

확장 칼만 필터를 이용한 2차원 트러스 구조물의 손상 추정에 적용된 5가지 손상지표의 유효성 및 수렴성에 관한 연구

A Study on the Effectiveness and Convergency of Five Damage Measures for Damage Assessment of 2-Dimensional Truss Structures using Extended Kalman Filter

유숙경*
Yoo, Suk-Kyong

서일교**
Suh, Il-Gyo

권택진***
Kwun, Taek-Jin

Abstract

In this paper, a study of the effectiveness and convergency of five damage measures for structural damage detection of 2-dimensional truss structure using the extended Kalman filtering algorithm is presented. These damage measures are associated with the change in mode shape and displacement due to structural damage. Damage measures contain the change in natural frequency, mode shape, curvature of mode shape, displacement of static force and curvature of displacement of static force. The effectiveness and convergency of these damage measures by using extended Kalman filtering algorithm are demonstrated with the numerical examples.

1. 서론

우리가 접하는 고층건물, 타워, 다리와 해양 구조물등과 같은 대부분의 구조물들은 여러 가지 외부환경이나 자연재해에 의해 손상을 입는다. 그리고 구조물의 수명이 다할 때까지 손상이 누적되어 간다.

따라서 최근들어 내구성과 안전성의 측면에서 기존 구조물의 내구연한을 합리적으로 예측할 필요성이 인식되고 있다. 이에따라 유지, 보수 및 교체 등을 위해 구조물의 손상위치를 추정하고, 손상정도를 평가하는 방법을 개발하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. 특히 지진발생 후에, 현존하는 구조물의 상황에 대한 우려의 증가는 다양한 비파괴 평가방법을 이용한 손상추정에 대한 연구의 원인이 되었다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

그러나 손상부를 파악하고자 하는 경우 그 위치나 정도를 정확히 알아내는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 기존 구조물 내부의 손상부 추정등을 수행하는데 역문제해석은 매우 유용하여 최근 많은 관심을 끌고 있다⁽¹⁾.

특히 실험에 의해 측정된 손상 전과 손상 후의 구조물의 진동특성 변화를 이용하여 확률적으로 손상을 탐지하는 방법에 대한 연구가 많이 제시되고 있다. 진동대 실험 장비를 이용하여 구조물을 진동시켜 얻은 고유진동수와 모드형상의 정보는 구조물을 해체하지 않고 얻어지므로 경제적인 측면에서도 매우 유용한 정보이기 때문이다.⁽²⁾⁻⁽⁵⁾

그러나 대상으로 하는 시스템과 측정 데이터에는 잡음이 포함되어 이는 확률적으로 다루어져야할

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정 회 원 · 제주대학교 건축공학과 교수

*** 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

내용이나 기존의 방법들은 확률적으로 적절히 고려하지 못하는 문제점이 있다.⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾

따라서 본 연구는 구조물 내부의 손상부 추정을 수행하는 데 적용되는 역문제해석을 대상으로 관측잡음을 고려한 비선형 시스템에 대한 확장 칼만 필터(Kalman filter)이론⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾을 적용하여 보다 효율적이고 정밀한 해석이 가능하도록 하며, 또한 손상지표를 다양화시켜 각각의 지표에 대해 유효성과 수렴성을 검증하는 것을 목표로 한다.

본 논문에서 해석 대상인 2차원 트러스 구조물의 손상을 추정하기 위해 채택한 관측 지표로는 각각 고유진동수, 모드 형상 진폭, 모드 형상 진폭의 곡률, 정적 하중에 의한 절점 변위 및 정적하중에 의한 절점 변위의 곡률이다.⁽¹¹⁾ 이상의 다섯가지 손상지표에 대해 수치해석 예를 통하여 그 유효성을 밝힌다.

