



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

센서 네트워크에서 효율적 재구성이  
가능한 계층적 라우팅 프로토콜



濟州大學校 大學院

1952

컴퓨터工學科

權 勳

2010年 12月

# 센서 네트워크에서 효율적 재구성이 가능한 계층적 라우팅 프로토콜

指導教授 郭 鎬 榮

權 勳

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2010年 12月

權勳의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2010年 12月

*An Efficient reconfigurable Hierarchical  
Routing Protocol in Sensor Networks*

Hoon Kwon

(Supervised by professor Ho-Young Kwak)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Doctor of Computer Engineering

2010. 12.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, \_\_\_\_\_

Thesis director, \_\_\_\_\_

Thesis director, \_\_\_\_\_

Thesis director, \_\_\_\_\_

Thesis director, \_\_\_\_\_

December 2010

Department of Computer Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 감사의 글

매 순간 주어진 시간과 일에 최선을 다하자는 마음가짐으로 여기까지 앞만 보며 달려왔습니다. 지금 박사학위 과정을 무사히 마쳤다는 작은 성과와 더불어 또 다른 미래의 시작을 위해 새로운 발걸음을 힘차게 내딛고자 합니다. 학위과정의 시작과 끝에서 부족한 저에게 크고, 작은 도움을 주신 분들이 너무 많습니다. 다 찾아 뵙고 인사를 드리기 전에 지면을 통해 감사의 인사를 드리고자 합니다.

처음 연구실 문을 열고 들어오면서부터 지금까지 많이 부족한 저에게 사각모를 쓸 수 있도록 해주시고, 저를 알고 있는 분들께 논문을 내놓을 수 있도록 지도와 격려를 아낌없이 해주신 지도교수 곽호영 교수님께 감사를 드립니다. 논문 심사와 지도를 위해 열정을 아끼지 않으신 이상준 교수님, 김도현 교수님, 김한일 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 바쁘신 일정에서도 먼 길을 떠나지 않으시고 내려오셔서 꼼꼼하게 지적해주신 원유헌 교수님께도 이 면을 통하여 감사의 말씀을 올립니다. 또한 학위 과정 내내 많은 가르침을 주셨던 김장형 교수님, 안기중 교수님, 변상용 교수님, 송왕철 교수님, 변영철 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

이 논문을 완성하기 까지 주위의 모든 분들로부터 수많은 도움을 받았습니다. 같은 연구실에서 함께 공부하고 생활하고, 논문의 타당성과 효율성에 대해 아낌없는 조언을 해준 김정희 박사, 한경복 박사, 에르덴 토야, 효주, 익선, 영철, 진수, 소영, 모두에게 감사의 말을 전합니다.

또한 연구실은 다르지만 많은 도움을 주셨던 영도, 강석, 지완, 태보, 동호, 남식 선배님, 영식, 영일, 그리고 행정적인 지원을 아끼지 않으셨던 이정하, 정은경 선생님을 비롯한 학과와 연구실 식구들에게 감사의 말을 전합니다.

짧은 시간이지만 많은 것을 보고, 느낄 수 있도록 해주신 김창숙 실장님을 비롯한 김병호 팀장님, 고성돈 팀장님, 강신해 박사님, 진관훈 박사님, 윤충환 선생님, 임소진 선생님, 양철호 선생님, 박은경 선생님 이하 전략산업기획단 식구들께도 감사의 말을 전합니다.

긴 시간 동안 깊은 사랑으로 묵묵히 옆에서 지켜봐주고 격려해준 아버지, 어머니를 비롯한 형님, 형수님, 그리고 장인 어른, 장모님, 처제, 사랑스런 조카들 모두에게 감사의 말을 전합니다.

끝으로, 사랑스런 이준이와 이현이를 돌보느라 자신을 희생하며 항상 옆에서 저를 믿고 지켜봐주는 저의 반려자 영이에게 정말 사랑하고 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

2010년 겨울, 연구실에서  
권 훈



# 목 차

그림 목차 .....	iv
표 목차 .....	vii
국문 초록 .....	viii
영문 초록 .....	x
약어표 .....	xii
<b>I. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	3
3. 연구 내용 .....	4
4. 연구 방법 .....	5
5. 논문 구성 .....	6
<b>II. 관련 연구</b> .....	<b>7</b>
1. 유비쿼터스 센서 네트워크(Ubiquitous Sensor Networks) .....	7
2. 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜 .....	12
1) 평면 라우팅 알고리즘 .....	13
2) 계층적 라우팅 알고리즘 .....	18
3) 위치 기반 라우팅 알고리즘 .....	25
<b>III. 제안된 계층적 라우팅 프로토콜</b> .....	<b>27</b>
1. 개요 .....	27
2. 프로토타입 분석 .....	28

1) 동적 네트워크의 재구성 .....	28
2) 네트워크 구성에 따른 동기화 .....	29
3) 네트워크 구성을 위한 노드 주소 배정 .....	30
4) 장애에 의한 네트워크 재구성 고려 .....	31
3. 선행 처리 알고리즘 .....	32
4. A-ComHRP 알고리즘 .....	33
1) 문제 정의 .....	33
2) 패킷 구조 .....	36
3) 주소 배정 .....	38
4) 경로 설정 .....	42
5. 적용 시나리오 .....	44
1) 네트워크 구성 .....	44
2) 장애 발생에 따른 네트워크 재구성 .....	46
3) 노드 이동에 따른 네트워크 재구성 .....	49
4) 경로 설정 .....	49
<b>IV. 실험 .....</b>	<b>53</b>
1. 개요 .....	53
2. 테스트베드 .....	53
1) NesC를 이용한 A-ComHRP .....	54
2) Java를 이용한 시뮬레이터 .....	59
<b>V. 성능 평가 .....</b>	<b>65</b>



1. 노드 탐색을 위한 경로 설정 단계 .....	65
2. 각 노드별 탐색에 따른 홉 수 .....	67
3. 경로 설정에 따른 에너지 소모량 .....	70
4. 네트워크 재구성 .....	73
VI. 결론 및 향후 연구 .....	76
참고문헌 .....	78

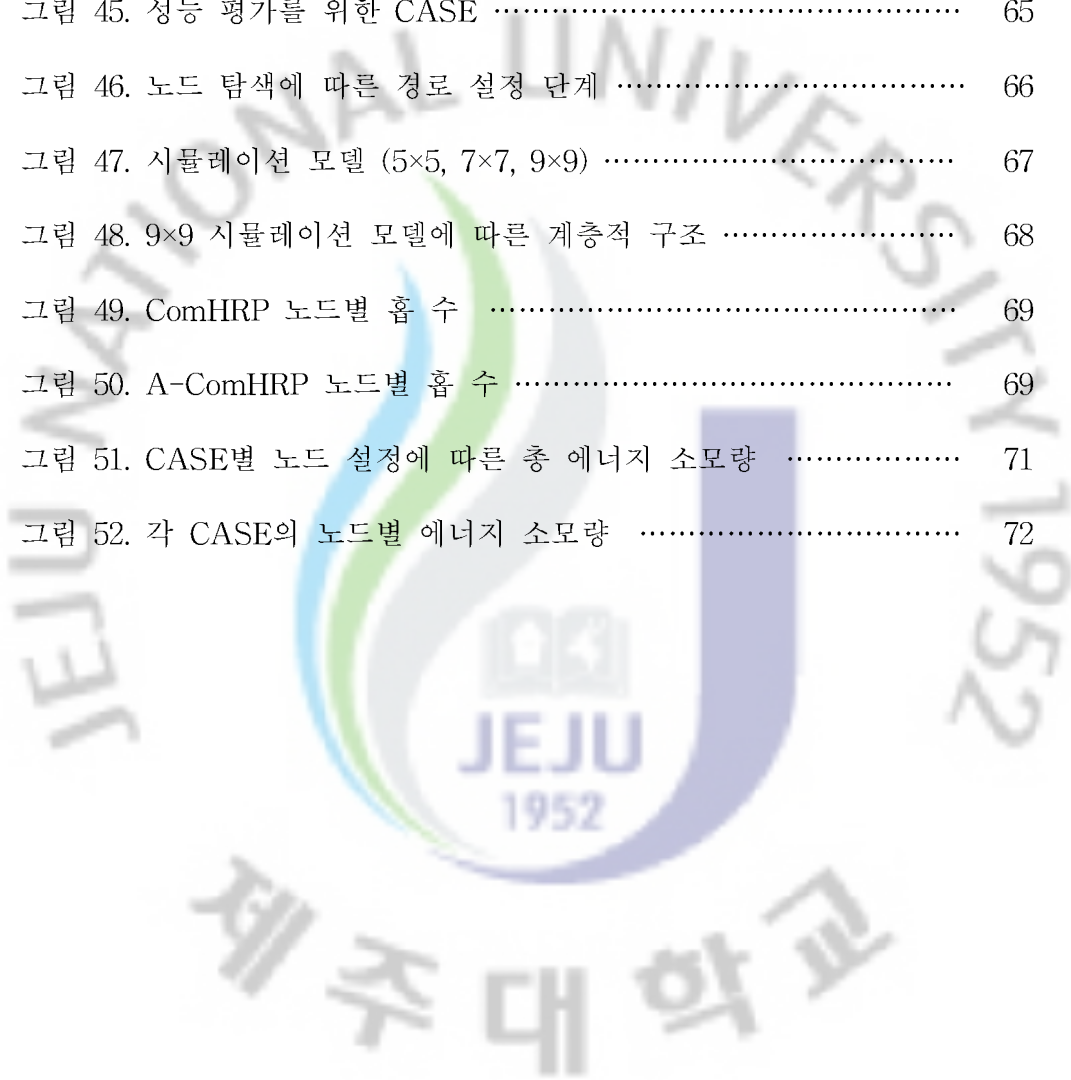


## 그림 목차

그림 1. USN의 구조	8
그림 2. 라우팅 프로토콜의 분류	13
그림 3. Direct Diffusion	14
그림 4. SPIN의 동작	15
그림 5. 최소 비용 경로에 따른 데이터 전송 방법	17
그림 6. Zigbee의 주소할당 체계	20
그림 7. Adaptive Robust Tree	21
그림 8. LEACH의 타임라인	22
그림 9. TEEN의 타임라인	23
그림 10. GRAB의 표현	28
그림 11. ComHRP의 주소 배정과 경로 설정	32
그림 12. 장애 발생의 원인	34
그림 13. 802.15.4 데이터 프레임과 TOS_Msg 구조 관계	36
그림 14. TOS_Msg의 세부 구조	36
그림 15. 수정된 TOS_Msg 헤더	37
그림 16. DATA영역의 세부 패킷 구조	37
그림 17. ComHRP와 A-ComHRP의 노드 구성에 따른 주소 배정	39
그림 18. A-ComHRP에서의 SYNC와 고아상태 처리	40
그림 19. 고아 상태에 따른 네트워크 재구성	41
그림 20. ComHRP와 A-ComHRP의 경로 설정 처리	43

그림 21. 초기 네트워크의 구성 .....	44
그림 22. 하위 노드들의 주소 배정 .....	45
그림 23. $SN_{mc}$ 가 3인 경우 전체 네트워크 구성 .....	45
그림 24. 장애 발생 원인에 따른 단말 노드로의 상태 변화(단말노드) ·	46
그림 25. 단말 노드의 주소 재배정후 새로운 노드 추가의 경우 .....	47
그림 26. 장애 발생 원인에 따른 단말 노드로의 상태 변화(고아노드) ·	47
그림 27. 고아 노드에 대한 네트워크 재구성 .....	47
그림 28. 목적 노드의 탐색 .....	50
그림 29. 목적 노드의 탐색 절차 .....	51
그림 30. 테스트베드 .....	53
그림 31. A-ComHRP의 컴포넌트간 Wiring 구조 .....	54
그림 32. A-ComHRP를 위한 패킷 구조체 .....	55
그림 33. 네트워크 구성과 노드 추가의 시퀀스 다이어그램 .....	56
그림 34. SYNC 처리에 따른 시퀀스 다이어그램 .....	57
그림 35. 소스 노드에서 목적 노드 탐색 처리 시퀀스 다이어그램 .....	58
그림 36. A-ComHRP 컴파일 .....	58
그림 37. 시뮬레이터 구성도 .....	59
그림 38. 네트워크 구조 표현 .....	60
그림 39. 노란 범위의 이상 감지 상황 .....	61
그림 40. 6번 노드의 이상으로 노드 값 대체 .....	62
그림 41. 5번 노드로부터 부모 노드 대체 .....	62

그림 42. 21번 노드에서 12번 경로 설정 지정 .....	63
그림 43. 경로 설정 알고리즘에 의해 선택된 노드들 .....	63
그림 44. 선택 경로의 데이터 전송 경로 구축 .....	64
그림 45. 성능 평가를 위한 CASE .....	65
그림 46. 노드 탐색에 따른 경로 설정 단계 .....	66
그림 47. 시뮬레이션 모델 (5×5, 7×7, 9×9) .....	67
그림 48. 9×9 시뮬레이션 모델에 따른 계층적 구조 .....	68
그림 49. ComHRP 노드별 흡 수 .....	69
그림 50. A-ComHRP 노드별 흡 수 .....	69
그림 51. CASE별 노드 설정에 따른 총 에너지 소모량 .....	71
그림 52. 각 CASE의 노드별 에너지 소모량 .....	72



## 표 목차

표 1. 센서 네트워크에서의 라우팅 방법에 따른 장·단점 .....	3
표 2. 평면 라우팅과 계층적 라우팅 프로토콜의 비교 .....	24
표 3. 기존 계층적 라우팅 알고리즘들의 특징과 문제점 .....	32
표 4. 메시지 타입 구분 .....	37
표 5. A-ComHRP를 위한 환경 파라미터 .....	55
표 6. 기존 방식과의 비교 .....	74



## 센서 네트워크에서 효율적 재구성이 가능한 계층적 라우팅 프로토콜

컴퓨터공학과 권 훈  
지도교수 곽호영

최근 USN(Ubiquitous Sensor Networks)을 실현하기 위하여 저비용, 저전력의 무선 센서들을 이용한 센서 네트워크 기반의 응용에 관한 연구 및 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 무선 센서 네트워크는 고정 네트워크 환경에서 다양한 환경과 빠른 변화가 발생하는 동적인 네트워크로 변화하고 있으며 이러한 환경에서는 센서 노드들 사이의 정보 수집 및 전달 능력이 중요한 요소로 부각되고 있다. 따라서 각각의 센서 노드들 사이의 자율적이며 효율적인 네트워크 구성이 이루어져야 한다.

USN에서의 무선 센서 네트워크는 다양한 응용들의 요구 사항 및 수준의 차이가 크다. 따라서 어떠한 라우팅 프로토콜을 선택하느냐에 따라 큰 성능의 차이를 가져온다.

무선 센서 네트워크에서 라우팅 프로토콜은 고정 센서 네트워크 환경에서 싱크노드로의 정보 수집 및 전달에 초점을 둔 프로토콜이기 때문에 동적 네트워크 환경을 반영하고 있지 않다.

반면, Ad-Hoc 네트워크 라우팅 프로토콜은 동적 네트워크에서 자가 구성을 위한 라우팅 프로토콜이나 경로 설정 과정에서 지연이 발생한다는 점과 홉 거리에 따른 관점에서 볼 때 최적경로를 보장하지 못하는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜 중 단순하며 복잡도가 적은 계층적 라우팅 방법을 이용하여 동적 센서 네트워크의 재구성을 위한 주소 배정 방법과 경로 설정 방법에 대하여 실험하고, 성능 평가를 실시하였다.

노드 장애 및 환경적 요인에 따른 센서 네트워크의 변화 시 효율적 재구성이 가능한 계층적 라우팅 프로토콜을 제안하고, 이에 대한 실효성을 증명하였다. 이를 위하여 기존 연구들과의 비교 실험을 실시하였다. 탐색에 따른 노드별 에너지 소모량을 측정해 본 결과 GTR 대비 68.1%, ComHRP 대비 65.6%, CTR 대비 4.4%의 에너지 절감 효과를 나타내었으며, 모든 노드간의 경로 설정에 따른 노드별 평균 홉 수를 비교한 결과 21.44%의 효율성이 있음을 증명하였다.

따라서 무선 센서 네트워크 환경에서 제안 방법을 적용 시 계층적 라우팅 프로토콜 기반에서 고정 및 동적 네트워크의 구성과 노드와 노드의 탐색에서 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.



ABSTRACT

*An Efficient Reconfigurable Hierarchical Routing  
Protocol in Sensor Networks*

KWON, HOON

Department of Computer Engineering

Graduate School

Jeju National University

Recently studies and technological developments are being actively carried out on applying sensor networks using low-cost, low-power wireless sensors to USNs (Ubiquitous Sensor Networks). Wireless sensor networks are changing from fixed network environments to active networks capable of generating various environments and rapid transformations, and in such environments the ability to collect and deliver data between sensor nodes is very important. Therefore, an autonomous, efficient network must be designed to link the sensor nodes together.

USN wireless sensor networks differ in their various application needs and levels, and performance is greatly affected by which routing protocol is selected.

In fixed sensor network environments, routing protocols for wireless sensor networks focus on the gathering and transmission of data to sink nodes, so this does not reflect active network environments. On the other hand, viewed from the perspective of routing networks for self-organization within active networks, or from the generation of delays in the process of establishing paths, or from that of Hop routes, Ad-Hoc network routing protocols are



problematic because they cannot guarantee the most optimal paths. Therefore, this research uses stratified routing methods that are simple and of low difficulty in its experiments and performance tests on address assignments and establishing routes for the purpose of reconstructing active sensor networks. It suggests stratified routing protocols that can efficiently restructure in the event of changes in sensor networks due to node obstruction and environmental factors, and proved their practicality and efficacy. To do this, it carried out comparative experiments with existing studies.

The research also measured energy consumption per node and showed reduction of energy use of 68.1% for GTR, 65.6% for ComHRP, and 4.4% for CTR, and a comparison of average Hops by node according to route establishment between all nodes evidenced a 21.44% efficiency rate. Therefore, it is hoped that when applying the suggested methods to wireless sensor network environments, efficient application may be achieved for the construction of fixed and active networks based on stratified routing protocols and searches between nodes.

## 약어표

UC	Ubiquitous Computing
USN	Ubiquitous Sensor Networks
QoS	Quality of Service
HRP	Hierarchical Routing Protocols
CBRP	Cluster-Based Routing Protocols
LBRP	Location-Based Routing Protocols
ComHRP	Complement Hierarchical Routing Protocols
UWB	Ultra-Wide Band
DD	Direct Diffusion
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
SAR	Sequential Assignment Routing
SWR	Single Winner Election
MWE	Multi Winner Election
ETR	End node suggest of Tree Routing
CTR	Cluster Tree Routing
ART	Adaptive Robust Tree
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocols
APTEEN	Adaptive Periodic Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocols
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing

MANET	Mobile Adhoc NETwork
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
WRP	Wireless Routing Protocol
MRL	Message Retransmission List
ACK	ACKnowledge character
LS	Link State Routing
DSR	Dynamic Source Routing
RREQ	Route Request
RERR	Route-Error
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector
ZRP	Zone Routing Protocol
IERP	Interzone Routing Protocol
IARP	Intrazone Routing Protocol
BRP	Broadcasting Routing Protocol
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
TBRPF	Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding
NEMO	NETwork MObility
A-ComHRP	Adaptive Complement Hierarchical Routing Protocols
FURP	Full update-based Routing Protocols
GRAB	Gradient Broadcasting

SN	Sensor Node
PN	Parents Node
PNN	Parents Neighbor Node
TSN	Total Sensor Nodes
FSN	First Sensor Node
CP	Construct Packet
RSSI	Received Singnal Strength Indication



# I. 서 론

## 1. 연구 배경

최근 정보통신 분야의 최대의 화두는 단연 유비쿼터스 컴퓨팅(Ubiquitous Computing)이다. 유비쿼터스 컴퓨팅은 21세기 새로운 IT 혁명으로 불리며, 상상도 하지 못할 정도로 사회·경제·문화 등 모든 분야에 큰 영향을 미치고 있다. 유비쿼터스 컴퓨팅은 다양한 컴퓨터가 현실 세계의 디바이스, 환경 및 사물들 속으로 스며들어 언제, 어디서나, 어떠한 기기로도 통신 서비스를 이용할 수 있는 인간, 사물, 공간 간의 최적의 컴퓨팅 및 네트워크 환경을 구축함으로써 생활 속으로 자연스럽게 편리하게 컴퓨터를 사용할 수 있는 기술을 의미한다.

이러한 USN(Ubiquitous Sensor Networks)을 실현하기 위하여 신호처리, 네트워크 및 프로토콜, 임베디드 시스템 및 분산처리 등 여러 가지 기술이 요구되며, 저비용, 저 전력의 무선 센서들을 이용한 센서 네트워크 기반의 응용에 관한 연구 및 기술 개발이 활발히 진행되고 있다[1][2][3].

이러한 소형의 센서들은 충분한 신뢰성과 정확성을 제공하기는 어렵지만 센서의 소형화와 저비용으로 수천에서 수백 개로 구성된 Ad-Hoc 네트워크 형성과 센서 자가 구성을 통해 서비스 품질(QoS)과 고장 허용성 측면에서 고성능을 제공하는 무선 센서 네트워크를 구축할 수 있다[2][3].

무선 센서 네트워크는 고정된 네트워크 환경이 아니라 동적인 네트워크 환경으로 변환되고 있으며, 센서 노드들 사이의 자율적인 자가 네트워크 구성이 효율적으로 이루어져야 한다. 이러한 무선 센서 네트워크에서 노드들 사이의 정보 수집 및 전달 능력이 중요한 요소가 된다[4][5].

USN에서의 무선 센서 네트워크는 다양한 응용들의 요구 사항 및 수준의 차이가 크다. 따라서 어떠한 라우팅 프로토콜을 선택하느냐에 따라 큰 성능의 차이를

가져온다.

무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜과 Ad-Hoc 네트워크에서의 라우팅 프로토콜은 환경 및 응용 구성에 따라 상이한 차이를 가지고 있다.

Ad-Hoc 네트워크 라우팅 프로토콜은 proactive 프로토콜과 reactive 프로토콜 두 가지로 요약된다[23][24]. Proactive protocol(Table-driven)[25][26]은 각각의 노드가 네트워크 내의 모든 경로를 유지하고 있기 때문에 경로의 요구 시 최적의 경로를 설정 할 수 있다. 그러나 최신의 라우팅 정보를 유지하기 위해 제어 패킷을 통해 주기적으로 정보를 갱신해야 하므로 실제 전달하는 데이터 외에 많은 양의 트래픽을 유발하는 단점을 가지고 있다. 반면, reactive protocol(On demand)[27][28]에서는 특정 목적지에 대한 경로를 요구하였을 때만 경로 설정을 수행한다. 설정된 경로는 목적지 노드에게 더 이상의 요구 패킷이 없거나, 목적지까지의 경로를 사용할 수 있을 때까지 경로 유지는 계속 유지된다. 그러나 경로 설정 과정에서 지연이 발생한다는 점과 홉 거리에 따른 관점에서 볼 때 최적 경로를 보장하지 못하는 단점이 있다.

반면, 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜은 평면 라우팅 알고리즘(Flat Routing)[8-10], 계층적 라우팅 알고리즘(Hierarchical Routing)[11-18], 클러스터 기반의 라우팅 알고리즘(Cluster-Based Routing)[19-21], 위치 기반 라우팅 알고리즘(Location-Based Routing)[22] 등으로 나뉜다.

계층적 라우팅 프로토콜은 네트워크 구축 시 할당 받은 주소를 기반으로 트리 형태의 네트워크 토폴로지를 형성하며, 별도의 라우팅을 위한 테이블이 없어 단순한 형태를 지니고 있다. 또한 노드간의 충돌은 일어나지 않으며, 에너지의 소비가 다른 라우팅 프로토콜에 비하여 일정하다는 장점이 있다. 그러나 동적 네트워크 환경에 대해 재구성에 따른 오버헤드가 크며, 주기적으로 동기화가 요구되어진다.

반면, 평면 라우팅 알고리즘은 노드 간 충돌에 따른 오버헤드가 존재하며, 트래픽의 패턴에 따라 에너지 소비가 일정치 않고, 라우팅의 복잡도가 높다는 단점이 존재하나, 별도의 동기화가 필요 없으며, 라우팅 경로에 있어서는 최적이라 할 수 있다.

이러한 센서 네트워크의 라우팅 방법에 따른 장·단점은 표 1.에 나타난 것과

같다.

표 1. 센서 네트워크에서의 라우팅 방법에 따른 장·단점

구분	평면 라우팅	계층적 라우팅	Proactive protocol	Reactive protocol
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>최적의 라우팅</li> <li>동기화 필요없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단순 라우팅</li> <li>라우팅 테이블 없음</li> <li>충돌 회피 방법</li> <li>에너지 소비 일정</li> <li>네트워크 지연 최소화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>최적의 경로를 통한 라우팅</li> <li>경로 획득 지연시간 최소화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>요구시 경로 탐색으로 오버헤드 감소</li> <li>일정 시간후 라우팅 정보 삭제</li> <li>동적 네트워크 고려</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>충돌 오버헤드 존재</li> <li>패턴에 따른 트래픽 부하</li> <li>복잡도 증가</li> <li>네트워크 지연 증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>전역적, 지역적 동기화</li> <li>동적 네트워크 적용 미흡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>동적 변화시 전체 라우팅 갱신으로 인한 트래픽 증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>라우팅 탐색에 따른 추가 시간 및 지연시간 증가</li> <li>주기적 동기화</li> </ul>

## 2. 연구 목적

앞 절의 배경에서 살펴본 것과 같이 현재 무선 센서 네트워크 구축과 효율적인 응용을 위한 많은 연구들이 지속되고 있다. 그러나 기존 연구들은 고정된 네트워크 환경에서의 데이터 전송 및 수집의 효율성 측면을 고려한 라우팅 프로토콜 연구들이 대부분이다. 따라서 동적인 네트워크 환경에서의 네트워크 재구성을 고려한 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜에 대한 연구는 미흡하다 할 수 있다.

K. Akkaya, M. Younis[7]에 따르면, 무선 센서 네트워크를 위한 라우팅 프로토콜에서는 제약 조건을 고려하여 라우팅 프로토콜을 설계하여야 한다고 하였으며, 이는 Ad-Hoc 네트워크보다 가용자원과 환경적인 면에서 더 가혹한 제약 사항을 지니고 있다고 할 수 있다. 이러한 제약사항을 극복하기 위하여 기존의 방법들과는 다른 형태의 프로토콜이 요구되어진다.

따라서 본 논문에서는 장애 및 환경 변화에 적응적으로 대처할 수 있는 동적



센서 네트워크 환경에서의 네트워크 재구성을 위한 라우팅 프로토콜에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 위하여 네트워크 구축을 위한 주소 배정 알고리즘과 노드간의 탐색에 따른 효율성을 증명하였다.

### 3. 연구 내용

연구 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 내용을 중심으로 기존의 계층적 라우팅 프로토콜과 제안하는 연구 방법과의 네트워크 구성, 탐색에 따른 성능의 효율성을 증명하였다.

- ① 데이터 수집이 싱크 중심으로 이루어지는 무선 센서 네트워크의 라우팅 방법에 노드 간 데이터 전송이 가능하도록 개선
  - 계층적 네트워크에서의 싱크로의 데이터 수집은 기존 연구와 동일하게 이루어지며, 소스 노드에서 목적 노드로의 필요에 따른 데이터 전송 시 효율적인 경로 설정 알고리즘을 제시함.
- ② 환경 요인 및 장애 발생에 따른 네트워크 재구성에 따른 효율을 높이기 위한 노드 주소 배정 방법 제시
  - 환경 요인 및 장애 발생에 따른 재구성시, 말단 노드의 재구성과 중간 노드의 재구성의 경우를 구분하여 처리 가능하도록 함.
  - 재구성에 따른 빈번한 노드 주소 배정을 줄이기 위한 마스터/슬레이브 부모 노드를 이용한 재구성 방법 제시함.
- ③ 노드 간 탐색에 따른 효율적 방법 제시
  - 노드 간 탐색에 있어, 목적 노드와 목적 노드의 부모 노드를 이용하여 노드간의 최소 차를 이용하는 방법을 제시함으로써, 노드의 탐색 횟수 및 평균 홉 수의 효율성을 증명함.



