



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

碩士學位論文

제주시 한천 저류지의
비점오염물질 특성 및 저감 효과

濟州大學校 大學院

環境工學科

林 成 錄

2013 年 2 月

제주시 한천 저류지의 비점오염물질 특성 및 저감 효과

指導教授 趙 恩 一

林 成 錄

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013 年 2 月

林 成 錄의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 甘 相 奎 印

委 員 金 鎮 瑾 印

委 員 趙 恩 一 印

濟州大學校 大學院

2013 年 2 月

Characteristics and Reduction Effects of
Non-Point Materials in HanCheon Retention Pond

Seong-Rok Yim
(Supervised by professor Eun-Il Cho)

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

2013 . 2

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Sang-Kyu Kam, Prof. of Environmental Engineeriog

Thesis director, Jin-Keun Kim, Prof. of Environmental Engineeriog

Thesis director, Eun-Il Cho, Prof. of Environmental Engineeriog

February. 2013

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	V
제 I 장 서론	1
제 II 장 이론적 배경	3
1. 비점오염원	3
1) 비점오염원 개요	3
2) 비점오염원의 종류	4
3) 비점오염원저감시설의 종류와 효과	5
2. 저류지	8
1) 저류지 개요	8
2) 저류지 유형 구분	8
3) 저류시설 구성요소	10
4) 제주지역 저류지 현황	11
제 III 장 재료 및 방법	15
1. 연구 대상 지역	15
2. 연구 방법	16
1) 연구기간	16
2) 연구내용	19
3. 분석항목 및 방법	21
1) 침강실험	22
2) 저류지 유입유량 산정 방법	22
3) 한천 유량 산정 방법	23

제 IV 장 연구 결과 및 고찰	27
1. 한천의 수질 특성	27
1) 한천의 비점오염물질 농도변화	27
2) 한천과 병문천, 삼수천의 수질특성 비교	32
2. 한천 제 1저류지 입자성물질의 침강성 평가	36
3. 한천 제 1저류지의 수질 특성	38
4. 한천 저류지 유입유량 산정	41
1) 한천 유량 산정	41
2) 한천 저류지 유입유량	42
5. 한천 저류지의 비점오염물질 저감 효과	45
1) 한천 저류지의 비점오염부하량	45
2) 한천 저류지의 오염물질 저감 효과	46
제 V 장 결 론	49
참고문헌	51
감사의 글	53

List of Table

Table 1. Comparison of non-point pollution sources and point pollution source	4
Table 2. Non-point source pollutants and major sources	5
Table 3. Non-point pollution source technology	6
Table 4. Effects by non-point pollution treatment facility	7
Table 5. The retention ponds facility condition in Jeju city	12
Table 6. The retention ponds facility condition in Seogwipo city	13
Table 7. The retention ponds facility condition in Jeju area since 2007	14
Table 8. Rain event of over 10mm of rainfall for a day	19
Table 9. Location of Rainfall observation station come with in HanCheon basin	25
Table 10. Summary of inflow stormwater runoff data	28
Table 11. Feature analysis of drink water quality of stream flow in HanCheon	31
Table 12. Feature analysis of drink water quality of stream flow in HanCheon(Continue)	32
Table 13. Feature of water quality of stream in HanCheon Retention pond	38
Table 14. Feature of water quality of stream in HanCheon1 Retention pond (Drink water quality criteria)	39
Table 15. Feature of water quality of stream in HanCheon1 Retention pond (Drink water quality criteria)(Continue)	40
Table 16. Total Precipitation Amount of originate in the upper basin(Retention pond) of the HanCheon basin	41
Table 17. The rate of flow of rainfall runoff from the upper basin (Tamna Bridge) of the HanCheon basin	42
Table 18. Inflow runoff volume of HanCheon Retention pond	43
Table 19. Nonpoint Source Pollutant Loads by Event Date	46

List of Figures

Fig. 1. The location of HanCheon Retention pond	16
Fig. 2. The feature of Rainfall from July 1 to September 30, 2012	18
Fig. 3. Location of sampling site	20
Fig. 4. The front sediment view of the inlet of the first HanCheon Retention pond in HanCheon	23
Fig. 5. Thiessen Network in Jeju by Rainfall observation station in Korea	24
Fig. 6. Thiessen Network come within HanCheon basin by Rainfall observation station in Korea	26
Fig. 7. Variation of Flowrate and pollutant concentration at HanCheon	29
Fig. 8. Other facilities condition in HanCheon, ByungMunCheon and SamSuCheon basin	34
Fig. 9. Feature comparison of water quality of stream in Jeju city	35
Fig. 10. Analyse hourly variation of water turbidity in the first HanCheon Retention pond in HanCheon(8/28, 8/30)	37
Fig. 11. The front sediment view of the inlet of the first HanCheon Retention pond in HanCheon	37
Fig. 12. Hourly variation of inflow rate in HanCheon Retention pond	44
Fig. 13. The flow of outflow and pollutant(2012/09/16 ~ 2012/09/17)	48

Summary

The Jeju Special Self-Governing Province established 11 off-line large-scale retention ponds in order to prevent floods after 2007. The reservoirs were mainly designed to prevent floods yet also serve as large-scale settling retention ponds that reduce non-point source pollution and help lower the level of pollutants discharged downstream during rainfall by allowing the pollutants to first settle. The study aimed to examine data collected from a field study on four cases of pollutant leaks that occurred in August and September, 2012, in HanCheon Retention pond, which is one of the 11 off-line retention ponds. The result showed the reduction of SS concentration, turbidity, COD, NH₃-N, NO₃-N, potassium permanganate consumption with 31.7 %, 40.2 %, 80 %, 33.3 %, 25 % and 47 %, respectively, as the outflow of No.1 HanCheon Retention pond flowed to the third section from the first section of the retention pond, indicating that when outflow occurs in the No.1 HanCheon Retention pond, the level of pollutants flowing into the stream can be lowered. Particulate in the retention pond were observed to settle differently depending on several factors such as the location of the retention pond, antecedent precipitation and rainfall intensity; however, they were all immediately settled in the early stage, a phenomenon known as discrete settling. Moreover, the study was conducted in order to calculate pollution load after an inflow into HanCheon1 Retention pond and results showed that BOD, COD, T-N, SS with 266 kg, 4,657 kg, 327 kg, 120,197 kg respectively in 17, September, 2012, and besides in 28, August, 2012 showed that BOD, COD, T-N, SS with 210 kg, 663 kg, 74 kg, 12,037 kg, which means pollution load is proportional to an inflow. In other words, the pollutants being discharged downstream and into the ocean was removed as much as the pollutants being discharged into HanCheon Stream, owing to the retention pond.

Because the reduction rate fluctuates depending on the opening and closing of sluices that are installed in the retention pond, further studies upon this matter should be conducted.

I. 서론

우리나라는 기후변화로 인해 강수의 패턴이 바뀌어 강우일수는 감소하고 강우강도는 증가하여, 집중 호우의 빈도 등이 증가하고 있으며, 산업의 발달과 생활환경의 변화 등으로 불투수성 지역이 늘어나면서 하천과 호소는 점오염원(Point source)에 의한 오염보다 비점오염원(Non-point source)에 의한 오염의 기여도가 커지고 있다. 환경부의 비점오염원종합관리대책에 따르면 2010년 4대강의 비점오염원의 오염부하(BOD 기준)는 전체의 67.4%에 이르며 개발면적 증가, 도시화 지역 확대 등으로 2020년에는 72%로 증가될 전망이다. 그러므로 비점오염원을 관리하는 것이 중요해지고 있으며, 이는 현재 환경부의 주요 관심사이기도 하다.^{1), 2)}

비점오염원은 불특정한 배출경로를 통해 오염물질을 강수와 함께 유출시키므로 비점오염 발생을 최소화하는 가장 바람직한 방법 중의 하나는 강수의 유출량을 저감하는 것이다. 최근 도시화와 더불어 불투수성 면적이 증가함에 따라 우수의 침투면적이 감소하고 우수의 유출량이 증가하는 동시에 단기간에 우수가 유출하는 경향을 보인다. 따라서 우수를 저류 또는 침투시켜 되도록 우수를 천천히 유출시키거나 감소시키는 우수유출억제대책에 대해서 적극적인 검토 및 시설의 도입이 필요하다.³⁾

비점오염물질 저감을 위한 시설에는 자연형 시설과 장치형 시설로 구분되며, 자연형 시설로는 저류시설, 인공습지, 침토시설 등이 있고, 장치형 시설로는 여과형, 와류형, 스크린형 등이 있다. 이런 비점오염물질 저감시설 중 자연형의 저류시설에 해당하는 저류지는 비점오염물질을 줄이는 가장 일반적인 시설로 강우유출수를 저류하여 오염물질을 침전처리하고 하천으로의 유입량을 조절함으로써 홍수 방재기능도 할 수 있는 시설이다.⁴⁾ 제주도에서 2007년 태풍 ‘나리’ 이후 홍수 방재기능을 위해 새로운 저류지 11개를 설치 운영 중에 있다. 하지만 비점오염물질을 저감할 수 있는 저류지를 홍수 방재기능으로만 운영하고 있는 실정으로 저류지 운영에 있어 비점오염물질 저감과 홍수 방재기능 등 효과적인 관리를 위해 현재 운영 관리 중인 저류지를 대상으로 비점오염물질에 대한 저감효과에 관한 연구가 필요하다.

국내에는 비점오염원 저감에 관한 연구는 활발하게 이루어지고 있으며, 비점오염원

저감시설 중 자연형 시설에 관한 연구로 비점오염원 저감을 위한 침투도랑의 저감 효율을 평가한 Marla C. Maniquiz at all(2010)⁵⁾은 침투도랑에서 강우시 유입수와 유출수의 농도 및 유량을 측정하여 총괄적인 저감량과 오염물질 성분 간의 상관관계를 산정하였다. 연구결과 총부유물질에 대한 처리효율이 높고 금속과 영양염류 역시 높은 처리효율을 보였고, 총부유물질과 같은 미립자들은 다른 흡착 성분의 운반자역할을 한다고 하였다. 그리고 이민규(2010)⁶⁾는 침투형 저류지에 의한 비점오염물질의 처리방법에 관한 연구에서 침투형 저류지에 유입수와 유출수의 농도를 측정하여 제거 효율을 측정한 결과 영양 염류와 중금속, 생물화학적물질 등의 저감 효율능력이 우수하다고 하였다. 김동섭(2011)⁷⁾은 농촌지역 비점오염물질의 유출 특성을 저류지로 유입되는 강우유출수의 농도와 유량을 측정하여 연구하였다. 연구 결과 유량과 각 수질 항목사이의 상관관계는 SS와 T-P간의 상관관계가 높았으며, T-P의 유출 특성에 대하여 T-P는 용존성 물질보다는 입자상 물질 또는 토양에 흡착된 형태로 유출된다고 하였다.

제주도에서 저류지에 관한 연구는 오세형(2010)⁸⁾이 3차원 지하수 모델링을 통하여 제주도 한천유역의 홍수조절저류지의 인공함양에 의한 지하수계의 변화와 함양된 지하수의 체류시간을 분석하였다. 문덕철(2011)⁹⁾은 한천 저류지 운영이 하류지역 홍수위험 저감에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 연구 결과 한천 저류지를 운영하여 하천 유출수가 저류지로 유입됨으로써 하류 지역의 수위가 하강하는 효과를 얻는 것으로 분석하였다. 그리고 박원배(2011)¹⁰⁾는 제주지역 저류지의 활용방안으로 공원형 저류지와 생태공원, 농업용수 등 주민의 편익 및 활용을 극대화하는 방향으로 연구를 하였다.

이와 같이 제주도에서는 계속해서 설치되어지는 크고 작은 저류지에 대한 수량과 활용방안에 대한 연구는 많이 이루어졌지만, 수질 측면에서는 연구가 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 제주도의 저류지 중 한천 저류지를 대상으로 연구를 행하여, 저류지로 유입되는 하천수와 인근 하천의 수질 특성을 분석하여 제주도의 비점오염물질의 특성을 파악하고 저류지의 효과적인 관리를 위해 저류지로 유입되는 오염물질의 농도와 유입량을 산정하여 저류지에 의해 해양으로 유출되는 비점오염물질의 저감효과를 평가하였다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 비점오염¹¹⁾

1) 비점오염 개요

비점오염원(非點汚染源)은 점오염원(點汚染源)에 대한 상대적 개념으로서, 농지에 살포된 농약, 축사에서서의 유출물, 도로상 오염물질, 도서지역의 먼지와 쓰레기, 지표상 퇴적오염물질 등이 강우시 빗물과 함께 유출됨에 따라 유발되는 수질오염을 말한다.

일반적으로 점오염원은 오염물질의 유출경로가 명확하여 수집이 쉽고, 계절에 따른 영향이 상대적으로 적은 만큼 연중 발생량 예측이 가능하여 관거 및 처리장 등 처리시설의 설계와 유지/관리가 용이한 반면 비점오염원은 오염물질의 유출 및 배출 경로가 명확하게 구분되지 않아 수집이 어렵고 발생량/배출량이 강수량 등 기상조건에 크게 좌우되기 때문에 처리시설의 설계 및 유지관리가 어렵다.

Table 1. Comparison of non-point pollution sources and point pollution source

Section	Point Pollutant	Non-point Pollutant
Output source	<ul style="list-style-type: none"> - factory, sewage, sewage disposal, farming, stock farmer and etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - ground, rice field, road, Atmosphere fall material and etc.
Character-istic	<ul style="list-style-type: none"> - Artificially - Only discharge function - Exhaust point clearness - Intensive exhaust to specific point - Collection ease, High efficiency - Seasonal change being few 	<ul style="list-style-type: none"> - Artificially and Naturally - Double-faced of exhaust function and purification ability - Exhaust point indefiniteness - Does diffusion to be difficult, effect of the rainfall Receives and the control efficiency does not fix - Seasonal change being serious

2) 비점오염물질의 종류

강우시 도로지역에서 유출되는 강우유출수에는 토사, 영양물질, 박테리아, 오일과 그리스, 협잡물 등과 같은 비점오염물질이 포함되어 인근 수계로 유출되며, 비점오염원의 종류 및 배출원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Non-point source pollutants and major sources

Type	Major source
Sediment	- Construction Sites, Mining Operations, Croplands, Logging Operations, Streambank Erosion, Shoreline Erosion, Grazed Woodland
Nutrients (Fertilizers, Grease, Organic Matter)	- Croplands, Nurseries, Orchards, Livestock Operations, Gardens, Lawns, Forests, Petroleum Storage Areas, Landfills
Acids and Salts	- Irrigated Lands, Mining Operations, Urban Runoff, Roads, Parking Lots, Landfills
Heavy Metals (Lead, Mercury, Zinc)	- Mining Operations, Vehicle Emissions, Urban Runoff, Roads, Parking Lots, Landfills
Toxic Chemicals (Pesticides, Organic, Inorganic Compounds)	- Croplands, Nurseries, Orchards, Building Sites, Gardens, Lawns, Landfills
Pathogens (Bacteria, Viruses)	- Domestic Sewage, Livestock Waste, Landfills

3) 비점오염저감시설의 종류와 효과

비점오염 저감을 위한 강우유출수 관리시설에는 크게 자연형 시설과 장치형 시설로 구분할 수 있다. 자연형 시설로는 저류시설, 인공습지, 침투시설, 식생형 시설 등이 있으며, 장치형 시설로는 여과형, 와류형, 스크린형, 응집침전처리형, 생물학적 처리형 등이 있다. 이 중 강우유출수 저류시설 및 침투시설은 비점오염원의 저감뿐만 아니라 홍수 방재를 위한 우수유출저감도 포함한다. 대부분의 비점오염원 유출은 강우유출과 동시에 진행되기 때문에 강우유출량이 저감될수록 비점오염원 저감양도 증가하므로 대부분의 비점오염원 저감시설과 강우유출억제 시설은 기본적으로 비슷한 구조를 가지고 있다.

