

# 파라메트릭 사영필터 이론을 이용한 3차원 트러스 구조물의 손상추정

문 효 준 \* , 서 일 교 \*\*

## Damage Assessment of 3-D Truss Structures Using Parametric Projection Filter Theory

Hyo-Jun Mun \* , Ill-Gyo Suh \*\*

### ABSTRACT

Space truss structures are composed of many members, so it is difficult to find damaged members from the whole system. Therefore, damage detection takes use of 2-step damage identification method. First, kinetic energy change ratio is used to find damage region including damaged members, and then extended parametric projection filter algorithm is used to detect damaged members in damage region. The results of 2-step damage identification method that apply to examples are next. First, in the case of finding damage region using kinetic energy change ratio, the ratios of nodes including damage members are large, so we can consider as this measure is effective. Next, in the case of finding damaged members at nodes of damage regions using extended parametric projection filter algorithm, the stiffness ratios of damaged members converge exactly.

**Key words** : Extended parametric projection filter, KECR, 2-step damage identification method

### 1. 서 론

부재의 국부적인 손상은 구조물 전체의 파괴를 초래할 있으므로 구조물의 손상부위를 파악하여 보수

및 보강을 통해 구조물의 내구연한을 증진시키고 안정성을 확보하는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 구조물의 손상 위치와 정도를 평가하는 방법을 개발하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. 저자는 지금까지 필터이론을 적용한 트러스 구조물의 손상추정에 관한 연구를 해왔다[1,2]. 여기서 칼만 필터[1,3,4]는 수렴속도가 늦는 문제점이 있었고, 사영필터[2,5]는 수렴하는 경우 수렴속도는 빠르나 발산하는 경우가 많아 수렴성이 좋지 않았다. 따라서 본 연구에서는 3차원 트러스에 대한 보다 효율적인 손상추정을 위해 확장 파라

\* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 건축학부, 첨단기술연구소

Dept. of Architectural Eng. , Research Institute of  
Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ .

메트릭 사영필터를 이용한 손상추정법의 개발을 목표로 한다. 3차원 트러스 구조물은 부재수가 많으므로 전체 시스템에서 국부적인 손상영역을 추정하여 미지수를 줄여 최종적으로 손상부재의 위치와 손상정도를 추정하는 2단계 손상추정법을 도입한다. 우선, 1단계에서는 운동에너지의 변화를 통해 손상부재를 포함한 국부 손상영역을 추정하고, 2단계에서는 추정된 국부 손상영역에서 확장 파라메트릭 사영필터 알고리즘을 이용하여 손상부재의 위치와 손상정도를 추정한다.

그리고 화상복원문제 등에서 지금까지는 파라메타  $\gamma$  값을 시행착오를 거쳐서 가정하여 사용하는 경우가 많았으나[5], 본 논문에서는 각 스텝마다 파라메타  $\gamma$  값을 구할 수 있는 방법을 제안한다.

마지막으로 3차원 트러스 구조물의 수치해석 예를 통하여 제안된 해석법의 유효성을 밝힌다.

## II. 확장 파라메트릭 사영필터 이론

### 2.1. 파라메트릭 사영필터

파라메트릭 사영필터는 사영필터(Projection filter)를 변형한 필터로서, 사영필터의 제약 조건  $BM=P$ 를 완화한 필터이다. 즉 노이즈가 없는 경우의 추정량  $\hat{z}$ 을  $z$ 의  $R(M^T)$ 로의 최량근사  $Pz$ 로부터 약간 이동시킴으로서 노이즈가 있는 경우의 추정량의 흠여짐을 내폭 작게 할 수 있도록 한 것이다. Fig. 1은 파라메트릭 사영필터의 개념적 수리모형을 나타낸 것이다. 파라메트릭 사영필터는 다음과 같은 평가함수의 최소화로부터 얻을 수 있다.

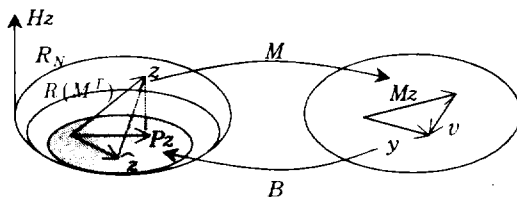


Fig. 1 Mathematical model of parametric projection filter

$$J_{PPF}(B) = \|BM - P\|^2 + \gamma E_v(\|Bv\|^2) \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 사영행렬을 나타내고  $B$ 는 복원 사상으로 파라메트릭 사영필터에 해당된다.  $\gamma$ 는 추정치의 최량근사 부분과 잡음부분 간의 균형을 조정하는 파라미터로서  $\gamma > 0$ 인 실수이다.

### 2.2. 확장 파라메트릭 사영필터

확장 파라메트릭 사영(Extended parametric projection)필터는 선형 시스템을 대상으로 하는 파라메트릭 사영필터[5]를 비선형 시스템에 적용시킨 필터이며, 다음의 이산시간 확률시스템을 대상으로 한다.