#### 4. 연구 방법

연구 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 방법을 이용하여 연구를 수행하였다.

1) 네트워크에서의 변화를 빠르고 효율적으로 감지하고 재구성하는 방법에 대하여 다음과 같은 프로토타입을 고려하였다.

- ① 동적 네트워크의 재구성
- ② 네트워크 구성에 따른 동기화
- ③ 네트워크 구성을 위한 노드 주소 배정 방법
- ④ 장애에 의한 네트워크 재구성

2) 본 연구에서 필요한 용어 및 장애에 대한 상황을 정의하여, 해당 상황에 맞는 시나리오에 대한 검증을 수행하였다.

K-mote를 이용한 실제 센서 노드에 라우팅 프로토콜 프로그램을 포팅하여 실험 테스트베드 환경을 구축하였으며, 이로부터 전송되는 패킷을 이용하여 시뮬레이터에서 분석하여 성능을 평가 하였다.

3) 성능 평가에 있어서는 노드의 탐색을 위한 경로 설정 단계, 각 노드에서 모든 노드를 탐색할 때의 평균 홉 수, 그리고 네트워크 재구성의 기준을 이용하여 평가하였다.

첫 번째, 노드간의 탐색에 따른 경로 설정 단계를 3가지의 경우에 대하여 각각 테스트를 수행하였으며, 기존 계층적 라우팅 프로토콜들과의 성능 평가를 실시하였다.

두 번째, 5×5, 7×7, 9×9의 그리드 형태의 네트워크 모델을 가정하여 각 노드에서 모든 노드를 탐색할 때 걸리는 홉 수를 기존 계층적 라우팅 기법에서의 탐색 홉 수와 성능 평가를 실시하였다.

세 번째, 환경 또는 장애, 노드의 이동으로 인한 네트워크 재구성이 발생 시 고정 네트워크인 경우와 동적 네트워크인 경우를 나뉘어 네트워크의 구성 및 복잡도, 노드 탐색 등의 기준을 이용하여 성능 평가를 하였다.

성능 평가 결과 A-ComHRP를 이용하였을 때, 기존의 계층적 라우팅 기법과 비교하여 노드 탐색 시간 및 동적 네트워크 환경에서의 네트워크 재구성의 용이함을 나타내었다. 이는 고정 센서 네트워크에서의 라우팅 구축 및 경로 설정만 아니라, 동적인 환경에서의 장애로 인한 빈번한 노드 변화에 대처하여 네트워크 재구성이 가능하다.

## 5. 논문 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구 및 기술로 무선 센서 네트워크와 ad-hoc 네트워크의 라우팅 프로토콜 관련 연구들을 살펴보고, III장에서는 제안하는 A-ComHRP의 주소 배정 방법 및 경로 설정에 따른 방법에 대해 서술하였다. IV장에서는 III장에서 A-ComHRP에 대하여 실험하고, V장에서는 성능 평가를 실시하였다. 마지막 VI장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구에 대하여 기술하였다.

## II. 관련 연구

### 1. 유비쿼터스 센서 네트워크(Ubiquitous Sensor Networks)

유비쿼터스 센서 네트워크란 용어 그대로 보면, “Ubiquitous”, “Sensor”, “Network” 이라고 하는 3가지 단어가 조합된 것으로, 그 각각의 의미는 다음과 같다.

#### 가. 유비쿼터스 (Ubiquitous)

라틴어로 ‘편재되다(보편적으로 존재하다)’라는 의미로써 비 PC 기기가 네트워크화 되어 언제, 어디서나, 누구나 대용량의 통신망을 사용할 수 있고, 커뮤니케이션 할 수 있는 것이다.

#### 나. 센서 (Sensor)

센서는 외부의 변화를 감지하는 것으로 유비쿼터스 컴퓨팅 환경에서 입력장치 역할을 하게 되고 시각적인 정보는 물론, 빛, 온도, 냄새 등 물리적·화학적 에너지를 전기신호로 바꾸는 역할을 하며, 유비쿼터스 컴퓨팅을 구성하는 가장 기본 단위가 된다. 센서는 인터페이스 기술과 함께 기존 컴퓨팅 환경과 가장 크게 구분되는 기술이다. 기존 컴퓨팅에서는 인터페이스와 센서의 기능을 인간이 대신하는 형태이지만 유비쿼터스 컴퓨팅에서는 이것이 전자화되는 것이다. 센서가 널리 쓰이기 위해서는 소형화, 저가화, 저전력화가 필수 선결 조건이다.

#### 다. 네트워크 (Network)

네트워크는 사용자와 사물, 사물과 사물 간의 상호작용이나 의사소통을 위해서는 이를 지원할 수 있는 근거리 무선통신기술이 필수적이다. 유비쿼터스 시대에는 수많은 사물들이 유선으로 연결되는 것이 사실상 불가능하기 때문에 근거리 무선통신기술인 Zigbee, Bluetooth, UWB(Ultra-Wide Band) 등의 기술이 대안으로 떠오르고 있다. 또한 시시각각 위치가 변하는 사물들을 동적으로 연결하기 위한 Ad-Hoc 네트워크 기술이 필요하게 되었다.

USN은 이러한 3가지 기술을 컨버전스 시켜 새로운 기술 형태로 발전시키려고 하는 새로운 기술 트렌드이다.

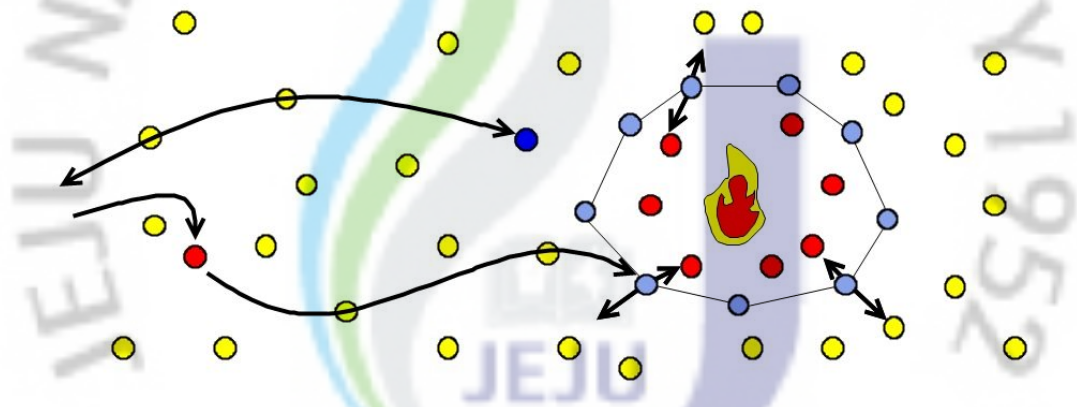


그림 1. USN의 구조

USN(Ubiquitous Sensor Network)이란 “필요한 모든 곳에 무선노드(센서노드, Sensor Node)를 부착하고 이를 통하여 사물의 인식정보를 기본으로 주변의 환경 정보(온도, 습도, 오염정보, 균열정보 등)까지 탐지하여 이를 실시간으로 네트워크에 연결하여 정보를 관리하는 것”을 말하는 것으로 궁극적으로 모든 사물에 컴퓨팅 및 커뮤니케이션 기능을 부여하여 Anytime, Anywhere, Anything 통신이 가능한 환경을 구현하기 위한 것이다. USN은 먼저 인식정보를 제공하는 전자태그를 중심으로 발전하고 이에 센싱 기능이 추가되고 이들 간의 네트워크가 구축되는 형태로 발전하고 있다. 그림 1.은 USN의 구조를 나타낸다.

센서 네트워크에서 사용되는 센서는 무인으로 동작되거나 사람이 접근하기 힘든 환경에서 동작 하는 경우가 대부분이다. 또한 다량의 센서를 유포하여 센서 네트워크를 형성하는 경우가 많아 센서 노드의 크기가 작고 가격이 저렴해야 하므로 노드의 에너지양과 데이터 처리 능력에 제한이 있다. 이런 센서의 제약 사항들과 센서 네트워크의 용도에 따라 네트워크에서 원활한 통신을 위해 충족되어야 할 다음의 특징을 가지고 있어야 한다[6].

가. 저 전력 소비

센서 노드로 구성된 센서 네트워크의 수명은 배터리 수명에 달려 있다. 그러나 기 배치된 대규모 노드의 배터리 교환이나 재충전은 불가능한 경우가 많다.

나. 대규모 센서 노드

확장성에 따라 수십에서 수십만 개의 센서 노드로 구성될 수 있으며, 노드의 위치는 미리 정해져 있는 것이 아니며, 노드의 비용이 매우 낮아야 한다.

다. 네트워크 자가 구성

수동으로 설치하기 어려운 곳이나 전장에서 적지와 같은 곳에서 많은 노드를 수동으로 설치하는 것이 불가능하므로 노드들이 자체적으로 네트워크를 구성해야 하며, 센서 노드들이 네트워크에 신규 접속이 가능해야 한다. 또한 Ad-Hoc 센서 네트워크를 위한 프로토콜이 동작해야 한다.

라. 협업 및 분산 처리 작업

센서 노드들은 개별적으로 단순 계산을 수행하지만, 또한 수신된 데이터를 모으고 다른 노드로의 전달을 담당한다.

마. 질의 능력

단일 센서 노드 또는 그룹 센서 노드에게 질의가 전송되어 처리되며, 베이스 노드는 주어진 영역의 데이터를 수집하여 수집된 메시지를 생성한다.

위와 같은 특징을 가지는 USN을 지원하기 위한 센서 노드의 자가 구성적 능력과 제한된 전력 및 응용 분야를 고려한 라우팅 프로토콜에 대한 연구가 지속되고 있다.

무수히 많은 네트워크 응용에도 불구하고 센서 네트워크 설계 시에는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. 예를 들면 제한된 에너지 자원, 제한된 처리 능력, 센서 노드들 간의 제한된 무선 통신 대역폭 등이다. 센서 네트워크에서 라우팅 프로토콜의 설계 시에 다음과 같은 많은 제약사항을 받는다[7].

가. 노드 배치 : 센서 네트워크에서 노드배치는 응용에 따라 상이하며, 라우팅 프로토콜의 성능에 영향을 미친다. 노드 배치는 지정되거나 임의로 뿌려질 수 있으며, 지정 배치의 경우 센서 노드들은 하나씩 수동으로 배치되며, 데이터 전송은 지정된 경로로 전송된다. 하지만, 임의 배치의 경우 배치된 센서 노드들이 스스로 허용된 연결을 가지고 에너지 효율적인 네트워크를 구성하는 기능이 필요하다.

나. 에너지 소비 : 각 센서 노드는 정보 전달이나 처리 수행하는데 제한된 에너지를 사용할 수 있다. 따라서 센서 노드의 통신 및 처리 에너지를 절약하는 것이 기본이다. 센서 노드의 수명은 곧 배터리의 수명이라 할 수 있다. 센서 노드에서 에너지 소모로 인한 고장은 주요 토폴로지 변화나 패킷의 재전송 및 네트워크 재구성을 야기할 수 있다.

다. 데이터 보고 모델 : 센서 네트워크에서 데이터 센싱과 보고는 응용 분야나 데이터 시간적인 긴급성에 의존된다. 데이터 보고에는 시간에 의한 방법, 이벤트에 의한 방법, 질의에 의한 방법, 혼합 방법 등 4가지 모델[33]로 나뉜다. 시간에 의한 방법은 주기적으로 데이터를 모니터링 하는 응용에 적합한 모델이다. 이벤트와 질의에 의한 방법은 이벤트가 발생하거나 베이스 스테이션에서 보낸 질의에 만족하는 데이터 값이 변화하였을 때 즉시 반응하는 모델이다. 마지막으로 앞의 3가지 모델을 적절하게 조합하여 사용하는 것이 혼합 모델을 의미한다.



라. 노드/링크 이질성 : 많은 연구에서 모든 센서 노드들은 그들이 가지는 처리, 통신, 전원 조건에 있어 동일한 능력을 가졌다고 가정한다. 그러나 응용 분야 따라서 센서 노드는 역할이나 능력에서 차이를 가진다.

마. 고장 허용성 : 어떤 센서 노드들은 실패하거나 전력 부족이나 물리적 파손 또는 환경적인 영향에 의해서 정보 전달이 실패할 수도 있다. 이러한 센서 노드들의 실패는 전체 센서 네트워크의 성능에 지장을 주어서는 안 된다. 만약 많은 노드들에 이상이 생기면, MAC과 라우팅 프로토콜은 베이스 스테이션으로 데이터를 모으기 위해 새로운 경로를 선택해야 한다.

바. 확장성 : 센서 네트워크에서는 센싱 영역 내에 수백 또는 수천 개, 그 이상의 센서 노드들이 배치된다. 어떤 라우팅 스키마든 거대한 센서 노드 수와 함께 작동할 수 있어야 한다.

사. 동적 네트워크 : 네트워크 구조의 대부분은 센서 노드들의 위치가 고정 위치이다. 그러나 많은 응용 분야 중에서 베이스 스테이션과 센서 노드들의 이동을 필요로 하는 것도 있다[34]. 에너지와 대역폭과 같이 라우터 안정성이 중요해진 이래로 라우팅 메시지를 이동하는 노드로 보내거나 받거나 하는 문제는 더 주목 받게 되었다.

아. 전송 매체 : 다중 홉 센서 네트워크에서 노드 간의 통신은 무선 매체로 연결되어 있다. 전통적인 무선 채널과 관련된 문제들은 센서 네트워크의 기능에도 영향을 미친다. 일반적으로 센서 데이터가 요구하는 대역폭은 1-100kb/s로 작다.

자. 연결성 : 센서 네트워크에서 센서 노드들의 높은 밀도 배치는 센서 노드들이 다른 노드로부터 고립되는 것을 방지한다. 그러므로 센서 노드들은 높은 연결성을 기대한다. 이러한 높은 밀도 배치는 임의 노드 배치에서 주로 나타난다.

차. 적용범위 : 센서 네트워크에서 각 노드는 적용 범위 즉 반경을 지닌다. 즉

정 범위와 정확성은 환경의 제한된 물리적인 영역에서만 된다. 그래서 영역 정용 범위도 센서 네트워크에서 중요한 설계 인수이다.

카. 데이터 집합 : 센서 노드들은 주요 중복된 데이터를 생성해 내기 때문에 중복된 노드들의 비슷한 패킷은 데이터 전송 횟수를 줄이기 위해서 모은다. 데이터 집합에서 중복 금지, 최소, 최대, 평균 등과 같은 집합 함수를 이용해서 다른 자원으로부터 온 데이터를 통합한다.

타. 서비스 품질 : 어떤 응용 분야에서는 데이터가 센싱된 순간부터 지정된 시간 내에 전송되어야 하며, 그 시간이 지나면 사용할 수 없는 데이터가 되는 분야도 있다. 그러므로 시간 제약적인 응용 분야서는 데이터 전달의 bounded latency 는 또 다른 중요한 요건이 된다.

이와 같이 센서 네트워크를 설계 및 구성할 때 고려해야하는 많은 제약사항들이 있다. 특히 라우팅 프로토콜은 해당 센서 네트워크가 적용되는 응용 분야에 따라 그 구조와 효율성에 영향을 받는다. 그러므로 센서 네트워크에서 제공할 수 있는 다양한 응용의 형태를 분석하고, 이를 데이터 중심적인 센서 네트워크의 특징과 결합하여 정확한 정보의 제공과 에너지 소비를 최소화 할 수 있어야 한다. 이러한 제약사항을 극복하기 위해 제안된 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜과 Ad-Hoc 라우팅 프로토콜에 관하여 살펴보았다.

## 2. 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜

USN에서의 라우팅 기법은 센서 네트워크의 전체적인 에너지 소모량을 감소시키거나 모든 센서 노드들의 균등한 에너지 소비를 유도해야 한다. 특히 데이터가 집중되는 싱크 노드에 가까운 센서 노드들은 전송할 데이터의 양이 많아져 에너지 소모가 심해지는데 이를 극복하기 위한 새로운 방식들이 제안되어 전체적인



에너지 소모량을 균등하게 조절할 수 있다.

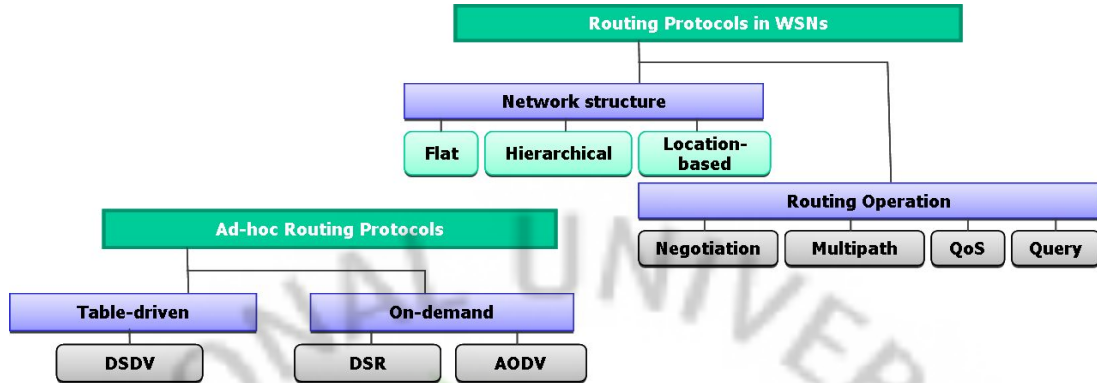


그림 2. 라우팅 프로토콜의 분류

이러한 라우팅 프로토콜과 기법들은 네트워크 구조와 라우팅 동작에 의해 그림 2.와 같이 분류[6]할 수 있다. 이중 무선 센서 네트워크를 위한 라우팅 프로토콜 알고리즘은 다음과 같다.

### 1) 평면 라우팅 알고리즘

평면 라우팅 알고리즘은 보통 플러딩 기술에 기반을 둔 라우팅 알고리즘으로 정보 전달 시 모든 노드들이 데이터 병합과정을 수행 하는 방법이다.

#### ① Direct Diffusion[8]

Direct Diffusion(DD) 방식은 싱크 노드의 질의 방송에 기반을 둔 데이터 중심적 라우팅 중 대표적인 것으로 질의 유포 및 처리 응용에 적합한 특성을 가진다. DD는 해당 응용에 대한 질의는 속성과 값의 쌍으로 구성되는 interest로 표현된다. Interest는 싱크 노드에서 시작되어 네트워크 전체에 유포되고, 데이터 요청 노드로 질의에 부합하는 데이터를 전송하기 위한 경사(Gradient)를 설정한다. 이때 다중경로를 통해 요청 노드로 전송된다. 더 이상의 플러딩을 막기 위해 경로들 중 전송품질이 좋은 몇 개의 경로를 통해 데이터 전송이 이루어지게 하는 방식이다.

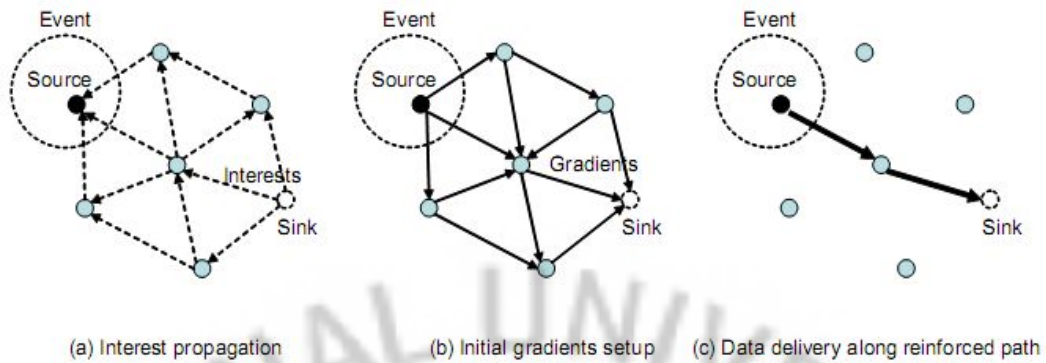


그림 3. Direct Diffusion

임무에 해당하는 이벤트가 발생하면 소스노드는 기울기가 설정된 노드로 데이터를 전송한다. 이 때 다중 경로를 통해 데이터가 싱크 노드로 전송될 수 있다. 데이터를 수신한 싱크노드는 여러 기준에 의해 하나의 경로, 혹은 경로 중의 일부, 여러 경로의 기울기를 강화(reinforcement)시킬 수 있다. 이때부터는 초기 경로 중 우수한 경로만 사용된다. 혹은 에너지 수준이 낮은 경로는 배제하도록 강화할 수 있다.

DD는 싱크 노드의 named data 질의에 기반을 둔 라우팅 프로토콜로 다수의 소스 노드와 다수의 싱크 노드의 상황에서도 효율적으로 동작한다는 점과 각각의 질의에 의한 라우팅 경로 상에서 데이터 융합(aggregation)과 caching을 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 강화된 경사 경로를 얻기 위해 요구되는 부담이 크다는 단점을 갖는다.

## ② SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)[9]

Sensor Protocols for Information via Negotiation(SPIN) 방식은 협상과 자원 적응에 의해 플러딩의 결함을 처리하기 위해 설계된 것으로, 센서노드가 데이터에 대해 광고하고, 싱크노드로부터 요청을 기다리는 형태의 데이터 중심적 라우팅 기법이다. 이는 센서노드가 데이터를 방송하는 대신 센서 데이터를 기술하는 메타 데이터를 전송하여 보다 효율적으로 동작하고, 에너지를 보존하도록 하는 방식이다.

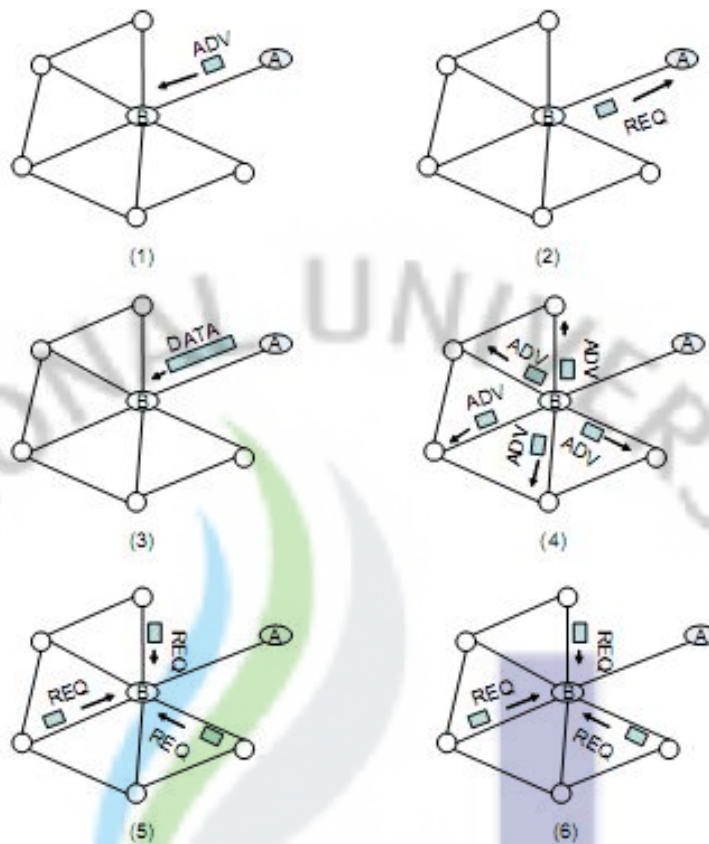


그림 4. SPIN의 동작

그림 4.는 SPIN의 동작을 나타내며, 동작을 위하여 ADV, REQ, DATA 등의 세 가지 메시지를 가진다. 센서 노드는 메타 데이터를 가지는 ADV 메시지를 발송한다. ADV의 메시지를 수신한 이웃 노드가, 데이터에 관심을 가지고 REQ 메시지를 전달하면, 해당 이웃 노드를 위한 DATA 메시지를 전송한다. 전체 센서 네트워크에서 해당 데이터에 관심 있는 모든 노드들은 데이터에 대한 사본을 얻게 된다. SPIN 방식은 모든 노드들이 Potential base station 네트워크상에 존재한다고 가정하고 각 노드에서 모든 노드들로 정보를 뿌린다. 그리고 SPIN은 사용자가 한 노드에게 질의를 하고 즉시 정보를 받을 수 있도록 하여 준다. 이처럼 SPIN은 가까이 있는 노드들이 유사한 데이터를 가지는 속성을 활용하여, 다른 노드가 가지지 않은 데이터만을 분배하도록 한다. 또한 사전적으로 동작하여, 사

용자가 데이터를 요청하지 않은 경우에도 네트워크 전체에 정보를 분산시킬 수 있다.

### ③ SAR (Sequential Assignment Routing)[6]

Sequential Assignment Routing(SAR)에서는 라우팅 결정을 위해 각 경로에 있는 에너지 자원과 QoS, 그리고 각 패킷의 우선순위를 고려한다. 트리 구조의 다중 경로가 설정되어, 특정 경로가 실패하는 경우에도 경로 재계산을 위한 오버헤드는 없다. 각 노드에서 싱크까지의 다중 경로를 설정하기 위하여 싱크의 one hop 이웃들을 시작으로 낮은 QoS와 에너지 보유량을 가지는 노드들을 피하면서 구성된 다중 트리가 형성된다. 트리 설정 절차가 끝나면 각 노드는 다중 경로에 속하게 되고, 각 노드는 싱크로 메시지를 전달할 트리를 선택할 수 있게 된다. 각 노드마다 다음 두 개의 파라미터가 싱크를 향한 각 경로와 연관된다.

- Energy resources : 해당 센서 노드가 경로를 독점하여 사용하는 경우 전송할 수 있는 패킷 수
- Adaptive QoS metric : 해당 값이 높을수록 낮은 QoS를 의미함

SAR에서는 adaptive QoS metric과 패킷의 우선순위와 관련된 가중치(weight) 계수의 곱인 weighted QoS metric을 계산하여 이의 평균값을 네트워크의 생존 기간 동안 최소화시키고자 한다. 위상 변화에 반응하기 위하여 주기적인 경로 재계산이 싱크에 의해 시작된다. 실패에 대한 복구는 이웃 노드간의 핸드셰이킹 절차를 통해 이루어지고, 지역 경로 복구 기법도 사용된다. 또한, 지역적인 협력처리를 위한 SWR(Single Winner Election)과 Multi Winner Election(MWE)기법이 사용된다.

### ④ Minimum Cost Forwarding Algorithm for Large Sensor Networks[10]

이 기법은 센서 네트워크에서 데이터 흐름이 항상 싱크를 향한 방향으로 이루어지는 특성을 이용하였다. 이 기법에서 센서 노드는 유일한 ID나 메시지를 전송할 라우팅 테이블을 가질 필요 없이 싱크까지의 최소 비용 측정치만을 관리한다.

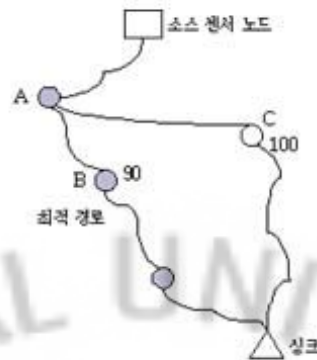


그림 5. 최소 비용 경로에 따른 데이터 전송 방법

그림 5.는 최소 비용 경로에 따른 데이터 전송 방법을 나타내고 있다. 최소 비용 추정치를 관리하는 동작은 다음과 같다. 싱크에서 비용이 0으로 설정된 광고 메시지를 방송한다. 각 노드는 초기에 무한대로 설정된 추정 집합을 가진다. 노드가 광고 메시지를 수신하여 메시지의 추정치와 해당 메시지를 수신한 링크 비용의 합이 현재의 추정치보다 작다고 판단하면, 이 값으로 현재의 추정치와 광고 메시지의 추정치를 갱신한다. 새로운 비용 추정치로 광고 메시지가 갱신된 경우에만, 해당 광고 메시지를 전송하고, 그렇지 않은 경우에는 제거한다. 이러한 과정을 통하여 네트워크 전체 비용 필드가 구성된다.