Table 3. Non-point pollution source technology

Type	Non-point pollution source reduction technology
Natural Type	- Detention type, Constructed wetlands, Infiltration type, Vegetation type
Device Type	- Filtration type, Vortex type, Screen type, Coagulation·Precipitation treatment, Biological treatment

(1) 자연형

- ① 저류시설 : 강우유출수를 저류하여 침전 등에 의하여 비점오염물질을 저감하는 시설로 저류지·연못 등을 포함한다.
- ② 인공습지 : 침전, 여과, 흡착, 미생물 분해, 식생식물에 의한 정화 등 자연상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 비점오염물질을 저감하는 시설을 말한다.
- ③ 침투시설 : 강우유출수를 지하로 침투시켜 토양의 여과·흡착 작용에 따라 비점오염물질을 저감 하는 시설로서 유공포장, 침투조, 침투저류지, 침투도랑 등이 포함된다.
- ④ 식생형시설 : 토양의 여과·흡착 및 식물의 흡착작용으로 비점오염물질을 저감함과 동시에, 동·식물 서식공간을 제공하면서 녹지경관으로 기능하는 시설로서 식생여과대, 식생수로 등이 포함된다.

(2) 장치형

- ① 스크린형 시설 : 망의 여과·분리 작용으로 비교적 큰 부유물이나 쓰레기 등을 제거하는 시설로서 주로 전처리에 사용하는 시설을 말한다.
- ② 여과형 시설 : 강우유출수를 집수조 등에서 모은 후 모래·토양 등의 여과재를 통하여 걸러 비점오염물질을 저감하는 시설을 말한다.
- ③ 와류형 시설 : 중앙회전로의 움직임으로 와류가 형성되어 기름·그리스(grease) 등 부유성물질은 상부로 부상시키고, 침전 가능한 토사, 협착물은 하부로 침전·분리시켜 비점오염물질을 저감하는 시설을 말한다.
- ④ 응집·침전 처리형 시설 : 응집제를 사용하여 비점오염물질을 응집한 후, 침강시설에서 고형물질 침전·분리시키는 방법으로 부유물질을 제거하는 시설을 말한다.

다.

- ⑤ 생물학적 처리형 시설 : 전처리시설에서 토사 및 협작물 등을 제거한 후 미생물에 의하여 콜로이드(colloid)성, 용존성 유기물질을 제거하는 시설을 말한다.

비점오염원 저감과 강우유출량을 동시에 저감할 수 있는 시설은 다음과 같이 수질 개선, 수량개선, 친수개선, 홍수방지 등의 다양한 효과가 있다.

Table 4. Effects by non-point pollution treatment facility

Section	Effect
Water quality improvement	- Decrement of water pollution of public waters
	- Reduction of sewerage facility charge
	- Security of rivers maintenance water and dry stream prevention water
Close water improvement	- Formation of city view
	- Demobilization of natural ecosystem
	- City line island reconciliation relaxation
Water quantity improvement	- Recreation
	- Recovery of rivers normal flow
	- Security of other water
Water operation improvement	- Security of ground water
	- Security of fire fighting water
	- Water circulation functional improvement
	- Salt infiltration prevention
Flood prevention	- Vegetation drying dead prevention
	- Ground sinkage prevention
	- Reduction of city flood damage
	- Peak discharge decrement

2. 저류지

1) 저류지 개요

비점오염물질을 줄이는 가장 일반적인 시설로서 저류지는 강우유출수를 저류하여 오염물질을 침전처리하고 하천으로의 유입량을 조절함으로써 홍수 방재기능도 할 수 있다. 개발사업지구 내 계획적으로 적용 가능한 시설에는 우수지, 저류시설, 저류지, 저수지, 소류지 등이 있다.

- (1) 우수지(遊水池) : 집중강우로 인하여 급증하는 제내지의 내수 또는 지반고가 낮은 저지대의 배수량을 하천에 조절 배제할 목적으로 일시 저류시키기 위하여 설치하는 시설을 말한다.
- (2) 저류시설(貯流施設) : 「도시계획시설의 결정·구조 및 설치기준에 관한 규칙」 제119조 및 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 의하면 “저류시설이란 빗물을 일시적으로 모아 두었다가 바깥 수위가 낮아진 후에 방류하기 위하여 설치하는 유입시설, 저류지, 방류시설 등 일체의 시설”을 말한다.
- (3) 저수지(貯水池) : 발전용수, 생활용수, 공업용수, 농업용수 또는 하천유지용수의 공급이나 홍수조절을 위한 댐, 제방과 일체가 되어 그 효율을 높이는 시설 또는 공작물과 공유수면을 말한다.
- (4) 저류지(貯流池) : 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 의하면 유입시설, 방류시설과 함께 저류시설의 구성요소로서 빗물을 가두어 두는 공간이다. 그러나 저류지에 대한 정의를 내린 연구는 거의 없으며, 이순탁 등(2003)은 저류지 정의를 “하천유역에 대규모 개발이 이루어질 경우 개발에 따른 홍수유출량의 증가에 의한 수해의 위험성을 방지함과 동시에 하천의 천수 안전도 향상을 주목적으로 자연재해대책법에 의거 설치하는 시설”로 정의하였다.¹²⁾

2) 저류지 유형 구분

통상 유역의 말단에 설치되어 유역으로부터 유입된 우수를 조절할 목적으로 설치되는 지역 외 저류(Off-site)와 물을 일시적으로 저류시켜 유출을 억제하는 지역 내 저류(On-site)로 나눌 수 있다.

(1) 지역 내 저류(On-site)

- ① 저류기능이 해당 지역 내에서 수행되는 경우를 지역 내 저류(On-site)라 한다.
- ② 지역 내 저류시설을 도시 유역 내에 내린 강우가 우수관거, 우수지 및 하천으로 유입되기 전에 물을 일시적으로 저류시켜 유출을 억제하는 시설이다. 강우 시에 우수의 이동을 최소한으로 억제하고 비가 내린 그 지역에서 우수를 저류하는 방식이다.
- ③ 지역 내 저류유형은 조성위치에 따라 다양하나 주차장, 교정, 공원 등에서 많이 사용되고 있다.

(2) 지역 외 저류(Off-site)

- ① 우수가 흘러 해당지역 외의 중하류부에서 처리되는 경우를 지역 외 저류(Off-site)라 한다.
- ② 지역 외 저류의 개념은 통상 유역의 말단부에 설치되어 유역으로부터 유입된 우수를 조절할 목적으로 설치된 시설이다.
- ③ 지역 외 저류의 장점은 우수유출량을 일괄적으로 처리하기 때문에 저류 가능량이 높고, 배수계획상의 신뢰성이나 안전도가 높은 유출억제방법이다.
- ④ 지역 외 저류지는 하천본류에 시설을 설치하는 형태로서 상시저류가 가능한 하도 내 저류(On-line or On stream system)와 본류에서 허용방류량을 초과하는 홍수량을 횡월류제를 통하여 월류시키는 하도 외 저류(Off-line or Off stream system)로 구분된다.
- ⑤ On-line형 저류지
 - 유역으로부터의 모든 유출수를 전량 저류지로 유입시킨 후 오리피스 등에 의해 허용방류량 이하로 유하하여 조절하는 형태
 - 배수로의 수위와 저류지의 수위가 일체로 작용하는 형태로서 유출량을 지구내 저류에서 일시 저류하여 하류부의 홍수유출을 억제하는 방법
 - On-line형 저류지의 구조는 구릉지역에서 계곡부에 댐을 축조하고 평탄부 지반을 굴착하여 저류하는 방식
- ⑥ Off-line형 저류지
 - 도시개발로 증가된 홍수량이 하류하천의 허용 방수량 이하인 경우는 그대로 유하하고, 허용방류량을 초과하는 홍수량을 횡월류제를 통하여 저류지로 저류되었다가

하류하천의 홍수위가 저하되면 방류구를 통하여 다시 유하하여 하류하천의 범람을 제어하는 방식

3) 저류시설 구성요소

저류시설의 구성은 유입시설, 저류지, 방류시설로 구성되며, 저류지는 바닥, 비탈면(측면), 제방상단으로 구분할 수 있다.

(1) 유입시설

- ① 유입시설은 강우 시 저류지 내로 빗물이 들어오도록 유도하는 시설로서 하도 내 저류의 경우는 주로 박스나 관로로 유입되므로 폭포나 수로 등으로 자연스럽게 유하할 수 있도록 처리하는 경우가 많다.
- ② 하도 외 저류 형태의 경우는 일반적으로 보(weir) 형태로 이루어지며 유입 단면은 개발 전 침투 유량보다 높은 유량 이상의 유출수가 흐르는 지속 시간 내에 저류지로 유입이 가능하도록 횡월류 방식을 채택하고 있다.

(2) 저류지

- ① 빗물을 일시적 또는 상시 담고 있는 공간으로 저류지 바닥의 형태 및 구조에 따라 공간 활용이 달라질 수 있다.
 - 하도 내 저류인 경우 강우 시 우수의 유입이 존재하여 토지활용에 제약이 따른다.
 - 하도 외 저류의 경우에는 설계빈도 이상의 경우에만 침수되므로 운동 공간 및 휴게 공간 등의 적극적 도입이 가능한 장점이 있다.
- ② 저류지 사면은 저류용량 확보를 위해 보강토 옹벽 등의 수직벽으로 조성되기도 하고 자연석 쌓기나 호안블럭, 혹은 잔디식재 등으로 비탈면을 처리하기도 한다.
 - 제주지역은 저류용량 확보를 위해 대부분 자연석으로 수직 쌓기로 조성하고 있다.
 - 주변지형과 조화되고 인위적인 형태가 아닌 자연형 소재를 이용하여 주민편의를 고려하여 저류지 사면을 조성할 필요가 있다.
- ③ 제방 상단부분은 침수피해를 받지 않는 곳으로 저류지 관리 시설과 주민편의를 위한 공간으로 활용이 가능하다.

(3) 방류시설

저류지내 저류된 유출수는 하도 수위가 안정되면 하류로 유출수를 내보내는 시설로서 일반적으로 박스나 관로로 연결되어 있다. 그러나 제주도와 같이 투수성이 좋

은 지역은 저류지 바닥을 통해 유출수가 지하로 침투되기도 한다.

4) 제주지역 저류지 현황

제주도에는 2011년 기준 총 62개소의 저류지가 설치 운영 중에 있다. 총 규모는 689,220 m²이며, 총 저류용량은 2,625,424 m³이다. 이 중 35개소는 제주시에 설치되어 있으며(Table 5), 27개소는 서귀포시 지역에 설치되어 있다(Table 6). 제주도에서는 2004년 처음으로 구좌읍 지역을 중심으로 소규모의 저류지가 설치되었으며, 2007년 9월 제주지역에 태풍(제11호) '나리'의 내습으로 1,000년 이상 빈도에 해당되는 사상 유례없는 집중호우(9월 16일 하루 동안 한라산 윗세오름에 563.5 mm, 제주시에 420 mm, 서귀포시에는 265.5 mm)로 하천이 범람하면서 많은 인명과 재산피해(인명피해 : 사망 13명, 부상 1명, 재산피해 : 872억 원)가 발생함에 따라 집중호우 시 도심지 하천 범람 예방으로 인한 인명과 재산 피해를 방지하는 것을 주목적으로 하여 Table 7과 같은 대규모의 Off-Line 저류지를 건설하게 되었다.¹⁰⁾

Table 5. The Retention ponds facility condition in Jeju city

No.	Position	Year	Area(m ²)	Volume(m ³)
1	1384-3, Odeung-dong	2010	111,129	472,000
2	1834-12, Odeung-dong	2009	66,249	459,000
3	742, Odeung-dong	2009	7,073	46,000
4	1837-6, Odeung-dong	2009	64,000	293,000
5	San 107, Odeung-dong	2009	31,796	139,0000
6	2870, Ara 1-dong	2009	8,000	24,000
7	402, Hoecheon-dong	2010	2,150	6,290
8	401, Hoecheon-dong	2009	5,100	14,800
9	176, Bonggae-dong	2010	7,240	23,680
10	2548, Hoecheon-dong	2009	2,990	10,500
11	2092, Hoecheon-dong	2010	5,000	13,000
12	2974, Ara 1-dong	2011	11,640	24,000
13	2426, Ara 2-dong	2009	6,860	26,000
14	57, Odeung-dong	2009	10,145	46,000
15	1959, Ara 1-dong	2009	5,249	2,000
16	4057, Bongseong-ri, Aewol-eup	2009	6,505	20,000
17	2149-1, Panpo-ri, Hangyeong-myeon	2010	3,100	11,000
18	287, Nakcheon-ri, Hangyeong-myeon	2010	12,660	44,000
19	1432, Cheongsu-ri, Hangyeong-myeon	2010	1,270	4,500
20	2535, Cheongsu-ri, Hangyeong-myeon	2010	6,368	25,000
21	San 19, Wollyeong-ri, Hallim-eup	2008	13,353	30,000
22	4125, Sangdae-ri, Hallim-eup	2010	2,400	4,000
23	37, Handong-ri, Gujwa-eup	2004	13,336	25,000
24	326-1, Handong-ri, Gujwa-eup	2005	5,000	5,000
25	1039-2, Handong-ri, Gujwa-eup	2007	9,796	20,000
26	1766, Handong-ri, Gujwa-eup	2006	1,500	3,000
27	2470-2, Handong-ri, Gujwa-eup	2004	5,000	5,000
28	3344, Handong-ri, Gujwa-eup	2005	1,500	1,500
29	2132-1, Hado-ri, Gujwa-eup	2005	4,701	15,000
30	1130-4, Hado-ri, Gujwa-eup	2010	4,923	13,000
31	1637-1, Sehwa-ri, Gujwa-eup	2004	1,800	2,000
32	157-12, Deokcheon-ri, Gujwa-eup	2009	8,519	15,000
33	3597, Sinchon-ri, Jocheon-eup	2010	6,450	20,000
34	1581, Bukchon-ri, Jocheon-eup	2010	2,514	9,000
35	151, Hwabuk 2-dong	2010	6,760	37,900

Table 6. The Retention ponds facility condition in Seogwipo city

No.	Position	Year	Area(m ²)	Volume(m ³)
1	1126, Hacheon-ri, Pyoseon-myeon	2010	32,663	56,589
2	1930-1, Nansan-ri, Seongsan-eup	2010	2,593	6,999
3	828-12, Nansan-ri, Seongsan-eup	2010	2,761	5,832
4	831-2, Nansan-ri, Seongsan-eup	2010	4,300	8,400
5	3193, Susan-ri, Seongsan-eup	2007	12,200	61,000
6	2510-8, Susan-ri, Seongsan-eup	2007	3,240	17,820
7	354, Susan-ri, Seongsan-eup	2006	5,600	22,400
8	2608-1, Onpyeong-ri, Seongsan-eup	2010	6,983	15,210
9	2478-1, Onpyeong-ri, Seongsan-eup	2010	9,643	21,130
10	1304-2, Sinsan-ri, Seongsan-eup	2010	964	2,410
11	96-3, Sincheon-ri, Seongsan-eup	2010	7,599	16,650
12	581, Sincheon-ri, Seongsan-eup	2010	16,040	40,000
13	1959-1, Goseong-ri, Seongsan-eup	2009	30,300	109,080
14	2062-6, Goseong-ri, Seongsan-eup	2010	2,870	9,720
15	1595-1, Goseong-ri, Seongsan-eup	2010	2,860	9,720
16	1357-48, Hannam-ri, Namwon-eup	2010	5,472	12,960
17	1207-2, Wimi-ri, Namwon-eup	2010	3,157	11,478
18	961-3, Hannam-ri, Namwon-eup	2010	8,194	32,776
19	485-2, Hannam-ri, Namwon-eup	2010	2,780	9,730
20	1500-1, Dong-il-ri, Daejeong-eup	2006	33,107	84,350
21	1690, Dong-il-ri, Daejeong-eup	2006	560	820
22	1444, Boseong-ri, Daejeong-eup	2006	400	750
23	328, Ilgwa-ri, Daejeong-eup	2006	1,683	4,290
24	1260, Sinpyeong-ri, Daejeong-eup	2006	3,407	6,160
25	470, Sinpyeong-ri, Daejeong-eup	2006	3217	5,500
26	456, Sinpyeong-ri, Daejeong-eup	2006	369	480
27	365, Yeongrak-ri, Daejeong-eup	2010	24,182	144,000

Table 7. The Retention ponds facility condition in Jeju area since 2007

Stream	Total		Phase 1('08-'09)		Phase 2('09-'10)	
	Unit	Volume (1,000m ³)	Unit	Volume (1,000m ³)	Unit	Volume (1,000m ³)
Total	11	1,607	7	742	4	865
Hancheon	2	931	1	459	1	472
Byeongmuncheon	4	554	2	185	2	369
Sanjicheon	3	74	3	74	-	-
Dogsacheon	2	48	1	24	1	24

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 연구 대상 지역

제주도는 연평균 강수량이 1,975 mm에 달하는 다우지역임에도 불구하고 투수성이 좋은 다공질 화산암류 및 화산회토로 이루어져 있어 강수량이 40~50 mm 이상일 때만 홍수유출이 발생한다.⁷⁾ 제주도의 하천은 한라산 백록담을 중심으로 남·북사면에 발달해 있어 경사가 급할 뿐만 아니라, 20 km 미만의 짧은 연장으로 인하여 유출지속시간이 짧은 특성을 갖고 있다. 이 때문에 본 연구를 수행하기 위하여 한천 저류지를 선정하여 한천 저류지로 유입되는 강우유출수의 현황(유역 특성, 기상 특성, 유출 특성 등)을 수집 및 조사·분석하였다.