상태방정식

$$z_{t+1} = \phi_t(z_t) + w_t \quad (2)$$

관측방정식

$$y_t = m_t(z_t) + v_t, \quad t \geq 0 \quad (3)$$

여기서  $z_t, y_t, w_t, v_t$ 는 확률변수 벡터로서 각각  $t$  시간 스텝에서의 상태벡터, 관측벡터, 시스템 잡음벡터 및 관측 잡음벡터이다. 확률변수 벡터의 통계적 성질을 다음과 같이 가정한다.

$$E\{z_0\} = \bar{z}_0, \quad E\{w_t\} = E\{v_t\} = 0$$

$$E\left\{ \begin{bmatrix} w_t \\ v_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_t^T & v_t^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} S_t & 0 \\ 0 & Q_t \end{bmatrix} \delta_{tt}$$

$$E\{w_t z_0^T\} = E\{v_t z_0^T\} = 0, \quad (t > 0)$$

$$E\{[z_0 - \bar{z}_0][z_0 - \bar{z}_0]^T\} = R_0 \quad (4)$$

여기서,  $E$ 는 기대치 연산기호,  $\delta_{tt}$ 은 kronecker 델타이며,  $z_0$ 는 상태벡터  $z_t$ 의 초기벡터,  $S_t, Q_t, R_0$ 는 각각 시스템 잡음 공분산 행렬, 관측 잡음 공분산 행렬 및 추정오차 공분산 행렬을 나타낸다. 여기서  $\phi_t(z_t), m_t(z_t)$ 는 비선형 벡터 함수이다. 상태벡터

$z_t$ 에 대해 연속미분 가능하다고 가정한다. 이 가정 하에서  $z_t$ 는 추정량  $\hat{z}_{t+1/t}$ 의 주위에서 테일러 (Taylor) 전개하고 고차항을 무시하면 다음과 같이 선형화된 확률 시스템이 얻어진다.

$$z_{t+1} = \Phi_t z_t + w_t + u_t \quad (5)$$

$$\eta_t = M_t z_t + v_t \quad (6)$$

여기서

$$u_t = \phi_t(z_{t/t}) - \Phi_t \hat{z}_{t/t} \quad (7)$$

$$\eta_t = y_t - m_t(\hat{z}_{t/t-1}) + M_t \hat{z}_{t/t-1} \quad (8)$$

여기서  $\Phi_t$ 는 상태 천이(遷移)행렬(state transition matrix),  $M_t$ 는 관측행렬(observation matrix)로 기지의 확정행렬로 한다. 이상으로부터 비선형 시스템을 선형화함으로써 얻어진 식(5)와 (6)로써 나타난 시스템에 대한 확장 파라메트릭 사영필터는 다음과 같다.

< 필터방정식 >

$$\hat{z}_{t/t} = \hat{z}_{t/t-1} + B_t [y_t - m_t(\hat{z}_{t/t-1})] \quad (9)$$

$$\hat{z}_{t+1/t} = \phi_t(\hat{z}_{t/t}) \quad (10)$$

< Filter Gain >

$$B_t = M_t^T (M_t M_t^T + \gamma Q_t)^{-1}, \quad \gamma > 0 \quad (11)$$

< 추정오차의 공분산 행렬방정식 >

$$\begin{aligned} R_{t/t} = & R_{t/t-1} + B_t (M_t R_{t/t-1} M_t^T + Q_t) B_t^T \\ & - B_t M_t R_{t/t-1} - R_{t/t-1} M_t^T B_t^T \end{aligned} \quad (12)$$

$$R_{t+1/t} = \Phi_t R_{t/t} \Phi_t^T + S_t \quad (13)$$

< 초기조건 >

$$\hat{z}_{0/-1} = \bar{z}_0, \quad R_{0/-1} = R_0 \quad (14)$$

여기서  $\hat{z}_{t/t}$ 는  $t$  스텝에서의 관측벡터  $y_t$ 에 의해 얻어지는  $z_t$ 의 추정치이고,  $R_{t/t}$ 는  $\hat{z}_{t/t}$ 의 추정 오차 공분산행렬이다.

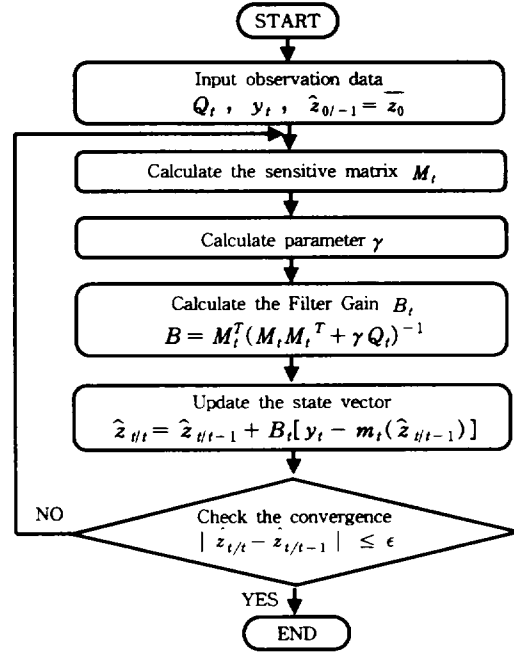


Fig. 2 Parametric projection filter algorithm

### III. 트러스 구조물의 손상추정법

#### 3.1. 상태방정식과 관측방정식

관측데이터인 고유진동수 및 모드진폭과 미지량의 강성의 관계는 비선형이기 때문에 다음과 같이 모델화 할 수 있다.