비용 필드를 기반으로 각 노드는 전송될 각 데이터 메시지를 방송하고, 데이터 메시지를 수신한 노드는 자신이 소스 센서 노드와 싱크간의 최소 비용 경로에 있는지 체크하여, 해당하는 경우에만 메시지를 방송한다. 노드에서 여러 번의 갱신이 일어나거나 여러 번의 전송을 수행하고, 싱크에서 멀리 떨어진 노드들이 더 많은 갱신이 일어날 수 있는 점을 해결하기 위하여, 현재 비용 추정치를 갱신할 때 Back-Off 기법을 적용하여, 갱신 시간으로부터 광고 메시지를 수신한 링크 비용의 정수배의 시간이 경과한 후에 광고 메시지를 전송하도록 하는 기법이다.



## 2) 계층적 라우팅 알고리즘

계층적 라우팅 프로토콜[11-13]은 IEEE 802.15.4의 MAC과 PHY를 기반으로 센서 네트워크를 효율적으로 운영하기 위한 라우팅 방법이다.

계층적 라우팅 프로토콜은 센서 노드가 네트워크에 참여하면서 할당 받은 주소를 기반으로 트리 형태의 네트워크 토폴로지를 형성한다. 따라서 각각의 센서 노드들은 부모와 자식 간의 관계를 가지고 할당 받은 주소를 이용하여 수집된 데이터를 다른 센서 노드에게 전송하는 역할을 한다. 이에 각 센서 노드들은 목적 노드에게 데이터를 전송하기 위하여 별도의 라우팅 테이블을 갖지 않아도 되며, 이는 하드웨어가 소형인 센서 노드들에게 적합한 프로토콜이다.

### ① 계층적 라우팅 알고리즘[13]

부모 노드(parent) 정보와 루트 노드로 부터의 홑(hop) 수로 경로를 결정한다. 경로 결정을 위해 루트 노드는 브로드캐스트 방식을 사용하며 루트 주위의 노드들도 계속해서 브로드캐스트를 반복적으로 수행하여 네트워크의 최중에 위치한 노드까지 전달되도록 한다. 이렇게 경로가 결정되면 데이터를 전송하려는 노드들은 자신의 부모 노드에게 데이터를 전송하고 같은 방법으로 데이터를 수신한 부모 노드들은 또다시 부모노드에게 데이터를 전송하여 루트 노드까지 데이터가 전송 된다.

모든 노드가 네트워크에서 부모 노드로 자식 노드를 가질 수 있다는 전제의 이상적인 토폴로지를 가정한 방법이다. 네트워크 깊이가 깊어지면 최악의 경로 탐색에 따른 비용이 증가된다. 또한 센서 네트워크의 변화에 적응적이지 못하는 한계를 지닌다.

### ② End 노드를 고려한 계층적 라우팅 알고리즘[14]

기존 계층적 라우팅 프로토콜에 기능 제한으로 라우팅이 제한적인 노드인 경우를 고려한 라우팅 프로토콜이다. 센서 노드를 자식 노드가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우로 나뉘어 각각의 노드에 주소를 할당함으로써 라우팅을 처리

할 수 있는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 주소를 부여하고 경로를 탐색하는 부분만을 고려하였다. 따라서 네트워크 내에서의 노드들의 소멸과 추가적 생성에 대하여 고려하지 않아 수시로 변화하는 센서 네트워크의 특성상 네트워크 재구성을 위한 주소할당 및 라우팅 설정에는 적합하지 못하다는 단점을 지닌다.

### ③ ComHRP(Complement Hierarchical Routing Protocol)[15][37]

ComHRP는 기존 계층적 라우팅 프로토콜에서의 경로 설정에 따른 탐색 트래픽의 과부하를 줄이기 위한 방법으로 센서 노드에 대한 효율적인 주소 배정 방법을 제안하고, 이를 통하여 노드간의 탐색에 있어 효율성을 나타내었다. 주소 배정방법은 말단 노드에 대한 노드 아이디 배정에 있어 가상의 아이디를 배정함으로써, 말단 노드 이후에는 탐색에 따른 트래픽을 줄였으며, 환경적 요인에 의하여 자식 노드를 가질 수 없는 노드들에 대해서도 효율적으로 처리하였으며, 동적인 환경 변화에 보다 효율적으로 대처할 수 있다. 그러나 네트워크가 안정화된 상태에서의 목적 노드를 탐색 시 [12]에 의한 방법과 경로 설정에 대한 효율이 크게 다르지 않다. 이에 따라, 경로 설정 시에 보다 나은 방법에 대한 추가적 보완이 요구된다.

### ④ Zigbee 기반의 계층적 라우팅 프로토콜[16-18]

동적인 네트워크 구성은 PAN coordinator, coordinator (FFD), device (RFD)들을 센서 필드에 배치시킨 후 노드들 간의 통신을 통해서 자동적으로 토폴로지를 구성하고, 주소를 할당하는 것을 의미한다. 크게 PAN coordinator에 의한 네트워크 형성 기능과 coordinator와 device에 의한 네트워크 조인(join) 기능, 네트워크 조인 시 부모 노드에 의한 자식 노드로의 주소 할당 기능으로 분류된다.

PAN coordinator에 의한 네트워크 형성은 사용할 채널, PAN ID, 비컨 구조 등을 결정하며 이렇게 결정된 사항들은 네트워크의 모든 노드들이 따라야 한다. 이를 위한 과정은 각 채널에 대한 에너지 검출을 통하여 가장 낮게 검출되는 채널을 사용하고, 그 뒤 능동 검출을 통하여 PAN ID를 파악하여 중복되지 않도록 PAN ID를 선택한다. 그리고 상위 계층으로부터 내려온 값을 이용하여 사용할 비컨의 구조를 결정하는 super-frame order, beacon order를 설정한 뒤 비컨을

브로드 캐스팅하여 네트워크를 시작한다.

네트워크 조인은 coordinator나 device가 네트워크에 미리 조인한 PAN coordinator나 coordinator에게 조인하는 것을 말한다. 이때 네트워크에 미리 조인한 PAN coordinator나 coordinator를 부모라 하고 조인하려는 coordinator나 device는 자식이라고 한다. 조인 과정을 통해서 자식은 부모에 게서 비컨 정보인 SO, BO 값과 주소를 하나 받는다.

Zigbee 네트워크 계층 프로토콜에서의 주소 할당 기법은  $nwkMaxChildren(Cm)$ ,  $nwkMaxRouter(Rm)$ ,  $nwkMaxDepth(Lm)$ 과  $Cskip(d)$ 을 이용하여 부모 노드가 자식노드에게 주소를 할당한다.

그림 6.은 Zigbee 네트워크 계층 프로토콜에서의 주소할당 예제를 나타낸다.

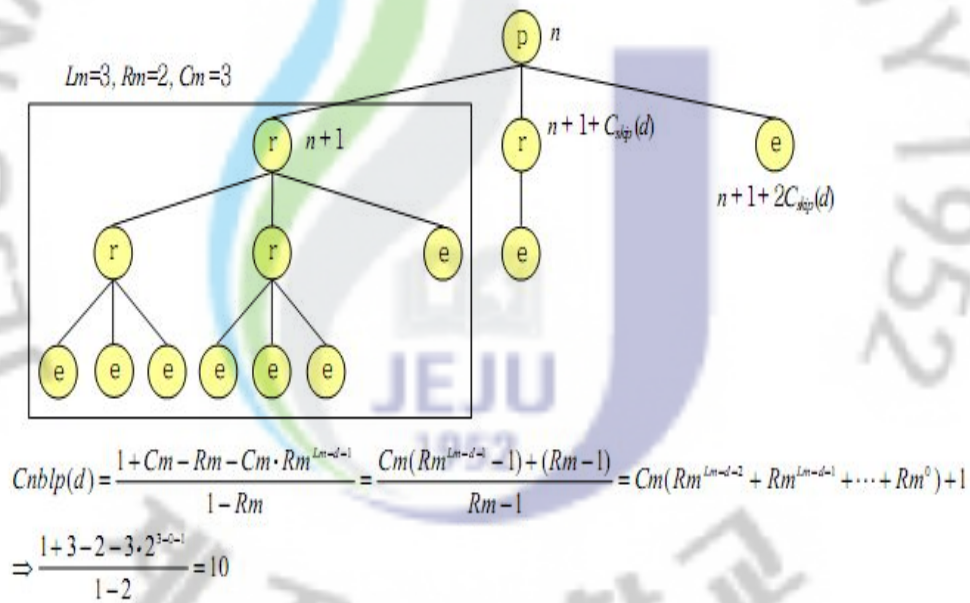


그림 6. Zigbee의 주소할당 예제

Zigbee의 주소 할당 알고리즘은 네트워크의 구성에 초점을 맞춰 설계되어 있으며, 네트워크 재구성에 따른 고려는 미미하다. 따라서 네트워크 재구성에 따른 주소 배정이 요구된다.



⑤ ART(Adaptive Robust Tree)

ART방식은 Zigbee 표준과 동일하게 어떤 PAN이 있을 때 가장 먼저 PAN 코디네이터가 동작을 하고, 일반 노드들이 하나씩 결합(association)하면서 트리를 완성하는 방식이다. 그러나 Zigbee와는 주소를 할당하는 방식에서 차이가 있다. Zigbee에서는 노드가 부모에 결합할 때 부모가 바로 주소를 할당하나 ART에서는 트리가 완성된 후에 트리의 끝에서부터 차례로 자식이 부모에게 하위에 몇

개의 자식이 있는지를 보고한다. PAN 코디네이터가 자식들부터 하위에 존재하는 노드의 개수에 대한 보고를 받으면 그에 따라 사용할 수 있는 주소공간(block address)을 할당한다. 주소공간의 할당도 PAN 코디네이터로부터 트리의 끝단까지 순차적으로 일어난다.

그림 7.은 ART에서의 주소 할당 방식을 나타낸다.

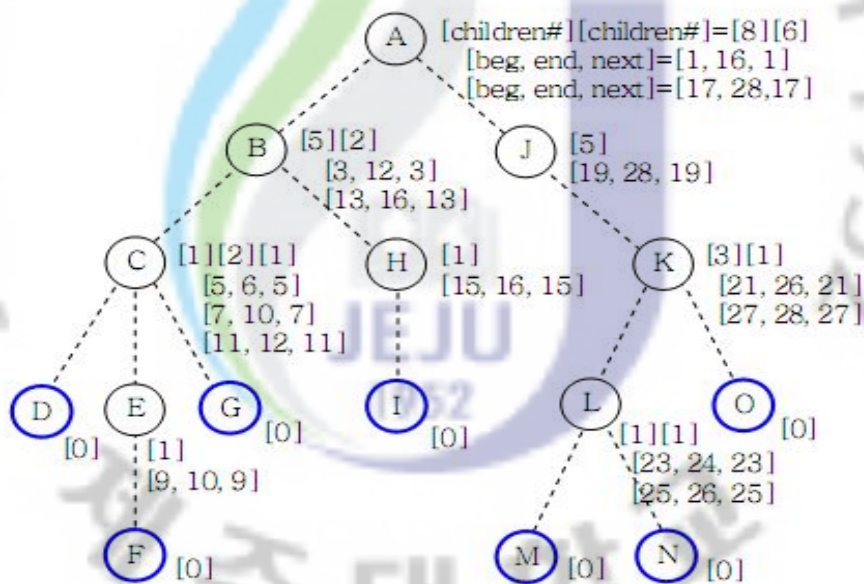


그림 7. Adaptive Robust Tree

⑥ 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜

클러스터 기반의 라우팅 프로토콜은 인접한 노드들의 유사한 정보의 중복전달로 인한 에너지 소모를 감소시켜 에너지 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 즉 센서들에 대한 클러스터를 형성하여 유사한 이벤트 정보들을 클러스터 헤드에서

데이터 통합과정을 통해 걸러냄으로서 보다 에너지 효율적인 라우팅을 가능하게 한다. 이러한 클러스터 기반의 프로토콜은 노드들을 클러스터 단위로 묶고 이 중 하나의 헤드노드를 선출하여 주변 노드들로부터 데이터를 전달받아 데이터를 통합하여 베이스 스테이션으로 전달한다.

이러한 클러스터 기반의 프로토콜 중 대표적인 것으로 LEACH[19]와 TEEN[20], 그리고 APTEEN[21]이 있다. LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)는 클러스터 헤드를 확률적으로 선정하여 클러스터 내의 모든 노드들에게 헤드가 될 수 있는 기회를 준다. LEACH는 라운드라는 시간단위로 구성되고 클러스터 구성 시에 클러스터 헤드를 선정하고 헤드가 선정되면 광고메시지를 통해 노드들에게 알리고 TDMA 스케줄을 작성하여 클러스터 구성 노드들에게 전파한다. 그리고 구성노드들은 정해진 스케줄에 따라서 데이터를 전송하고 전송이 끝나면 sleep 모드로 전환하여 에너지 소모를 줄인다. 그림 4는 일정한 간격을 갖는 라운드로 구성된 LEACH의 동작을 나타낸다. 한 라운드는 setup과 steady로 나뉘지며 이 과정은 매 라운드마다 고정적으로 반복된다. 매 라운드의 주기적인 setup의 반복은 클러스터 멤버 노드의 가용 에너지 여부에 관계없이 일어나며, steady에서 고정된 slot 할당은 이전 slot과 동일한 정보를 가지고 있는 멤버 노드들의 불필요한 에너지 소모를 야기한다.



그림 8. LEACH의 타임라인

LEACH 알고리즘은 노드들의 에너지의 양을 고려하지 않고 헤드를 선정하기 때문에 에너지 효율적이지 못하고 또한 헤드의 에너지 고갈로 베이스 스테이션과 클러스터 간 연결 지향성에도 문제가 있다.

TEEN(Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)은 센서 노드들이 주기적으로 전송할 데이터를 갖지 않으며 시간 임계적인 데이터를 처

리하는 reactive network이다. 그러나 임계값을 이용한 데이터 전송을 제외한 부분은 LEACH와 유사하다. 그림 9.는 TEEN의 동작을 나타낸다.

이 방법은 클러스터 형성에 LEACH와 동일한 방법을 사용하며 클러스터 형성 이후 클러스터 헤드노드가 측정하는 데이터의 파라미터들, 즉 Hard Threshold 값인  $H_T$ 와 Soft Threshold 값인  $S_T$ 를 멤버노드에 전송하여 멤버 노드들은 이 값에 기반을 두어 report time내 할당된 시간에 데이터 전송을 한다. 이는 노드들이 측정하는 값이  $H_T$ 값을 초과할 때 데이터가 수집되어 전송이 이루어지며, 이후 측정하는 데이터가  $S_T$ 를 초과할 때에만 데이터를 수집·전송하게 되어 steady 상태에서 낭비되는 에너지가 줄어들게 되는 방법이다.



그림 9. TEEN의 타임라인

또한 클러스터 재구성시 사용자가 임의로 임계값을 재설정할 수 있으며 이 값을 변경함에 따라 수집되는 데이터의 빈도와 노드의 수명을 조절 가능한 장점이 있다. 그러나 만일 수집되는 데이터가  $H_T$ 를 초과하지 않는다면 노드가 데이터를 전송하지 않으므로 데이터의 수집이 이루어질 수 없고  $S_T$ 를 초과하지 않는다면 초기 값 이후 변동에 대해 임계값 이하 데이터 변동에 대해서는 알 수 없으며 또한 전체 네트워크를 구성하는 노드의 생존 여부도 판단하기 어려운 문제가 있다.

마지막으로, APTEEN(Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol)은 사전적 센서 네트워크와 반응적 센서 네트워크의 한계점을 최소화하면서 둘의 장점을 통합하는 하이브리드 네트워크를 제공한다. APTEEN을 채택한 하이브리드 네트워크에서, 센서 노드들은 데이터를 주기적으로 전송할 뿐만 아니라, 측정된 데이터의 속성 값의 갑작스런 변화에도 반응한다.

APTEEN에서는 TEEN의 방법과 같이 시간 임계적 데이터를 처리하고, 사전적 동작을 위해서, 센서 노드가 카운트 시간동안 데이터를 전송하지 않은 경우 데이터를 감지해서 클러스터 헤드로 전송하도록 하여 TEEN의 단점을 개선하였다.

APTEEN은 주기적인 데이터를 전송해서 사용자에게 네트워크의 전반적인 상황을 제공하고, 갑작스런 네트워크 상태의 변경에 즉각적으로 반응하여 시간 임계적 상황에 대응하도록 한다. 그리고 사용자가 카운트 시간과 속성에 대한 임계값을 설정하여 에너지 소비를 제어할 수 있도록 한다. 그러나 이러한 APTEEN에서는 임계치 기능과 카운트 시간을 구현하는데 부가적인 비용이 요구되는 단점을 지니고 있다.

앞서 설명한 평면 라우팅 프로토콜과 계층적 라우팅 프로토콜의 비교를 표 2.에 나타내었다.

표 2. 평면 라우팅과 계층적 라우팅 프로토콜의 비교

구분	평면 라우팅	계층적 라우팅
스케줄링	경쟁 기반 스케줄링	예약 기반 스케줄링
충돌	충돌 오버헤드 존재	충돌 회피
Duty Cycle	노드의 sleeping 시간을 제어한 duty cycle 변이적	주기적 sleeping에 의한 duty cycle 감소
Data aggregation	멀티 홉 경로상의 노드가 이웃 노드로부터 데이터 모음	클러스터 헤드가 데이터 모음
라우팅 복잡도	복잡하나 최적의 라우팅	단순하나 최적은 아닌 라우팅
동기	동기 없음	전역적, 지역적 동기가 필요
경로 설정 방법	전송할 데이터를 가지는 지역에서 경로가 설정됨	네트워크 전체에 클러스터 형성 오버헤드 존재
지연	중간 노드를 깨워 멀티홉 경로를 설정하는데 지연 존재	클러스터 헤더들이 형성하는 멀티 홉 네트워크 항상 존재로 인한 지연 낮음
에너지 소비	트래픽 패턴마다 다름	에너지 소비가 일정
채널 할당 공정성	공정성이 보장되지 않음	공정성이 보장됨

### 3) 위치 기반 라우팅 알고리즘

#### ① GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)[22]

Geographic and Energy Aware Routing(GEAR)는 지리적으로 목적지 주소가 있는 노드들이나 네트워크 지역에 패킷을 전달하는 라우팅 프로토콜로써, 모든 노드들이 자신의 지리적 위치와 radio range 내의 자신의 one hop 이웃을 알고 있으며, 라우팅 목적지는 정해진 위치에 있는 노드이거나 한 네트워크 지역에 있으며, 각 패킷은 장소를 기록하는데 도움이 되기 위해서 추가 라우팅 정보를 보유할 수 있을 때 적용되는 프로토콜이다.

GEAR은 링크 비용과 토폴로지 변화를 업데이트하는데 비용이 적으며, 경로 설정 테이블을 저장하는 오버헤드를 피하면서 요구에 부합한 경로들을 발견할 수 있으며, 탐색시간과 energy-awareness 및 load-balancing 을 고려한 효율적인 경로들을 발견할 수 있다.

이러한 무선 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜들은 Ad-Hoc 네트워크 라우팅 프로토콜과 비교하여 환경 및 응용 구성에 따라 상이한 차이를 가지고 있다.

Ad-Hoc 네트워크 라우팅 프로토콜은 proactive 프로토콜과 reactive 프로토콜 두 가지로 요약된다[23][24]. Proactive protocol(Table-driven)[25][26]은 각각의 노드가 네트워크 내의 모든 경로를 유지하고 있기 때문에 경로의 요구 시 최적의 경로를 설정 할 수 있다. 그러나 최신의 라우팅 정보를 유지하기 위해 제어 패킷을 통해 주기적으로 정보를 갱신해야 하므로 실제 전달하는 데이터 외에 많은 양의 트래픽을 유발하는 단점을 가지고 있다. 반면, reactive protocol(On demand)[27][28]에서는 특정 목적지에 대한 경로를 요구하였을 때만 경로 설정을 수행한다. 설정된 경로는 목적지 노드에게 더 이상의 요구 패킷이 없거나, 목적지까지의 경로를 사용할 수 있을 때까지 경로 유지는 계속 유지된다. 그러나 경로 설정 과정에서 지연이 발생한다는 점과 홉 거리에 따른 관점에서 볼 때 최적 경로를 보장하지 못하는 단점이 있다.

반면, 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜은 평면 라우팅 알고리즘(Flat

Routing)[8-10], 계층적 라우팅 알고리즘(Hierarchical Routing)[11-18], 클러스터 기반의 라우팅 알고리즘(Cluster-Based Routing)[19-21], 위치 기반 라우팅 알고리즘(Location-Based Routing)[22] 등으로 나뉜다.

계층적 라우팅 알고리즘은 네트워크 구축 시 할당 받은 주소를 기반으로 트리 형태의 네트워크 토폴로지를 형성하며, 별도의 라우팅을 위한 테이블이 없어 단순한 형태를 지니고 있다. 또한 노드간의 충돌은 일어나지 않으며, 에너지의 소비가 다른 라우팅 프로토콜에 비하여 일정하다는 장점이 있다. 그러나 동적 네트워크 환경에 대해 재구성에 따른 오버헤드가 크며, 주기적으로 동기화가 요구되어진다.

반면, 평면 라우팅 알고리즘은 노드 간 충돌에 따른 오버헤드가 존재하며, 트래픽의 패턴에 따라 에너지 소비가 일정치 않고, 라우팅의 복잡도가 높다는 단점이 존재하나, 별도의 동기화가 필요 없으며, 라우팅 경로에 있어서는 최적이라 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 라우팅 알고리즘 중 계층적 라우팅 알고리즘을 기반으로 센서 네트워크에서 효율적 재구성이 가능한 라우팅 프로토콜을 제안하였다.



### III. 제안된 계층적 라우팅 프로토콜

#### 1. 개요

무선 센서 네트워크의 라우팅 기법의 대부분은 고정 네트워크 환경을 기준으로 노드 ID를 부여하고, 부여된 노드 ID를 기준으로 네트워크를 구성하며, 라우팅 경로를 설정하고 있다. 이러한 방법은 동적으로 변하는 USN 환경에 적용하기에는 라우팅 경로의 재구성이 빈번하여 에너지 소모가 증가함으로 적절치 않다.

반면, 동적 네트워크 환경에 적합한 Ad-Hoc 네트워크 라우팅 기법 중 Proactive 라우팅 방식은 Table-Driven 방식으로 동적으로 변하는 USN 환경에서의 빈번한 테이블 갱신이 요구되며, Reactive 방식은 주기적 동기화 및 라우팅 탐색의 복잡도 증가와 지연 시간이 증가하여 효율이 떨어지는 단점이 존재한다.

USN 환경의 다양한 제약사항을 고려할 때, 기존 무선 센서 네트워크의 문제점을 보완하고, 고정 네트워크와 동적 네트워크 환경에 대한 장점을 적용한 효율적인 무선 센서 네트워크 프로토콜에 대한 연구가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 센서 네트워크에서 효율적 재구성이 가능한 계층적 라우팅 프로토콜을 설계하였다.

본 제안 라우팅 프로토콜은 기존 계층적 라우팅 프로토콜을 보완하고, USN 환경에 보다 적응적으로 반영할 수 있는 장점이 있다. 이에 제안 프로토콜은 A-ComHRP(Adaptive Complement Hierarchical Routing)이라 명명한다.

A-ComHRP는 빈번하게 이루어지는 USN의 네트워크 재구성과 네트워크에서의 노드 간 탐색 시 경로 설정에 따른 효율성을 높이기 위하여 USN 환경에서의 제약사항에 따른 프로토타입을 고려하여 설계하였다.



## 2. 프로토타입 분석

A-ComHRP는 빈번하게 이루어지는 USN의 네트워크 재구성과 네트워크에서의 노드간 탐색에서의 효율성을 높이기 위하여 다음과 같은 4가지 사항에 대한 프로토타입을 분석하였다.

### 1) 동적 네트워크의 재구성

동적으로 변화하는 무선 센서 네트워크에 있어서의 네트워크 재구성에서는 싱크노드가 이동할 때마다 토폴로지의 변화에 따른 재구성을 해야 한다. 이를 위하여 가장 기본적으로 전체 망에 싱크노드의 위치정보를 브로드 캐스팅하여 망 내의 모든 센서 노드들이 싱크노드의 위치를 알게 하는 방법(Full Update-based Routing Protocol:FURP)이 있다. 그러나 FURP는 전체 네트워크에 존재하는 많은 센서 노드들이 위치정보를 전달하는 과정에서 에너지 소비뿐만 아니라 망에서의 과중한 트래픽으로 인하여 Broadcasting storm이라는 문제가 발생한다. 따라서 FURP의 방법보다는 브로드캐스팅 기반의 Gradient Broadcasting(GRAB) 방법을 고려해야 한다.

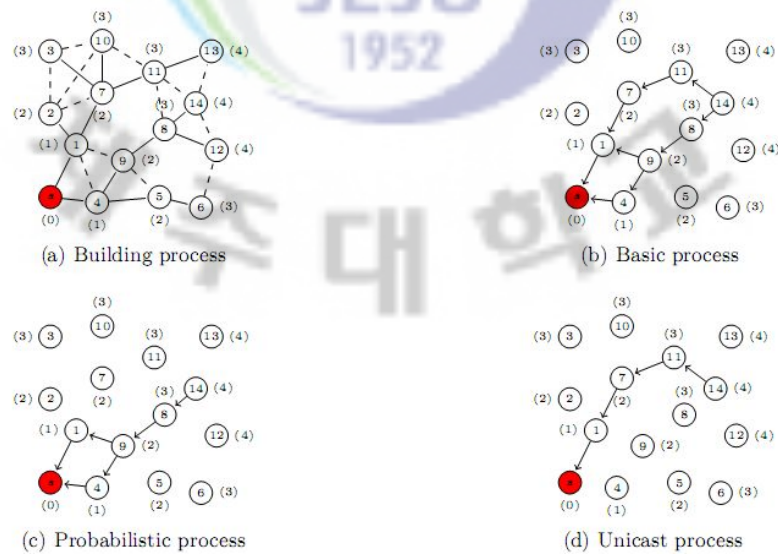


그림 10. GRAB의 표현

근처에 있는 센서 노드들 간의 트리형태의 경로를 설정하고 네트워크의 변화가 생기면, 변화된 지역에서의 센서 노드만 추가하는 방법을 통하여 전체 네트워크 토폴로지의 변화에 대하여 보다 효율적으로 네트워크를 구성할 수 있다.

GRAB 방법의 네트워크 구성은 그림 10.에 나타내었다. 네트워크를 구성하기 위하여 Build Packet을 전송하여 싱크노드에서의 각 노드간의 깊이에 따른 라우팅을 각각 구성하게 되며, 하나의 노드에서 싱크노드까지의 경로를 (B), (C), (D)의 과정을 거쳐 최적의 단일 경로를 구성하게 된다.

## 2) 네트워크 구성에 따른 동기화

동기화는 일반적으로 자신과 상대 간에 서로 정보를 일치시킨다는 의미 이외에도, 송신측 및 수신측 간의 데이터를 주고받는 시점(시간적 관계)을 일치(유지)시키는 것을 말한다.

대부분의 무선 센서 네트워크에서의 응용 프로그램들은 이벤트가 발생한 시간을 결정하기 위해 센서 노드들이 자체 시간을 유지하며, 정보를 감지하고 의미 있는 정보를 만들기 위해 다양한 신호 처리 기법을 사용한다. 이러한 신호 처리 기법들은 이벤트들 사이의 올바른 순서를 결정해야 하므로 센서 노드들 간의 시간은 동기화가 필요하다.