한천은 한라산(EL. 1,950 m) 정상부에서 발원하여 탐라교육원 동쪽 부근~오라컨트리 골프장~용담동 해안으로 유하하는 하천(유역면적 35.0 km², 최대유하거리 19.95 km, 유역 평균 폭 1.75 km, 형상계수 0.09, 평균고도 704.19 m, 5차수)으로 집중호우시에만 홍수유출이 발생하고, 평상시에는 건천인 상태를 유지하고 있다.¹³⁾

한천 저류지는 2007년 태풍 ‘나리’의 내습 이후 건설된 대규모 Off-Line 저류지로 제주도에서 규모가 가장 크며, 저류되어 있는 유출수를 지하로 인공 함양 시킬 수 있는 시설이 설치되어 있는 특징이 있다. 그리고 한천 저류지는 상류 유역에 학교 및 교육시설이 있고, 대규모 골프장이 입지해 있어 비점오염물질의 유입에 취약할 것으로 사료되는 지역이다. 따라서 한천 저류지를 대상으로 한천 저류지로 유입되는 비점오염물질의 특성과 한천 저류지의 비점오염물질 저감 효과에 대하여 연구를 실시하였다.

한천 저류지는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 하천 하류에서부터 제 1저류지와 제 2저류지로 건설되었으며, 각 저류지에는 1지, 2지, 3지로 나뉘어져 있다.

1지에는 위어(Weir)가 설치되어 위어를 통해 하천 유출수가 유입되고 만수(滿水)시 2지를 거쳐 3지로 흘러 들어가게 되어 있으며, 3지에는 유출부와 저류지로 유입

된 강우유출수를 지하로 함양시키는 인공함양정이 설치되어 있다. 저류지의 면적은 제 1저류지는 77,550 m²이며 제 2저류지는 43,110 m²이고, 저류용량은 각각 472,000 m³, 453,000 m³이다.

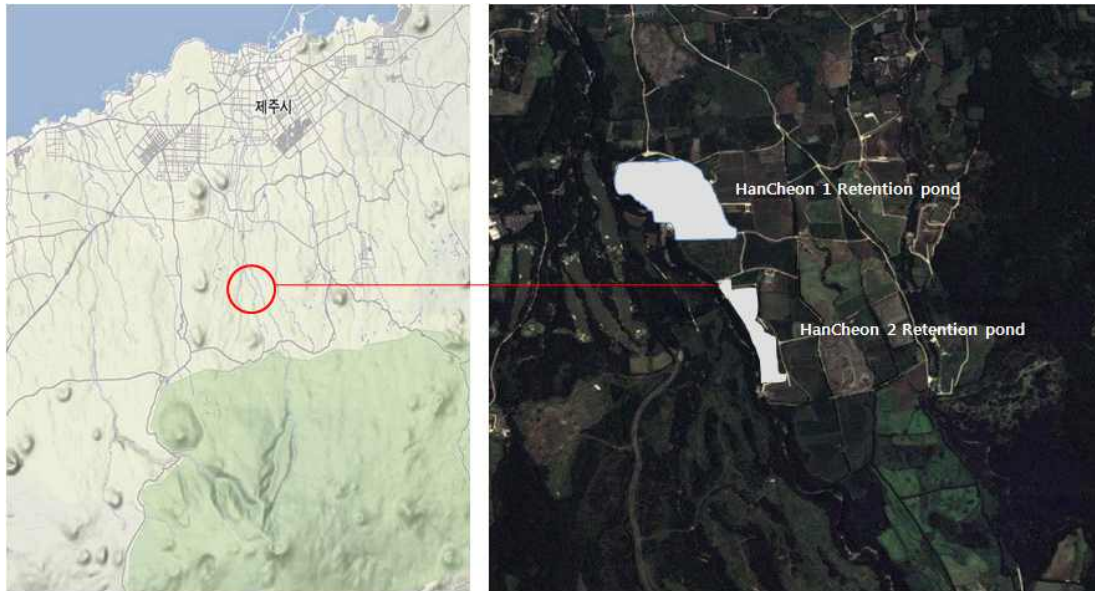


Fig. 1. The location of HanCheon Retention pond.

2. 연구방법

1) 연구기간

본 연구기간은 집중호우가 많이 발생하는 하계와 추계를 대상으로 2012년 7월부터 9월말까지 강우사건에 대하여 조사한 결과 Fig. 2에 나타내었다. 이 기간 동안 총 강수일은 41일이며, 1일 강수량 10 mm 이상의 강우사상을 나타낸 날은 19일에 불과하다. 1일 강수량 10 mm 이상의 강우사상을 나타낸 날은 Table 8에 나타내었다. Table 8에는 무강우일수(Antecedent dry day, ADD), 총 강수량, 강우 지속 시간, 평균 강우 강도를 나타내었다. 무강우일수는 0일에서 19일까지이며, 총 강수량의 규모는 10.1 mm - 206.0 mm로 총 강수량의 편차가 크게 나타났다. 뿐만 아니라 강우 지속 시간이 4.15 시간에서 22.88 시간으로 장기간에 걸쳐 내렸으며, 그 기간 강우 강도는 1.15 mm/h에서 14.21 mm/h였다.

강우 특성 조사 기간 10 mm 이상의 강우가 내린 19일 중 제주도 지질 특성상 강우유출수 발생일은 7일이며, 태풍이 발생한 8월 28일(태풍 15호 볼라벤), 8월 29일(태풍 14호 덴빈), 9월 16일(태풍 16호 산바) 집중적으로 많은 양의 강우가 발생하였다. 그래서 무강우일수는 0일에서 19일까지 다양했으며, 현장 조사가 있었던 8월 23일부터 9월 17일 사이에 12일이 10 mm 이상 강우가 발생하였다.

따라서 본 연구의 조사는 총 4건으로 8월 24일, 8월 28일, 8월 30일, 9월 17일 이루어 졌으며, 4건 모두 한천 저류지로 강우유출수가 유입되었다.

처음 조사를 나갔던 8월 24일의 강우유출수는 8월 23일부터 8월 24일 있었던 강우의 유출수로 무강우일수는 19일이었다. 이틀간 내렸던 제주지역의 총강우량은 192 mm였으며, 강우지속시간은 29.27 시간, 강우강도는 6.56 mm/hr 였다.

두 번째 조사인 8월 28일에는 15호 태풍 ‘볼라벤’의 영향으로 8월 27일 저녁에 시작되어 28일 오전까지 지속된 강우의 유출수로 ADD는 2일이며, 제주지역에 내린 총강우량은 305.9 mm, 강우지속시간은 24.86시간으로 강우강도가 12.31 mm/hr로 조사되었다.

세 번째인 8월 30일은 29일 저녁부터 시작되어 30일 오후까지 지속된 강우의 유출수로 ADD는 0일이며, 제주지역에 내린 총강우량은 51.8 mm, 강우지속시간은 15.91 시간, 강우강도는 3.26 mm/hr로 조사되었다.

마지막 조사는 9월 17일 제 16호 태풍 ‘산바’의 영향으로 9월 16일부터 17일까지 제주지역의 총강우량은 399.2 mm, 강우지속시간은 40.68시간, 강우강도는 9.81 mm/hr로 많은 비가 내렸다.

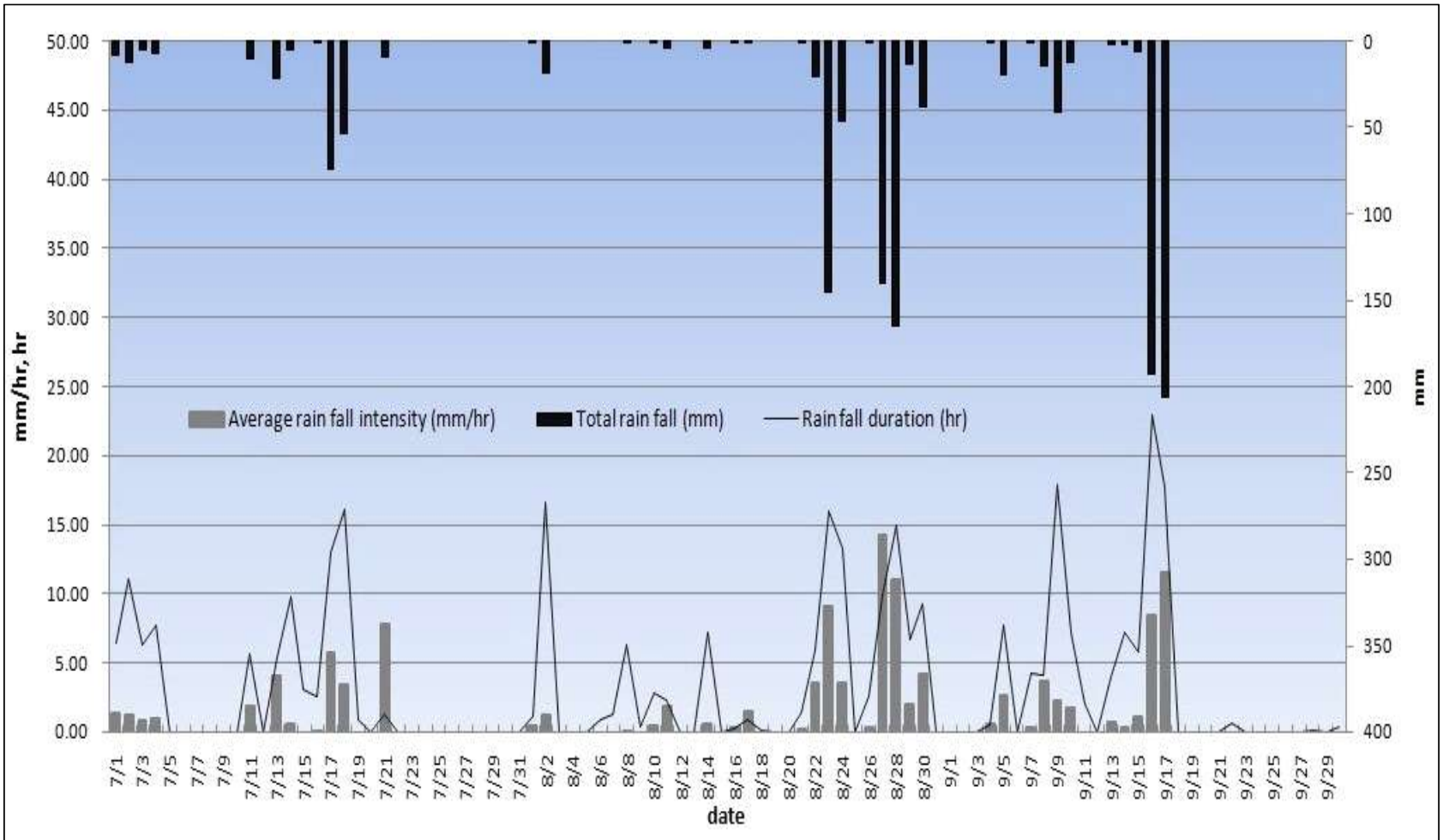


Fig. 2. The feature of rainfall from July 1 to September 30, 2012.

Table 8. Rain event of over 10mm of rainfall for a day (2012/7/1 ~ 2012/9/30)

Event date	ADD (day)	Total rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Field Survey
07/02	2	12.8	11.10	1.15	
07/11	8	10.1	5.65	1.79	
07/13	1	21.2	5.33	3.98	
07/17	3	74.0	13.00	5.69	
07/18	0	53.4	16.03	3.33	
08/02	14	19.1	16.63	1.15	
08/22	19	20.3	5.85	3.47	
08/23	0	145.8	16.02	9.10	
08/24	0	46.2	13.25	3.49	○
08/27	2	140.4	9.88	14.21	
08/28	0	165.5	14.98	11.05	○
08/29	0	13.1	6.63	1.98	
08/30	0	38.7	9.28	4.17	○
09/05	4	19.9	7.68	2.59	
09/08	2	15.0	4.15	3.61	
09/09	0	40.9	17.87	2.29	
09/10	0	12.1	7.22	1.68	
09/16	5	193.2	22.88	8.44	
09/17	0	206.0	17.80	11.57	○
Mean	3.16	65.7	11.64	4.99	
Minimum	0	10.1	4.15	1.15	
Maximum	19	206.0	22.88	14.21	

※ADD : Antecedent Dry Day

2) 연구내용

한천 저류지의 비점오염물질의 특성 및 저감효과를 평가하기 위하여 저류지로 유입되는 한천의 유출수와 한천 제 1저류지와 한천 제 2저류지의 저류수로 구분하여 시료채취하였고, 각 저류지별 시료채취지점은 Fig. 3에서 보는 바와 같다.