$$y = m(z) + v \quad (15)$$

여기서,  $y$ 는 관측벡터로서 고유진동수 및 모드진폭을,  $v$ 는 관측 잡음벡터를 나타낸다.  $m(z)$ 는  $z$ 에 관한 비선형 함수로서 손상지표를 나타낸다. 또한 상태량 즉 부재의 강성은 정수이어서 시간적으로 변화하지 않는 파라미터이기 때문에 시간적 천이구조(遷移構造)를 갖지 않게 된다. 따라서 시스템잡음  $w_t$ 는 고려할 필요가 없으므로 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_{t+1} = I z_t \quad (16)$$

여기서 아래 첨자  $t$ 는 반복계산에서 각 스텝을 나타내면,  $I$ 는 단위행렬을 나타낸다. 또한 식(16)에서 주어진 각 스텝에서의 상대방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_t = m_t(z_t) + v \quad (17)$$

그리고 초기치  $z_0$ , 추정오차공분산 행렬  $R_0$ 는 일반적으로 모르기 때문에 초기치를 가정하여 계산한다.

### 3.2. 파라메타 $\gamma$ 의 계산

파라메트릭 사영필터를 사용한 경우 상태량을 추정하는 과정은 식(9)과 식(11)에 의해서 이루어진다. 식(9)은 기울기가  $B_t$ 인 직선 식으로 생각할 수 있고 이 기울기를 결정하는 것은  $\gamma$ 임을 알 수 있다. 파라메타  $\gamma$ 는 다음과 같은 식을 통해 계산되어진다.

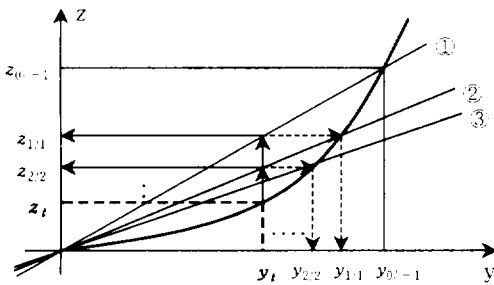


Fig. 3 Relationship of states and observed data

$$\hat{z}_{t|t-1} = B_t m_t(\hat{z}_{t|t-1}) \quad (18)$$

$$\gamma Q_t (M_t M_t^T)^{-1} M_t \hat{z}_{t|t-1} = m_t(\hat{z}_{t|t-1}) - M_t \hat{z}_{t|t-1} \quad (19)$$

식(9)을 원점(0,0)과 초기치  $(y_{0,t-1}, z_{0,t-1})$ 을 지나는 직선으로 Fig. 3의 직선 ①과 같이 나타낼 수 있

다. 이를 스텝  $t$ 에 대해서 일반화하면 식(18)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 정리하면 (19)와 같이 나타낼 수 있다. 식(19)에서  $\gamma$ 를 계산하면 스텝  $t=1$ 에서의  $B_1$ 을 계산할 수 있고, 식(9)를 통해 관측치  $y_t$ 에 대한 추정치  $z_{1/t}$ 를 구할 수 있다. 그러나 이 값은 실제 관측치  $y_t$ 에 대한 값이 아니고 직선①에서의 값이므로 추정치  $z_{1/t}$ 의 관측치  $y_{1/t}$ 를 구해 다시 원점과 추정된 점  $(y_{1/t}, z_{1/t})$ 를 지나는 직선을 그림 3의 직선 ②와 같이 나타낸다. 직선①에서와 같은 과정을 통해 각 스텝마다  $\gamma$ 를 계산하고  $B_t$ 을 계산할 수 있다. 위 과정을 반복함으로써 관측치  $y_t$ 에 대한 상태량  $z_t$ 를 구할 수 있다. 따라서 상태량을 추정하기 위한 파라메타  $\gamma$ 값을 결정하기 위해 시행착오를 거치지 않고 각 스텝마다 적절한  $\gamma$ 값을 결정할 수 있다.

### 3.3. 운동에너지의 변화

본 논문에서는 각 자유 절점에서 손상 전후의 운동 에너지 분포의 변화를 손상지표로 하여 손상 영역을 추정하기로 한다. 손상 영역을 줄여 나가기 위한 손상 지표로서 운동 에너지 변화율(Kinetic energy change ratio ; KECR)을 다음과 같이 정의한다.

$$KECR = \frac{(E_{ij})_{damaged} - (E_{ij})_{undamaged}}{(E_{ij})_{undamaged}} \quad (20)$$

식(20)에서 절점에서의 운동 에너지 분포는 모드 특성을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$E_{ij} = \sum_{r=1}^3 m_j \omega_i^2 \phi_{rj}^2, \quad (r=1,2,3) \quad (21)$$