하지만 무선 센서 네트워크에서의 시간 동기화는 다음과 같은 다양한 제약 조건을 가지고 있다. 첫 번째로 무선 센서 네트워크의 노드들은 제한된 배터리와 대역폭을 가지는 등 풍부하지 못한 자원을 가지고 있으므로 시간 동기화 알고리즘들은 패킷 전송을 적게 하는 등의 경량화된 방법(lightweight method)을 사용해야 한다. 두 번째로 무선 브로드캐스트는 패킷 손실뿐만 아니라 패킷 충돌을 발생시켜 패킷들의 전달 시간이 지연될 수 있다. 이로 인해 시간 동기화의 정확성을 떨어뜨릴 수 있으므로 이를 해결해야한다. 세 번째로 센서 노드들은 기존의 분산 환경에서 사용하는 컴퓨터들에 비해 값싼 크리스탈(crystal)을 사용하므로 시간을 측정하는 것이 부정확하다. 그러므로 시간 편차가 부정확한 점을 감안하여 시간을 동기화해야 한다.

따라서 데이터의 신뢰성 확보 및 데이터 전송에 있어 무분별한 데이터 송수신

으로 인한 에너지 소모를 최소화하기 위하여 네트워크 구성에 따른 동기화 처리가 요구되어진다.

### 3) 네트워크 구성을 위한 노드 주소 배정

무선 센서 네트워크의 주소 할당 기법은 크게 분산 주소 할당 기법과 중앙 관리 기법으로 나눌 수 있다. 분산 주소 할당 기법의 대표적인 예는 Zigbee Alliance에서 제정한 Zigbee 2007 프로토콜이 있으며, 중앙 관리 기법의 대표적인 예에는 IEEE 802.15.5 표준 프로토콜이 있다. Zigbee 기법과 같은 분산 주소 할당 기법은 네트워크에 접속하고자 하는 노드 및 접속을 허용하는 부모 노드 간의 통신만으로 주소를 할당함으로써 보다 빠른 네트워크 형성, 제어 커맨드에 의한 트래픽 감소가 가능하지만, 망이 커짐에 따라 낭비되는 주소가 발생하는 단점이 있다. 반면에 IEEE 802.15.5 표준 기법과 같은 중앙 관리 기법의 경우, 네트워크 전체에 대해 주소의 낭비 없이 효율적으로 모든 노드에게 유일한 주소를 할당할 수 있지만, 대규모 네트워크에 있어 초기 네트워크의 형성에 오랜 시간이 요구되고, 노드의 동적인 추가 및 삭제에 적절히 대응하지 못한다는 단점이 있다.

Zigbee에서 트리 라우팅 기법은 분산 주소 할당 기법에 의해 동작한다. 이 분산 주소 할당의 하나인 Cskip 알고리즘은 트리 라우팅이 가능하도록 의도적인 16bit 주소를 설정한다. 또한 Cskip 알고리즘을 쓰기 위해 3가지의 고정된 파라미터를 알고 있어야 한다. 이 3가지 파라미터는 라우터나 코디네이터가 가질 수 있는 자식노드의 최대 개수, 자식노드가 라우터로 될 수 있는 최대 개수, 네트워크의 최대 깊이이다. 이때 라우터나 코디네이터 깊이가 결정되어 있고, 최대 자식의 개수와 노드가 가질 수 있는 최대 라우터의 개수가 정해져 있을 때 주소를 분산적으로 할당 할 수 있다. 그러나 논리적으로 형성된 네트워크에 실제로 센서를 배치하게 되면 낭비되는 주소 공간이 많은 것을 알 수 있다.

이는 고정된 토폴로지의 사용으로 네트워크에 충분한 주소 영역이 남아 있음에도 불구하고 이웃 라우터들의 주소 고갈로 인해 접속을 하지 못하는 고아 문제(orphan problem)가 발생한다.

대규모 센서 네트워크를 위한 주소 할당 기법은 초기 네트워크 형성 시간을 단축시키고, 네트워크에 과도한 트래픽을 발생시키지 않으며, 노드의 동적인

추가 및 제거에도 효과적으로 대응할 수 있어야 한다. 구성된 네트워크에서의 노드 재배치 및 재구성이 이루어질 때, 이를 효율적으로 대처할 수 있는 노드 주소 배정 방법이 요구된다.

#### 4) 장애에 의한 네트워크 재구성 고려

무선 센서 네트워크에서의 센서 노드들은 열악한 환경에 설치되기 때문에 센서 노드자체의 전원차단 및 파괴 등과 같은 다양한 위험에 노출되어 있다. 이러한 경우 같은 네트워크 내의 일부 지역에서의 장애가 발생하게 된다. 이러한 장애가 발생할 때 다른 노드로부터의 데이터 수신에는 문제가 없도록 네트워크 재구성이 요구된다.

많은 라우팅 프로토콜들은 장애가 발생할 경우 복구 보다는 장애회피에 더 중점을 두고 있다. 에너지를 고려하는 라우팅 프로토콜인 경우는 에너지가 가장 최대한 노드를 부모로 선택하여 노드의 에너지양에 따라 부모노드를 제외하는 정책을 취하고 있다. 또 다른 방법으로는 라우팅 시 패킷 전송을 여러 노드로 분산시켜 장애가 발생하지 않도록 하는 정책을 사용하고 있다. 이러한 프로토콜은 두 개 이상의 경로를 설정하고 하나의 패킷을 모든 경로로 중복해서 전송함으로써 장애가 발생할 경우 데이터의 신뢰성은 보장할 수 있으나 패킷을 중복해서 전송함에 따른 오버헤드가 문제가 된다. 제한적인 에너지 자원을 갖는 센서 노드에서 많은 에너지를 소모하는 패킷 전송을 불필요하게 많이 하면 노드들의 에너지가 빠르게 고갈되어 네트워크의 수명이 단축되는 단점을 지니게 된다.

네트워크내의 장애를 판별하며, 라우팅을 빠르게 재구성하기 위한 방법이 요구되어진다.

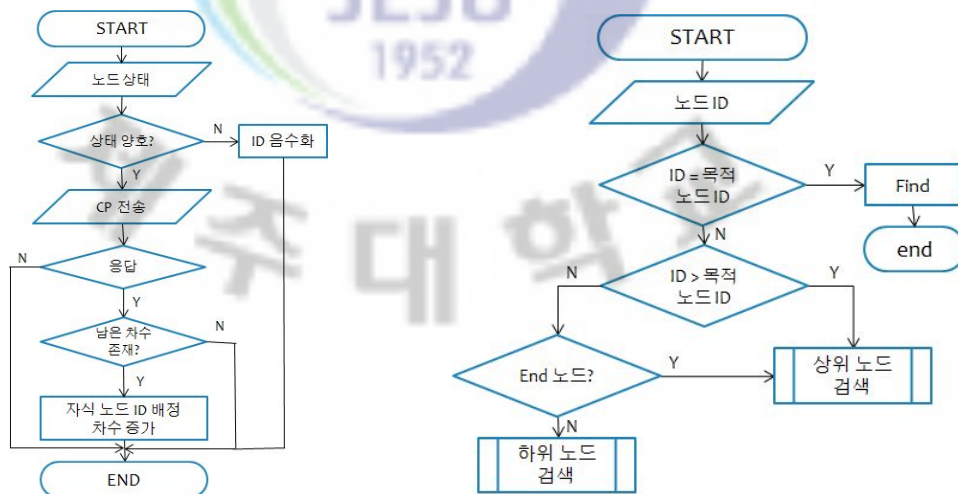
### 3. 선행 처리 알고리즘

기존 계층적 라우팅 알고리즘들은 표 3.과 같은 특징과 문제점을 지니고 있었다.

표 3. 기존 계층적 라우팅 알고리즘들의 특징과 문제점

구분	GTR	ETR	CTR	Zigbee
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>이상적인 환경 가정</li> <li>단일 노드의 추가 및 삭제 용이</li> <li>일반적인 트리 검색 적용 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>장애 및 환경의 변화에 따른 말단 노드 상태 고려</li> <li>동작 노드에 대한 순차적 주소 배정</li> <li>일반적인 트리 검색 적용 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>하위 노드에 대한 서브넷 정보를 가짐</li> <li>라우팅 경로에 따른 테이블 유지</li> <li>정적 환경에서의 최적 라우팅 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자체 주소 배정 방식에 따라 네트워크 구성</li> </ul>
문제점	<ul style="list-style-type: none"> <li>깊이 증가에 따른 복잡도 증가</li> <li>장애 및 환경 변화에 따른 재구성 처리 미흡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>장애 및 환경 변화에 따른 재구성 처리 미흡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>장애 및 환경 변화에 따른 재구성 시 라우팅 테이블 전체 갱신</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>네트워크 노드 증가 및 깊이 증가시 노드 주소의 낭비</li> </ul>

이에 선행 연구를 통하여 ComHRP[15][37]를 제시하였다.



(a) ComHRP에서의 주소 배정

(b) ComHRP에서의 경로 설정

그림 11. ComHRP의 주소 배정과 경로 설정



ComHRP는 주소 배정 알고리즘과 경로 설정 알고리즘을 통하여 기존 계층적 라우팅 프로토콜의 문제점을 보완하고 효율성을 나타낼 수 있었다.

그림 11.의 (a)에 나타낸 것과 같이 ComHRP의 주소 배정을 위한 알고리즘은 노드 상태가 불안정한 말단 노드에 대한 노드 아이디 배정에 있어 음수 값을 이용하여 가상의 아이디를 배정한다. 이러한 방법을 이용하여, 기존 계층적 구조를 그대로 유지할 수 있으며, 음수 값을 이용하여 하위 노드로의 탐색 단계를 생략할 수 있어 탐색에 따른 트래픽을 줄일 수 있었다. 장애 노드가 발생할 경우와 복구 될 경우에 따른 동적 환경에 보다 적응적으로 대처할 수 있는 장점이 있다.

ComHRP의 경로 설정 알고리즘은 가상의 주소 배정을 이용하여 말단 노드인 경우에는 바로 상위노드로 탐색이 가능하도록 제어함으로써, 탐색 횟수를 감소 시키게 된다.

그러나 네트워크가 안정화된 상태에서의 목적 노드를 탐색 시[12]에 의한 방법과 경로 설정에 대한 효율이 크게 다르지 않다. 따라서 경로 설정 시에 [12]의 연구보다 더 나은 방법을 위한 고려가 요구되며, 노드 재구성에 있어도 하위 노드를 가지고 있는 중간 노드에 대한 상태 변경에 따른 재구성이 이루어지지 않는 문제점을 지니고 있다.

이에 기존 계층적 라우팅 프로토콜과 선행 연구된 ComHRP의 단점을 보완한 A-ComHRP를 설계하였다.

#### 4. A-ComHRP 알고리즘

##### 1) 문제 정의

센서 네트워크의 일부 영역에 있는 여러 개의 노드들에 동시다발적으로 장애가 발생할 경우 해당 영역 하위에 있는 노드들의 라우팅 정보가 이를 빠르게 반영하지 못하면 데이터를 전송할 수 없게 된다. 노드에서 장애가 발생하게 되면 부모 노드로 패킷을 전송하던 각 하위노드들은 새로운 부모를 찾아서 메시지를

전달해야만 한다. 장애가 하나의 노드에서 발생하였다면 해당 노드의 자식노드들만 부모 노드를 다시 선택하면 되기 때문에 크게 문제되지 않는다. 하지만 장애가 동시에 인접해 있는 여러 노드에서 발생한다면 하위 노드들은 새로운 부모노드를 찾기 어려워진다.

이렇듯 상위 노드에 대한 장애가 발생하였을 때 하위 노드들이 라우팅을 빠르게 복구하기 위해 스스로 장애 발생 여부를 판별할 수 있어야 한다. 이를 위한 장애에 대한 정의가 요구된다.

**[정의 1]** 네트워크상에서 지리적으로 인접한 하나 이상의 노드들에 하드웨어적, 소프트웨어적, 또는 환경적으로 문제가 발생하여 메시지 중계 역할을 수행할 수 없어 라우팅이 정상적으로 이루어지지 못하는 것을 장애(*F, Failure*)라 한다.

노드간의 메시지를 중계할 수 있느냐 여부가 장애발생 여부의 기준이 된다. 이러한 장애의 원인은 여러 가지의 경우가 있을 수 있다.

- |                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. 센서노드에 물리적 충격이나 공격이 가해진 경우</li><li>2. 센서노드에서 동작하는 소프트웨어 오류가 발생하거나 공격이 가해진 경우</li><li>3. 센서 노드 자체의 전력량이 극소 상태인 경우</li><li>4. 주위 환경이 변하여 통신이 두절되는 경우</li></ol> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

그림 12. 장애 발생의 원인

그림 12.의 경우에서 1번과 2번, 그리고 3번의 경우는 노드 자체의 문제로 일어나는 장애로 인지되며, 4번의 경우는 노드와는 관계없는 환경적인 문제로 발생하는 장애이다. 이러한 경우 센서 노드가 하드웨어적이나 소프트웨어적으로 정상 동작을 하더라도 주위의 노드들과 통신이 되지 않는 경우는 장애로 간주하여야 함을 의미한다.

상위 노드에서 장애가 발생하였을 때 장애가 발생한 상위 노드에서 이를 통보해 줄 수 없기 때문에 하위 노드에서 자체적으로 감지하여야 한다. 이를 위한 서



로간의 동기화를 위한 메시지를 주고받게 된다. 장애 감지가 된 상태에서 하위 노드들이 새로운 상위 노드를 찾기 위하여 네트워크 구성을 위한 메시지를 브로드 캐스팅하여 찾는 것은 많은 트래픽 부하를 가져올 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위한 방법이 필요하다.

**[정의 2]** 센서 노드( $SN$ , Sensor Node)의 라디오 전송 범위( $R$ , Radio range) 내에 있는 노드들 중 부모 노드( $PN$ , Parents Node)의 형제 노드들을 부모 이웃 노드( $PNN$ , Parents Neighbor Node)라 정의하며, 부모 이웃 노드를 이용하여 부모 노드가 장애 발생 시 차순위 라우팅 노드로 할당한다.

센서 노드  $A$ 의 부모 노드( $A_{pn}$ )에 의하여 부모 이웃 노드( $A_{pnn}$ )은 식 1.과 같이 구할 수 있다.

$$A_{pnn} = \{PNN \mid SN \in TSN, SN_d \leq R, PN_{id} = \pm TSN_{mc}\} \quad (\text{식 1.})$$

$TSN$ (Total Sensor Nodes)은 전체 노드의 집합을 의미하며  $d$ 는 노드  $A$ 와의 물리적 거리를 의미한다. 전체 센서 노드 중 물리적 거리가  $R$  이내에 있는 노드들 중 부모 노드의 노드번호와 전체 노드 집합의 차수범위 안에 있는 노드들이 노드  $A$ 와의 부모의 이웃 노드가 된다.

센서 노드들 중에서 장애로 인하여 메시지를 서로 주고받을 수 없는 경우가 나타날 수 있다.

**[정의 3]** 센서 노드의 장애 요인 중 노드 전력의 감소 및 환경적인 요인으로 인하여 부모 노드와의 메시지 교환이 불가능하여 더 이상 라우팅을 구성할 수 없는 경우 해당 센서 노드를 **고아 노드**로 정의한다.

**[정의 4]** 센서 노드의 장애 요인 중 노드 전력의 감소 및 환경적인 요인으로 인하여 부모 노드와는 메시지 교환이 이루어지나, 하위 노드와 메시지 교환이 이

루어지지 않는 노드를 단말 노드로 정의한다.

[정의 3]과 같이 고아 노드가 발생시, 해당 고아 노드는 [정의 2]의 부모 이웃 노드를 탐색하는 단계를 거쳐 새로운 라우팅 경로를 유지함으로써 메시지 전송에 있어 손실이 없도록 할 수 있다.

## 2) 패킷 구조

A-ComHRP를 위한 패킷은 앞 절에서 언급된 프로토타입을 고려하여 설계하였다.

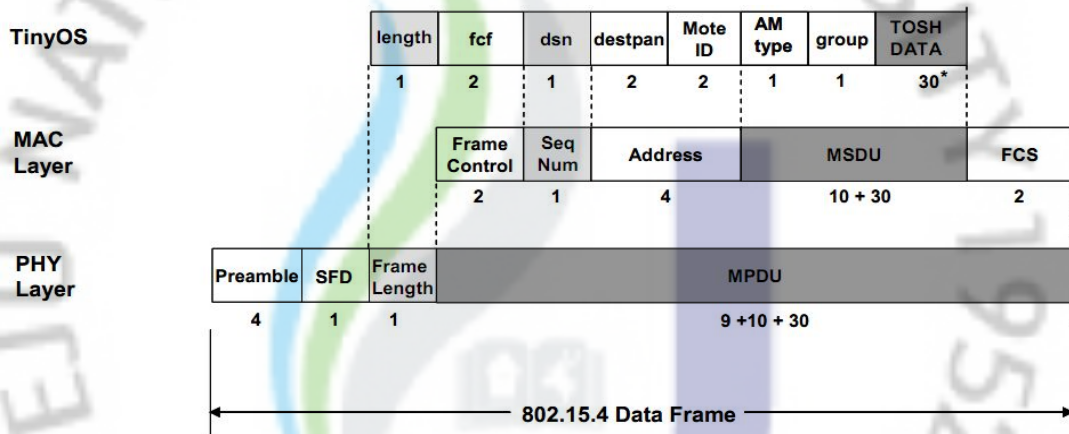


그림 13. 802.15.4 데이터 프레임과 TOS\_Msg 구조 관계

그림 13.은 무선 통신에서 쓰이는 802.15.4의 데이터 프레임 구조와 TinyOS에서 기본적으로 사용되는 TOS 메시지 구조 관계를 나타내었다.

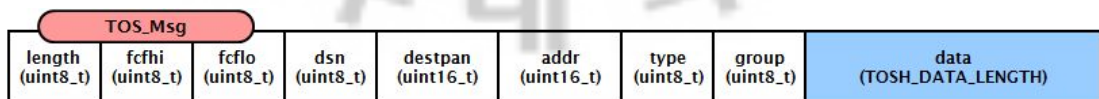


그림 14. TOS\_Msg의 세부 구조

그림 14.는 TOS\_Msg 패킷의 세부 구조를 나타내었다. 일반적으로 TOS 메시지의 패킷 구조를 이용하여 TinyOS에서 Zigbee로 데이터 통신이 이루어진다.

제안하는 A-ComHRP 구현을 위하여 TOS\_Msg의 패킷 헤더 부분의 명칭과 의미를 그림 15.와 같이 재정의 하였다.

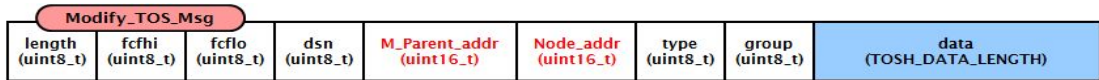


그림 17. 수정된 TOS\_Msg 헤더

TOS\_Msg의 destspan 필드와 Addr 필드가 트리 라우팅을 기반으로 하기 위해서는 자신의 노드에 대한 부모 노드의 주소를 기억하고 있어야 하기 때문에 자신의 부모노드를 기억하는 M\_Parent\_addr 과 자신의 주소를 기억하는 Node\_addr로 재정의 하였다.

또한 type 필드는 데이터의 종류에 따른 구분을 위하여 재정의 하였으며, 재정의된 내용은 표 4.과 같다.

표 4. 메시지 타입 구분

AM Type	값	세부 내용
AM_SYNCMSG	170(0xAA)	Beacon 메시지
AM_DATAMSG	10(0x0A)	Raw data
AM_ACTIS_HelloMSG	71(0x47)	라우팅 구축을 위한 헬로 메시지
AM_ACTIS_As_ChildMSG	72(0x48)	부모 자식을 구성을 위한 주소 배정 메시지
AM_ACTIS_As_AckMSG	73(0x49)	응답을 위한 ACK 메시지
AM_ACTIS_As_FindMSG	74(0x50)	경로 설정을 위한 메시지

TOS\_Msg의 data 영역의 재구성을 하였으며, 이는 그림 16.에 나타내었다. Orhan\_Chk 필드는 네트워크 동기화를 위하여 주기적으로 보내는 AM\_SYNCMSG의 응답이 제한 횟수보다 존재하지 않는다면 해당 노드는 고아 노드임을 판단하기 위한 필드이다.

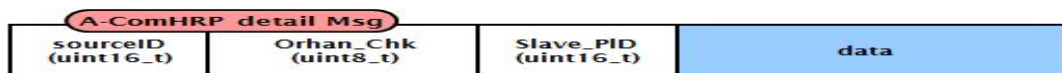


그림 16. DATA 영역의 세부 패킷 구조

Slave\_PID는 초기 값으로 Master\_PID의 값을 지니며, 해당 노드가 고아 노드가 될 때, Slave\_PID를 다시 계산식에 의해 산출한 후, 해당 Slave\_PID를 배정하고 배정된 Slave\_PID로 라우팅을 재구성한다.

### 3) 주소 배정

계층적 라우팅을 기반으로 하는 A-ComHRP의 핵심은 센서 노드의 주소 배정 방법이다.

계층적 라우팅 프로토콜에서 네트워크 구성을 위한 최초의 센서 노드 주소는 "0"의 값을 갖게 되며, 이를 기준으로 각 센서들 간의 네트워크가 구성된다.

**[정의 5]** 네트워크 구성을 위한 최초의 노드를 *FSN(First Sink Node)*라 정의하고, *FSN*는 해당 네트워크에서의 가장 *RSSI*의 값이 큰 센서 노드를 의미한다.

*FSN*은 식 2.를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$A_{FSN} = \{FSN \mid SN \in TSN, \max(TSN(SN_{RSSI}))\} \quad (\text{식 2.})$$

**[정의 6]**  $SN_{mc}$ 는 해당 센서 노드가 가질 수 있는 하위 노드의 차수라 정의한다.

센서 노드마다 정해진  $SN_{mc}$ 가 존재한다. 이 값에 의해 각 노드는 자신의 부모 노드로부터 센서 노드의 주소를 배정받는다.

$$A_{SN} = \begin{cases} SN \mid SN \in TSN, PN \in FSN, \\ SN = SN_{mc} \times PN + n (1 \leq n \leq SN_{mc}) \end{cases} \quad (\text{식 3.})$$

식 3.에 의해 센서 노드의 주소는 자신의 부모 노드로부터 노드 차수를 곱하여  
배정되는 순서(n)으로 구할 수 있다.

이러한 방법의 센서 노드들의 재귀적 호출로 인하여 주소를 배정할 수 있다.  
또한, 선행 연구로 수행된 ComHRP에서의 주소 배정 방법과 제안하는  
A-ComHRP의 주소 배정방법과는 다소 차이가 존재한다. 그림 17.은 ComHRP와  
A-ComHRP에서의 네트워크 구성에 따른 주소 배정을 나타낸 것이다.



(a) ComHRP에서의 주소 배정 (b) A-ComHRP에서의 주소 배정

그림 17. ComHRP와 A-ComHRP의 노드 구성에 따른 주소 배정

그림 17.에 나타낸 것과 같이 A-ComHRP의 경우에는 SYNC 패킷을 처리하는  
단계에서 환경 변화와 장애에 대한 대처를 처리하도록 수정되었음을 알 수 있다.  
SYNC 처리를 통하여 노드의 생성 및 삽입, 삭제인 경우에 대해 판단할 수 있으  
며, 이를 통하여 단말 노드인 경우와 고아 상태 유무를 확인할 수 있다.

노드의 생성 및 삽입에 있어서는 기본적인 계층적 라우팅에서의 주소 배정 방  
법을 이용하여 주소를 배정하였으며, 단말 노드인 경우에는 해당 노드에 부호화  
절대치 방법을 이용하여 노드 주소를 음수로 변환하여 처리하였다. 이를 통하여  
단말 노드는 하위 노드를 가질 수 없기 때문에 노드간의 탐색 및 데이터 전송에



서 발생하는 노드 트래픽을 절감시킬 수 있다.

노드의 삭제는 노드 자신 및 하위 노드의 삭제인 경우와 부모노드의 삭제인 경우로 나뉘어 주소배정 방법이 결정된다. 노드 자신 및 하위 노드의 삭제인 경우는 하위 노드의 주소에 “0”을 곱하여 부호화 절대치를 취함으로써 삭제되어 없는 노드는 “-0”의 값을 지니게 된다. 이를 이용하여 탐색 시 “-0”의 값이 존재한다면, 더 이상 탐색을 하지 않도록 제어할 수 있게 된다.

그림 18은 SYNC 처리와 고아상태에 따른 처리를 나타내었다.

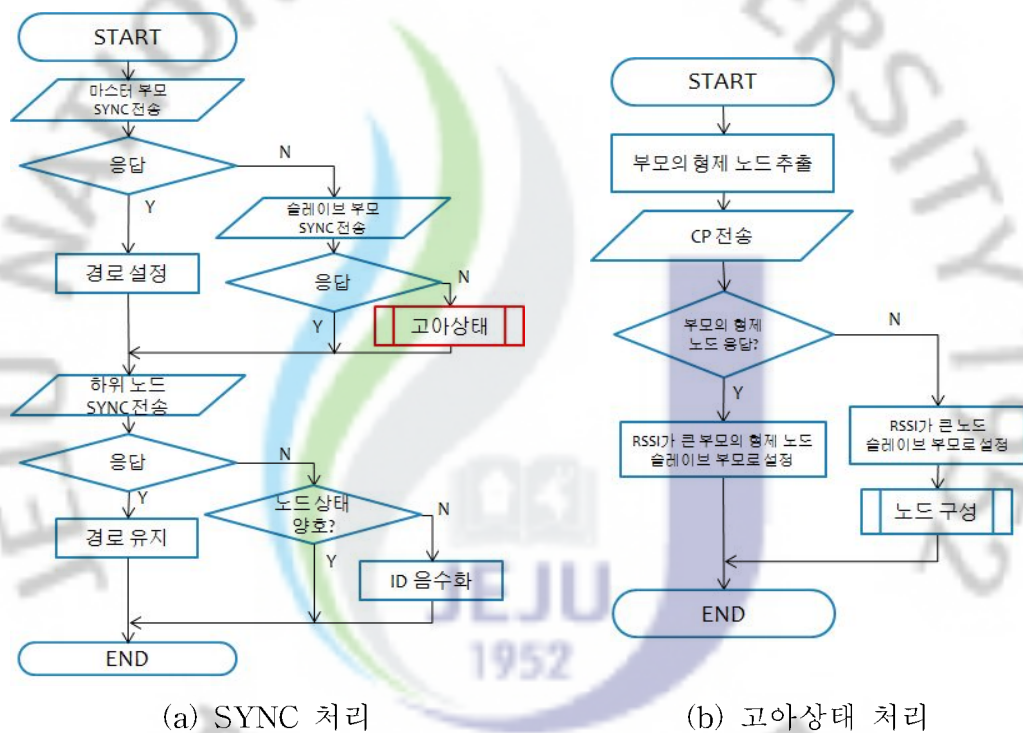


그림 18. A-ComHRP에서의 SYNC와 고아상태 처리

부모 노드의 삭제인 경우는 장애로 인한 재구성인 경우로 판단할 수 있다. 이에 해당 노드는 고아 상태를 나타내게 된다.

고아 상태인 경우, 기존 연구에서는 해당 센서 노드로부터 주위 모든 노드로 재구성을 위해 브로드 캐스팅하며 이후 선택된 노드를 부모로 하여 재구성이 완료된다. 이러한 경우, 노드를 찾기 위한 트래픽 부하 및 재구성에 따른 노드 주소의 재배정이 빈번하게 이루어지게 된다.

그러나 A-ComHRP는 무조건 기존 방식과 같이 브로드 캐스팅을 통하여 부모 노드를 탐색하지 않는다. 부모 이웃 노드를 계산하여 부모 이웃 노드들에게 우선적으로 캐스팅하여, 부모 이웃 노드들 중 선택된 노드로 하여금 부모 노드로 재구성하게 된다. 이와 같은 방법으로 재구성에 따르는 노드 주소의 재배정은 필요 없게 된다.