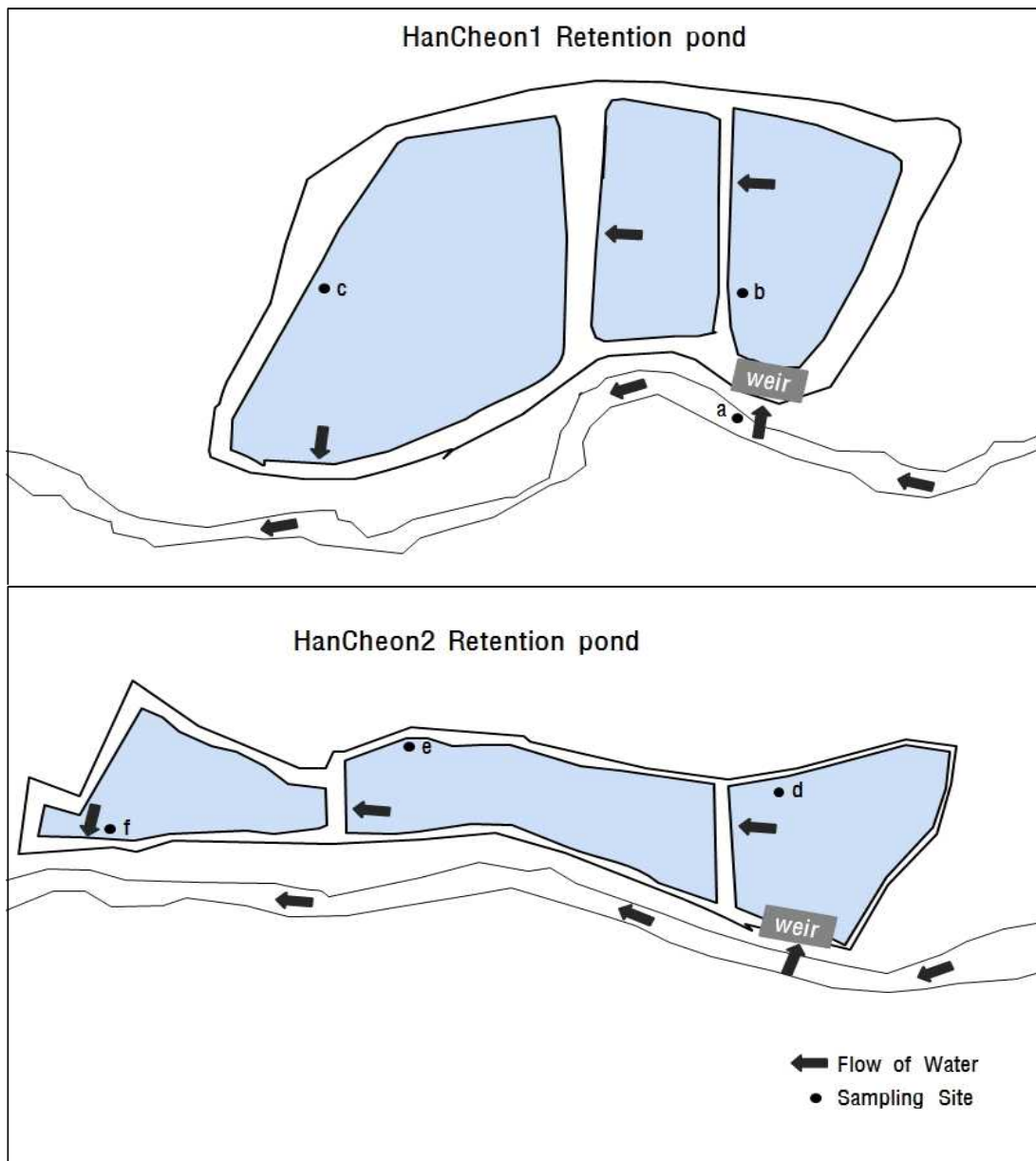


Fig. 3. Location of sampling site.

(1) 한천의 수질특성

조사대상 한천 저류지의 유입수 수질특성은 8월 24일 조사지점 a에서 수질 성분을 분석하기 위해 4 L 씩 30분 간격으로 8시간 동안 총 16회의 시료를 채취하였다. 또한 한천 유역에서 유입되는 오염물질의 농도를 평가하기 위해 비교 대상지역으로 유역 특성이 비슷한 병문천과 유역 특성의 차이가 많은 삼수천을 선정하여 강우시 하천의 유출수를 대상으로 조사하였다.

(2) 한천 저류지 입자성물질의 침강성 평가

저류지에서 비점오염물질 제거의 주요 기작인 입자성 물질의 침강현상을 평가하기 위해 8월 28일과 8월 30일에 한천 제 1저류지를 대상으로 조사하였다. 하천으로 유출이 발생하고 유출수가 저류지로 유입되면 유입수(8월 28일, 지점 a)와 저류수(8월 30일, 지점 b)에서 시료를 채취해 한천 저류지 입자성물질의 침강특성을 조사하였다.

(3) 한천 제 1저류지의 수질 특성

한천 제 1저류지로 유입된 강우유출수의 수질 특성은 8월 28일 한천 제 1저류지의 1지(지점 b)와 3지(지점 c)에서 시료를 채취해 각 오염물질의 농도를 조사해 1지에서 3지로 유하하는 동안 감소된 오염물질의 비율을 조사하였다.

(4) 한천 저류지의 비점오염물질 저감 효과

한천 저류지에서 저감되는 비점오염물질의 부하량을 산정하기 위해서 8월 28일과 9월 17일 한천 저류지 유입수의 농도와 유량을 산정하여 농도와 유량의 곱으로 오염부하량을 산정하였다. 이 때 농도의 경우 시간에 따른 유입수의 농도를 평균하여 농도를 계산하였으며, 유량의 경우는 'Kindsvater-Cater'의 Weir공식을 이용하여 유량 계산을 하였다.

3. 분석항목 및 방법

분석방법은 수질오염공정시험기준(2010)¹⁴⁾과 기기분석에 의하여 분석하였다. 분석항목 중에 수온, pH, DO, 총용존고형물(TDS)는 현장에서 다항목수질자동측정장비(HQ40d Dual-Input Digital Multi-Meter)를 이용하여 측정하였고, 나머지 분석항목인 화학적산소요구량(COD), 총 질소(T-N), 암모니아성질소(NH₃-N), 질산성질소(NO₃-N), 망간(Mn), 총 철(Fe), 부유물질(SS), 탁도는 실험실로 운반하여 분석하였다. 그리고 미생물실험과 농약성분 등 유역특성에 따라 유입될 수 있는 오염물질을 확인하기 위하여 먹는물 수질기준 중 소독부산물을 제외한 47개 항목도 분석(한국수자원공사)하였다.

1) 침강실험

강우유출수를 20 L 채수하여 실험실로 가져와 완전 혼합한 후 1000 mL 비이커 20 개에 1000 mL 씩 넣고 0분, 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분, 90분, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간, 6시간, 8시간, 12시간, 18시간, 24시간 후에 각 비이커의 상층의 시료를 탁도 흡수셀에 넣고 [HACH]2100 AN Turbidimeter로 잔류탁도를 분석하였다.

2) 저류지 유입유량 산정 방법¹⁵⁾

저류지 유입유량은 각 저류지의 유입구에 설치된 수위관측장비에서 관측된 수위 자료 (제주 수자원본부)를 이용해 Weir공식인 “Kindsvater-Carter 공식”에 적용하여 산정하였다. “Kindsvater-Carter 공식”은 4각 Weir에 부합하는 공식으로 이 식은 다음과 같다.

$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}}$$

여기서,

$Q = \text{m}^3 / \text{s}$ 로 Weir를 통과하는 유량

$b = \text{Weir의 Overflow 폭(m)}$

$C_e = \text{상수} (C_e = 0.602 + 0.083 \times h/p)$

$h = \text{측정 높이(유입수 수위, m)}$

$g = \text{중력가속도} (9.8066 \text{ m/s}^2)$

$p = \text{Weir까지의 높이(m)}$

“Kindsvater-Carter 공식”을 적용하기 위해서는 몇 가지 조건이 필요하다. 먼저 h/p 는 2.5 보다 클 수 없고, b 는 0.15 m 보다 작을 수 없다. 그리고 p 와 $(B-b)/2$ 는 0.1 m 보다 작을 수 없다. 본 연구기간 다음과 같은 조건에 모두 유효하여 “Kindsvater-Carter 공식”을 적용하였다.

한천저류지의 유입부에는 4각 위어가 설치되어 있으며, 위어에는 평상시 1.5 m의 수문을 설치하여 평상시에는 유출수 유입을 막고 있으나 유출량이 많아지면 수문을 개폐(開閉)하여 유출수를 유입 시킨다(Fig. 4).



Fig. 4. The front view of the inlet of the first HanCheon Retention pond in HanCheon (Weir).

3) 한천 유량 산정 방법

한천의 유량 중 한천 저류지로 유입된 유입률을 파악하기 위하여 한천의 유량을 산정하였다. 연구대상인 한천의 유량을 산정하기 위하여 한천 유역에 내린 유역강수량을 파악하고 유역강수량 중 한천으로 유출된 유출률을 파악하였다. 먼저 유역강수량을 파악하기 앞서, 제주도에 재난안전대책본부에서 운영하는 48개소의 강수량관측소와 기상청에서 운영하는 25개소의 자동기상관측소(Automatic weather system, AWS)가 있으며, 총 73개의 강수량관측소별 면적 가중치를 적용하기 위해 Fig. 5과 같이 티센(Thiessen)망을 구성하였다.

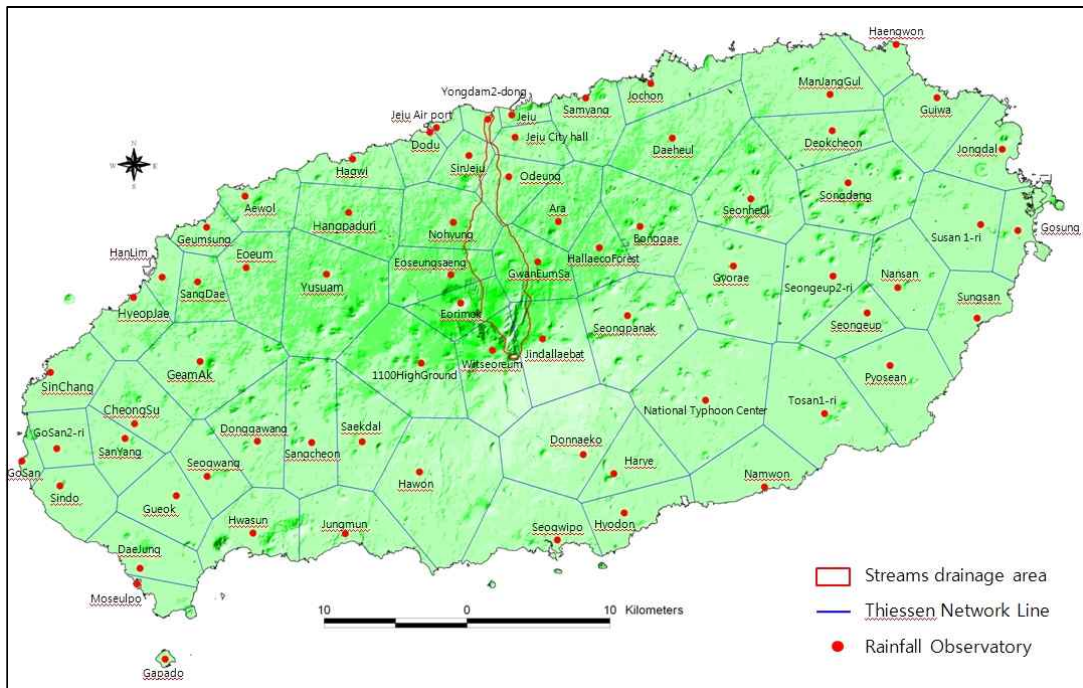


Fig. 5. Thiessen network in Jeju by rainfall observation station in Korea (Jeju Water Resource Headquarter).

티센(Thiessen)망을 구성한 결과, 총 10개의 강수량관측소가 한천 유역에 해당 하였으며, 10개의 강수량 관측소가 한천유역에 포함되는 유역면적과 강수량관측소에서 관측된 강수량을 곱하여 수문총량(Total Precipitation Amiunt)을 산출하였다.

Table 9. Location of rainfall observation station come with in HanCheon basin (Jeju Water Resource Headquarter)

Branch Office	Position	Position		Altitude (m)
		X	Y	
Eorimok	Haean-dong, Jeju-si	152,851	38,559	969
Witseoreum	Gwangnyeong-ri, Aewol-eup, Jeju-si	155,028	35,207	1,668
Jindallaebat	Harye-ri, Namwon-eup, Seogwipo-si	158,556	36,046	1,493
Eoseungsaeng	Haean-dong, Jeju-si	151,923	41,003	601
Gwaneumsa	Odeung-dong, Jeju-si	158,056	41,797	576
Nohyeong	Nohyeong-dong, Jeju-si	152,145	44,561	285
Odeung-dong	Odeung-dong, Jeju-si	156,033	47,749	142
Sinjeju	Yeon-dong, Jeju-si	153,370	49,461	93
Jeju Cityhall	Ido 2-dong, Jeju-si	156,461	50,520	62
Yongdam 2-dong	Yongdam 2-dong, Jeju-si	154,557.56	51,782.31	20

그리고 Fig. 6와 같이 한천 유역 10개의 관측소 중 4개(어리목, 윗세오름, 진달래밭, 관음사 관측소)의 강수량 관측소는 저류지까지 유하되는 한천유역(Streams drainage area 2)에 해당하였다. 따라서 한천 저류지까지 유하하는 한천의 유량을 산정하기 위해 한천 저류지로부터 약 2 km 상류에 있는 탐라교에 있는 유량관측기를 이용하였다. 한천 상류인 탐라교까지의 유역면적은 10,300,321 m²으로 한천 저류지까지의 유역면적 11,054,703 m²와 큰 차이를 보이지 않아 탐라교에서 관측된 한천으로의 유출률을 한천 저류지까지 유출된 유량을 산정함에 있어 동일하게 사용하였다. 산출된 유출률에 유역의 수문총량을 곱하여 한천의 유량을 산정하였다.

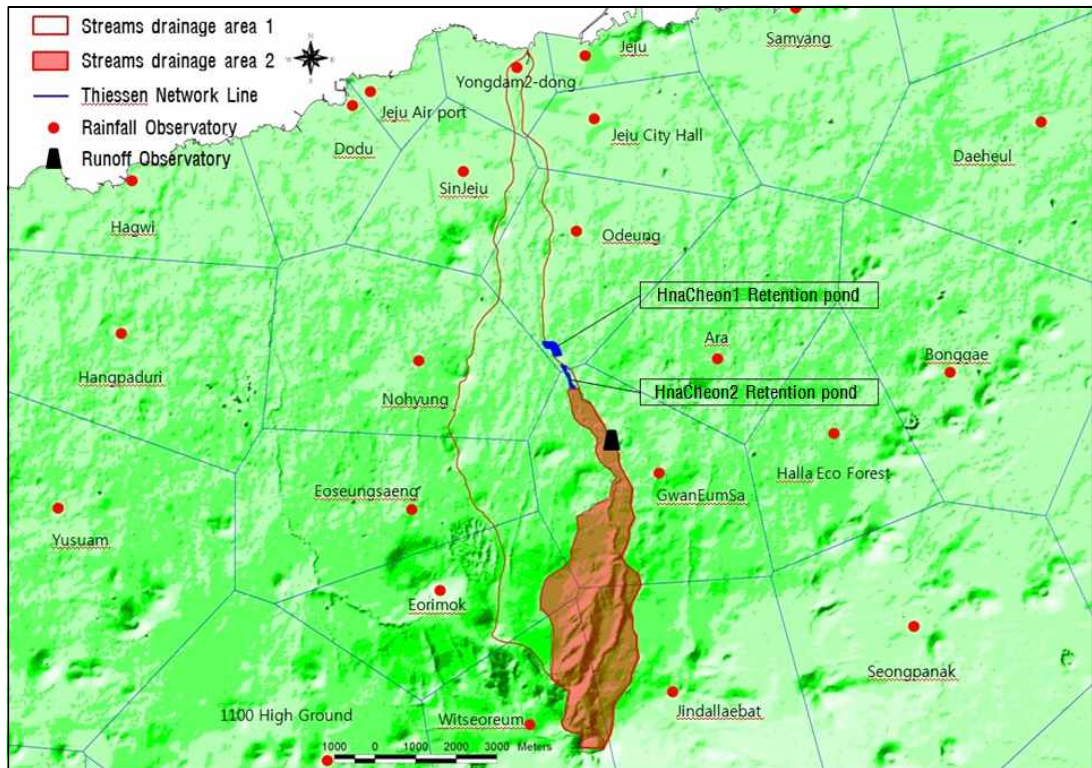


Fig. 6. Thiessen network come within HanCheon basin by rainfall observation station in Korea(Jeju Water Resource Headquarter).

IV. 연구 결과 및 고찰

1. 한천의 수질특성

한천 저류지의 비점오염물질 특성을 조사하기 위해 한천 저류지로 유입되는 한천의 수질을 조사하여 특성을 분석하였다. 한천의 비점오염물질에 대한 시간에 따른 농도변화와 강수량에 따른 농도변화를 조사하였으며, 한천과 유역특성이 비슷한 병문천, 유역특성이 다른 삼수천을 대상으로 각 하천의 유출수를 분석하여 유역특성에 따른 수질특성의 차이를 비교 분석하였다.

1) 한천의 비점오염물질 농도변화

강우시 한천 저류지의 유입부 지점 a에서 오염물질을 측정된 결과는 Table 10과 Table 11, Table 12에 나타내었다.