여기서,  $m_j$ 는 절점  $j$ 에서의 질량,  $\phi_{rj}$  ( $r=1,2,3$ )은 절점  $j$ 에서  $i$ 차 모드의  $x, y, z$ 성분의 진폭비,  $\omega_i$ 는  $i$ 차 모드의 고유진동수이다. 식(20)에서 KECR은 각각의 모드마다 정의되므로 모든

모드에 대해서 적용하기는 어렵다. 따라서 많은 모드 중에서 손상검출에 유효한 모드를 선출해 낼 필요가 있다. 이를 위해 다음과 같이 정의된 유효 질량비 (Effective mass ratio : EMR)를 이용한다.

$$EMR = \frac{M_n}{\sum_{n=1}^N M_n}, \quad M_n = \frac{\left(\sum_{r=1}^L m_r \phi_{ri}\right)^2}{\sum_{r=1}^L m_r \phi_{ri}^2} \quad (22)$$

여기서, N은 전체 모드수, L은 절점수를 나타낸다. 여기서 ( r=1, 2, 3 )이고, 유효 질량비는 x, y, z 각 방향 성분에 대해서 구한다. KECR이 질량에 대해 정의된 지표이므로 유효 질량비가 큰 모드에 대해 KECR을 적용하도록 한다. KECR의 값이 주변의 값에 비해서 큰 절점은 손상된 부재가 포함되었을 가능성이 크기 때문에 해당 절점을 손상 영역으로 추정할 수 있다.

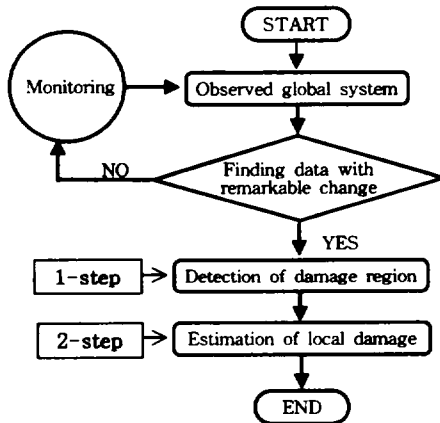


Fig. 4 2-step damage detection algorithm

#### IV. 수치해석 예

##### 4.1. 해석예제 1

Fig. 5에 나타난 입체 트러스 구조물은 부재단면적  $A=10.0 \text{ cm}^2$ , 영계수  $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ , 밀도

$\rho = 0.00787 \text{ kg/cm}^3$  이다. 경계조건은 절점 1, 6, 11이 x, y, z 모든 방향에 대해 고정되어 있다. 관측 데이터는 일반적으로 구조물의 진동을 모니터링해서 얻은 계측 데이터를 사용해야 하나 본 논문에서는 순해석에 의한 수치해를 측정 데이터로 사용하였다.

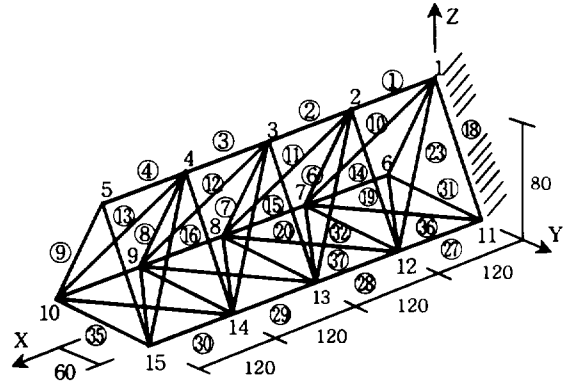


Fig. 5 Analysis model 2 (Units : cm)

관측 데이터로서 고유 진동수는 1차에서 5차까지의 5개의 고유 진동수와 KECR이 큰 절점에서의 y, z 방향 모드형상 데이터를 채택하였다.

본 모델에서는 Table 1에서와 같이 5가지의 손상 상태를 가정하였다. Case 1 ~ Case 3은 단일 부재 손상인 경우로서 부재 ②, ⑥, ⑩가 각각 50% 씩 손상된 경우이고 Case 4 ~ Case 5는 복수 부재 손상인 경우로서 각각 부재 ②, ⑥이 50% 씩 그리고 ⑩, ⑫가 50%씩 손상된 경우를 나타낸다.

Table 1 Assumed damage rate

Case	Damaged member			
	No. 2	No. 6	No. 11	No.32
1	50%			
2		50%		
3				50%
4	50%	50%		
5			50%	50%

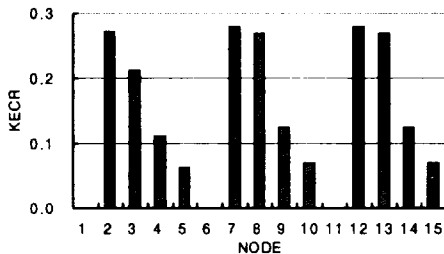
손상추정을 위한 확률분포로 관측 잡음은 관측치의 30%를 표준편차로 하는 분포로 가정하고 초기조건으로 정상시의 강성을 초기 상태벡터로 한다. 또 감도행렬 계산을 위한 초기치는 정상시의 30%의 손상을 가

정한다. 수치 예제 모델에서 손상 전의 유효 질량비 (EMR)를 Table 2에 나타낸다. Table 2에서 유효 질량비가 1차, 2차, 4차 및 6차 모드에서 대체적으로 크게 나오고, 그 밖에 모드는 매우 작은 것을 볼 수 있다. 본 모델의 구조물은 z방향에 대한 구조적 거동이 지배적이므로 z방향에 대해서 EMR이 큰 2차 모드에서 각각의 Case 별로 KECR를 계산한다.