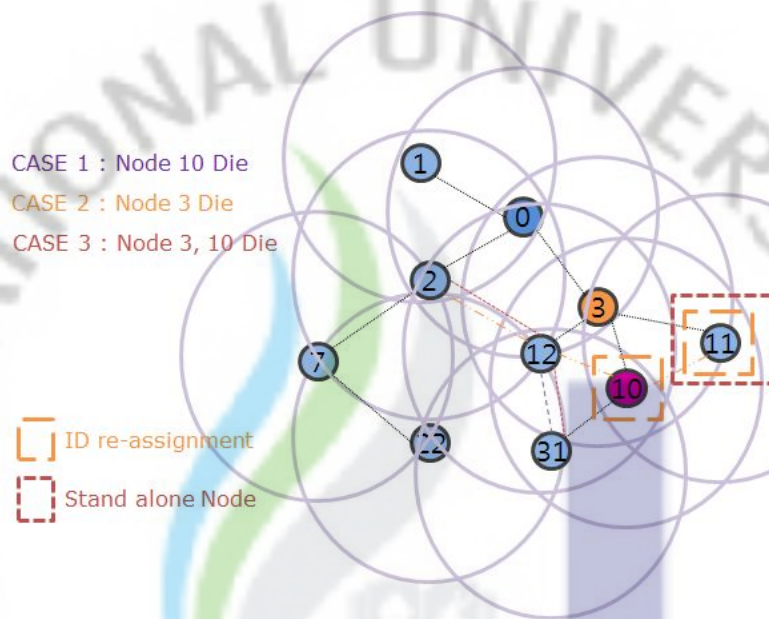


그림 19. 고아 상태에 따른 네트워크 재구성

그림 19.은 3가지의 경우에 대하여 나타내었다.

첫 번째, 10번 노드가 작동 불능 상태가 되어 31번 노드가 고아 노드가 된 경우 31번 노드는 원래 부모 노드인 10번 노드의 형제를 슬레이브 부모 노드로 설정하게 된다. 따라서 12번 노드로 31번 노드는 재구성 된다.

두 번째, 3번 노드가 작동 불능 상태가 되어 10번, 11번, 12번 노드가 고아 노드가 되는 경우, 각 노드는 첫 번째와 동일한 방법으로 원래 부모 노드인 3번 노드의 형제노드를 찾게 된다. 이때, 12번 노드만 2번 노드와 연결되고, 10번 노드는 12번 노드와 31번 노드 중 RSSI가 큰 12번 노드에 재구성 된다. 이때, 10번 노드는 12번 노드의 하위 노드가 됨으로 노드 값의 재 배정이 이루어져 32번 노드로 바뀌게 된다. 11번 노드 역시, 재배정된 32번 노드의 하위 노드로 재구성



되어 노드 값의 재배정이 이루어진다.

세 번째, 10번과 3번 노드가 둘 다 작동 불능 상태인 경우는 31번 노드는 12번 노드에 12번 노드는 2번 노드에 재구성 될 수 있다. 그러나 11번 노드는 어떠한 노드의 응답도 없기 때문에 고립되어 버린다. 이러한 경우는 노드의 이동이 요구된다.

또한, 네트워크 구성에 있어 최초의 가장 안정한 상태의 구성에서 장애 상황에 따른 재구성이 발생시, 부모 노드를 다시 재구성 하였다고 하더라도 네트워크 구조는 불안정한 상태로 바뀌게 된다.

이러한 경우 정적인 네트워크인 경우, 원래의 안정적인 네트워크 구조상에서의 부모 노드가 배터리 교환 및 노드 교체를 통하여 다시 동작 가능한 상태로 변화되었을 때, 재구성된 하위 노드들은 라우팅 경로를 유지하고 있는 상태이기 때문에 원래의 부모노드가 동작 가능한 상태가 되었다 하더라도 경로를 다시 재구성하지 않게 된다. 이에 따른 센서 노드의 주소 혼동 및 탐색상의 어려움이 나타날 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 경우를 대비하여 주소 배정 시 최초의 부모 노드의 주소를 재구성시 탐색된 부모 이웃 노드로 바로 대체하는 것이 아니라 최초의 부모 노드 주소를 마스터 부모 주소로 놓고, 부모 이웃 노드의 주소를 슬레이브 부모 주소로 놓아 처리하도록 한다. 이후 네트워크 동기화를 위하여 동기화 메시지를 전송할 때마다 마스터 부모 노드로 먼저 신호를 보내 응답 메시지가 돌아오면 마스터 부모 주소로 라우팅을 재설정하고 그렇지 않으면 라우팅 경로로 유지하고 있는 슬레이브 부모 주소를 그대로 유지하도록 하였다.

#### 4) 경로 설정

기존의 계층적 라우팅에서는 소스 노드에서 목적 노드로의 탐색을 하려면, 반드시 최상위의 싱크 노드를 반드시 먼저 탐색한 후, 싱크 노드에서 목적 노드로의 경로 설정이 이루어지는 2단계 경로 설정 방법으로 라우팅 설정 및 데이터 전송이 이루어졌다. 또한 선행 연구로 수행된 ComHRP에서는 경로 설정에 있어 End 노드에 따른 처리를 추가하여 수행되었다. 이러한 방법은 탐색 단계를 다소 줄일 수 있지만, 자식 노드 정보를 서브넷으로 가지고 있는 CTR 방법에 비하여

탐색 단계가 현저히 높다는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 20의 (b)와 같이 새로운 경로 설정 방법을 적용하였다.

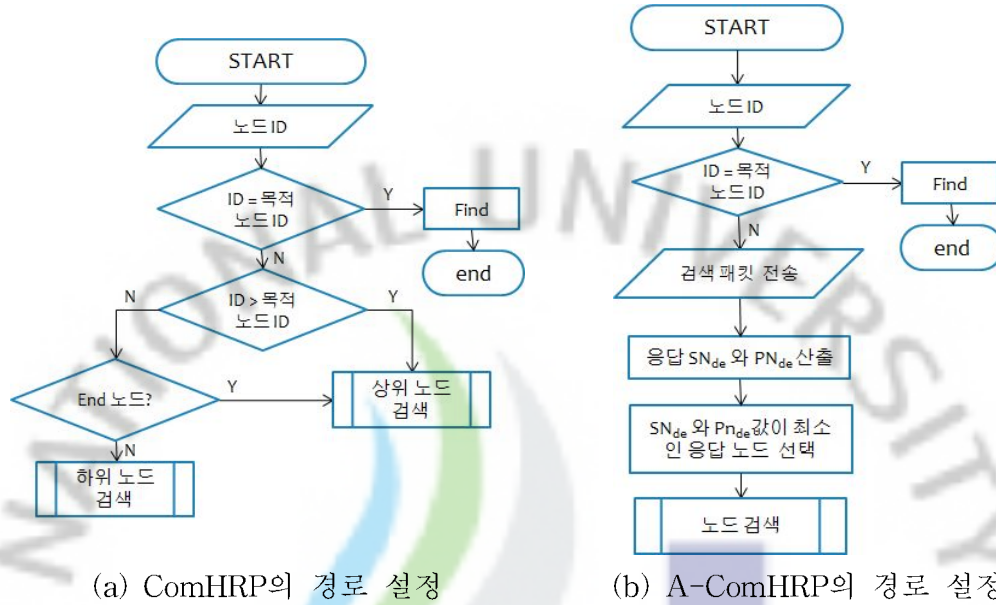


그림 20. ComHRP와 A-ComHRP의 경로 설정 처리

(b)의 A-ComHRP의 경로 설정 방법에서  $SN_{de}$ 와  $PN_{de}$ 값은 식 4.를 적용하여 산출할 수 있다.

$$\begin{cases} A_{PN} = \{PN \mid SN \in TSN, (SN-1)/SN_{mc}\} \\ A_{SN(n)} = \{PN \mid SN \in TSN, SN \bmod SN_{mc}, \text{ if } n=0 \rightarrow n=SN_{mc}\} \end{cases} \quad (\text{식 4.})$$

식 4.에 의해 노드 A의 부모 노드는 자신의 노드의 값에 1을 뺀 값에 노드의 차수로 나눈 몫으로 구할 수 있으며, 자신의 노드가 노드 차수 내의 n 번째 노드 인지를 알고자 한다면 자신의 노드를 노드의 차수로 나눈 나머지가 n이 바로 해당 노드의 위치가 된다. 이때 나머지가 n이라면 노드의 차수 값이 바로 노드의 위치가 된다. 이를 재귀적 방법에 의해 탐색을 진행하면, 각 노드의 부모 노드와 자신의 노드의 차수내의 위치를 알아낼 수 있으며, 자신의 노드에 대한 하위 노드의 범위를 계산할 수 있다.

## 5. 적용 시나리오

### 1) 네트워크 구성

최초의 네트워크 구성을 위해 센서 노드들은 AM\_ACTIS>HelloMSG 타입의 네트워크 구성을 위한 CP(Construction Packet)을 전송한다. 이때, RSSI가 가장 큰 노드를 FSN으로 설정하게 된다. FSN이 결정되면, 다시 FSN은 CP를 라디오 반경 안에 있는 노드들에게 브로드 캐스팅하게 된다.

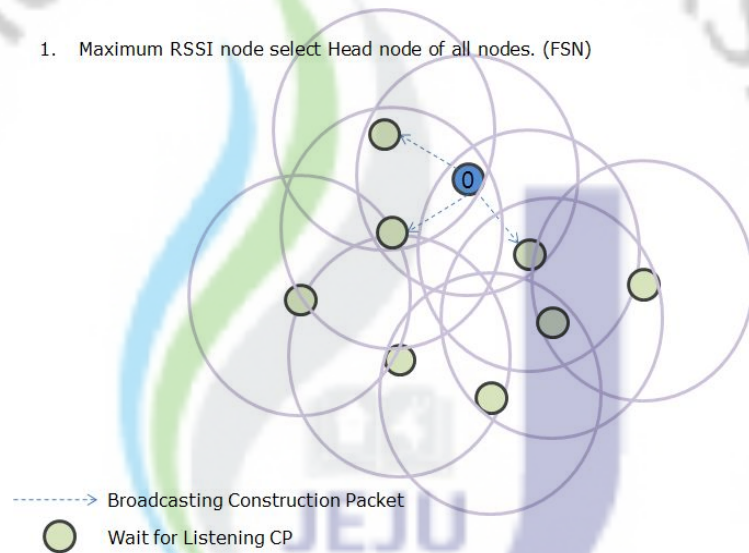


그림 21. 초기 네트워크 구성

그림 21.에 나타난 것과 같이 FSN은 노드 주소를 “0”으로 설정하였으며, 나머지 노드들은 FSN으로부터의 CP를 기다리게 된다.

FSN으로부터의 CP를 받은 센서 노드들은 AM\_ACTIS\_As\_AckMSG 타입의 응답 메시지를 보내게 되며, 해당 메시지를 받은 순서에 따라, FSN은  $SN_{mc}$ 의 최댓값까지 응답한 하위 노드에게 AM\_ACTIS\_As\_ChildMSG 타입의 메시지를 전송하여 하위 노드에 대한 주소를 배정하게 된다.

그림 22.의 예는  $SN_{mc}$ 값이 “3”일 경우를 가정하여 노드 주소가 배정되는 것을 표현한 것이다.

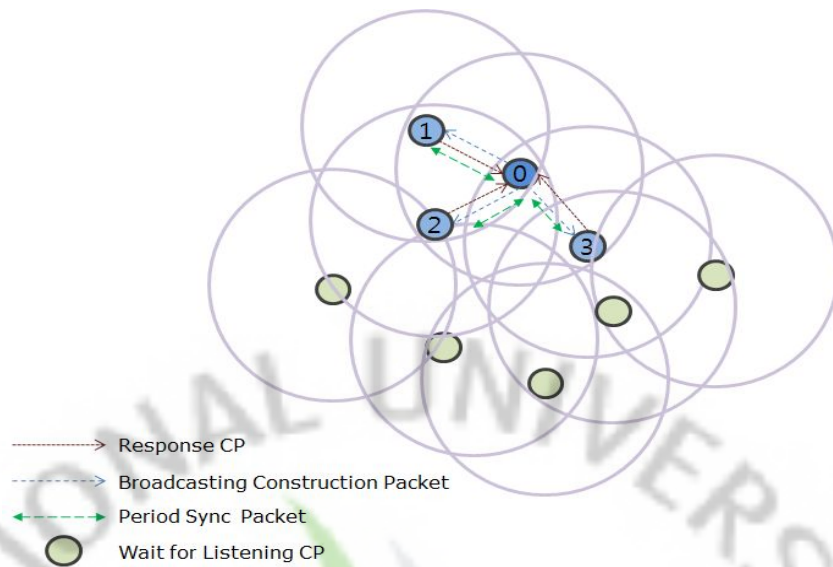


그림 22. 하위 노드들의 주소 배정

주소 배정이 끝나면, 서로의 데이터 전송에 따른 시간차를 없애기 위하여 AM\_SYNCMSG 타입의 Period 싱크 패킷을 전송하여 서로간의 동기화를 진행한다. 이렇게 구성된 하위 노드들은 다시 CP를 브로드 캐스팅하여 자신의 하위 노드를 추가적으로 구성하여 전체적인 네트워크 구조를 형성하게 된다. 그림 23. 은 전체적으로 구성된 네트워크의 구조를 나타내었다.

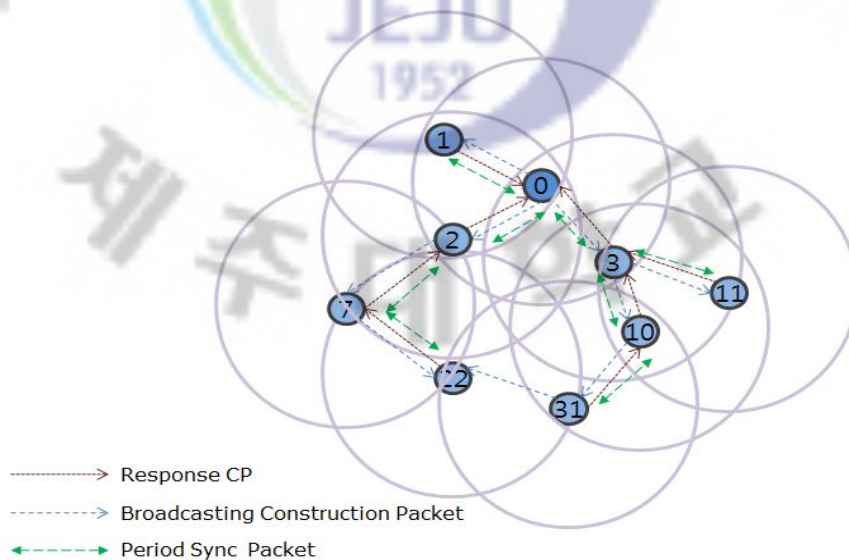


그림 23.  $SN_{mc}$ 가 3인 경우 전체 네트워크 구성

## 2) 장애 발생에 따른 네트워크 재구성

네트워크가 형성된 후 그림 12.에서와 같은 장애 발생 원인에 의해 센서 노드에 장애가 발생할 경우 노드의 상태 변화에 따라 네트워크의 재구성이 이루어져야 한다. 이때 최하위 노드에서 장애가 발생하게 되면 [정의 4]에 따른 단말노드로 상태 변화가 이루어지며, 하위 노드를 가지고 있는 부모 노드 중에서 장애가 발생하게 되면 [정의 3]에 따른 고아노드로의 상태변화가 이루어지게 된다.

그림 24.는 네트워크 구성에 있어 최하위 노드에서 장애가 발생하여 단말노드로 상태가 바뀌는 경우를 나타낸다. 22번 센서와 31번 센서가 단말 노드로 상태가 변화가 일어날 경우를 의미한다.

22번과 31번은 자신의 부모 노드와는 신호를 주고받을 수 있으나, 장애가 발생하여 하위 노드를 더 이상 갖지 못하는 경우가 된다. 따라서 이러한 경우에는 네트워크 자체를 재구성 하지 않고, 해당 노드의 상태를 변경하고, 이에 따라 주소 배정을 자신의 원래 주소에 부호화절대치를 적용하여 음수로 변경하게 된다.

센서 노드의 값이 음수를 지니게 되면, 해당 노드는 단말 노드를 의미한다.

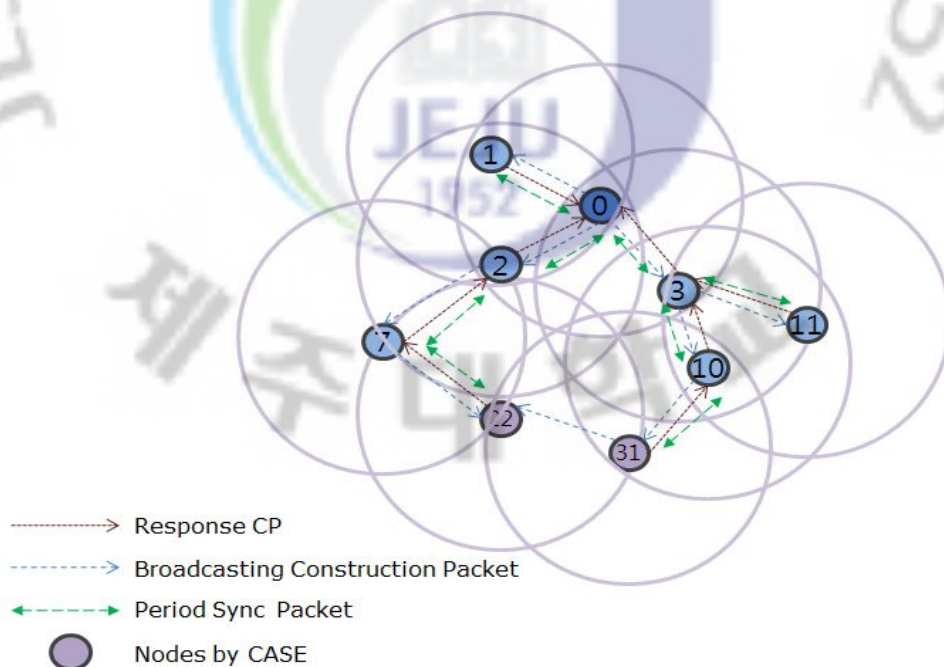


그림 24. 장애 발생 원인에 따른 단말 노드로의 상태 변화(단말노드)



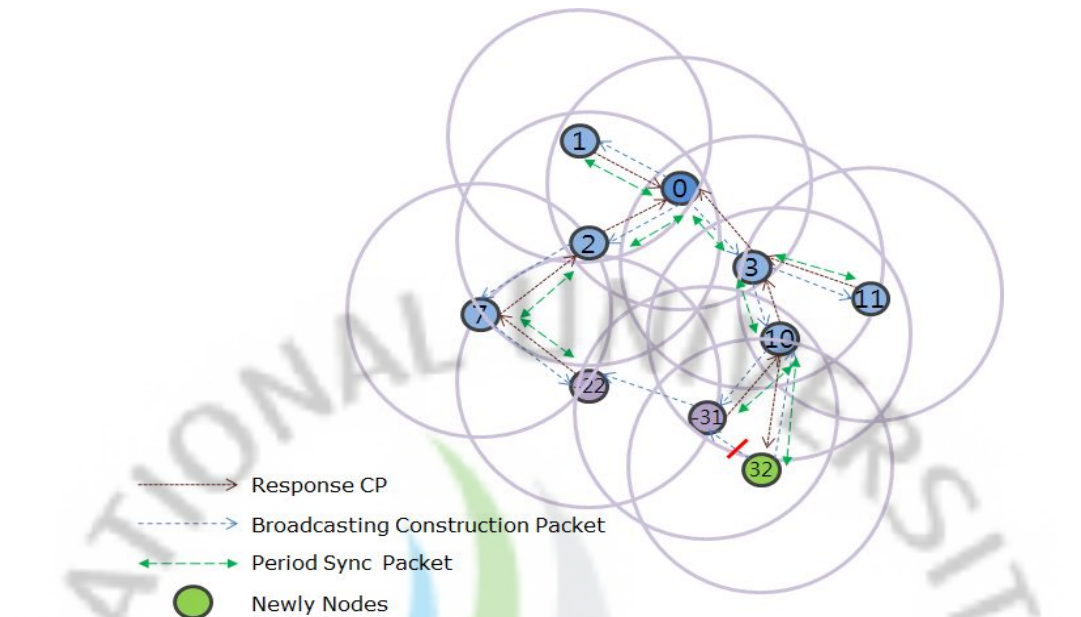


그림 25. 단말 노드의 주소 재배정후 새로운 노드 추가의 경우

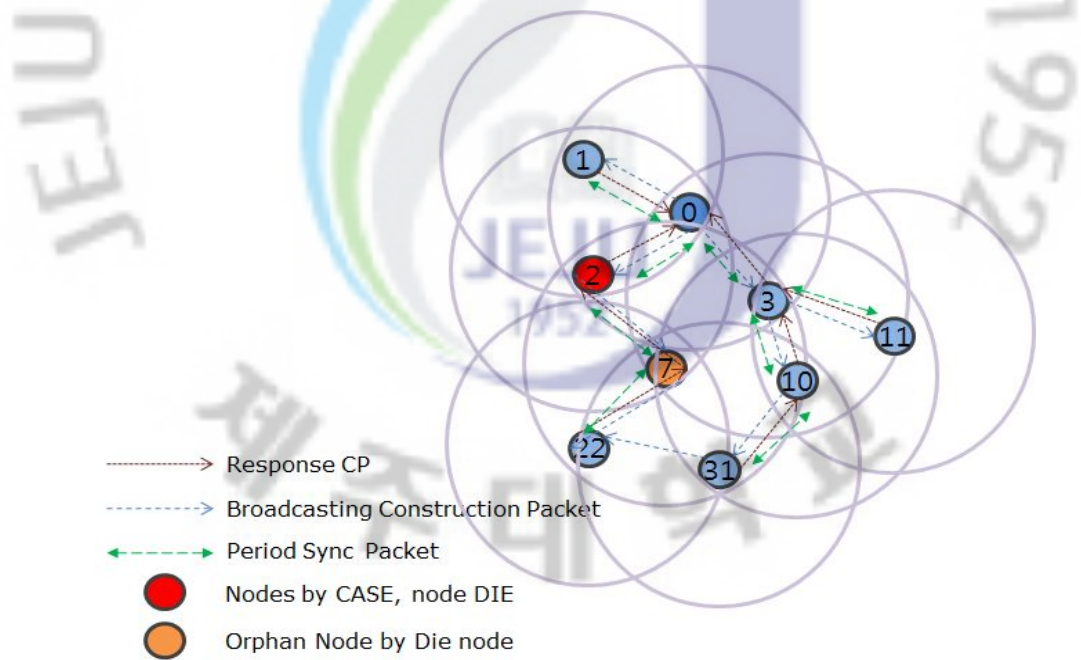


그림 26. 장애 발생 원인에 따른 단말 노드들의 상태 변화(고아노드)

그림 25.에 나타난 것과 같이 22번과 31번 센서 노드는 각각 음수 값으로 치환

되어 주소 재배정이 이루어짐을 알 수 있다. 이후 새로운 노드가 등장하게 되면, 새로운 노드는 31번과 가까운 거리에 있어 연결이 되어야 하나, 31번 노드는 장애를 가진 단말노드이므로 A-ComHRP에서는 10번의 노드와 연결되어 10번 노드로부터 2번째 차수인 32번의 주소를 배정 받게 된다.

그림 26.은 2번 노드가 장애 발생 원인으로 인하여 노드가 불능이 되어 2번 노드의 하위 노드인 7번 노드가 [정의 3]에 의한 고아 노드가 된 경우를 나타내었다.

이 경우 고아 상태로 전환된 노드 7번은 자신이 유지하고 있는 마스터 부모 노드인 2번 노드가 AM\_SYNCMSG 타입의 Period 싱크 패킷에 대한 제한 횟수 내의 응답이 존재하지 않는 경우, 부모 이웃 노드를 탐색하여 탐색된 부모 이웃 노드와 CP를 교환하여 슬레이브 부모 경로를 설정하게 된다. 부모 노드의 변경에 따른 주소를 재배정하지 않고, 현재의 주소를 그대로 유지하여 부모 노드의 라우팅 경로만 변경하게 된다.

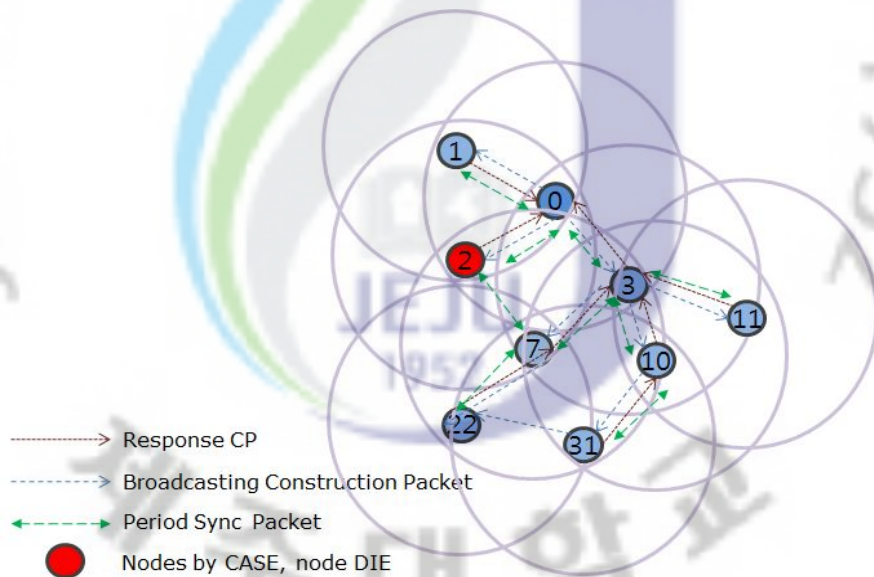


그림 27. 고아 노드에 대한 네트워크 재구성

또한, 향후 마스터 부모 노드인 2번 노드의 장애가 해결되어 정상 동작에 들어가면, 최초의 안정적인 네트워크 구성으로 다시 재구성할 필요가 있다. 이에 7번 노드는 라우팅 경로를 슬레이브 부모 노드인 3번과 연결이 되어 있지만, 네트워크



크 동기화를 위해 AM\_SYNCMSG 타입의 Period 싱크 패킷을 보낼 때, 항상 마스터 부모 노드로 먼저 보내게 된다. 이때, 마스터 부모 노드에서 응답이 오면, 슬레이브 부모 노드의 라우팅 경로를 제외하고 다시 라우팅 경로를 마스터 부모 노드의 경로로 재설정하게 된다. 만약 응답이 없다면, 슬레이브 부모 노드와 계속 라우팅이 유지된다.

### 3) 노드 이동에 따른 네트워크 재구성

네트워크가 형성된 후 센서 노드 자체의 이동에 따른 네트워크 재구성이 발생하는 경우에는 두 가지 경우를 처리한다. 두 가지의 경우는 최하위 센서 노드의 이동으로 네트워크가 재구성 되는 경우와 부모 노드 이동에 따른 네트워크 재구성 되는 경우를 의미한다.

첫 번째로 최하위 센서 노드의 이동으로 네트워크가 재구성되는 경우는 해당 되는 이동 센서 노드를 네트워크 구조에서 제거함으로 처리할 수 있다. 이는 별도의 네트워크 재구성을 요구하지 않는다.

두 번째로 부모 노드에 해당하는 노드의 이동으로 네트워크 재구성이 될 경우, 두 가지 시나리오를 처리하여야 한다.

첫 번째 시나리오는 부모 노드 자신만 이동하는 경우가 있다. 이 경우에는 해당 노드를 장애가 발생한 노드로 간주하고, 연결된 하위 노드를 고아 노드로 처리하게 되면, 장애에 의한 네트워크 재구성 방법 중 고아노드 발생 시 처리하는 방법을 그대로 적용 가능하다.

두 번째 시나리오는 부모 노드에 해당 하는 노드 및 그 하위 노드들이 같이 이동을 하는 경우가 있다. 이러한 경우 기존 네트워크에서는 노드의 삭제에 의한 재구성 방법으로 네트워크를 재구성하게 된다.

### 4) 노드의 라우팅 경로 설정

A-comHRP에서의 노드의 라우팅 경로를 설정하고, 데이터를 전송하기 위한 방법은 현재 노드에서 경로 설정 패킷을 브로드 캐스팅하여 응답이 오는 노드의

수에 따라 경로 설정을 다르게 적용하였다.