Table 10은 2012년 8월 24일 9시 30분부터 17시까지 30분 간격으로 조사하여 시간에 따른 비점오염물질의 농도변화와 지속 강우에 따른 농도변화를 나타냈다.

조사 결과 먹는물 수질기준에 포함되어 있는 암모니아성질소($\text{NH}_3\text{-N}$)와 망간(Mn), 총철(Fe)은 시간과 강수량에 따라 변동은 있었으나 모두 먹는물 수질기준($\text{NH}_3\text{-N}$: 0.5 mg/L, Mn : 0.3 mg/L, Fe : 0.3 mg/L) 이하의 농도로 측정되었다.

반면 부유물질(SS)과 탁도(Turbidity), 전기전도도(EC), 총용존고형물(TDS)은 시간과 강수량에 따라 농도의 변동이 크게 조사되어, 이 네 가지 항목에 대한 시간과 강수량에 따른 유출수의 특징을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 한천 저류지까지의 유역에 내린 총강수량은 124.0 mm이고 강우는 9시부터 17시까지 내렸으며, 13시에 가장 많은 19.6 mm의 강우가 내렸다. 그리고 분석된 오염물질 측정치는 강우가 시작된 직후의 초기강우에 의해 최대 농도가 나타나며 수질의 변동은 강수량과 하천 유출유량의 증감과 밀접한 관계를 보였다.

SS의 경우 강수량과 비슷한 양상을 보여주고 있다. 9시 30분 농도가 48 mg/L에서

시작하여 11시 30분 8 mg/L까지 계속 감소하다 강수량이 증가와 함께 다시 증가하여 13시에 초기 농도인 48 mg/L까지 증가하였다. 강우가 지속되는 기간 동안 45 mg/L의 농도를 유지하였고 그 이후 15시부터는 하천수질환경기준 생활환경 III등급 (25 mg/L) 이하를 유지하였다. 그러나 2010년 태풍 ‘덴무’가 발생하였을 때 조사된 SS의 범위 2.5 ~13.2 mg/L보다는 높은 값을 보여준다.¹⁶⁾

탁도의 경우 SS와 유사한 양상을 보여주며 초기 탁도는 29.3 NTU로 검출되어 시간에 따라 감소하다 강수량이 증가한 13시에 31.4 NTU까지 증가하였다.

TDS와 전기전도도는 서로 유사한 양상을 보였으며 처음 최고 농도까지는 계속 증가하였으나 최고 농도 이후 시간에 따라 감소하는 양상을 보였다.

Table 10. Summary of inflow stormwater runoff data

Constituent	Unit	Range	Mean	SD
NH ₃ -N	mg/L	0 - 0.04	0.01	0.01
Mn	mg/L	0.014 - 0.044	0.025	0.01
Fe	mg/L	0.05 - 0.17	0.08	0.03
Turbidity	NTU	3.9 - 31.4	15.0	7.13
SS	mg/L	8.0 - 48.0	29.50	14.15
EC	μs/cm	10.16 - 20.97	15.03	3.73
TDS	mg/L	4.62 - 9.62	6.84	1.68

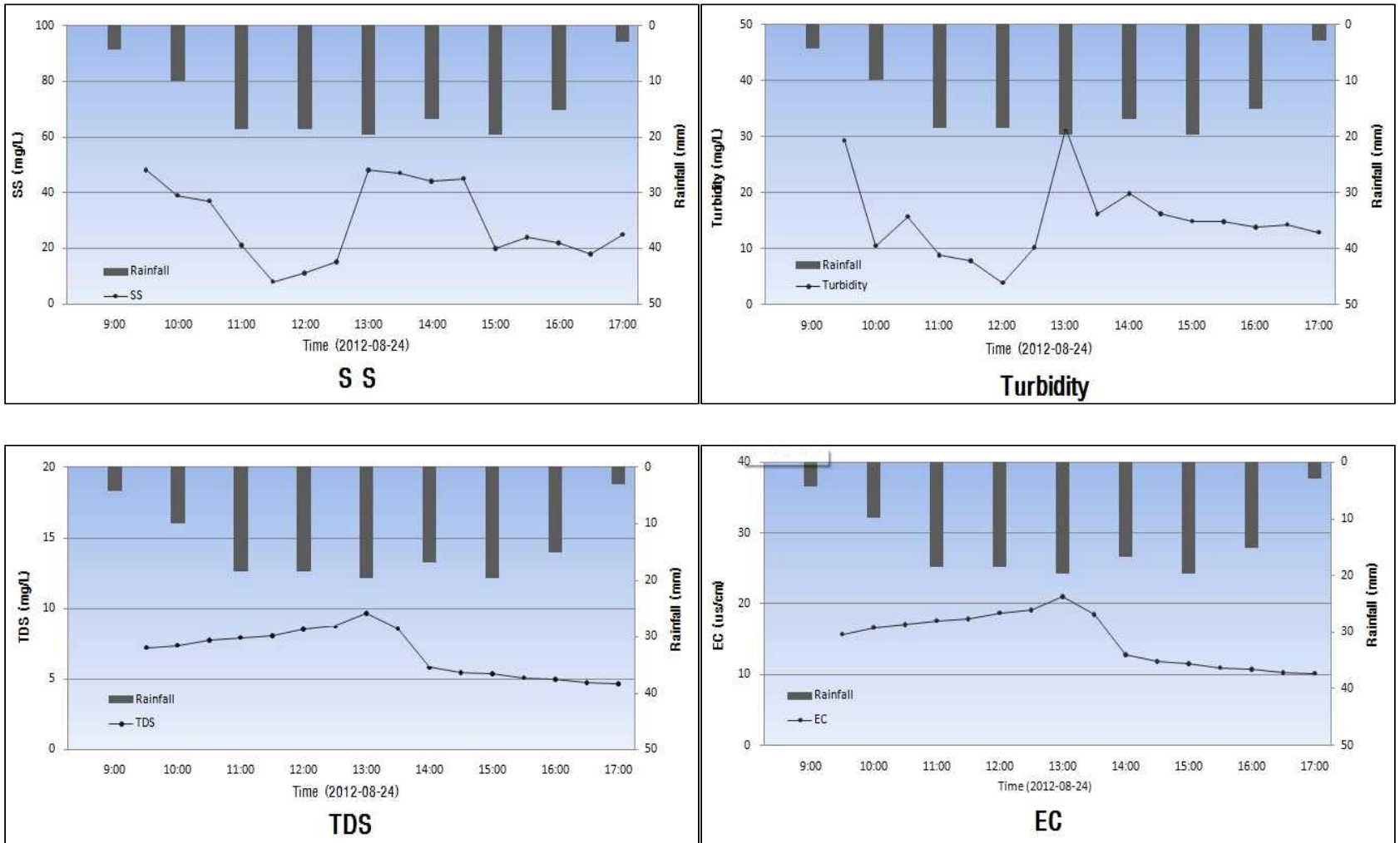


Fig. 7. Variation of flowrate and pollutant concentration at HanCheon.

Table 11과 Table 12는 미생물실험과 농약성분 등 유입수에 포함되어 있는 오염물질을 파악하기 위해 먹는물 수질기준의 항목을 분석한 결과 미생물실험에서는 높은 농도의 일반세균(2,800 CFU/mL)이 검출되었으며, 금속이온 성분 중에는 불소, 아연, 알루미늄이 검출되었다. 농약성분은 검출되지 않았으며, 과망간산칼륨소비량도 2.0 mg/L 미만으로 검출되어 유기물의 농도는 아주 낮은 것으로 평가되었다. 경도의 경우에는 3 mg/L로 분석되어 수중에 Ca와 Mg와 같은 2가 양이온의 농도도 낮은 것으로 평가되었다.

이러한 수질특성은 강수의 대부분이 우수에 의존하고 있으며, 선행강우 및 선행 유출정도에 따라 매우 큰 폭으로 변동될 수 있다. 초기유출(first flush)의 경우 고농도의 오염물질을 함유하고 있지만 이후의 강우유출수는 초기유출수에 비해 낮은 농도의 오염물질을 갖고 있다.

수질 분석 결과, 대부분의 오염물질은 불검출 또는 미량 검출되는 수준 이었으며, 일반세균의 경우 2,800 CFU/mL가 검출되었는데 이는 하천 상류에 다양한 오염원이 존재함을 의미한다. 질산성 질소의 경우 2.2 mg/L가 검출되었는데 이는 상류의 비료 또는 분뇨 등에 기인한 것으로 추정되며, 불소의 경우도 0.41 mg/L가 검출되었으며 이는 인위적인 오염원 보다는 지질에 기인한 것으로 보인다.

Table 11. Feature analysis of drink water quality of stream flow in HanCheon

NO	Substantial	unit	Drink water quality criteria	HanCheon
1	Heterotrophic plate count	CFU/mL	100	2,800
2	Total Coliforms	/100 mL	ND	Detection
3	Escherichia coli	/100 mL	ND	Detection
4	Lead(Pb)	mg/L	0.01	ND
5	Fluoride(F)	mg/L	1.5	0.41
6	Arsenic(As)	mg/L	0.01	ND
7	Selenium(Se)	mg/L	0.01	ND
8	Mercury(Hg)	mg/L	0.001	ND
9	Cyanide(CN)	mg/L	0.01	ND
10	Chromium(Cr)	mg/L	0.05	ND
11	Ammonia(NH ₃ -N)	mg/L	0.5	0.01
12	Nitrate(NO ₃ -N)	mg/L	10	2.2
13	Boron(B)	mg/L	1.0	ND
14	Cadmium(Cd)	mg/L	0.005	ND
15	Phenol	mg/L	0.005	ND
16	Diazinon	mg/L	0.02	ND
17	Parathion	mg/L	0.06	ND
18	Fenitrothion	mg/L	0.04	ND
19	Carbaryl	mg/L	0.07	ND
20	1,1,1-Trichloroethane	mg/L	0.1	ND
21	Tetrachloroethylene	mg/L	0.01	ND
22	Trichloroethylene	mg/L	0.03	ND
23	Dichloromethane	mg/L	0.02	ND
24	Benzene	mg/L	0.01	ND
25	Toluene	mg/L	0.7	ND
26	ethylbenzene	mg/L	0.3	ND
27	Xylene	mg/L	0.5	ND
28	1,1-Dichloroethylene	mg/L	0.03	ND
29	Carbon tetrachloride	mg/L	0.002	ND
30	1,2-Dibromo-3-chloropropane	mg/L	0.003	ND
31	Total Hardness	mg/L	300	3
32	Permanganate value	mg/L	10	1.7

Table 12. Feature analysis of drink water quality of stream flow in HanCheon
(Continue)

NO	Substantial	unit	Drink water quality criteria	HanCheon
33	Odor	-	-	-
34	Taste	-	-	-
35	Copper(Cu)	mg/L	1	ND
36	Chromaticity	color unit	5	1
37	Anionic surfactant	mg/L	0.5	ND
38	pH	-	5.8 - 8.5	8.6
39	Zinc(Zn)	mg/L	3	0.016
40	Chloride(Cl ⁻)	mg/L	250	3
41	Total solids	mg/L	500	44
42	Iron(Fe)	mg/L	0.3	ND
43	Manganese(Mn)	mg/L	0.3	ND
44	Turbidity	NTU	1.0	3.07
45	Sulfate(SO ₄ ²⁻)	mg/L	200	3
46	Aluminium(Al)	mg/L	0.2	0.03
47	1,4-Dioxane	mg/L	0.05	ND

2) 한천과 병문천, 삼수천의 수질특성 비교

연구대상인 한천 저류지로 유입되는 한천의 강우유출수 특성을 조사하기 위해 한천의 비교 대상지역으로 병문천과 삼수천을 선정하여 평가하였다. 제주도의 하천 유역은 대부분 주거지역을 포함하는 전형적인 비도시 유역의 형태를 보이기 때문에 토지이용과 오염원의 분포 등 유역 전반에 대한 이해가 필요하다. 그리고 각 하천유역에 경작활동으로 인한 오염물질의 배출특성은 경운(Till)과 표면덮개 설치 유무, 재배작물에 따른 비료 투입량 및 강우특성과 토지 경사도, 오염원별 유달률 등과 같은 다양한 요인에 영향을 받는다.^{17), 18)} 특히 유역말단 지역은 하수처리장 방류수, 정화조유출, 불명수의 유입, 축산 그리고 농경지의 비점오염 등 오염물질의 유입으로 하천의 수질 문제를 발생시키는 악영향을 미친다.¹⁹⁾

각 하천의 유역을 Fig. 8에 나타내었다. 병문천은 한천과 약 1 km 거리에 있는 하

천으로 유역 내에 골프장과 공공시설 등이 있는 공통점이 있으나, 골프장과 하천 사이에 임야(林野)지역이 있어 비점오염물질의 유입을 저감할 수 있는 특징이 있다. 반면 삼수천은 한천과 약 8 km 거리에 위치해 있으며, 유역 내에 대규모 공업단지 와 주택단지가 위치해 있어 차량이동이 많은 특징이 있다.

8월 29일 발생한 강우유출수에 대해 세 곳의 하천(한천, 병문천, 삼수천)을 조사한 결과 각 하천의 오염물질 비교 그래프는 Fig. 9에 나타내었다.

한천과 삼수천에 비해 병문천의 대부분의 오염물질 농도가 낮았으며, 특히 입자성 물질인 탁도는 병문천 4.1 NTU와 삼수천 33.7 NTU이고, SS는 병문천 4 mg/L와 한천 20 mg/L로 많은 차이를 보였다. 그리고 금속류인 Mn과 Fe도 Mn은 병문천이 0.033 mg/L, 삼수천이 0.082 mg/L의 차이를 보였으며, Fe은 병문천이 0.09 mg/L에서 삼수천이 0.62 mg/L로 차이를 보였다. 또한 유기물 농도를 의미하는 BOD의 경우 삼수천에서 1.88 mg/L로 한천과 병문천에 비해 각각 5.5, 4.4 배 높은 수치를 나타냈다. 정광욱 et al.(2007)은 유역의 토지이용과 오염원의 공간적 변화가 하천수 질에 미치는 영향을 분석한 결과 유역에 밀집된 주거지역과 상업지역이 있는 하천의 경우 강우시 평상시보다 하천 수질의 농도가 COD는 약 1.5배, SS는 약 3배, T-N은 약 2배, E.coli은 약 5배 높게 측정되어 단위면적당 인구의 수가 많을수록 오염을 증가시키며, 하천으로부터 오염원의 거리가 멀어질수록 수질오염 정도가 감소한다고 결론을 지었다.²⁰⁾

이와 같은 내용은 그래프에 나타나듯이 유역에 주택단지와 산업단지가 밀집되어 있으며, 오염원과 하천의 거리가 가까운 삼수천의 경우 강우유출수가 발생시 오염도가 가장 높았고, 유역의 토지이용이 비슷한 한천과 병문천의 경우 오염원과 하천 사이의 거리가 멀었던 병문천이 강우유출수의 발생시 한천에 비해 오염도가 낮은 것으로 판단된다.