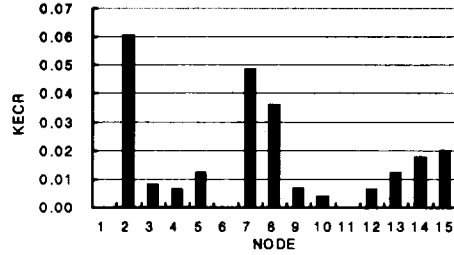
Table 2 Effective mass ratio

Mode	Effective Mass Ratio(EMR)		
	x	y	z
1	0.00000	0.47791	0.00000
2	0.02556	0.00000	0.25036
3	0.00000	0.01926	0.00000
4	0.32773	0.00000	0.17399
5	0.00000	0.15240	0.00000
6	0.45326	0.00000	0.00586
7	0.00000	0.00681	0.00000
8	0.00207	0.00000	0.01515
9	0.00000	0.02864	0.00000
10	0.01156	0.00000	0.00478

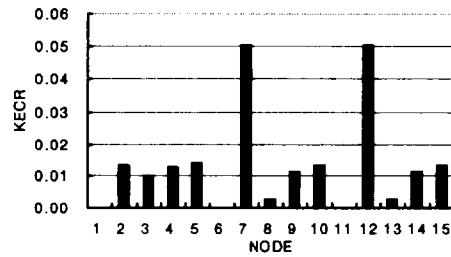
Fig. 6은 2차 모드에서 각 Case 별 KECR값을 나타낸다. Case 1은 부재 ②가 손상된 경우로 손상된 부재와 관계된 절점 2, 3에서 KECR값이 큰 것을 볼 수 있다. 이와 더불어 절점 7, 8, 11, 12에서도 KECR값이 크게 나오므로 절점 2, 3, 7, 8, 11, 12와 관계된 부재가 손상되었다고 판단할 수 있다. 이와 같이 각 Case 별로 KECR값이 큰 절점과 관계된 부재들이 손상되었다고 판단하여 각 Case 별 손상 영역 추정을 Table 3에 나타낸다. Table 3은 각 Case 별로 KECR값이 큰 절점과 관계된 부재들을 나타낸 것으로, 이 부재들을 대상으로 손상 추정이 이루어진다. Case 1, Case 4는 KECR값이 큰 절점이 많아 그 만큼 손상 추정할 상태량의 개수가 많아진 것을 볼 수 있다.



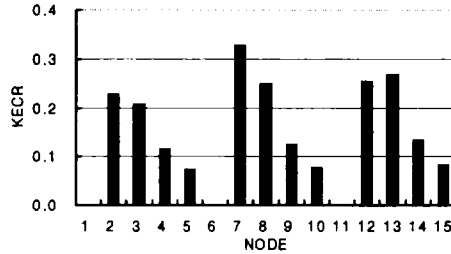
(a) Damage of member 2 (Case 1)



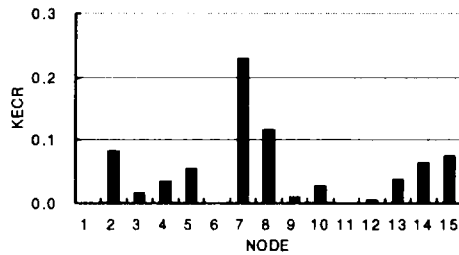
(b) Damage of member 6 (Case 2)



(c) Damage of member 32 (Case 3)



(d) Damage of member 2, 6 (Case 4)



(e) Damage of member 11, 32 (Case 5)

Fig. 6 KECR of second mode

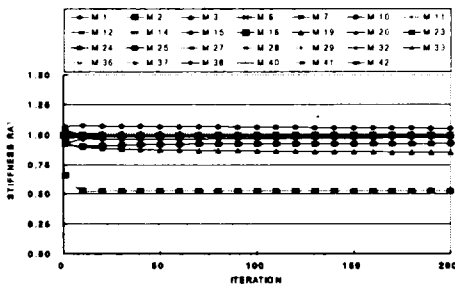
Fig. 7은 각 Case 별로 상태량의 손상 추정 결과를 나타낸 것이다. 단일 부재 손상인 경우 Case 1은 상태량의 개수가 많음에도 불구하고 수렴정도가 안정적

이고 손상된 부재의 위치와 손상 정도 잘 추정하였다. 그러나 손상되지 않은 부재들에서는 추정오차가 발생한 것을 볼 수 있다. Case 2와 Case 3도 상태량의 수렴정도가 안정적이며 손상된 부재의 위치와 손상 정도를 잘 추정한 것을 볼 수 있다.