우선 응답 노드가 1개인 경우는 계층적 라우팅 프로토콜에서 일반적으로 이용되는 센서 노드의 값과 목적 노드의 값을 비교하여 라우팅 경로를 설정하는 방법을 사용한다.

이때, 이미 부여된 A-ComHRP의 주소 배정에 의한 값 중 단말 노드에 대해서는 음수 값을 지니고 있기 때문에 부호화절대치 방법을 이용하여 원래의 고유 노드 값을 통해 경로 설정이 이루어지게 된다.

또한 경로 설정할 때, 존재하지 않는 노드를 의미하는 “-0”의 값을 갖는 위치에서는 더 이상의 하위 노드로 데이터 전송을 시도하지 않는다. 이에 따라 네트워크 전체에 경로 설정을 위한 패킷 트래픽의 부하를 줄일 수 있다. 이러한 방법은 네트워크의 구조가 사향 구조와 같이 한쪽으로 편중되어 있을 때, 네트워크의 홑이 크면 클수록 더욱 효과적인 방법이라 할 수 있다.

반면, 응답 노드의 수가 다수인 경우에는 응답 노드와 목적 노드 그리고 응답 노드와 목적 노드의 부모 노드의 값 사이의 편차를 구한다. 편차 값이 가장 최소화된 값을 기준으로, 네트워크 구조의 홑과 비교하여 최적화된 경로를 선택한다.

이러한 방법으로 일반적인 계층적 라우팅에서의 경로 설정 방법과는 차별화된 효율성을 나타낼 수 있다.

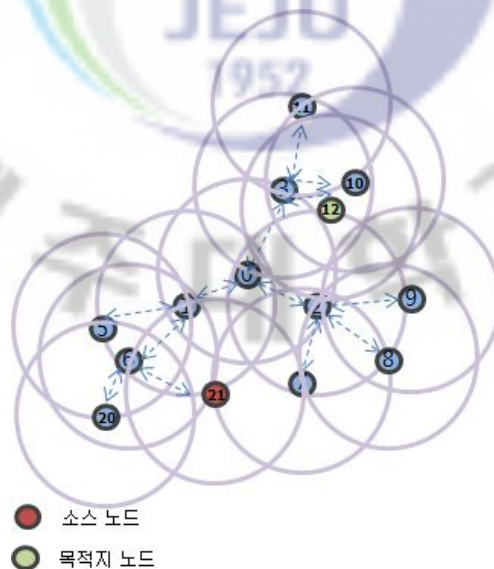
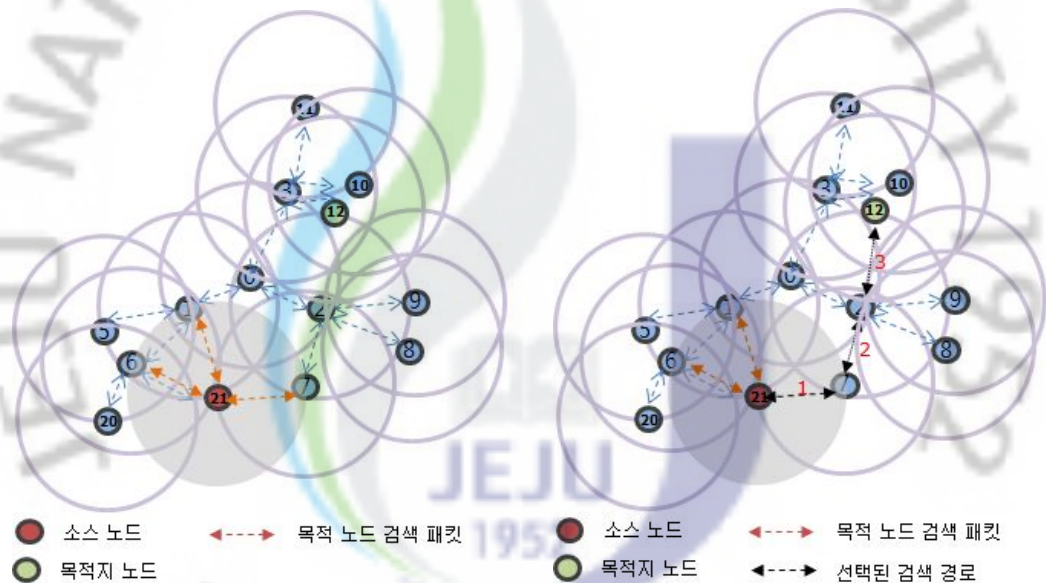


그림 28. 목적 노드의 탐색

그림 28.에 나타난 것과 같이 소스 노드 21번에서 목적 노드 12번으로 정보를 전송하기 위해서는 기존 방법은 0번 노드를 먼저 탐색한 후, 0번 노드에서 목적 노드를 찾아가는 방법을 사용하였다. 그러나 A-ComHRP에서는 21번 노드에서 목적 노드를 찾아가기 위하여 그림 19.의 경로 설정을 이용하여 목적 노드를 찾게 된다.

그림 29.는 소스 노드 21번에서 목적 노드를 탐색하기 위하여 탐색 패킷을 브로드 캐스팅 한 상태를 나타낸다. 이때 여러 노드로부터 응답이 올 경우 (식 5)에 의해 응답 온 센서 노드와 응답 온 센서 노드의 부모 노드에 대한 목적 노드의 차가 가장 최소의 절대 값을 지니는 노드를 다음 노드로 선택하게 된다.



(a) 경로 설정을 위한 브로드 캐스팅      (b) 탐색 알고리즘을 적용한 선택된 경로

그림 29. 목적 노드의 탐색 절차

$$\{ A_{de} = \{ De \mid SN \in TSN, \min(\|reSN - SN_{da}\| \text{ and } \|rePN - SN_{da}\|) \} \quad (\text{식 5})$$

따라서 소스 노드 21번에서 7번 노드로 데이터 전송을 시도하며 목적 노드인 12번 노드를 계속 탐색하게 된다. 7번 노드에서 경로 설정을 위한 패킷을 브로드 캐스팅하면, 새롭게 응답이 오는 노드는 2번 노드 하나만 존재하기 때문에, 2번

노드를 다음 노드로 선택하게 된다. 이와 같은 방법으로 목적 노드를 탐색하였을 경우, 목적 노드로의 데이터 전송은 소스노드에서 목적 노드까지 3단계(21번 -> 7번 -> 2번 -> 12번)를 거치면 가능하다.

기존의 목적 노드를 탐색하기 위해서 거치는 단계는 일반 트리 탐색인 경우, 17단계를 거치며, 자식 노드에 대한 정보를 이미 패킷에 넣어 전송하는 경우에는 최소 5단계를 거쳐 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 경우보다는 본 논문에서 제시한 A-ComHRP의 경로 설정 방법이 효율적임을 알 수 있다.



## IV. 실험

### 1. 개요

본 논문에서는 센서 네트워크에서 효율적 재구성이 가능한 계층적 라우팅 프로토콜 알고리즘을 설계하였다.

이를 위해 3장의 설계에서 고려한 프로토타입에 대한 내용을 분석하고 패키지 구조를 이용, 제안 알고리즘을 적용하여 실험하였으며, 실험을 위해 TinyOS 기반의 NesC 프로그램을 이용하여 실제 센서 노드에 프로그램을 포팅 하여 테스트를 수행하였다. 이를 통하여 제안한 A-ComHRP가 기존의 계층적 라우팅 프로토콜의 단점을 보완하고, 보다 효율적으로 라우팅 구성 및 동적 환경에 적응적인 프로토콜임을 나타내었다.

### 2. 테스트베드

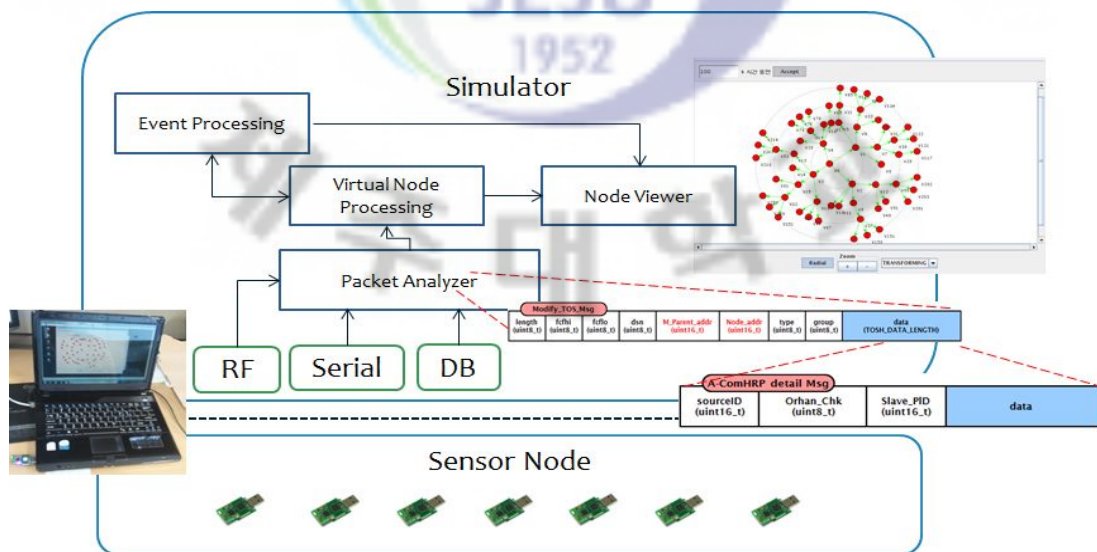


그림 30. 테스트베드



제안 프로토콜을 테스트하기 위하여 그림 30.과 같은 테스트베드를 구축하였다. 테스트베드 구축을 위하여 크게 2가지를 구현하고 실험하였다. 첫 번째, Telosb 기반의 K-mote를 사용하여 TinyOS 2.x 기반의 NesC 프로그래밍을 제작하였으며, 노드에 포팅하여 동작 유무를 확인하였다. 두 번째, K-mote로부터 전송된 패킷 정보를 이용하여 실제 네트워크 구성을 확인하기 위한 Java를 이용한 시뮬레이터를 구현하여 실험하였다.

### 1) NesC를 이용한 A-ComHRP

K-mote에 프로그램을 포팅하기 위해서는 TinyOS 2.x 기반의 센서 OS가 요구된다. TinyOS는 UC 버클리에서 진행해 온 스마트 더스트(Smart Dust) 프로젝트에 사용하기 위하여 개발된 컴포넌트 기반 내장형 운영 체제(OS). 네트워크 내장형 시스템을 위해 특별히 디자인된 초소형 OS이다. TinyOS의 특성들을 지원하기 위해 컴포넌트와 양방향의 인터페이스들로 구성되고, 태스크와 이벤트에 기반을 둔 동시성 모델을 지원한다는 특징을 지닌 NesC를 이용하여 A-ComHRP를 실험하였다.

실험을 위하여 구현된 컴포넌트들의 연결 관계를 그림 31.과 같이 나타내었다.

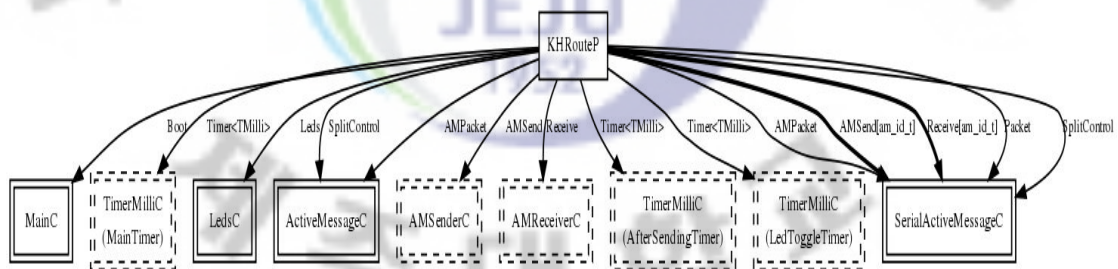


그림 31. A-ComHRP의 컴포넌트간의 Wiring 구조

컴포넌트들의 관계를 보면, 타이머를 여러 개 나눠 컴포넌트를 처리한 것을 볼 수 있는데, 동기화를 위한 타이머와 모트에 데이터 신호 확인을 위한 타이머, 그리고 네트워크 구축을 위한 타이머 등으로 세분화하여 구현되었기 때문이다.

ActiveMessage 컴포넌트는 무선 통신을 위해 사용되는 컴포넌트를 의미하며,



UART 컴포넌트는 탐색 경로에 대한 이벤트를 처리하기 위하여 사용되었다.

환경 파라미터들은 표 5.에 나타낸 것과 같이 전송 시간 및 동기화를 위한 동기화 주기, SN<sub>mc</sub>에 해당하는 Max\_Child값 등의 여러 가지 값들로 이루어져 있다. 메시지 타입에 따른 상수 값 설정은 표 3.의 메시지 타입 분류에 의해 정의되었음을 알 수 있다.

표 5. A-ComHRP를 위한 환경 파라미터

파라미터	세부 내용
BD_TIME_RATING	Beacon 전송 주기
MAX_CHILD	SN <sub>mc</sub> 값
AFTER_SENDING_RADIO_ON_TIME_mSEC	SYNC 주기
MSG_CHANNEL	메시지 전송 채널
AM_SYNCMSG	Beacon 메시지
AM_DATAMSG	Raw data
AM_ACTIS_HelloMSG	라우팅 구축을 위한 헬로 메시지
AM_ACTIS_As_ChildMSG	부모 자식을 구성을 위한 주소 배정 메시지
AM_ACTIS_As_AckMSG	응답을 위한 ACK 메시지
AM_ACTIS_As_FindMSG	경로 설정을 위한 메시지

```

struct _KHRoute
{
    uint16_t RealNodeID;
    uint16_t RealParent;
    uint16_t SlavePID;
    uint16_t Orhan_chk;
    uint16_t VirtualNodeID;
    uint16_t VirtualParent;
    uint16_t Chid_num;
    uint8_t KHCommand;
    uint16_t data;
};
    
```

그림 32. A-ComHRP를 위한 패킷 구조체

실험을 위한 패킷 정보에 대해서 구조체로 선언하였다. 이 패킷 정보에 대한 구조체는 앞 장에서 서술된 패킷 구조를 포함하며, 소프트웨어적인 처리를 위한 몇 개의 가상 필드로 재구성되어 선언되었다. 그림 32.는 정의된 패킷 구조체를 나타낸다.

센서 노드에 전원을 공급하게 되면 TinyOS 2.X 에서는 MainC의 컴포넌트안의 Boot 인터페이스를 이용하여 booted() 이벤트 함수를 호출하게 되며, 이를 통하여 전원 공급에 따른 초기화를 수행하게 된다. 이때 여러 가지의 초기화를 설정할 수 있으나, 각 노드에 대한 상태를 LED의 상태로 나타내도록 처리 하였다.

이를 처리하는 Status 함수는 센서 노드 자신에 대하여 부모 노드가 없는 경우, 또는 자식 노드가 없는 경우, 또는 자신의 자식 노드가 SN<sub>mc</sub>의 수만큼 자식을 가지고 있는지에 대한 상태를 LED로 표현한다.

최초로 정의된 FSN에서는 자신의 네트워크 반경에 AM\_ACTIS\_HelloMSG를 전송하며, 이에 따른 ACK 메시지가 돌아오면, 해당 노드에게 순서대로 노드번호를 부여하게 된다. 이를 통하여 네트워크 구성을 완료한다. 그림 33.은 네트워크의 구성과 노드의 추가에 따른 시퀀스 다이어그램을 나타낸다.

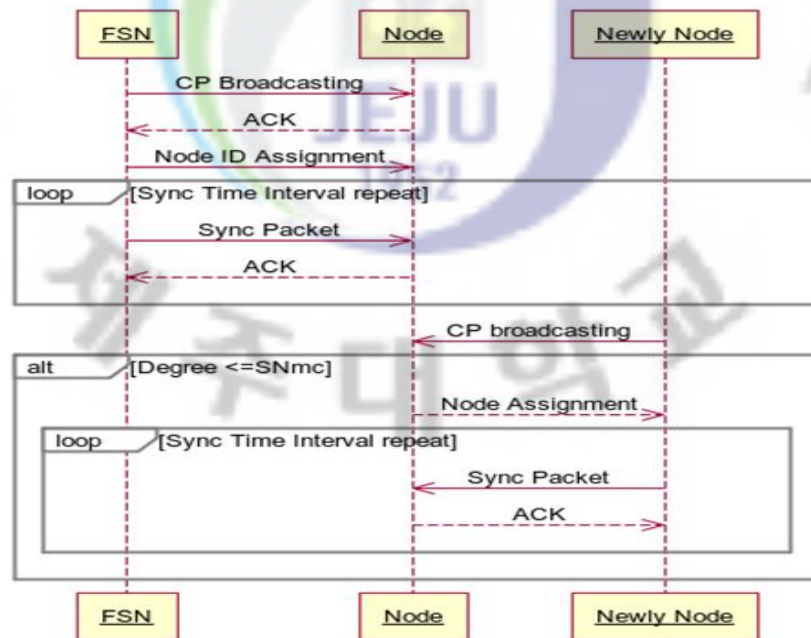


그림 33. 네트워크 구성과 노드 추가의 시퀀스 다이어그램

A-ComHRP를 위한 네트워크 구성이 완료되면, 각 센서 노드들은 주기적으로 SYNC 메시지를 보냄으로써, 네트워크의 변화 및 지속 여부를 체크하게 된다. 그림 34.는 SYNC 처리에서의 시퀀스 다이어그램을 나타낸다.

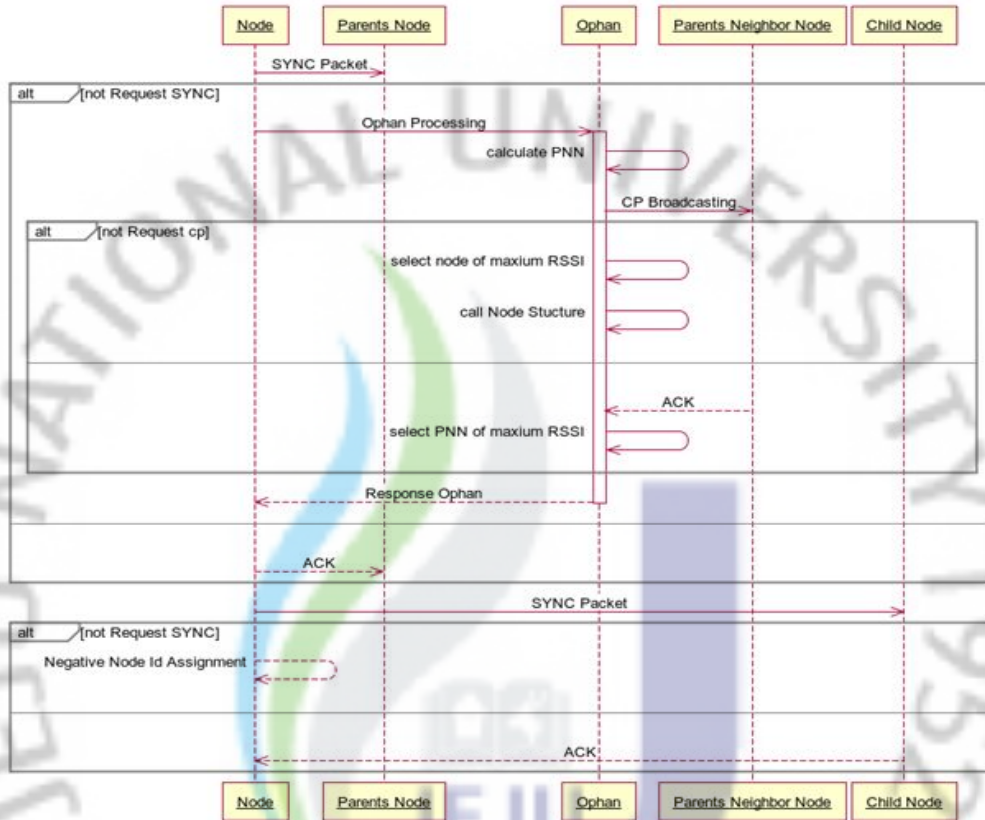


그림 34. SYNC 처리에 따른 시퀀스 다이어그램

데이터를 송수신하는 이벤트가 발생 시에는 두 가지로 나눠 처리된다.

첫 번째는 싱크노드로의 데이터 수집인 경우는 기존에 구축된 네트워크 경로를 통하여 상위 노드로만 데이터를 전송하면 간단하게 데이터의 전송이 해결된다. 이 경우는 데이터 중심의 트리 라우팅을 그대로 적용한 것이라 할 수 있다.

두 번째는 데이터를 보내는데 소스 노드에서 목적노드까지의 노드 간 데이터 전송인 경우이다. 이 경우에 해당하는 이벤트 발생시, 지정된 노드로 데이터를 보내기 위하여 목적 노드 탐색 알고리즘을 적용하여, 목적 노드까지의 데이터 전송 경로를 재설정하게 된다. 그림 35.는 소스 노드에서 목적 노드까지의 탐색에

따른 시퀀스 다이어그램을 나타내었다.

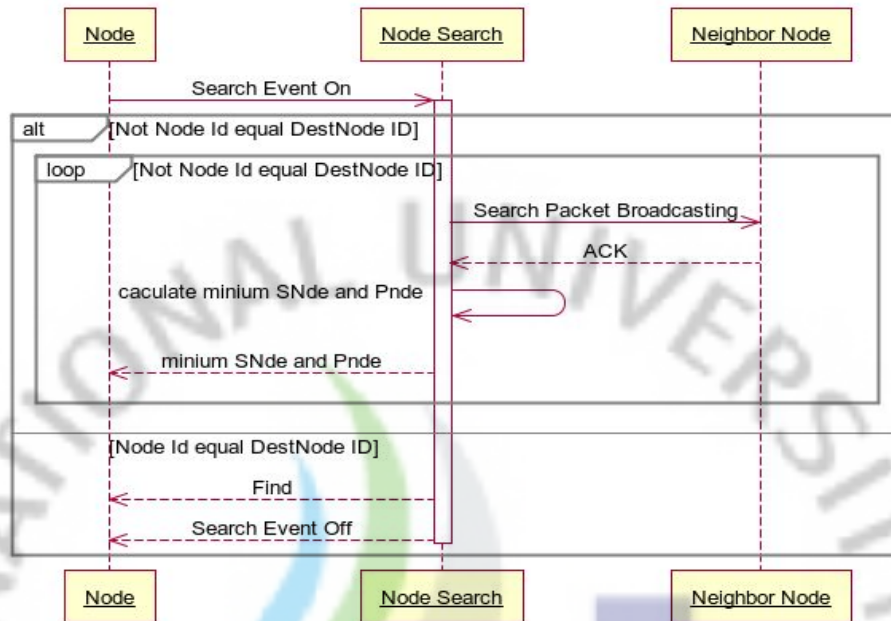


그림 35. 소스 노드에서 목적 노드 탐색 처리 시퀀스 다이어그램

네트워크의 구성 및 경로 설정을 위한 동작을 위하여 구현한 A-ComHRP의 NesC 프로그램을 K-mote에 포팅하여 Compile 하였으며, 이는 그림 36.에 나타내었다.

```

[root@localhost share]# make telosb
mkdir -p build/telosb
compiling KHRouteC to a telosb binary
ncc -o build/telosb/main.exe -Os -O -DTOSH_DATA_LENGTH=32 -mdisable-hwml -fnesc-separator=__ -Wall -Wshadow -Wnesc-all -target=telosb -fnesc-cfile=build/telosb/app.c -board= -DDEFINED_TOS_AML_GROUP=0x22 -DIDENT_PROGRAM_NAME="KHRouteC\" -DIDENT_USER_ID="root\" -DIDENT_HOSTNAME="localhost.local\" -DIDENT_USER_HASH=0x53b81074L -DIDENT_UNIX_TIME=0x4ce2a972L -DIDENT_UID_HASH=0x1ab3c52dL KHRouteC.nc -lm
In file included from KHRouteC.nc:15:
In component `KHRouteP':
KHRouteP.nc: In function `FindParent':
KHRouteP.nc:273: warning: assignment makes integer from pointer without a cast
KHRouteP.nc: In function `SyncPakcetToChild':
KHRouteP.nc:308: warning: assignment makes integer from pointer without a cast
/opt/tinyos-2.x/tos/chips/cc2420/lpl/DummyLplC.nc:39:2: warning: #warning "LOW POWER COMMUNICATIONS DISABLED"
KHRouteP.nc: In function `KHRouteP__SyncPakcetToChild':
KHRouteP.nc:308: warning: assignment makes integer from pointer without a cast
KHRouteP.nc: In function `KHRouteP__FindParent':
KHRouteP.nc:273: warning: assignment makes integer from pointer without a cast
compiled KHRouteC to build/telosb/main.exe
16194 bytes in ROM
1240 bytes in RAM
msp430-objcopy --output-target=ihex build/telosb/main.exe build/telosb/main.ihex
writing TOS image
[root@localhost share]#
  
```

그림 36. A-ComHRP 컴파일

## 2) Java를 이용한 시뮬레이터

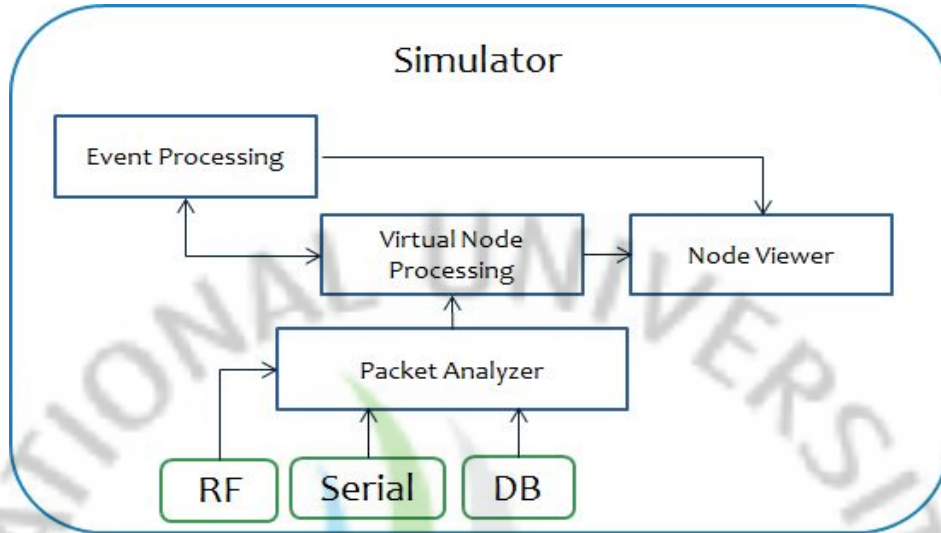


그림 37. 시뮬레이터 구성도

Java를 이용하여 노드로부터 전송된 패킷 데이터를 무선 RF 및 UART를 이용한 Serial 통신, 그리고 DB에 값을 읽어 표현하는 3가지의 입력 방식에 따른 시뮬레이터를 구현하였다. 그림 37.에 나타난 것과 같이 시뮬레이터는 크게 4가지의 처리 모듈로 구성되어 있다.

### ① Packet Analyzer 모듈

Packet Analyzer 모듈은 센서 노드로부터 전송된 A-ComHRP 패킷을 분석하여, 패킷 타입에 따라 Event Processing 모듈을 처리할 수 있도록 한다. 이때 분석된 패킷의 주요 내용은 Virtual Processing 모듈로 전송된다.

### ② Virtual Processing 모듈

Virtual Processing 모듈은 노드의 실제 노드 값과 단말 노드인 경우에 대한 가상 노드 값 등을 판별하여 처리하게 된다. 노드 값에 따라 노드를 화면에 출력하기 위하여 Node Viewer 모듈로 데이터를 보내게 된다. 또한 탐색, 재구성 등에 대한 이벤트에 따라 다시 노드 아이디를 재구성하는 역할



을 수행한다.

### ③ Event Processing 모듈

Event Processing 모듈은 탐색, 삽입, 삭제 등의 재구성에 대한 노드 상황에 따른 이벤트 시뮬레이션을 위하여 처리하는 모듈이다. 이벤트의 상황에 맞춰 노드의 재구성이 요구되면 Virtual Processing으로 데이터를 다시 보내게 되며, 상황에 대한 처리가 완료되면 Node Viewer 모듈로 데이터를 전송한다.