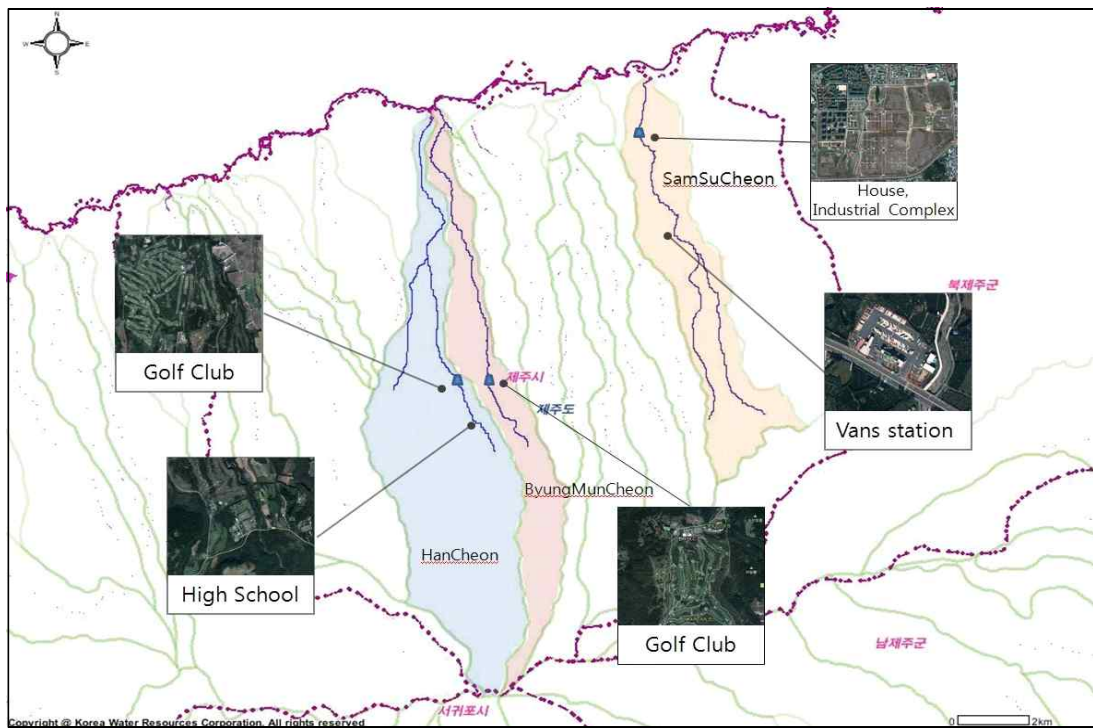


Fig. 8. Other facilities condition in HanCheon, ByungMunCheon and SamSuCheon basin.

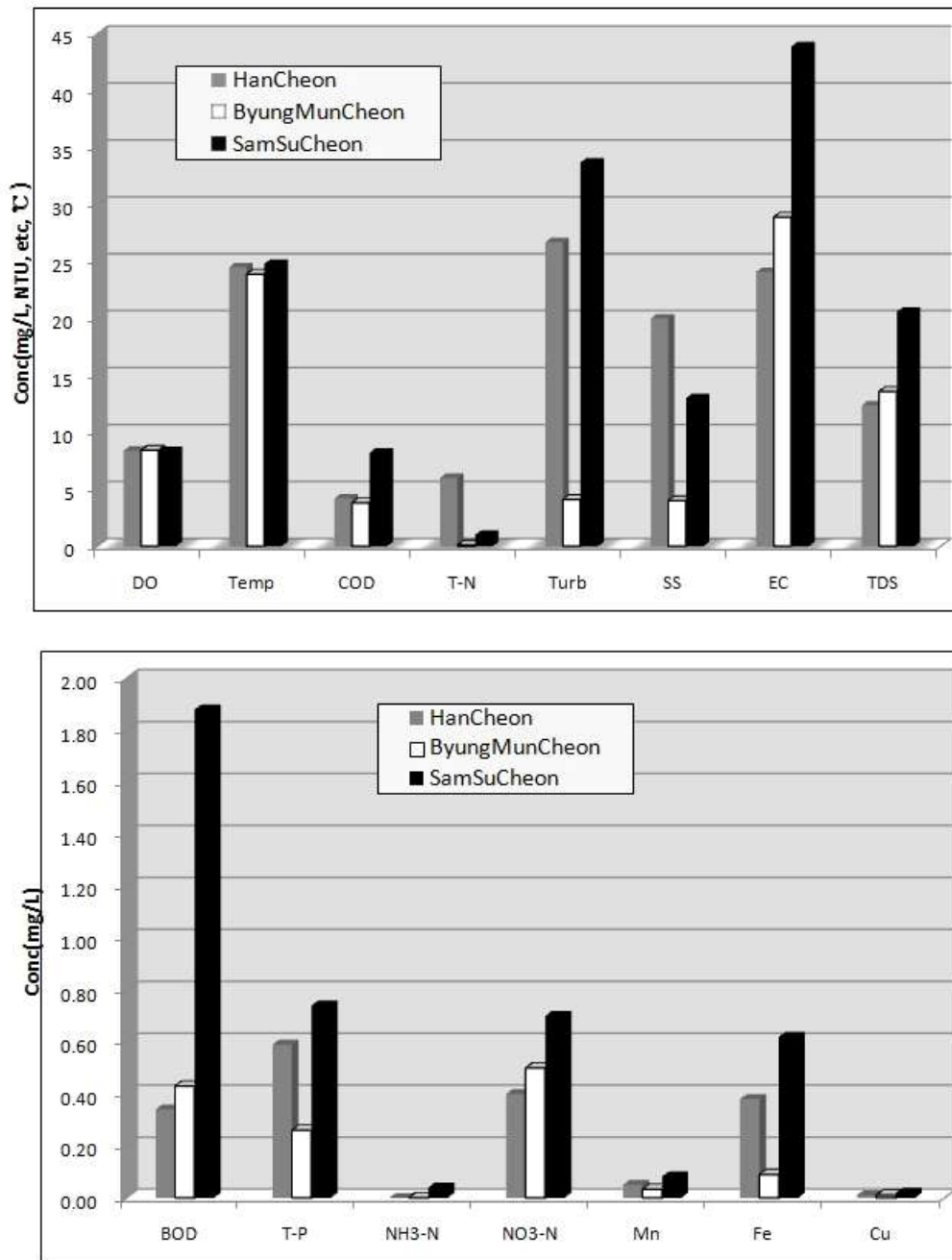


Fig. 9. Feature comparison of water quality of stream in Jeju city.

2. 한천 제 1저류지 입자성물질의 침강성 평가

일반적으로 저류지는 대형 침전지와 유사한 기능을 수행하므로, 오염물질이 제거되는 주요 기작은 침강현상이며, 이러한 침강현상의 결과로 주요 비점오염원인 토사를 포함한 입자성물질이 제거되는 것이다.²¹⁾ 따라서 본 연구에서는 한천 제 1저류지를 대상으로 저류지로 유입되는 유입수(a)와 유입후 저류지 내의 저류수(b)를 채수하여 위치에 따른 입자성 물질의 침강성을 분석하였다.

한천 제 1저류지로 강우유출수가 유입된 8월 28일, 8월 30일 각 각의 유입수를 20 L 채수하여 실험실에서 24시간 동안 간격을 두어 입자의 침강성을 조사한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10은 시간에 따른 시료수의 잔류탁도 분석결과를 보여주고 있다.

집중호우에 의한 고탁도물질의 침전은 초기에는 전형적인 I형 침강의 형태인 독립침강(discrete settling)의 형태를 보이므로 신속하게 침전이 발생하고 이후 II, III형의 형태로 발생하면서 침강속도가 지연되는 특성을 보인다.

조사가 있었던 8월 28일은 한천 제 1저류지의 유출부 인근에서 채수를 하였으며, 다음 8월 30일은 제 1저류지의 유입부에서 채수하였다. 각 시료는 선행 강수량, 강우강도 등 차이가 있어 서로 비교분석은 어려우나, 시료 모두 전형적인 입자의 침강 특성을 보이고 있다. 먼저 8월 28일 시료는 초기 탁도가 97.0 NTU 였으며, 60분 후에는 74.6 NTU 정도로 완만하게 감소하였다. 하지만 침강실험 초기의 탁도 하강이 완만한 점은 한천 제 1저류지 1지의 유출부 인근에서 채수하였으므로 이미 유입부 부근에 상당량의 고형물이 침전하여 입자의 침강속도가 다소 둔화된 것으로 사료된다.(Fig. 11) 8월 30일 시료는 초기 탁도의 농도는 53.6 NTU로 고탁도가 유입되지는 않았지만 전형적인 호우에 의한 탁도 물질의 침전을 보였다. 박과 문(2010)은 태풍 ‘덴무’에 의해 한천저류지로 강우유출수가 유입되었을 당시 한천 제 1저류지에서 시간경과별 유입수의 탁도 변화를 분석한 결과 한천 제 1저류지의 1지에서는 초기 탁도가 124 NTU에서 15분 후 43.9 NTU로 감소하였고, 2지에서는 137 NTU에서 15분 후 56 NTU로 감소하였다고 분석하여 이번 연구와 비슷한 경향을 보였다.¹⁶⁾

이번 연구가 진행되는 동안 한천 제 1저류지의 경우 강우유출수의 유입은 있었지

만 유출은 없었다. 따라서 저류지로 유입된 오염물질은 입자성 물질들과 함께 침전하여 저류지 바닥에 퇴적되므로 준설작업에 의해 오염물질을 제거 될 수 있었다.

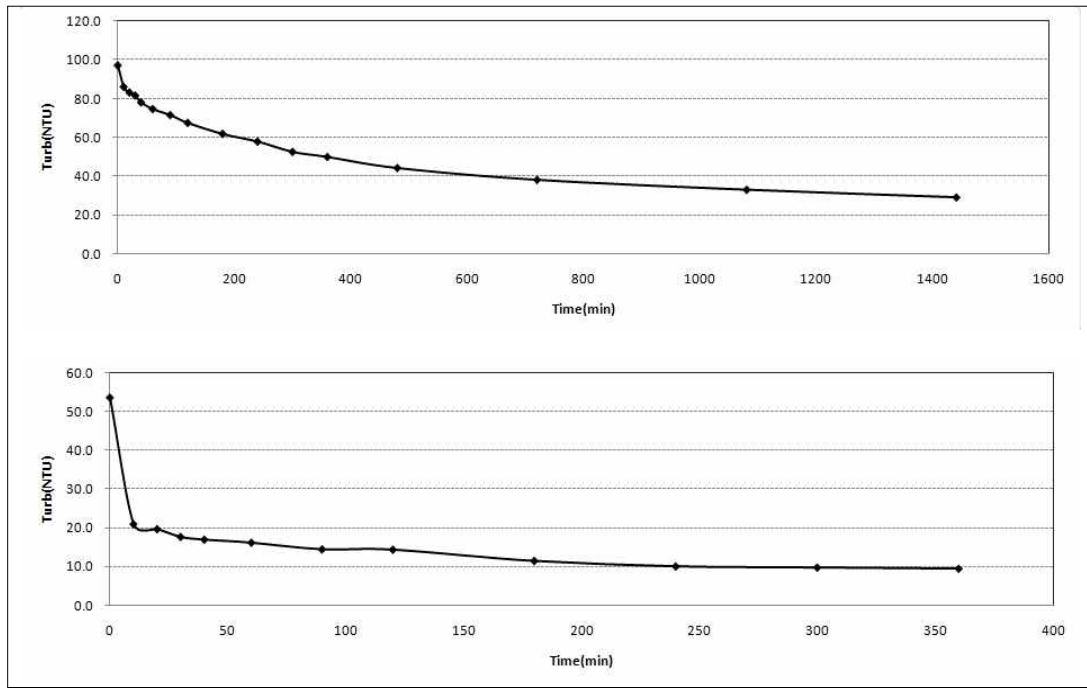


Fig. 10. Analyse hourly variation of water turbidity in the HanCheon1 Retention pond in HanCheon(8/28, 8/30).



Fig. 11. The front sediment view of the inlet of the HanCheon1 Retention pond in HanCheon.

3. 한천 제 1저류지의 수질 특성

8월 27일부터 28일까지 태풍 ‘볼라벤’의 영향으로 강하고 많은 비가 내려 한천이 범람하고 저류지로 많은 강우유출수가 유입 되었다. 그 당시 한천 제 1저류지의 1지와 3지의 수질 특성을 조사한 결과 저류지의 수질 농도는 Table 13에 나타내었다. 한천 제 1저류지의 1지에서 3지로 흘러가면서 입자성물질의 농도가 크게 감소하였다. SS는 31.7 %, 탁도는 40.2 % 까지 감소하였다. 또한 COD는 80 %, NH₃-N는 33.3 %, NO₃-N는 25 % 감소하였다.

이번 조사기간 동안 한천 제 1저류지에서는 유입은 일어났지만 유출은 일어나지 않았다. 하지만 유출이 일어났을 경우 한천 저류지는 한천으로 유출되는 유출수의 오염물질 농도를 크게 감소시킬 수 있는 역할을 할 수 있다.

Table 13. Feature of water quality of stream in HanCheon1 Retention pond

Constituent	Unit	HanCheon1-1	HanCheon1-3	Rate (%) (A/B*100)
		Retention pond (A)	Retention pond (B)	
pH	pH unit	6.3	6.1	-3.2
DO	mg/L	7.99	8.22	2.9
Temp	℃	24.2	24.4	0.8
COD	mg/L	6.018	1.204	-80.0
T-P	mg/L	1.01	1.04	3.0
NH ₃ -N	mg/L	0.09	0.06	-33.3
NO ₃ -N	mg/L	0.4	0.3	-25.0
Mn	mg/L	0.154	0.197	27.9
Fe	mg/L	0.85	0.71	-16.5
Turb	NTU	101	69	-31.7
SS	mg/L	82.0	49.0	-40.2
EC	us/cm	30.5	29.7	-2.6
TDS	mg/L	14.28	13.85	-3.0

먹는물 수질기준에 대한 분석 결과를 Table 14과 Table 15에 나타내었다. 전체 47개 항목을 분석하였으며, 전체 항목 중 16개 항목이 검출되었으며, 농약성분은 검출되지 않아 인근 골프장으로부터 농약성분의 유출은 없는 것으로 판단되었다. 검출된 물질 중에서 보존성 물질(Conservative Constituents)로 분류될 수 있는 보론, 경도, 염소이온 등은 1지에서 3지로 가면서의 변화는 미미 하였으나, 유기물의 지표로 인식될 수 있는 과망간산칼륨(KMnO₄)소비량의 경우 약 절반 정도는 감소하였다. 일반적으로 저류지내에는 중력에 의한 침강효과가 발생하므로 입자성물질의 경우 감소 효과를 기대할 수 있으나, 용존성물질 또는 미세 콜로이드입자의 경우 감소 효과를 기대하기 어렵다.