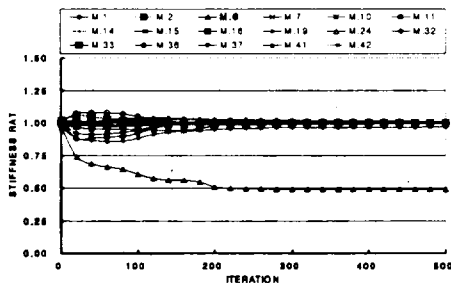
Table 3 Region of damage assessment

Case	Node	Member
1	2,3,7,8, 12,13	1,2,3,6,7,10,11,12,14,15,16,19,20,23, 24,25,27,28,29,32,33,36,37,38,40,41,42
2	2,7,8	1,2,6,7,10,11,14,15,16,19, 24,32,33,36,37,41,42
3	7,12	6,10,14,15,19,23,27,28,32,36,37,40,41
4	2,3,7,8, 12,13	1,2,3,6,7,10,11,12,14,15,16,19,20,23, 24,25,27,28,29,32,33,36,37,38,40,41,42
5	7,8	6,7,10,11,14,15,16,32,33,36,37,41,42

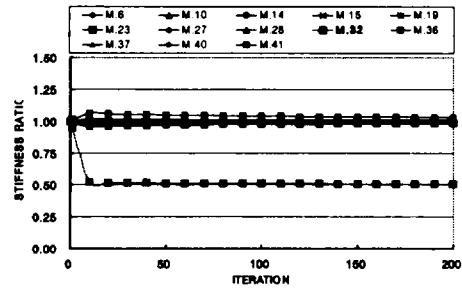
복수 부재 손상의 경우의 Case 4와 Case 5는 손상되지 않은 부재들의 수렴 과정에서 다소 추정오차가 발생하였으나, 손상된 부재의 손상 위치와 손상 정도를 잘 추정하는 것을 볼 수 있다.



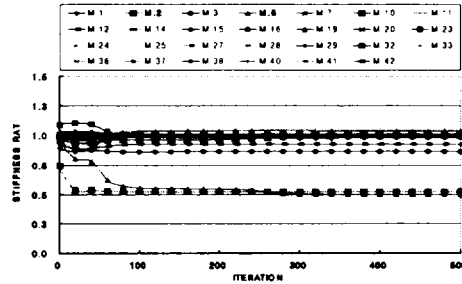
(a) Damage of member 2 (Case 1)



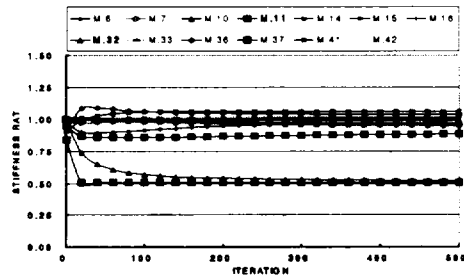
(b) Damage of member 6 (Case 2)



(c) Damage of member 32 (Case 3)



(d) Damage of member 2, 6 (Case 4)



(e) Damage of member 11, 32 (Case 5)

Fig. 7 Result of damage detection by observed data

Fig. 8은 단일 부재 손상인 Case 2에 대해서 칼만 필터를 이용하여 손상 추정을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 손상되지 않은 부재뿐만 아니라 손상된 부재의 추정오차가 크고 파라메트릭 사영필터에 의한 결과에 비해 손상 추정과정이 잘 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다.

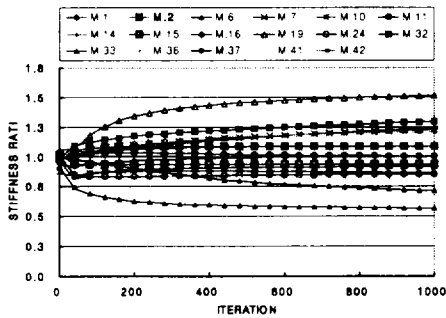


Fig. 8 Result of damage detection by kalman filter in case 2

4.2. 해석예제 2

Fig. 9에 나타난 입체 트러스 구조물은 부재단면적  $A=10.0 \text{ cm}^2$ , 영계수  $E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ , 밀도  $\rho=0.00787 \text{ kg/cm}^3$  이다. 경계조건은 절점 1, 4, 13, 16이 x, y, z 모든 방향에 대해 고정되어 있다. 관측 데이터로서 고유 진동수는 1차에서 5차까지의 5개의 고유 진동수와 KECR이 큰 절점에서의 모드형상 데이터를 채택하였다. 강성저하를 판단하는 강성비는 '손상 후 강성/손상 전 강성'으로 표시한다.

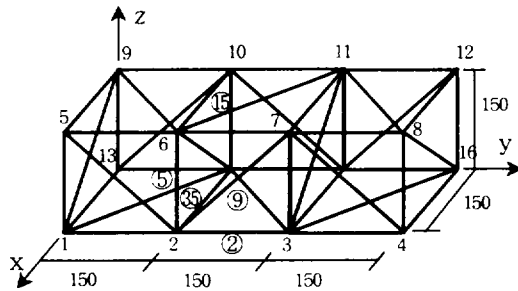


Fig. 9 Analysis model 2 (Units : cm)

본 모델에서는 Table 4에서와 같이 5가지의 손상 상태를 가정하고 손상추정을 위한 확률분포의 가정은 모델 1과 같다.