### ④ Node Viewer 모듈

Node Viewer 모듈은 처리된 데이터를 이용하여 화면에 노드 정보를 계층적으로 출력해주는 처리를 한다. 주기적으로 싱크 처리를 하는 모습을 나타내기 위하여 Timer에 따라 노드의 연결을 점점 희미하게 표현하였다.

그림 38.은 시뮬레이터를 이용하여 실험한 네트워크 구성에 따른 토폴로지를 나타낸 것이다.

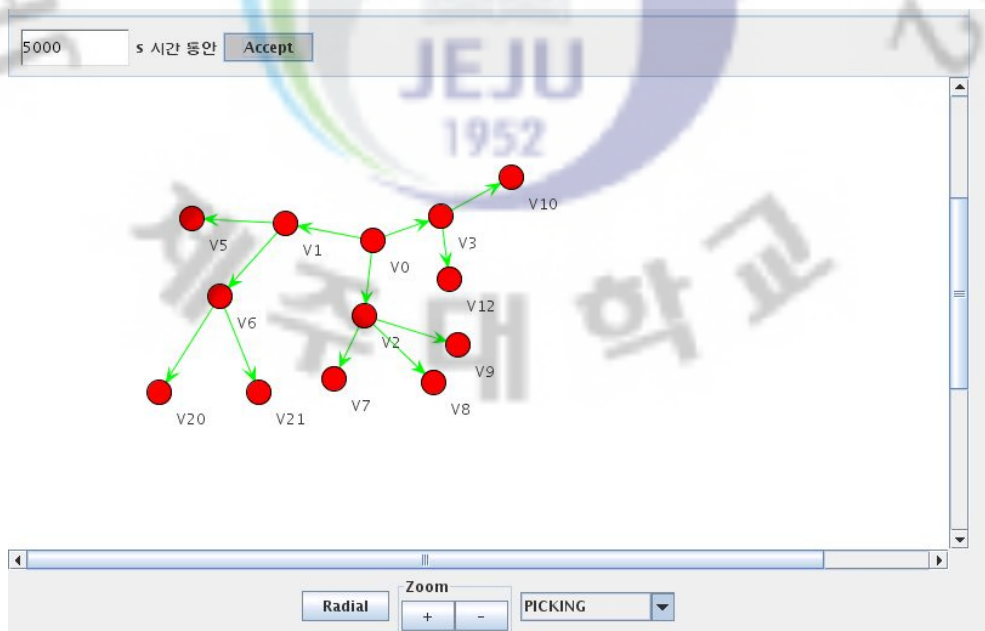


그림 38. 네트워크 구조 표현



이를 이용하여 간단한 시뮬레이션을 노드 자체의 싱크 처리를 통하여 표현할 수도 있고, 시뮬레이터 자체의 기능을 통하여서도 표현 가능하다.

그림 39.와 같이 네트워크 구성에서 6번 노드로 인하여 장애가 발생시, 노란색 범위에 있는 노드들의 데이터 통신이 원활하지 못하게 된다. 이때 6번 노드는 노드 값이 “-0”으로 치환되어 네트워크에서 사라지게 되며, 하위 노드인 20번과 21번 노드들은 고아노드로 남게 된다. 이때의 고아 노드들은 새로운 노드로 브로드캐스팅을 통하여 부모노드를 찾기 전에 자신의 부모 노드인 6번 노드의 형제 노드들로 네트워크 구성 신호를 먼저 보내게 된다.

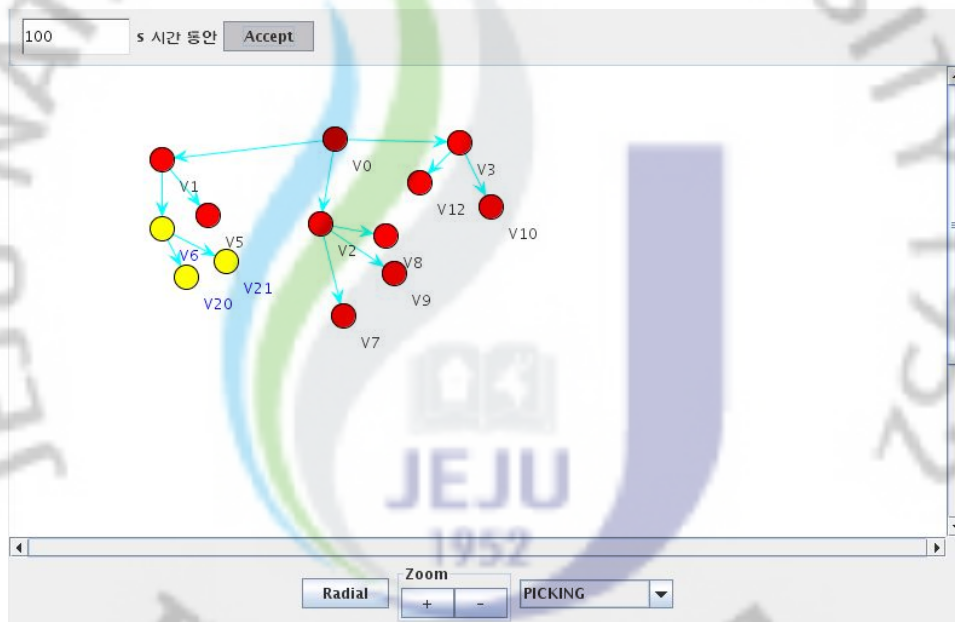


그림 39. 노란 범위의 이상 감지 상황

그림 40.은 6번 노드의 이상으로 인한 네트워크 구조에서 -0을 부여받아 사라지기 전의 상황을 나타낸다.

이 때, 5번 노드로부터 네트워크 구성에 따른 응답이 오게 되면, 해당 노드들은 슬레이브 부모 패킷에 5번 노드에 대한 값을 기억하게 된다. 따라서 싱크 노드로의 데이터 수집을 위한 일반적인 네트워크 경로로 5번을 지정하게 되며, 이후 싱크 노드로의 데이터 전송은 5번을 거쳐 전송하게 된다.

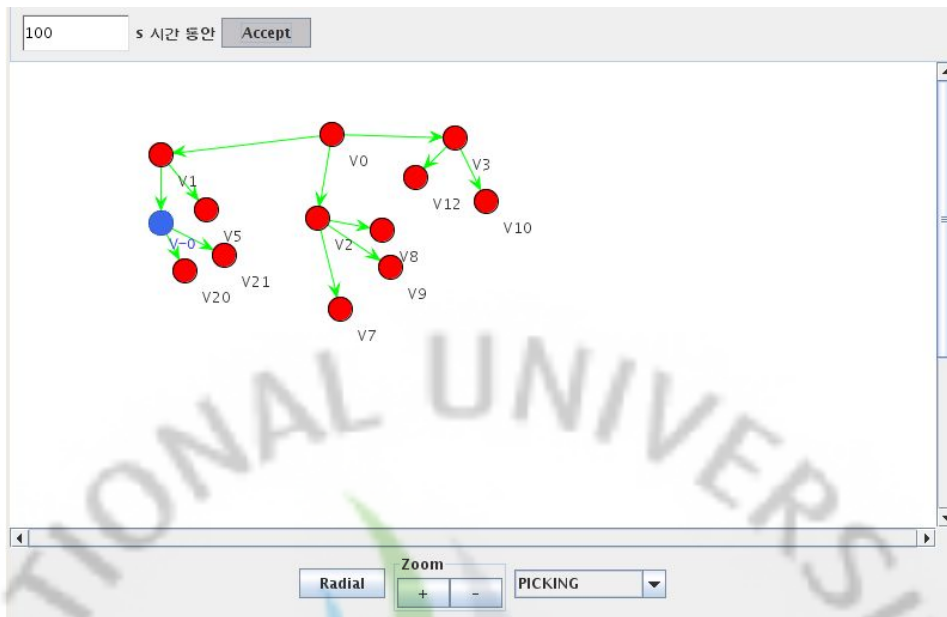


그림 40. 6번 노드의 이상으로 노드 값 대체

라우팅 경로의 구성 후, 싱크 패킷을 전송할 때, 싱크 패킷은 항상 마스터 부모 노드로 먼저 보낸 후, 응답이 있다면, 마스터 부모 노드로의 경로를 재설정하게 되며, 응답이 없다면, 이미 지정된 경로로 라우팅 경로를 유지하게 된다. 그림 41.은 새로운 부모 노드인 5번과의 라우팅 경로를 확보한 후의 상황을 나타낸다.

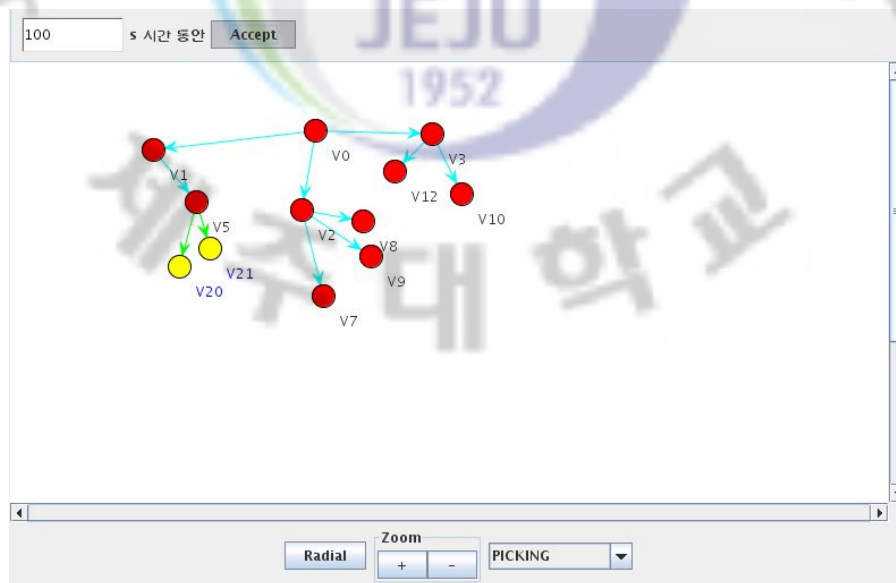


그림 41. 5번 노드로의 부모노드 대체

노드 탐색을 위한 경로 설정을 위해서는 그림 42.와 같이 21번 노드에서 12번 노드를 찾아가고자 선택하면 된다.

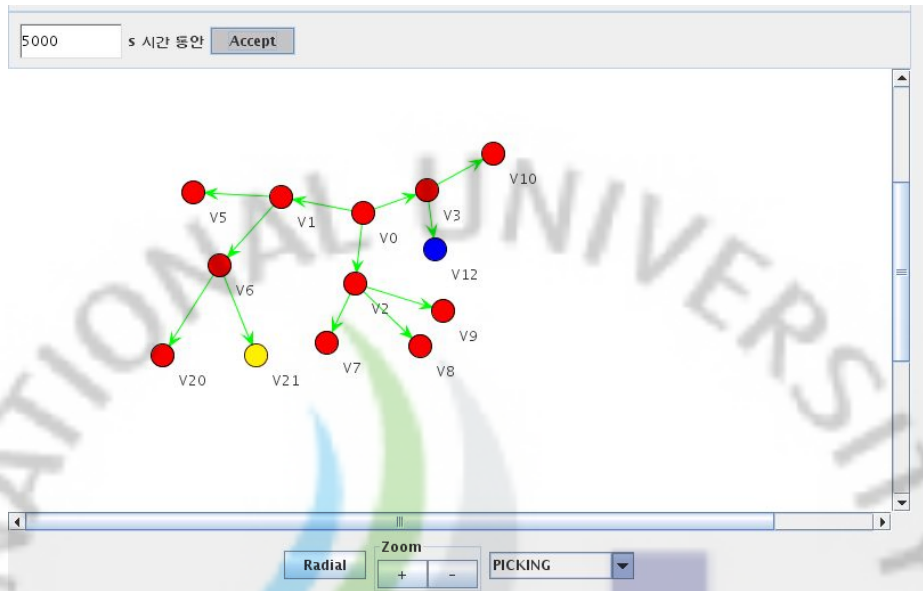


그림 42. 21번 노드에서 12번 경로 설정 지정

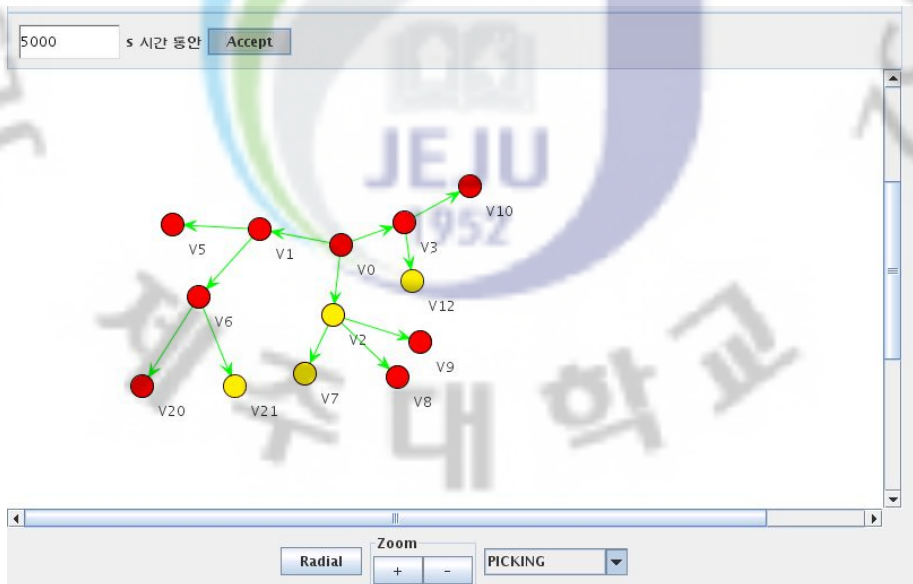


그림 43. 경로 설정 알고리즘에 의해 선택된 노드들

경로 설정을 위하여 경로 설정 패킷을 브로드 캐스팅하여 응답 온 노드들로부터

터의 거리 간 절대 값을 이용하여 노드 간 최단 거리를 구한다. 이렇게 선택된 각각의 노드들은 노란색으로 표현되었다. 노란색으로 선택된 경로들을 최종 데이터 전송의 경로로 지정하여 데이터를 송신하게 된다.

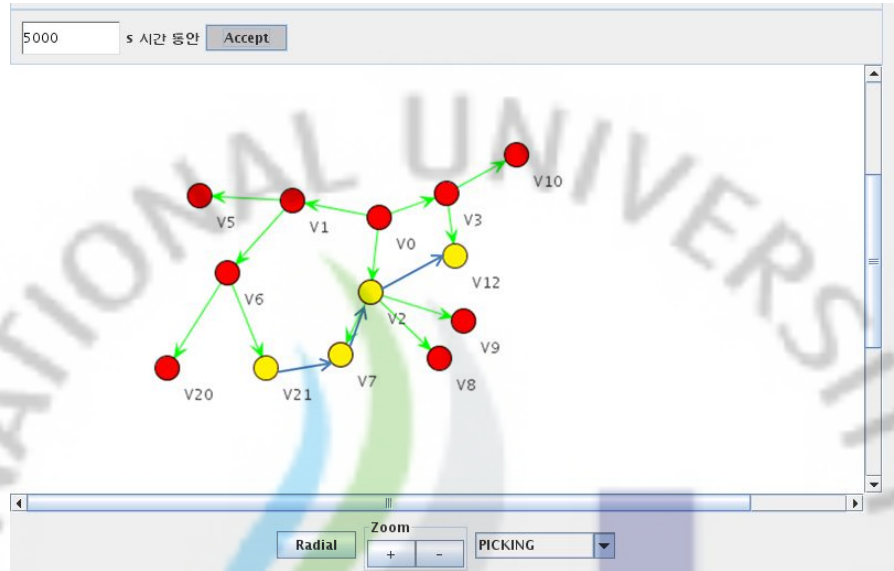


그림 44. 선택 경로의 데이터 전송 경로 구축

## V. 성능 평가

기존 연구에서의 트리 라우팅 방법과 제안한 A-ComHRP 방법에 대하여 몇 가지 상황을 나누어 시뮬레이션을 해 보았으며, 이를 이용하여 성능 평가를 실시하였다.

### 1. 노드 탐색을 위한 경로 설정 단계

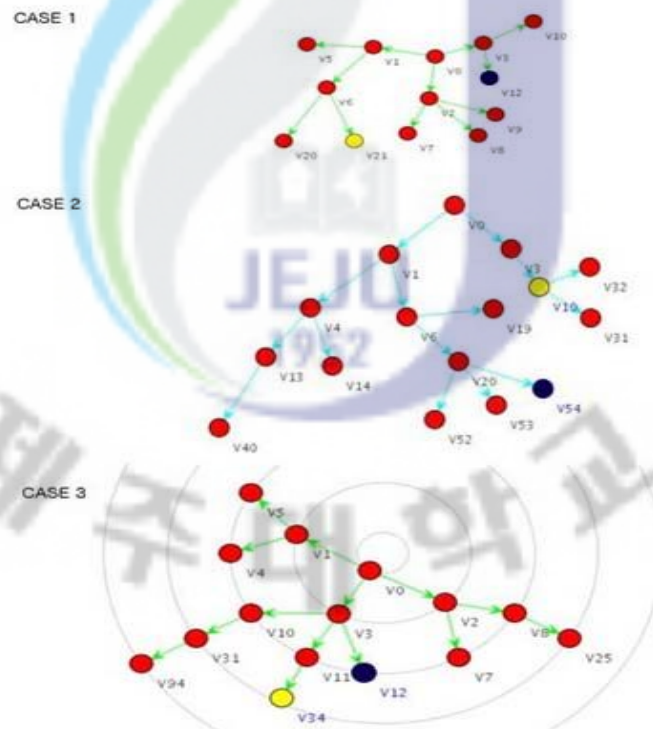


그림 45. 성능 평가를 위한 CASE

노드 탐색을 위한 경로 설정 단계를 평가하기 위하여 그림 45.와 같이 3가지의

경우를 설정하였다. 첫 번째 경우는 네트워크의 깊이의 차가 1이며 싱크 노드를 중심으로 구조가 분산되어 있는 경우를 나타내며, 두 번째 경우는 네트워크 깊이의 차가 2이며 싱크 노드를 중심으로 구조가 분산되어 있는 경우, 마지막 세 번째 경우는 포레스트 트리 구조에서의 네트워크 깊이의 차가 1인 경우를 나타낸다.

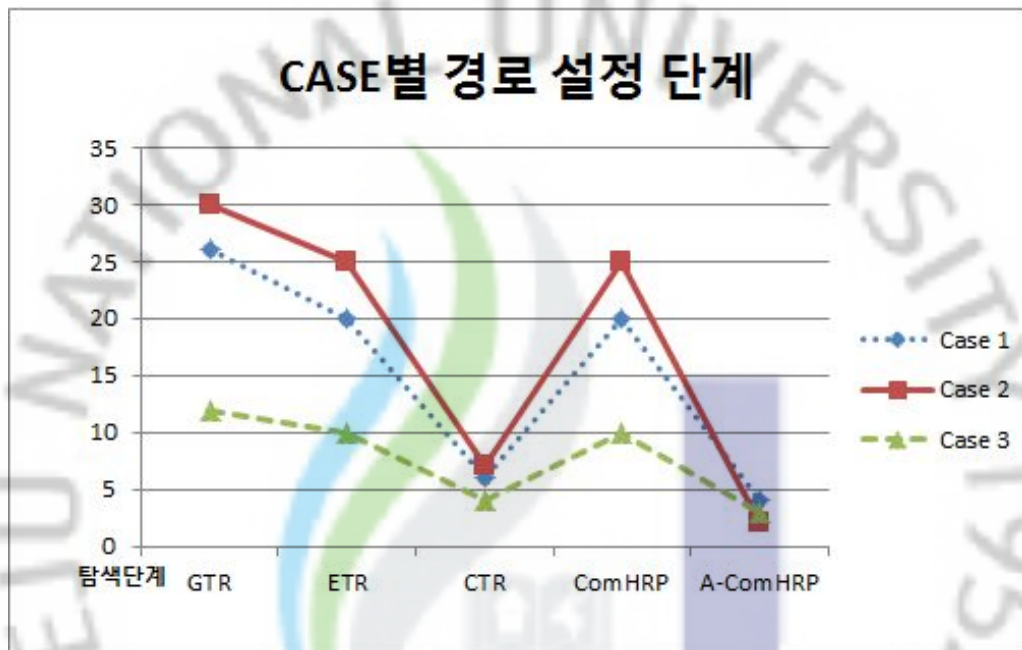


그림 46. 노드 탐색에 따른 경로 설정 단계

그림 46.은 노드 탐색에 따른 경로 설정 단계를 나타내었다.

일반적인 트리 라우팅(GTR)에서는 노드 탐색을 위한 경로 설정 수행 시 자신의 자식 노드 및 상위 노드를 단계별로 모두 거치며 경로 설정을 수행한다. 이에 경로 설정 단계가 가장 길어짐을 볼 수 있다.

엔드 노드를 고려한 트리 라우팅(ETR)에서는 네트워크 구성에서 엔드 노드인 경우는 그 밑으로 경로 설정 패킷을 보내지 않아, 기존의 GTR 방법에 비해 경로 설정 단계가 줄어들음을 나타내고 있다. ComHRP에서 역시, ETR과 마찬가지로 네트워크의 트리 라우팅 경로가 정해져 있을 경우에는 경로 설정 단계가 같음을 알 수 있다.



자식에 대한 노드 정보를 알고 있는 트리 라우팅(CTR)의 경우에는 자식 노드에 대한 ID 정보 및 서브넷을 통한 정보 접근으로 비교적 빠르게 경로 설정을 수행한다. 그러나 각 노드별로 모든 자식노들에 대한 서브넷 테이블을 따로 가지고 있어야 하며, 이에 따른 테이블 조인 및 매핑 연산이 별도로 요구어진다는 단점이 있다.

또한 각 경우에 대해 기존 연구에서는 싱크노드를 중심으로 네트워크 구조가 분산되어 있을 때의 경로 설정은 깊이의 차가 많을수록 경로 설정 단계가 현저히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안하는 A-ComHRP는 노드 탐색을 위한 브로드캐스팅에 따른 반경 안에 존재하는 이웃노드의 응답 패킷을 이용하여 최단 노드 경로를 재설정함으로써, 싱크 노드를 중심으로 분산되어 있는 노드 탐색에서 효율성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

## 2. 각 노드별 탐색에 따른 홉 수

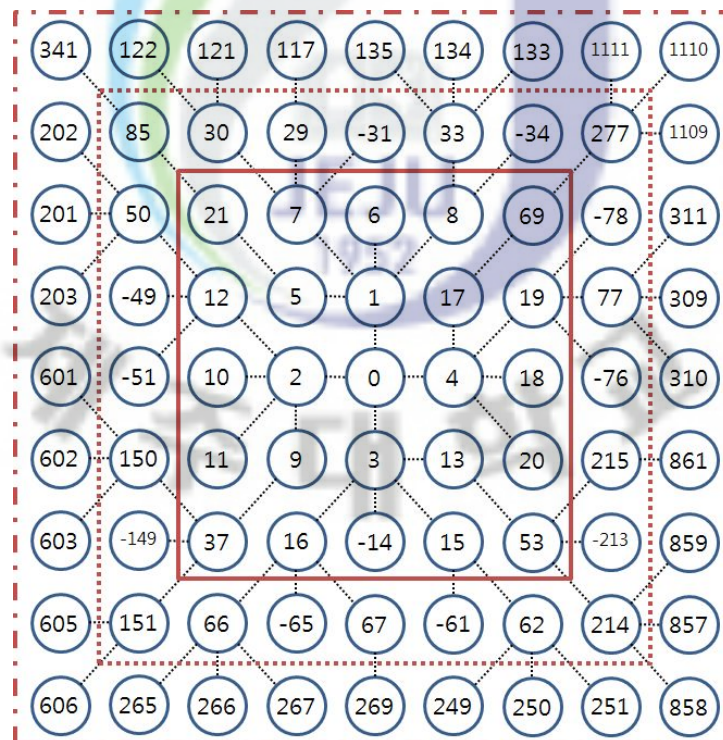


그림 47. 시뮬레이션 모델 (5×5, 7×7, 9×9)

시뮬레이션을 위하여 강문경, 진교홍의 6LowPAN의 계층적 라우팅 기법에서 이웃 노드 리스트를 이용한 Short-cut 라우팅 알고리즘[36]에서 검증한 시뮬레이션 모델을 적용하였다. 그림 47.에서 볼 수 있듯이 각 노드들의 위치는 행과 열로 그리드 형태를 유지하고 있으며, 이에 대한 싱크 노드의 위치는 시뮬레이션을 위한 네트워크 구조의 정중앙에 위치하고 있으며, 주소는 “0”을 나타낸다. 각 노드간의 반경은 대각선 노드까지라고 가정한다. 그림 48.은 구현 시뮬레이터를 이용하여 9×9의 시뮬레이션 모델에 대하여 각 노드에 대한 계층적 구조를 나타낸 것이다.

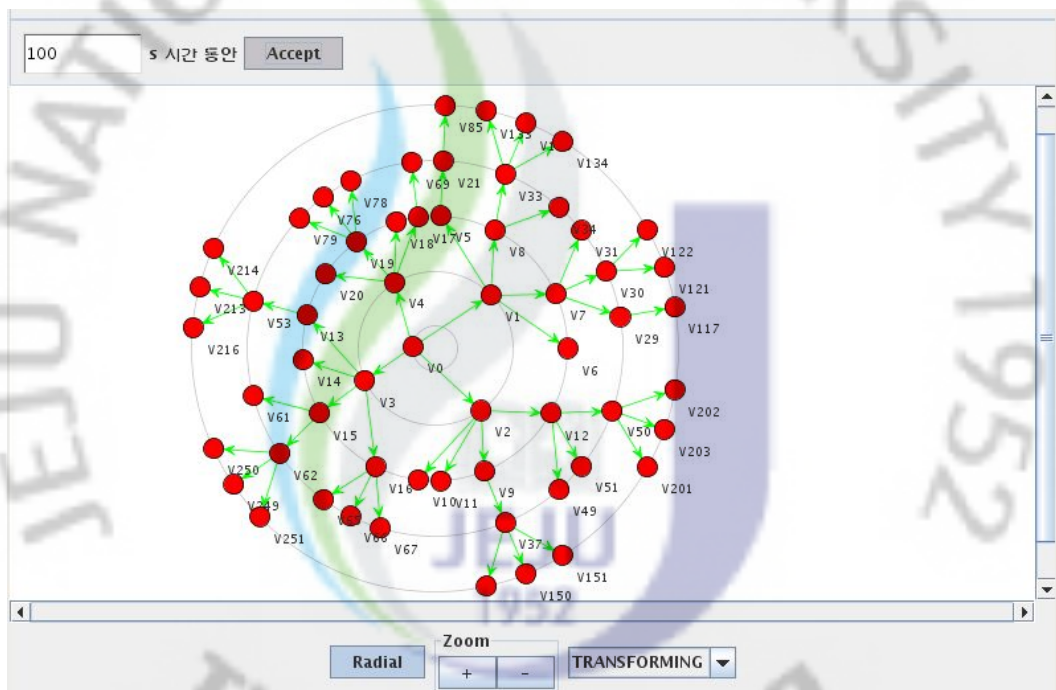


그림 48. 9×9 시뮬레이션 모델에 따른 계층적 구조

시뮬레이션의 시나리오는 각 노드들이 소스 노드와 목적지 노드가 될 모든 경우에 대하여 홉 수를 비교해 보았다.

GTR은 네트워크 구조의 깊이가 증가함에 따라 홉 수와 이를 탐색하기 위한 시간이 너무 많이 소요되어 본 시뮬레이션 시나리오에 적합하지 않다. ETR은 각 노드에 대하여 네트워크 형성 시 실제 동작노드에 대해서만 순차적으로 노드 값을 부여함으로써, 본 시뮬레이션과 같이 비어있는 노드에 대한 구성이 불가능

하다. 그러나 탐색 결과에 따른 노드별 흡 수는 GTR, ETR, CTR, ComHRP가 동일하다. 그림 49.는 시나리오 5×5 모델에서 기존 연구의 노드별 흡 수를 나타내었다.