Table 14. Feature of water quality of stream in HanCheon1 Retention pond
(Drink water quality criteria)

NO	Substantial	unit	Drink water quality criteria	Retention pond 1-1	Retention pond 1-3
1	Heterotropoc plate count	CFU/mL	100	14,000	11,000
2	Total Coliforms	/100 mL	ND	Detection	Detection
3	Escherichia coli	/100 mL	ND	Detection	Detection
4	Lead(Pb)	mg/L	0.01	ND	ND
5	Fluoride(F)	mg/L	1.5	ND	ND
6	Arsenic(As)	mg/L	0.01	ND	ND
7	Selenium(Se)	mg/L	0.01	ND	ND
8	Mercury(Hg)	mg/L	0.001	ND	ND
9	Cyanide(CN)	mg/L	0.01	ND	ND
10	Chromium(Cr)	mg/L	0.05	ND	ND
11	Ammonia(NH ₃ -N)	mg/L	0.5	ND	ND
12	Nitrate(NO ₃ -N)	mg/L	10	ND	ND
13	Boron(B)	mg/L	1.0	0.12	0.15
14	Cadmium(Cd)	mg/L	0.005	ND	ND
15	Phenol	mg/L	0.005	ND	ND
16	Diazinon	mg/L	0.02	ND	ND
17	Parathion	mg/L	0.06	ND	ND
18	Fenitrothion	mg/L	0.04	ND	ND
19	Carbaryl	mg/L	0.07	ND	ND

Table 15. Feature of water quality of stream in HanCheon1 Retention pond
(Drink water quality criteria)(Continue)

NO	Substantial	unit	Drink water quality criteria	Retention pond 1-1	Retention pond 1-3
20	1,1,1-Trichloroethane	mg/L	0.1	ND	ND
21	Tetrachloroethylene	mg/L	0.01	ND	ND
22	Trichloroethylene	mg/L	0.03	ND	ND
23	Dichloromethane	mg/L	0.02	ND	ND
24	Benzene	mg/L	0.01	ND	ND
25	Toluene	mg/L	0.7	ND	ND
26	ethylbenzene	mg/L	0.3	ND	ND
27	Xylene	mg/L	0.5	ND	ND
28	1,1-Dichloroethylene	mg/L	0.03	ND	ND
29	Carbon tetrachloride	mg/L	0.002	ND	ND
30	1,2-Dibromo-3-chloropropane	mg/L	0.003	ND	ND
31	Total Hardness	mg/L	300	7	6
32	Permanganate value	mg/L	10	18.7	8.8
33	Odor	-	-	-	-
34	Taste	-	-	-	-
35	Copper(Cu)	mg/L	1	ND	ND
36	Chromaticity	color unit	5	6	7
37	Anionic surfactant	mg/L	0.5	ND	ND
38	pH	-	5.8 - 8.5	6.2	6.2
39	Zinc(Zn)	mg/L	3	0.014	0.010
40	Chloride(Cl ⁻)	mg/L	250	6	6
41	Total solids	mg/L	500	120	8.3
42	Iron(Fe)	mg/L	0.3	3.27	2.03
43	Manganese(Mn)	mg/L	0.3	0.089	0.050
44	Turbidity	NTU	1.0	78.10	59.30
45	Sulfate(SO ₄ ²⁻)	mg/L	200	3	ND
46	Aluminium(Al)	mg/L	0.2	5.19	3.31
47	1,4-Dioxane	mg/L	0.05	ND	ND

4. 한천 저류지 유입유량 산정

한천 저류지의 유입유량은 ‘Kindsvater-Cater’의 Weir공식을 이용하여 측정하였으며, 저류지까지 유하한 한천의 유량은 티센망을 이용하여 한천 유역에 내린 수문총량 중 유출률을 계산하여 한천유량을 측정하였다. 그 결과 한천유량은 유출률 29.6 %를 보인 8월 24일은 $1,830 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며 그 중 한천 제 1저류지로 $128,905 \text{ m}^3$ 이 유입되었고 제 2저류지로는 $15,375 \text{ m}^3$ 이 유입되었고, 유출률 59.5 %를 보인 8월 28일에는 한천유량 $3,950 \times 10^3 \text{ m}^3$ 중 제 1저류지와 제 2저류지로 각각 $183,768 \text{ m}^3$ 와 $33,387 \text{ m}^3$ 이 유입되었다. 그리고 유출률 56.7 %를 보인 9월 17일에는 한천유량이 $4750 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 그 중 각 저류지로 $467,000 \text{ m}^3$ 와 $148,000 \text{ m}^3$ 이 유입되었다.

1) 한천 유량 산정

한천 저류지까지 유하한 한천의 유량은 티센망을 작성한 결과 한천유역에 해당하는 10개의 강수량 관측소 중 4개의 강수량관측소가 해당하였으며, 이 유역의 총면적은 $11,054,703 \text{ m}^2$ 이다. 총면적과 강수량을 곱해 수문총량을 산출한 결과 Table 16에 나타내었다. 8월 24일까지 내린 수문총량은 $6,190 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 8월 28일까지 내린 수문총량은 $6,640 \times 10^3 \text{ m}^3$, 9월 17일까지 내린 수문총량은 $8,960 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었다.

Table 16. Total precipitation amount of originate in the upper basin(Retention pond) of the HanCheon basin

Date	Drainage area($11,054,703 \text{ m}^2$)	
	Total rainfall (mm)	Total Precipitation Amount (m^3)
2012/08/24	2,140	6,189,595
2012/08/28	2,410	6,640,395
2012/09/19	3,170	8,964,460

유량관측기가 설치되어 있는 탐라교에서 한천의 유량과 유출률은 Table 17에 나타내었다. 유출률은 탐라교 상류의 한천유역에 대한 수문총량 중 탐라교에서 측정된 유량을 이용하여 계산하였다. 수문총량은 한천 저류지에서 측정한 수문총량과 유사한 값이 측정되었으며, 8,381,700 m³이며, 측정된 유량은 8월 24일 1,760 × 10 m³, 8월 28일 3,710 × 10 m³ 그리고 9월 17일 4,760 × 10 m³으로 측정되었다. 따라서 유역에서 한천으로 유출된 유출률은 각각 29.6 %와 59.5 %, 56.7 %로 8월 28일이 가장 높은 유출률을 보였다. 유출률은 선행강우에 따라 토양의 함수량에 따라 큰 차이를 보이며 무강우일수가 가장 길었던 8월 24일에 비해 무강우일수가 없었거나 적었던 8월 28일과 9월 17일에는 유출률이 2배 가까이 높은 것으로 사료된다.

Table 17. The rate of flow of rainfall runoff from the upper basin(Tamna Bridge) of the HanCheon basin

Date	Total Precipitation Amount (m ³)	Runoff of HanCheon (m ³)	Runoff Coefficient (%)
2012/08/24	5,956,491	1,761,992	29.6
2012/08/28	6,228,503	3,705,789	59.5
2012/09/17	8,381,700	4,756,355	56.7

2) 한천 저류지 유입 유량

한천 저류지의 유입 유량을 측정하기 위해 저류지 유입구에 설치된 수위관측장비에서 관측된 유입수위(제주 수자원본부)를 ‘Kindsvater-Cater’의 Weir공식에 대입하여 유입 유량을 측정하였다. 측정된 결과 Table 18과 같이 유역 강수량이 560 mm였던 8월 23일부터 24일까지는 한천 제 1저류지로 128,905 m³이 유입되었고 제 2저류지로는 15,375 m³이 유입되었다. 강수량이 600 mm였던 8월 27일부터 28일까지는 제 1저류지와 제 2저류지로 각각 183,768 m³와 33,387 m³이 유입되었고, 강수량이 810 mm를 기록한 9월 16일부터 17일까지는 각각 467,000 m³와 148,000 m³이 유입되었다. 그 중 가장 많은 양이 유입이 되었던 9월 16일부터 17일까지의 시간에 따른 저류지 유입유량을 Fig. 12에 나타내었다.

이번 연구가 진행되는 기간에는 저류지로 유입이 발생할 경우 한천 제 2저류지에 비해 제 1저류지로 최대 8배 많은 양의 유입되었다. 반면 박과 문(2010)이 연구한

결과 2010년 강수량 607 mm가 발생한 8월 9일부터 11일까지 한천 저류지로 유입된 유입량은 제 1저류지는 319,000 m³, 제 2저류지는 690,000 m³으로 제 2저류지가 약 2배 많은 양이 유입되어, 본 연구와 상이한 차이를 보였다.⁹⁾ 이는 선행 강수량, 강우 강도 등에 의해서도 차이를 보이지만 한천 저류지 유입부에 설치되어 있는 수문의 개폐 조작에 의한 차이로 사료된다.

Table 18. Inflow runoff volume of HanCheon Retention pond

Date	Rainfall (mm)	HanCheon 1 Retention Reservoir (m ³)	HanCheon 2 Retention Reservoir (m ³)
08/23-08/24	560	128,905	15,375
08/27-08/28	600	183,768	33,387
09/16-09/17	810	467,000	148,000

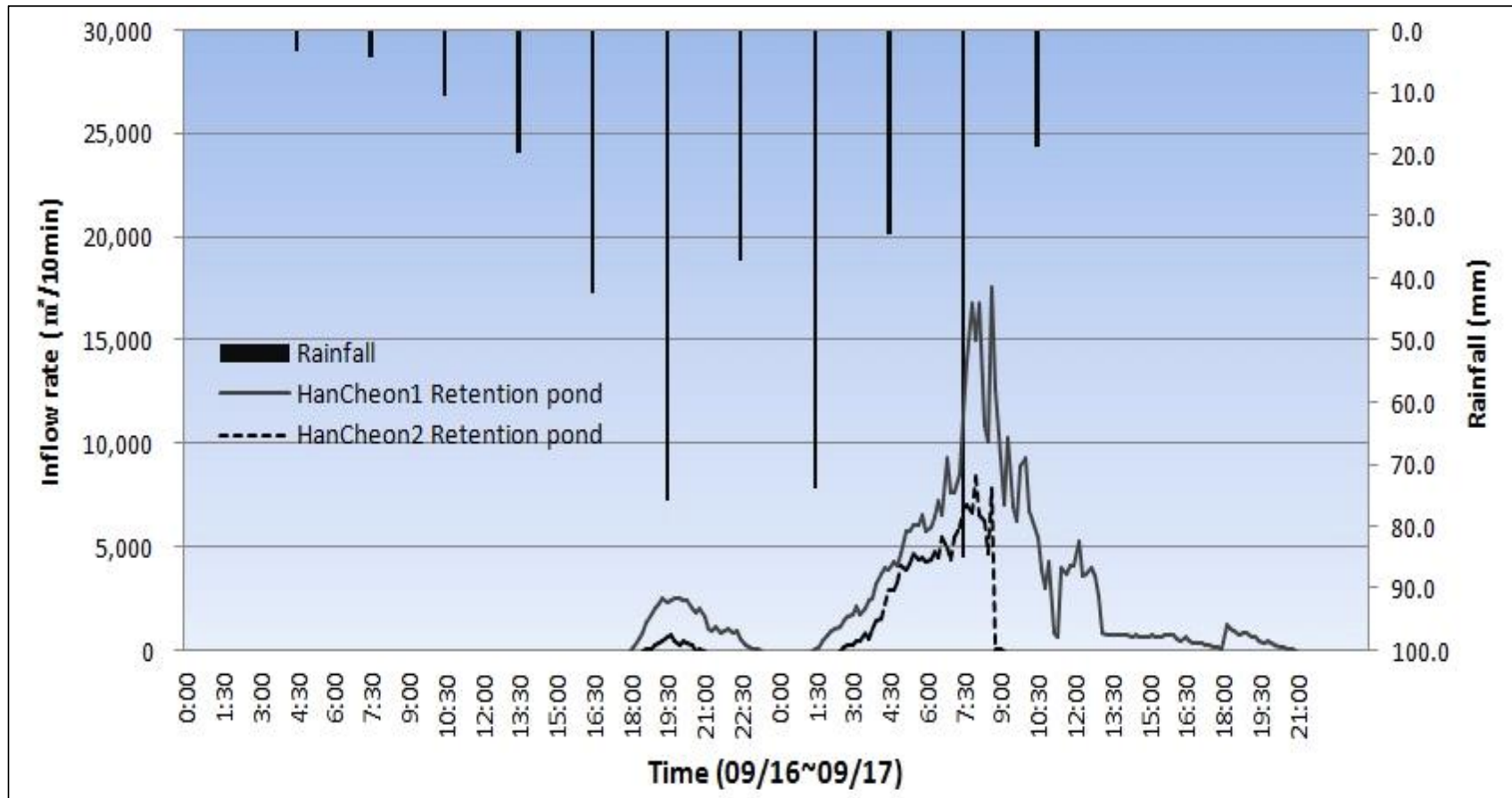


Fig. 12. Hourly variation of inflow rate in HanCheon Retention pond.

5. 한천 저류지의 비점오염물질 저감 효과

한천 저류지의 비점오염물질의 저감 효과는 연구기간 한천 저류지로 강우유출수의 유입은 있었으나 다시 하천으로 유출이 되지 않아 유입된 양만큼 하류 또는 해양으로 유출되는 오염물질의 양을 저감시킨 것으로 판단하였다. 한천 저류지로 유입된 비점오염부하량은 8월 25일 BOD는 210 kg, COD는 663 kg, T-N은 74 kg, SS는 12,037 kg이었으며, 9월 17일에는 BOD는 266 kg, COD는 4,657 kg, T-N은 327 kg, SS는 120,197 kg로 측정되었다. 이는 한천의 전체 유량 중 5.9 %와 11.2 %에 해당되는 것으로 한천 저류지의 설치에 의해 하류 또는 해양으로 유출되는 오염물질이 저감되었다.

1) 한천 저류지의 비점오염부하량

한천 저류지로 유입되는 비점원오염부하량은 2012년 8월 28일과 9월 17일 한천 제 1저류지 지점 a, b, c과 한천 제 2저류지 지점 d, e, f에서 측정된 오염물질의 농도와 각 저류지로 유입된 유량의 곱으로 계산하였다.

한천 저류지로 유입되는 비점오염원부하량은 Table 19에 나타내었다. 산정된 오염부하량은 한천 제 1저류지의 경우 가장 많은 강수량을 기록한 9월 17일에는 BOD는 266 kg, COD는 4,657 kg, T-N은 327 kg, SS는 120,197 kg으로 측정되었고, 강수량이 적으며 저류지로 유입된 유량이 적었던 8월 28일에는 BOD는 210 kg, COD는 663 kg, T-N은 74 kg, SS는 12,037 kg으로 측정되었다. 특히 SS의 경우 강수량과 유입유량에 따라 큰 차이를 보였다.

한천 제 2저류지의 경우 제 1저류지에 비해 유입유량이 적고, 오염물질의 농도가 낮아 측정된 오염부하량이 9월 17일은 BOD는 11 kg, COD는 72 kg, T-N은 2 kg, SS는 1,398 kg이며, 8월 28일은 BOD는 23 kg, COD는 54 kg, T-N은 10 kg, SS는 1,102 kg으로 측정되었다.

반면 2010년 8월 11일 한천 저류지로 유입된 오염부하량은 한천 제 1저류지의 경우 BOD는 64 kg, COD는 1,043 kg, T-N은 96 kg, SS는 2,807 kg이며, 한천 제 2저류지는 BOD 138 kg, COD 2,022 kg, T-N 207 kg, SS 2,346 kg으로 측정되었다.

2010년 8월 11일은 2012년 측정된 자료보다 유입유량은 많았으나 오염부하량은 낮았으며, 이는 2010년 8월 11일 유입되는 오염물질의 농도가 낮음을 의미하며, 또한 2년간 한천으로 유입되는 오염원이 증가하였음을 의미한다.

Table 19. Nonpoint source pollutant loads by event date

(unit : mg/L)

	Date	BOD	COD	T-N	SS
HanCheon1 Retention	2012/08/28	210	663	74	12,037
Reservoir	2012/09/17	266	4,657	327	120,197
HanCheon2 Retention	2012/08/28	23	54	10	1,102
Reservoir	2012/09/17	11	72	2	1,398

2) 한천 저류지의 오염물질 저감 효과

한천 저류지는 한천으로부터 유출되는 강우유출수를 수용하여 하천의 유량을 조절하고 하류의 홍수를 방지하는 목적으로 건설되었다. 하지만 재해방지 뿐만 아니라 많은 양의 오염물질을 함유한 유출수를 수용하여 침전처리 할 수 있는 시설로 하류 또는 해양으로 유출되는 유출수를 저류하여 침전된 오염물질을 준설 등의 작업을 통해 저감시킬 수 있다. Maria C. Maniquiz at all(2010)은 자연형 비점오염물질 저감시설 중 침투도랑을 이용하여 저감 효과를 분석하였는데 강수량이 적어 유입은 있었지만 유출이 없을 시에 유입수에 포함되어 있는 오염물질(TSS, BOD, COD, T-N, T-P 등)의 제거 효율을 100 %로 하여 연구하였다. 따라서 이번 연구에도 이와 같이 적용하였다.⁵⁾

연구기간 한천 저류지의 오염물질 저감 효과는 8월 28일 한천의 유량 3,705,789 m³ 중 한천 저류지로 총 217,7155 m³가 유입되어 전체 강우유출량 중 5.9 %가 유입되었다.

연구기간 가장 많은 유입이 발생했던 9월 17일(태풍 '산바')의 경우 한천의 유량 5,082,849 m³ 중 한천 제 1저류지로는 466,752 m³가 유입되어 전체 강우유출량 중

9.2 %가 유입되었고, 한천 제 2저류지로는 147,666 m³가 유입되어 전체 강우유출량 중 2.9 %가 유입되어 총 11.2 %의 강우유출량을 감소시키는 효과가 있었다. 11.2 %의 유입량 중에 포함되어 저류지로 유입이 일어난 오염물질의 오염부하량은 Table 19에 나타내었으며, SS는 121,594.6 kg, COD는 4728.7 kg, T-N은 329.2 kg, BOD는 277.4 kg을 하류 또는 해양으로 유입을 방지할 수 있었다. 이런 하천의 흐름을 Fig. 13에 나타내었다.