수치 예제 모델에서 손상 전의 유효 질량비(EMR)를 Table 5에 나타낸다.

Table 4 Assumed damage rate

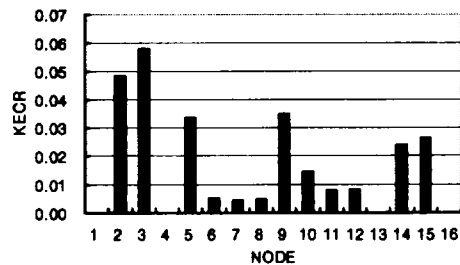
Case	Damaged member				
	No.2	No.5	No.9	No.15	No.32
1	50%				
2			50%		
3				50%	
4	50%				70%
5	50%	50%			70%

Table 5 Effective mass ratio

Mode	Effective Mass Ratio(EMR)		
	x	y	z
1	0.326032	0.007002	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.346187
3	0.106134	0.324171	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.041556
5	0.073488	0.219302	0.000000
6	0.099311	0.035817	0.000000
7	0.000000	0.168244	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.003975
9	0.000000	0.000000	0.029934
10	0.000761	0.000512	0.000000

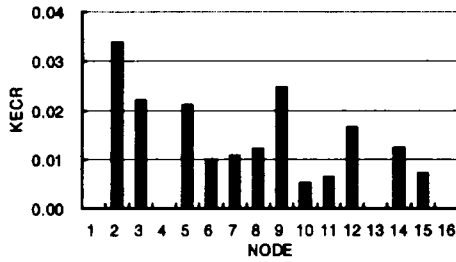
Table 5에서 유효 질량비가 1차, 2차, 3차 모드에서 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 본 모델의 구조물은 x 방향에 대한 구조적 거동의 영향이 크다고 판단하여 x방향에 대해서 EMR이 큰 1차 모드에서 각각의 Case 별로 KECR를 계산한다.

Fig. 10은 1차 모드에서 각 Case 별 KECR값을 나타낸다. Case 1은 부재 ②가 손상된 경우로 손상된 부재와 관계된 절점 2, 3에서 KECR값이 큰 것을 볼 수 있다. 이와 더불어 절점 5, 9에서도 KECR값이 크게 나오므로 절점 2, 3, 5, 9와 관계된 부재가 손상되었다고 판단할 수 있다.

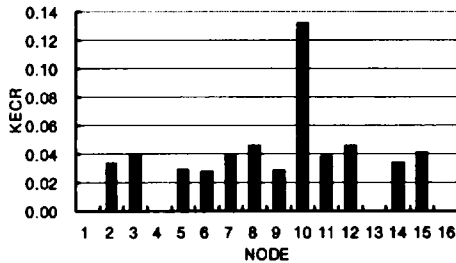


(a) Damage of member 2 (Case 1)

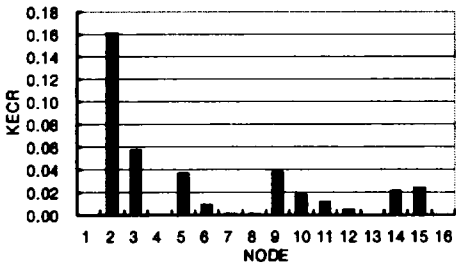




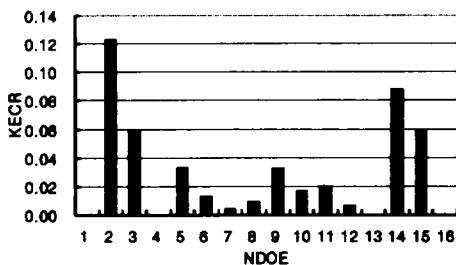
(b) Damage of member 9 (Case 2)



(c) Damage of member 15 (Case 3)



(d) Damage of member 2, 32 (Case 4)



(e) Damage of member 2, 5, 32 (Case 5)

Fig. 10 KECR of first mode

이와 같이 각 Case 별로 KECR값이 큰 절점과 관계된 부재들이 손상되었다고 판단하여 각 Case별로

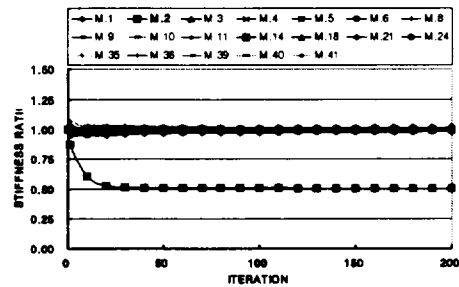
추정된 손상영역을 Table 6에 나타낸다. Table 6은 각 Case 별로 KECR값이 큰 절점과 관계된 부재들을 나타낸 것으로, 이 부재들을 대상으로 손상 추정이 이루어진다.