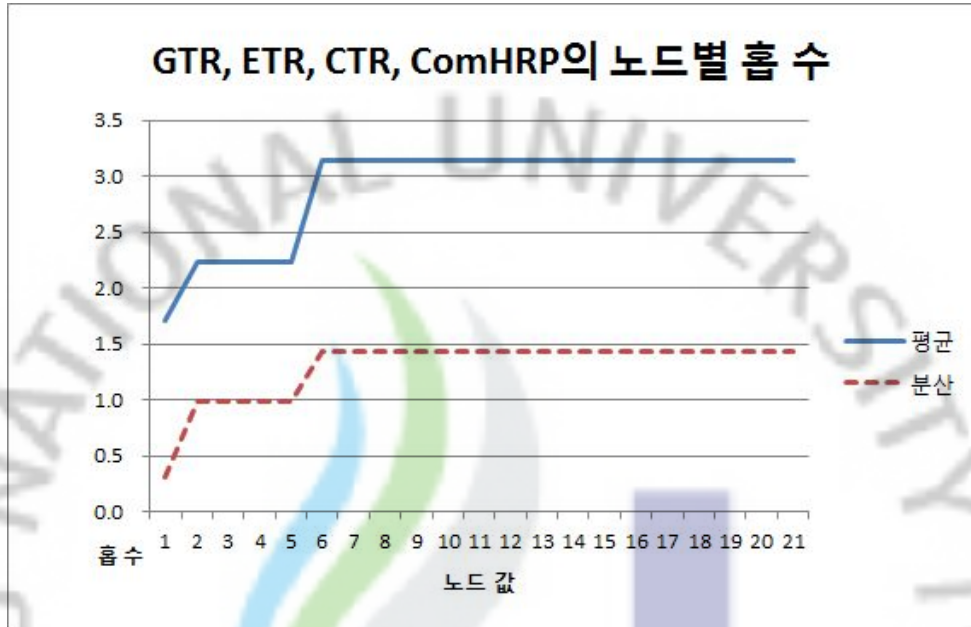


그림 49. GTR, ETR, CTR, ComHRP의 노드별 흡 수

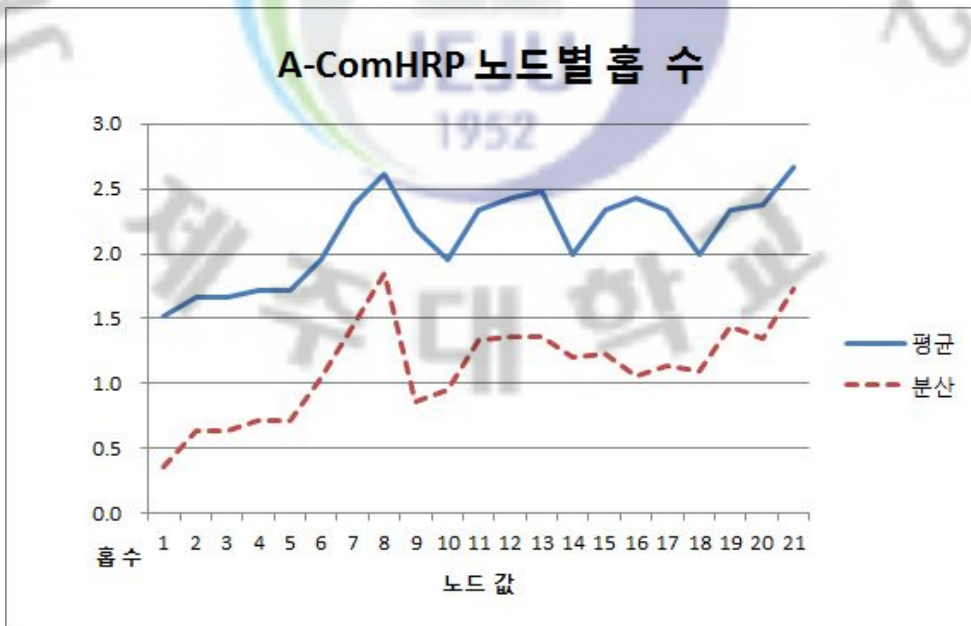


그림 50. A-ComHRP의 노드별 흡 수

그림 49.와 그림 50.은 기존의 계층적 라우팅 알고리즘과 A-ComHRP를 앞에서 제시한 시뮬레이션 모델에 따라 분석한 결과 중 20번 노드까지의 홉의 평균과 분산 값을 나타낸 것이다.

기존의 계층적 라우팅 알고리즘은 네트워크 홉 수에 있어서는 최적의 경로를 찾아 형성된 이후의 홉 수 이므로 경로의 변화가 크게 나타나지 않아 분산 값이 네트워크 깊이에 따라 일정함을 알 수 있다. 그러나 탐색에 따른 평균 홉 수는 5×5 시뮬레이션 모델인 경우 3.277 홉을 나타내었다.

본 논문에서 제안하는 A-ComHRP에서는 네트워크가 형성되어 각 노드에서 목적 노드를 탐색 시 설정된 네트워크에서의 부모와 자식노드를 탐색하는 것이 아니라, 브로드 캐스팅을 통한 반경 내의 이웃노드를 탐색하여 목적 노드와 목적 노드의 부모 노드 값과의 최소가 되는 경로를 찾아, 경로를 설정하게 된다. 이와 같은 방법으로 5×5 시뮬레이션 모델인 경우 탐색에 따른 평균 홉 수는 2.574 홉을 나타내었다. 이는 A-ComHRP가 목적 노드 탐색에 있어서도 21.44%의 효율성이 있음을 나타내는 수치이다.

### 3. 경로 설정에 따른 에너지 소모량

무선 센서 네트워크에서 센서의 가장 큰 에너지소비는 데이터 패킷의 송신과 수신이다. 따라서 본 논문에서는 경로 설정을 수행 시 각 센서 노드들의 에너지 소모량을 측정하였다. first order radio model[19]을 이용하여 에너지 소비 모델을 세웠다.

- 데이터 패킷을 전송할 경우에 센서 노드는 송신기 회로에서  $\epsilon_{elec} = 50\text{nJ} / \text{bit}$ , 증폭기 (amplifier)에서  $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ} / \text{bit} / \text{m}^2$ 의 에너지를 사용한다.

- 데이터 패킷을 수신할 경우에 센서 노드는  $\epsilon_{elec} = 50\text{nJ} / \text{bit}$ 의 에너지를 수신기 회로(receiver circuitry)에서 사용한다.

- 두 노드 사이의 거리가  $d_{ij}$  인 센서 노드  $i$  와  $j$ 가 존재하고, 센서 노드  $i$  에서  $j$  로  $k$ -bit 데이터 패킷이 전송되었을 경우에 센서 노드  $i$  의 에너지 소모는 식 6.과 같다.

$$T_{ij} = \epsilon_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times d_{ij}^2 \times k \quad (\text{식 6})$$

- 센서 노드  $i$  가  $k$ -bit의 데이터 패킷을 수신하였을 경우에 센서 노드  $i$  의 에너지 소모는 식 7.과 같다.

$$R_i = \epsilon_{elec} \times k \quad (\text{식 7})$$

메시지의 전송은 대칭전파 채널(symmetric propagation channel)을 가진다. 즉, 센서 노드  $i$  에서 센서 노드  $j$  로 데이터를 전송할 때 소모되는 에너지는 센서 노드  $j$  에서 센서 노드  $i$  로 데이터를 전송할 때 소모되는 에너지와 동일하다.

그림 51.은 1.절에서 제시한 경로 설정을 위한 평가 CASE를 적용하여 경로 설정에 따른 CASE별 총 에너지 소모량을 나타내었다.

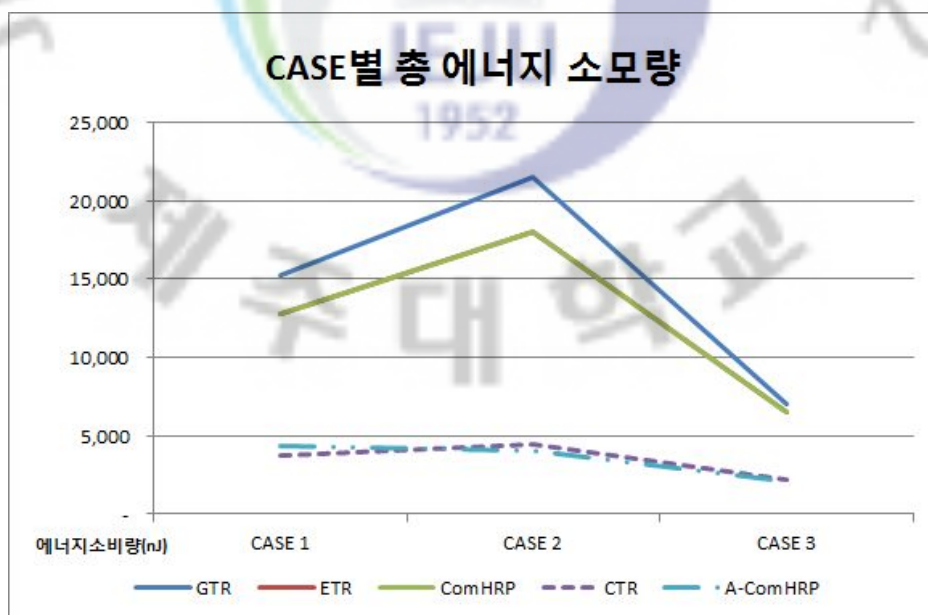


그림 51. CASE별 노드 설정에 따른 총 에너지 소모량



본 논문에서 제시하는 A-ComHRP의 노드 설정 시 에너지 소모량은 GTR 대비 68.1%, ComHRP 대비 65.6%, CTR 대비 0.4%의 에너지 절감을 나타내었다. 결과적으로 최적의 라우팅 경로를 알고 있는 CTR과 노드 설정에 따른 에너지량의 큰 차이가 없음을 나타내었다. 그림 52.는 각 CASE 별로 경로 설정에 따른 노드별 에너지 소모량을 나타내었다.

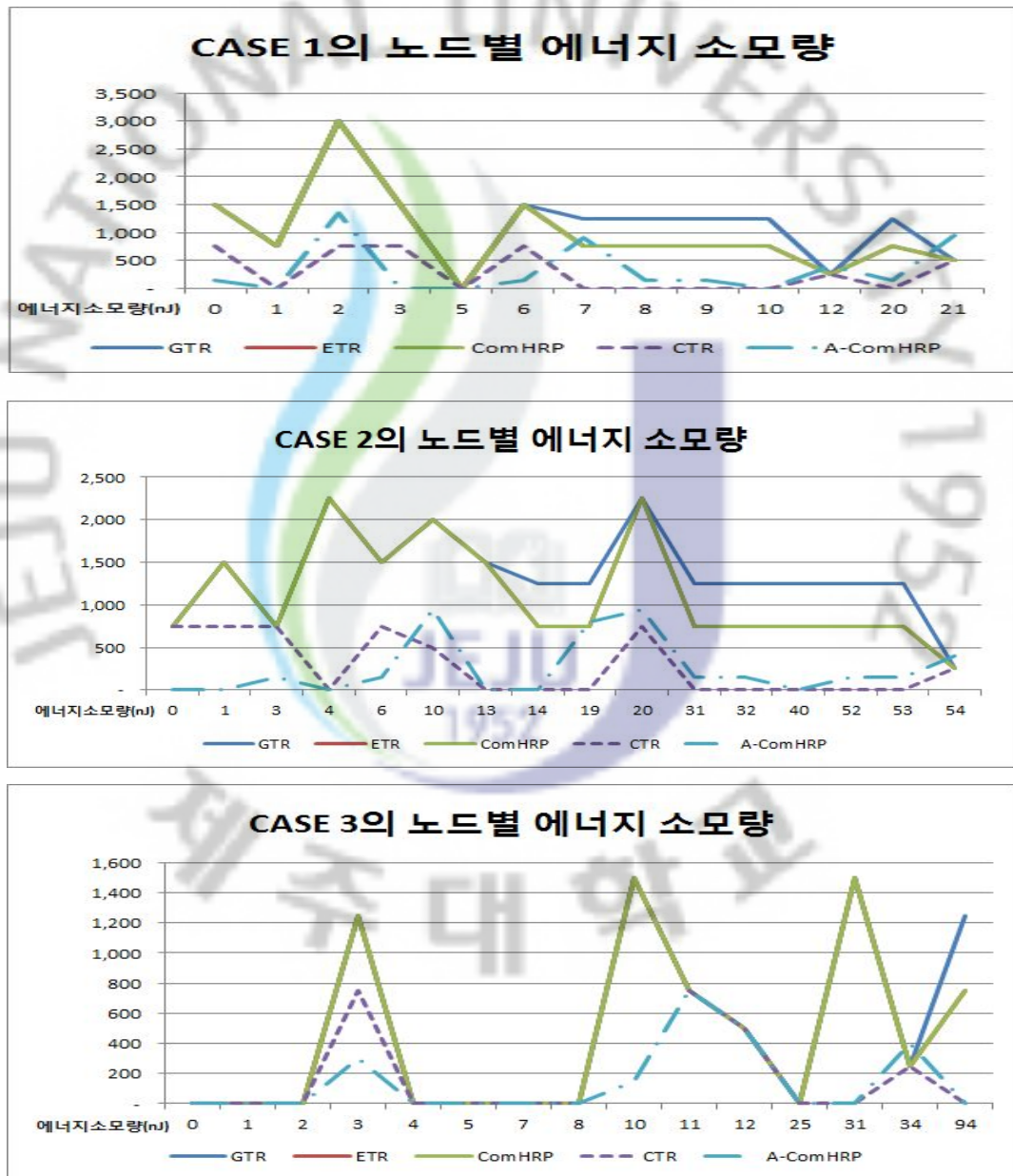


그림 52. 각 CASE의 노드별 에너지 소모량





표 6. 기존 방식과의 비교

비교 항목		GTR	ETR	ComHRP	CTR	A-ComHRP
고정 네트워크	구 성	쉬움	쉬움	쉬움	쉬움	쉬움
	네트워크 복잡도	높음	낮음	낮음	낮음	낮음
	재구성	쉬움	어려움	쉬움	어려움	쉬움
	노드탐색	보통	좋음	좋음	매우좋음	매우좋음
	경로설정	간단	간단	간단	간단	복잡
유동 네트워크	재구성	가능	어려움	가능	가능	가능
	네트워크 복잡도	높음	낮음	낮음	높음	낮음
	노드탐색	보통	나쁨	좋음	매우좋음	매우좋음
	경로설정	간단	어려움	간단	간단	복잡

표 6.에서 나타낸 바와 같이 GTR, ETR, ComHRP, CTR, A-ComHRP의 5가지의 라우팅 방법을 고정 네트워크와 유동 네트워크로 나눠 비교하였다.

고정 네트워크는 초기 센서네트워크상의 유동적 환경을 고려하지 않은 환경을 나타내며, 유동 네트워크는 센서 특성과 환경적 요인에 의해 네트워크 재구성이 빈번히 일어나는 환경을 나타낸다.

GTR은 계층적 라우팅 프로토콜에서의 이상적 환경에서의 최적화된 라우팅 방법으로 네트워크 구성은 쉬우나, 네트워크의 홉이 많아질수록 복잡도 측면에서 복잡하다. 또한 동적인 네트워크에서 네트워크 재구성은 노드의 차수에 따라 모든 노드 값이 고정되어 있어 이상적 환경에서 쉽게 가능하며, 확장성이 보장된다. 그러나 경로 설정 있어서는 설정 방법이 단순하며, 고정된 경로로의 라우팅 동작을 수행한다. 또한 네트워크 홉 수와 노드 차수가 증가할수록 경로 설정을 위한 트래픽의 부하가 증가하게 된다.

ETR은 고정 네트워크에서의 구성은 노드의 순서대로 배정되므로 구성이 쉽고, 자식 노드가 존재하지 않는 End 노드에 대한 처리를 구현함으로써 GTR에 비해 복잡도를 줄였다. 그러나 End 노드에 대한 변화되는 환경에 대한 고려가 없으며, 동적 환경에서의 네트워크 변화를 고려하지 않았다. 이에 빈번하게 바뀌는 노드의 삽입, 삭제에 따라 네트워크 구성을 처음부터 새로이 구성해야 하므로, 재구

성 자체가 어렵다. 또한 경로 설정에 있어서도 처음 할당된 주소로 구성된 고정 네트워크에서의 탐색은 GTR 보다 효율적으로 탐색가능하나, 유동 네트워크를 위한 탐색은 전혀 고려하지 않았다.

ComHRP는 GTR과 ETR의 장단점을 고려하여 계층적 구조를 유지하여, 별도의 라우팅을 위한 테이블을 두지 않고, 노드 값만으로 제어하여 경로를 탐색, 구성함으로써 복잡도를 최소화하였다. 또한 동적인 네트워크 상황에 따른 재구성이 용이하도록 하였다. 그러나 경로 설정에 있어, 기존 계층적 라우팅 방법의 기본 방법을 적용함으로써 인해 경로 설정에 있어 홉 수가 길어질수록 효율성이 저하되는 단점을 나타내었다.

따라서 A-ComHRP는 ComHRP의 단점인 홉 수가 길어질수록 노드 탐색에 있어 효율성이 저하되는 단점을 보완하기 위하여 경로 설정에 있어 반경 내의 인접 노드들에 대해 목적 노드와 목적 노드의 부모노드 값의 차의 최소값을 이용하여 탐색하는 방법을 적용하였다. 이러한 방법으로 경로 설정에서의 평균 홉 수를 줄일 수 있었다. 또한 네트워크 재구성시 자식 노드를 가지고 있는 노드에 대한 효율적 구성을 위하여 마스터/슬레이브 부모 정보를 이용한 네트워크 재구성을 구현함으로써, 최소한의 방법으로 네트워크 재구성이 가능하도록 하였다.

그러나 A-ComHRP는 기존 라우팅 알고리즘에 비해 노드 탐색에 따른 경로 설정이 기존 연구들에 비하여 복잡한 단계를 거치게 된다. 이로 인하여 노드 경로 설정에 따른 지연 시간이 증가하였다. 싱크 노드 중심의 탐색은 기존 탐색과의 지연 시간 차이가 없으나, 소스 노드에서 목적 노드의 경로 설정은 탐색 하는 과정의 계산 처리에 따른 지연 시간이 다소 발생 하였다.

이러한 경로 설정에 따른 지연 시간이 발생하는 것은 본 논문에서 고려하는 전체적인 재구성의 효율성 증가와 노드 탐색시의 단계 및 홉 수가 단축의 효과와 비교하였을 때 큰 영향을 미치지 않는다.

## VI. 결론 및 향후 연구

계층적 라우팅 기법을 이용한 기존의 많은 연구는 고정 센서 네트워크 환경의 네트워크 구축과 경로 설정을 중심으로 연구하였으며, 또한 싱크 노드 중심의 데이터 전송 연구를 주로 진행하였다.

논문에서는 ComHRP를 기반으로 기존 계층적 라우팅 방법에서의 단점들과 ComHRP의 단점을 보완하고 센서 네트워크에서 빈번하게 이루어지는 동적 환경에 대처하기 위한 계층적 라우팅 방법인 A-ComHRP를 제시하고 실험을 통하여 실효성을 보였다.

A-ComHRP는 고정 센서 네트워크에서의 라우팅 구축 및 경로 설정은 물론, 동적인 환경에서의 장애로 인한 빈번한 노드 변화에 적응적으로 네트워크 재구성이 용이하도록 하였다.

A-ComHRP는 노드 간의 경로 설정 시 부모와 자식 노드의 경로를 기준으로 설정하는 것이 아니라, 브로드 캐스팅을 통한 반경 내의 이웃노드를 탐색하여 목적 노드와 목적 노드의 부모 노드 값과의 최소가 되는 경로를 찾아, 경로를 재설정함으로써, 탐색에 따른 경로를 최소화 할 수 있다. 또한 탐색에 노드별 에너지 소모량을 측정해 본 결과 일반적인 계층적 라우팅 프로토콜인 GTR 대비 68.1%, ComHRP 대비 65.6%, CTR 대비 4.4%의 에너지 절감을 나타내었다.

모든 노드간의 탐색 평균 홉에 있어서도 시뮬레이션 결과 ComHRP에서는 5×5 시뮬레이션 모델인 경우 3.277 홉을 나타내었으나 A-ComHRP에서는 5×5 시뮬레이션 모델인 경우 탐색에 따른 평균 홉 수는 2.574 홉을 나타내어 21.44%의 효율성이 있음을 증명하였다.

동적 네트워크에서의 말단 노드에 대한 재구성은 ComHRP와 다르지 않으나, 자식 노드를 가지고 있는 중간 노드의 장애에 의한 재구성은 부모 노드를 다시 탐색할 때 모든 노드에 대해 탐색하지 않고, 원래의 부모 노드를 마스터 부모 노드로 하고, 마스터 부모 노드의 형제 노드들은 슬레이브 부모 노드로 설정하여

슬레이브 부모 노드들을 대상으로 네트워크 재구성을 실시한다. 이를 통하여 네트워크 재구성에 따른 트래픽을 줄일 수 있으며, 마스터 부모 노드의 장애 처리가 완료된 후 이상적인 네트워크 상태를 유지하기 위하여 A-ComHRP는 네트워크 싱크 메시지를 전송할 때, 마스터 부모 노드에게 먼저 보내, 마스터 부모 노드가 장애 복구되었다면 마스터 부모 노드로의 경로를 재설정함으로써 초기의 이상적인 네트워크 상태를 유지하도록 하였다.

본 논문에서는 A-ComHRP를 제시하고 실험을 통하여 기존 연구에 비해 계층적 네트워크의 구성과 노드와 노드의 탐색에 있어서 실효성을 증명하였다.

그러나 A-ComHRP는 동적 네트워크에서의 노드와 경로 설정에 따른 홉의 분산 값이 기존 방법에 비해 크다. 이는 반경 내의 인접노드를 탐색하여 다음 노드를 선택하는 과정에서 예기치 않은 결과에 의해 경로를 우회하여 설정하는 경우가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 탐색 시 목적 노드와 목적 노드의 부모 노드에 대한 거리 차를 구하기 위한 처리 지연 시간이 다소 발생 하였다. 이러한 결과를 보완하기 위한 추가 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] I. F. Alkildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks : A Survey", Computer Networks(Elsevier), 2002.
- [2] D. Estrin, R. Govindan, J. Hedemann, S. Kumar, "Next Century Challenges: scalable Coordination in Sensor Networks", in ACM MOBICOM 99, 1999.
- [3] Clare, Pottie, Agre, "Self-Organizing Distributed Sensor Networks", in SPIE Conference on Unattended Ground Sensor Technologies and Applications", pp. 229-237, 1999.
- [4] J. Mirkovic, G. P. Venkataramani, S. Lu, L. Zhang, "A Self-Organizing Approach to Data forwarding in Large-scale Sensor Networks", IEEE Int'l Conference on Communication, Helsinki, Finland, 2001.
- [5] K. Sohrabi, V. Ailawadhi, J. Gao, G. Pottie, "Protocols for Self Organization of a Wireless Sensor Networks", IEEE personal Communication Magazine, Vol 7, pp 16-27, 2000.
- [6] 김봉수, 황소영, 정훈, 주성순, "유비쿼터스 센서 네트워크 라우팅 기술", 한국 인터넷정보학회, 제 9권, 제 1호, pp13-21.
- [7] K. Akkaya, M. Younis, "A survey of routing protocols in wireless sensor networks", Ad Hoc Network, Elsevier, Vol. 3, pp325-349, 2005.
- [8] C. Intanagonwiat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed Diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks", ACM MOBICOM, 2000.
- [9] W. Heomzeman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks", ACM MOBICOM, 1999.
- [10] F. Ye, A. Chen, L. Zhang, "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks", 10th International Conference on



- Computer Communications and Networks, pp304-309, 2001.
- [11] H. Karl, "Protocols and architectures for wireless sensor Networks", John Wiley & Sons, 2005.
- [12] D. Y. Kim, J. Cho and B. S. Jeong, "A Practical Algorithm for Clustering and Routing in Hierarchical Sensor Networks", IEICE Trans. On Communications. 2007.
- [13] K. Kim, Ed. , J. Park, S. Daniel Pard, Ed. and J. Lee, "Hierarchical Routing Over 6LowPAN", draft-daniel-6lowpan-HiLow-hierarchical-routing-00, 2007.
- [14] 박준성, 김기형, "IP-USN에서 END 노드를 고려한 계층적 라우팅 프로토콜 연구", 한국정보처리학회 춘계학술대회, 제 14권, 제 1호, pp802-805, 2007.
- [15] H. KWON, H.Y Kwak, G.R Park, J.H Kim, "ComHRP: A Hierarchical routing protocol in dynamic sensor networks", Computer and Information Sciences, pp1-3, 2008.
- [16] Zigbee Alliance Web Site, <http://www.zigbee.org>
- [17] Zigbee Alliance, "Zigbee Specification 1.0", [http://www.zigbee.org/en/spec\\_download/download\\_request.asp](http://www.zigbee.org/en/spec_download/download_request.asp)
- [18] 김정희, 권훈, 김도현, 곽호영, 도양희, 김대영 "센서 네트워크와 인터넷 (IPv4/IPv6)과의 동적 주소 연동 방안", 한국해양정보통신학회, 제 10권, 제 8호, pp150-1518, 2006.
- [19] W.R Heinzelman, A.Chandrakasan, H. Balak-rishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", HICSS 2000. pp1-10, 2000.
- [20] A. Mangeshwar and D.P. Agrawal, "TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001.
- [21] Ariti Manjeshwar and Dharma P. Agrawal, "APTEEN:A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in

- Wireless Sensor Networks", IPDPS 2002, pp. 0195b, 2002.
- [22] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, 2001.
- [23] D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks", Mobile Computing. 1994.
- [24] Charles E. Perkins. E. M. Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing"
- [25] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic destination-Sequenced Distance-Vector routing(DSDV) for mobile computers", ACM SIGCOMM, Vol 24, no 4, pp234-244, 1994.
- [26] C.K. Toh, "Ad-Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and System", Prentice Hall PTR, 2002.
- [27] David B. Johnson et al., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", draft-ietf-manet-dsr07.txt, 2002.
- [28] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, and Samir R. Das, "Ad Hoc On-Demand Distance Vector(AODV) Routing", draft-ietf-manet-aodv-12.txt, 2002.
- [29] P. Tsuchiya, "The Landmark Hierarchy : A New Hierarchy for Routing in Very Large Network" ACM SIGCOMM, 1988.
- [30] S. Roy and J.J. Gracia Luna Aceves, "Using Minimal Source Trees for On-Demand Routing in Ad Hoc Networks", IEEE INFOCOM, 2001.
- [31] S. BNasagni, "Distributed Clustering for Ad Hoc Networks", International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. pp.310-315, 1999.
- [32] Z.J Haas and M.R. Pearlman, "The Zone Routing Protocol(ZRP) for Ad hoc Networks", draft-ietf-zone-zrp-04.txt, 1997.
- [33] Y. Yao and J. Gehrke, "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks", ACM SIGMOD record, Vol 31, pp.9-18,

- 2002.
- [34] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang, "A Tow-tire data dissemination model for large-scale wireless sensor networks", ACM MOBICOM, pp148-159, 2002.
- [35] Jamal N. Al-karaki, Ahmed E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey", IEEE Wireless Communications, 2004.
- [36] 강문경, 진교홍, "6LowPAN의 계층적 라우팅 기법에서 이웃 노드 리스트를 이용한 Short-cut 라우팅 알고리즘", 한국항행학회, 제 11권, 제 3호, pp 296-304, 2007.
- [37] 권훈, 김정희, 광호영, "센서 네트워크 재배치를 고려한 계층적 라우팅 프로토콜", 한국해양정보통신학회, 제 12권, 제 6호, pp1113-1119. 2008.