저류지로 유입되는 양은 강우 사상시 저류지의 수문 개폐 조작에 따라 크게 차이가 나는 것으로 조사되었다. 과거 2010년 태풍 ‘덴무’의 내습으로 발생한 한천의 유출은 당시 저류지까지의 한천유역에 해당하는 수문총량은 $6,250 \times 10^3$ m³이었고, 유출률 42.0 %에 해당하는 2.737×10^3 m³의 유출량이 관측되었다. 당시 한천 저류지의 유출수 유입은 한천 제 1저류지로 319×10^3 m³이 유입되었으며, 한천 제 2저류지로 690×10^3 m³이 유입되었다. 그래서 한천의 유출수는 제 1저류지로 11.7 %, 제 2저류지로 25.2 %, 총 36.9 %가 유입되었다.¹⁶⁾ 이 결과는 1년간 강우사상을 모두 반영한 것이 아닌 점에서 한계가 있으며 본 연구를 통해 산정된 한천 저류지의 비점 오염물질 제거 효과는 확대해석한 것으로 좀더 정확한 제거 효과 산정을 위해서는 1년 중 다수의 강우사상의 모니터링이 필요하며 한천 저류지 인근 지하수의 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

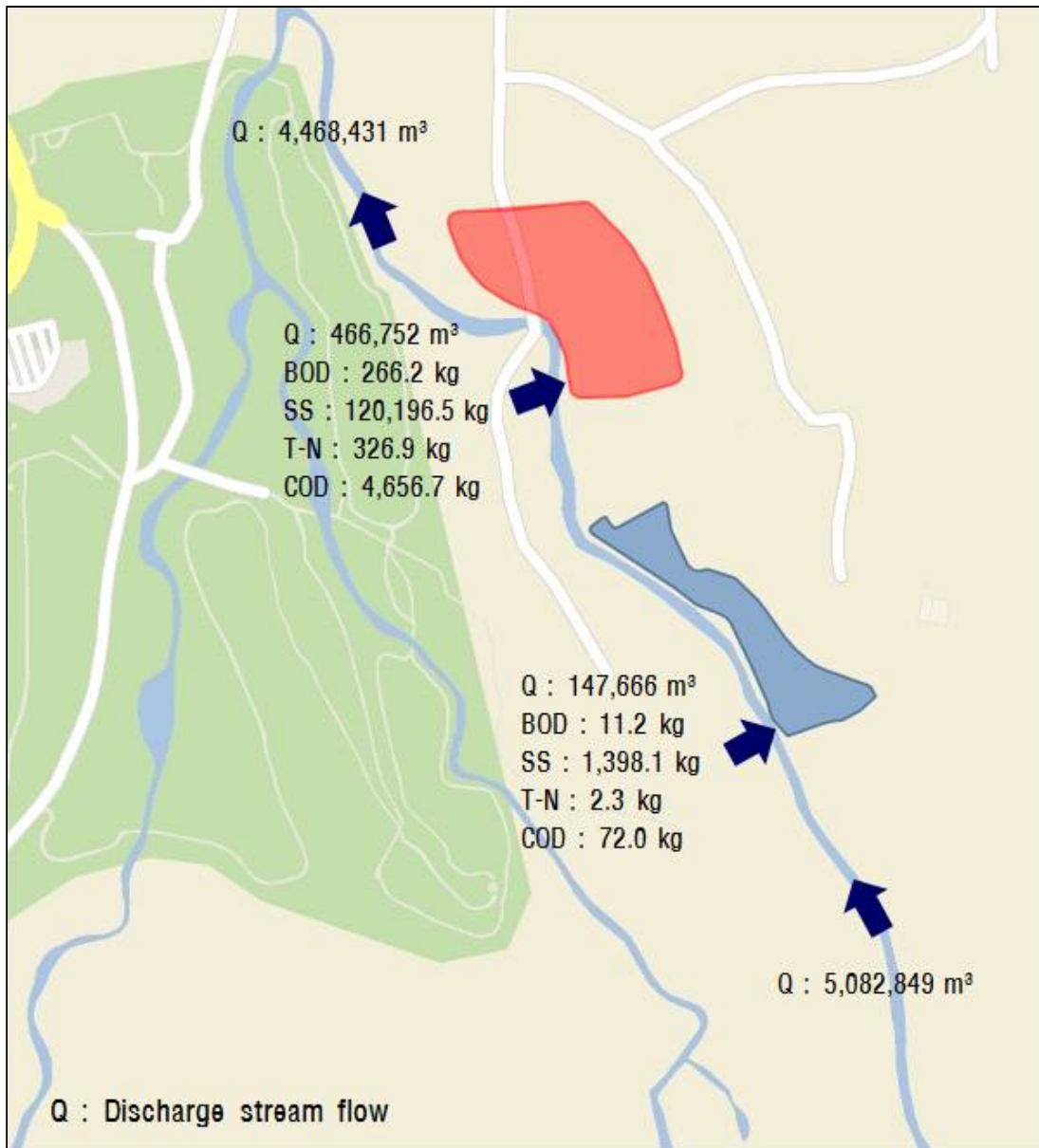


Fig. 13. The flow of outflow and pollutant(2012/09/16 ~ 2012/09/17).

V. 결 론

저류지는 하천의 유입량을 조절하여 홍수 방재기능을 하는 시설로 강우유출수를 저류하여 오염물질을 침전처리 함으로써 비점오염물질을 줄일 수 있는 가장 일반적인 시설이기도 하다. 이런 저류지 중 제주도의 한천 저류지를 대상으로 저류지로 유입되는 하천수와 인근 하천의 수질 특성을 분석하여 제주도의 비점오염물질의 특성을 분석하고 저류지로 유입되는 오염물질의 부하량을 산정하여 저류지의 비점오염원의 저감효과를 평가하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 한천의 시간에 따른 농도변화를 조사한 결과, 한천의 유출수 발생시 유출수에 많은 양의 현탁물질(Suspended solid)이 포함되어 있었다. DO의 농도는 8.73 ~ 9.02 mg/L 정도였고, SS 농도는 8.0 ~ 48.0 mg/L로 상류의 강우 사상에 따라 큰 차이를 보였으며, 탁도의 경우 15.03 ~ 31.40 NTU의 농도로 유입되었다. 또한 2,800 CFU/mL라는 높은 농도의 일반세균이 유입되어 하천 상류에 다양한 오염원이 있는 것으로 판단되었지만 농약성분은 검출되지 않아 인근 골프장으로부터 농약성분의 유출은 없는 것으로 판단되었다. 하천유역의 특징이 다른 한천과 병문천, 삼수천의 수질 농도는 유역의 개발이 가장 덜 되어 있는 병문천이 대부분의 농도에 낮게 검출되었다.
2. 한천 제 1저류지 1지와 3지의 저류수 농도를 조사한 결과, 1지의 저류수 농도에 비해 3지의 저류수 농도가 입자성물질인 SS는 31.7 %, 탁도는 40.2 % 저감되었으며, COD는 80 %, NH₃-N는 33.3 %, NO₃-N는 25 % 저감되어 검출되었다. 또한 한천 제 1저류지 내에서 검출된 물질 중에서 보존성물질인 보론, 경도, 염소이온 등은 1지와 3지의 농도 차이는 미미하였으나, 유기물의 지표인 과망간산칼륨 소비량의 경우 약 47 %가 감소하였다. 따라서 저류지에서 유출이 일어날 경우 상당량의 오염물질을 감소시켜 유출시키므로 하류 하천의 수질에 긍정적인 효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단되었다.

3. 한천 저류지에서 오염물질의 제거되는 주요 기작은 침강현상으로 한천 저류지에서 입자성물질의 침강성을 평가한 결과, 한천 저류지의 위치와 선행 강수량, 강우 강도 등에 따라 상이(相異)하나 모두 초기 신속하게 침전되는 독립침강의 형태를 보이고 있으며, 이후 침강속도가 지연되는 특성을 보였다. 입자성 물질의 침전으로 바닥에 오염물질과 토사 등이 퇴적되어 저류지의 물이 지하로 함양되면 준설 작업에 의해 오염물질을 제거 할 수 있었다.

4. 한천 저류지로 유입되어 제거된 오염물질의 양을 산정하기 위하여 한천의 유출량과 한천 저류지로 유입된 유출수의 농도와 유량을 산정하였다. 먼저 한천 저류지의 유입유량은 한천 저류지 유입부에 설치된 Weir을 통해 'Kindsvater- Cater 공식'으로 계산하였으며, 그 결과 한천의 유량 중 11.2 %에 해당하는 $615 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 유출수가 유입되었다. 그리고 한천 저류지로 유입되는 유출수와 함께 유입된 오염물질의 오염부하량은 BOD는 277.4 kg, SS는 121,594.6 kg, COD는 4728.7 kg, T-N은 329.2 kg이었다. 따라서 한천 저류지에 의해서 하류 또는 해양으로 방출되는 비점오염물질을 저감할 수 있었다.

한천 저류지는 수문의 개폐조작에 따라 저류지로 유입되는 유량 차가 크게 난다. 현재 저류지는 홍수방재의 역할을 위해 운영되고 있으며, 그에 따른 수문의 개폐도 하천의 피크(Peak) 수위에 도달되어야 실행된다. 그로 인해 하천의 유출 초기 고농도의 비점오염원은 그대로 하류 또는 해양을 유출되고 있는 실정이다. 따라서 저류지의 효과적인 활용을 위해 홍수방재와 비점오염원 저감을 위한 수문 조작 매뉴얼이 필요하며, 저류지 운영에 따른 지하수의 수질 농도변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

참고문헌

- 1) 환경부, 관계부처합동 [물관리 종합대책]의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원 관리 종합 대책, (2004).
- 2) 환경부, 물환경관리기본계획(4대강대권역수질보전기본계획, '06 ~ '15), (2006).
- 3) 관계합동부처, 제2차 비점오염원관리 종합대책, 7-21pp(2011).
- 4) ASCE and EPA, Urban Stormwater BMP performance monitoring(A Guidance Manual for meeting the National Stormwater BMP Database Requirement), GeoSyntec Consultants Urban Drainage and Flood Control District, Urban water Resources Research Council(UWRRC) of ASCE, (2002).
- 5) Marla C. Maniquiz, So-Young Lee, Lee-Hyung Kim, “Long-Term Monitoring of Infiltration Trench for Nonpoint Source pollution Control”, Water Air Soil Pollut **212**:13-26(2010).
- 6) 이민규, “침투형 저류지에 의한 비점오염물질의 처리방법”, 한탈대학교 석사학원 논문, (2010)
- 7) 김동섭, 유광현, 성진욱, 박제철, “농촌지역 비점오염물질의 유출 특성”, *Korean J.Limnol*, **44**(2):178-186, (2011).
- 8) 오세형, “제주도 한천유역 홍수조절 저류지 인공함양 지하수 모델링”, 공주대학교, 석사학위 논문, (2010).
- 9) 문덕철, 박원배, “한천저류지 운영이 하류지역 홍수위험 저감에 미치는 영향”, 제주발전연구원 제15호, 203-221pp(2011).
- 10) 박원배, “제주지역 저류지의 활용방안 연구”, 제주발전연구원, 4-58pp(2011).
- 11) 환경부, 환경백서, 환경부, 387-442(2011).
- 12) 이순탁, 최은혁, 안선복, 지홍기, “HEC-RAS를 이용한 저류지의 부정류 해석”, 대한토목학회 정기학술대회, (2005).
- 13) 문덕철, 고기원, “제주도 한천 상류 유역의 유출 특성”, 한국지하수토양환경학회지, (2009).
- 14) 환경부, 수질오염공정시험기준주해, (2011).

- 15) 김선봉, “개수로(Open-Channel) 유량계의 정의”, (주)세기정밀, (2004).
- 16) 박원배, 문덕철, “하천유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구 [한천, 화북천, 호례천을 중심으로]”, 제주발전연구원, (2010).
- 17) C. W. Richardson, and K, W, King, “Erosion and untrient losses from zero tillage on a clay soil”, *J. Agric, Eng, Res.***61**, 183~189(1995).
- 18) D. P. Thoma, S. C. Gupta, J. S. Strock, and J. F. Moncrief, “Tillage nutrient source effects on water quality and crop grain yield from a flat landuse”, *J. Environ. Qual.*, **34**, 1102~1111(2005)
- 19) Donoso, G., J.Cancino and A.Magri, “Effects of agricultural activitise on water pollution with nitrates and pesticides in the central valley of Chile”, *Water Sci. Technol.* **39**(3):49-60(1999).
- 20) 정광욱, 이승재, 이상우, 한정윤, “유역에서 토지이용과 오염원자료의 공간적 변화가 하천수질에 미치는 영향분석”, *Korean J.Limnol.* **40**(1):40-49(2007).
- 21) 김진근, “제주지역 비점오염원 관리체계 구축을 위한 하천정비사업 및 배수개선 사업 저류지 수질 모니터링”, (2012).
- 22) 하규철, 박원배, 문덕철, “제주도 토지이용 변화에 따른 직접유출량 변화량 추정”, *자연환경지질* **42**(4), 434-356pp(2009).
- 23) 이광섭, “저류형 인공습지를 이용한 비점오염물질 저감량 산정에 관한 연구” 부경대학교 석사학위논문, (2010).

감사의 글

2년이란 대학원 생활을 통하여, 일생을 보냄에 있어 피가 되고 살이 되는 좋은 경험을 많이 하였고, 많은 분들의 따뜻한 관심과 애정 어린 질책 속에 또 다시 한층 성숙해질 수 있었습니다. 이 시대를 살아가면서 많은 지식과 소양과 자세를 일깨워준 모든 분들께 한 분씩 찾아뵙지 못하고 이렇게 지면으로나마 감사의 인사를 드립니다.

먼저, 본 논문이 완성될 때까지 끊임없는 격려와 사랑으로 자상하게 지도하여 주신 조은일 지도 교수님의 무한한 은혜에 감사드리며, 연구수행에 있어서 많은 도움과 세심한 배려를 하여주신 김진근 교수님과 심사과정을 통해 면밀한 검토를 해주신 감상규 교수님 그리고 항상 많은 관심을 가지고 지켜보아 주신 허 목 교수님, 허철구 교수님, 이기호 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

그리고 입학에서부터 논문이 완성되기 까지 2년이란 배움의 여정이 힘들지 않고 즐거울 수 있게 철없는 막내의 투정을 받아 주시면서 동거 동락해온 여섯 분의 형님들과 환경공학과 사무실에서 많은 정보로 도움을 주신 양기호 형님과 박선영 누님께 고마움을 전하며, 각자의 분야에서 건승하시길 진심으로 기원합니다.

또한 본 논문이 완성될 때까지 많은 자료와 도움을 주신 제주특별자치도 수자원본부 문덕철 선배님께 감사드리며 본 연구가 수행되는 동안 많은 어려움 속에서도 조사 분석을 함께한 지안누나, 현우, 나연이, 범수, 도경이 그리고 우리 수질분석실협실 범석이와 후배들에게도 많은 고마움을 느낍니다.

많은 도움을 주신 모든 분들의 이름 하나 하나를 되새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 졸업 후 사회로 나가 어느 곳에서 무엇을 하던, 인생의 선배배로서 그리고 친구로서 많은 관심과 애정을 가지고 저를 지켜 봐주셨던 모든 분들께 부끄럽지 않은 모습으로 훗날 다시 뵈 수 있도록 어디서든 최선을 다하겠습니다.

끝으로 자식의 영광을 위해 모든 것을 희생하시고 따뜻한 사랑과 격려로써 뒷바라지 해주신 부모님 그리고 항상 옆에서 힘이 되어주는 우리형과 우리누나들에게 감사와 영광을 드리며, 항상 사랑하고 언제나 함께 할 가족들과 이 기쁨을 함께 하며 이 논문을 하늘에 계신 나의 영원한 우상 아버지께 바칩니다.