Table 6 Region of damage assessment

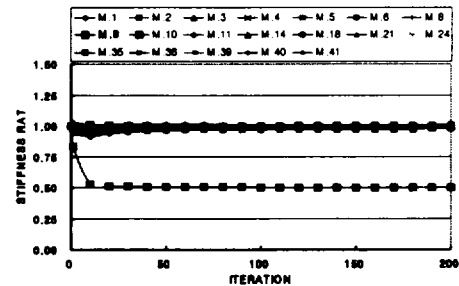
Case	Node	Member
1	2,3,5,9	1,2,3,4,5,6,9,10,11,14,18, 21,24,35,36,39,40,41,42
2	2,3,5,9	1,2,3,4,5,6,9,10,11,14,18, 21,24,35,36,39,40,41,42
3	10	15,21,22,25,28,29
4	2	1,2,5,8,9,35
5	2,14	1,2,5,8,9,25,31,32,35,38,39

Fig.11은 각 Case 별로 상태량의 손상추정 결과를 나타낸 것이다. 단일 부재 손상인 경우 Case 1, 2, 3 모두 상태량의 수렴이 빠르고 손상된 부재의 손상 위치와 손상정도를 잘 추정하고 있는 것을 볼 수 있다.

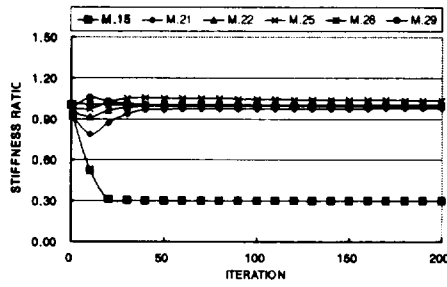
복수 부재 손상의 경우 Case 4, 5 모두 손상정도가 다른 경우에도 상태량의 수렴정도가 빠르고 손상되지 않은 부재뿐만 아니라 손상된 부재의 손상 위치와 손상 정도를 잘 추정하고 있는 것을 볼 수 있다.



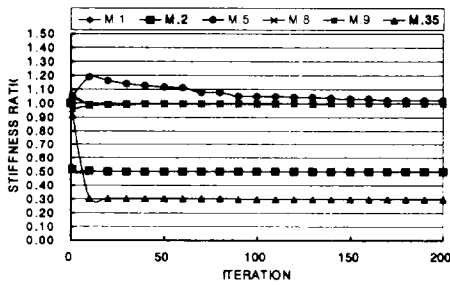
(a) Damage of member 2 (Case 1)



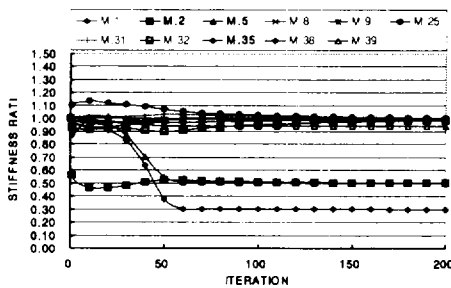
(b) Damage of member 9 (Case 2)



(c) Damage of member 15 (Case 3)



(d) Damage of member 2, 35 (Case 4)



(e) Damage of member 2, 5, 35 (Case 5)

Fig. 11 Result of damage detection by observed data

### V. 결론

본 논문에서는 3차원 트러스 구조물의 손상검출을 위한 2단계 손상 추정법을 제안하였다. 또한 각 스텝마다 적절한 파라메타  $\gamma$  값을 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 제시된 추정법을 해석예제에 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 1단계인 손상영역추정 단계에서는 대체적으로 손상된 부재가 포함된 절점에서 KECR값이 다른 절점에 비해 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 그러나 손상되지 않은 부재가 포함된 절점에서도 KECR값이 크게 나오는 경우가 발생하여 그만큼 손상 추정을 수행할 상태량의 개수가 많아졌다.
- 2) 2단계인 확장 파라메트릭 사영필터 알고리즘을 사용한 손상 추정 단계에서는 손상 영역을 대상으로 단일 부재 손상의 경우뿐만 아니라 복수 부재 손상인 경우 모두 손상 부재의 손상 위치와 손상 정도를 잘 추정하였다.
- 3) 칼만 필터로 손상 추정을 수행한 결과 파라메트릭 사영 필터에 비해 상태량의 수렴속도가 낮고 손상된 부재뿐만 아니라 손상되지 않은 부재들의 추정오차가 큰 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 확장 파라메트릭 사영필터를 이용한 2단계 손상추정법을 해석예제에 적용한 결과 3차원 트러스 구조물에서의 손상부재의 손상위치와 손상정도를 잘 추정하고, 칼만 필터보다 우수한 손상추정법임을 보였다.

### 참고 문헌

- 1) 서일교, 1999, 확장 칼만 필터를 이용한 2차원 트러스 구조물의 손상추정, 대한건축학회 논문집, 제 15권 4호, pp. 3 - 12.
- 2) 서일교, 임은지, 2003, 사영필터를 이용한 2차원 트러스 구조물의 2단계 손상추정, 대한건축학회 학술 발표논문집, 제23권 제 2호, pp. 213 - 216.
- 3) 片山 徹, 1983, 應用カルマンフィルタ, 朝倉書店, p.198.
- 4) 西山 清, 1994, ベソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善株式会社, p.171.
- 5) 小川英光, 1988, 信號と畫像の復元[III](最適復元のための射影フィルタ族), 電子情報通信學會論文集, Vol. 71, No 7, pp. 739-748.