2. 확장칼만필터

확장 칼만 필터 이론은 선형 시스템을 대상으로 하는 칼만 필터 이론을 비선형 문제에 확장 적용시킨 필터이론으로, 비선형 벡터함수를 상태벡터의 추정량의 주위에서 Taylor 전개하고 고차항을 무시하여 선형화시킨 다음의 이산시간 확률시스템을 대상으로 한 것이다.⁽⁸⁾

상태방정식

$$\mathbf{x}_{t+1} = f_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{g}_t(\mathbf{x}_t) \boldsymbol{\omega}_t \quad (1)$$

관측방정식

$$\mathbf{y}_t = h_t(\mathbf{x}_t) + \boldsymbol{\nu}_t \quad t \geq 0 \quad (2)$$

\mathbf{x}_t 는 n차원 상태벡터, \mathbf{y}_t 는 p차원 관측벡터이다. 시스템잡음, 관측잡음 및 초기치 $\boldsymbol{\omega}_t, \boldsymbol{\nu}_t, \mathbf{x}_0$ 는 가우스확률 벡터로써 확률변수 벡터 및 공분산행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$E\{\boldsymbol{\omega}_t\} = E\{\boldsymbol{\nu}_t\} = \mathbf{0}, \quad E\{\mathbf{x}_0\} = \bar{\mathbf{x}}_0$$

$$E\left\{\begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega}_t \\ \boldsymbol{\nu}_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega}_t^T & \boldsymbol{\nu}_t^T \end{pmatrix}\right\} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_t \end{pmatrix} \delta_{tt}, \quad E\{(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)^T\} = \boldsymbol{\Sigma}_0 \quad (3)$$

여기서, δ_{tt} 는 kronecker 델타이고, E는 기대치 연산기호이다. \mathbf{x}_0 는 $\boldsymbol{\omega}_t, \boldsymbol{\nu}_t$ 와는 독립으로 한다.

이상과 같이 선형화된 이산시간 확률시스템에 대한 확장 칼만 필터는 다음과 같다.

<필터 방정식>

$$\hat{\mathbf{x}}_{t+1|t} = f_t(\hat{\mathbf{x}}_{t|t})$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|t} = \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} + \mathbf{K}_t[\mathbf{y}_t - h_t(\hat{\mathbf{x}}_{t|t-1})] \quad (4)$$

< Kalman Gain >

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T [\mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t]^{-1} \quad (5)$$

< 추정오차 공분산 행렬 >

$$\mathbf{P}_{t+1|t} = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_{t|t} \mathbf{F}_t^T + \mathbf{Q}_t$$

$$\mathbf{P}_{t|t} = \mathbf{P}_{t|t-1} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t|t-1} \quad (6)$$

< 초기조건 >

$$\hat{\mathbf{x}}_{0|0} = \bar{\mathbf{x}}_0, \quad \mathbf{P}_{0|0} = \boldsymbol{\Sigma}_0 \quad (7)$$

여기서, $\hat{\mathbf{x}}_{t|t}$ 는 t 스텝에서의 관측벡터 \mathbf{y}_t 에 의해 얻어지는 \mathbf{x}_t 의 추정치이고, $\mathbf{P}_{t|t}$ 는 $\hat{\mathbf{x}}_{t|t}$ 의 추정오차 공분산 행렬이다.

3. 손상지표

칼만 필터링 알고리즘을 적용하면 구조물의 손상 추정을 위한 관측데이터를 다양하게 선택할 수 있다. 본 논문에서는 구조물의 손상 전과 손상 후의 진동특성의 변화 및 정적하중 재하시 변위의 변화를 이용하여 손상을 추정한다. 따라서 트러스 구조물의 자유진동에 의해 얻어지는 데이터로 고유진동수, 모드 형상 진폭, 모드 형상 진폭 곡률과 정적하중 재하시 얻어지는 데이터로 절점의 변위, 절점 변위의 곡률을 채택한다. 대상 구조물에 대해 적용하는 5가지 손상지표를 다음과 같이 정의한다.

3.1 고유 진동수의 변화(CNF)

ω_j 는 고유치 문제나 구조물의 진동을 모니터링해서 얻은 계측데이터에서 j차 모드의 고유진동수이다. CNF는 ω_j 가 손상 후 변화된 값이다.

3.2 모드 형상 진폭의 변화(CMS)

ϕ_{ij} 는 고유치 문제나 구조물의 진동을 모니터링해서 얻은 계측데이터에서 절점 i에서 나타낸 j차 모드의 모드 형상 진폭을 나타낸다. CMS는 ϕ_{ij} 가 손상 후 변화된 값이다.

3.3 모드 진폭 곡률의 변화(CCMS)

모드 진폭 곡률에 대해 다음과 같이 정의한다.

$$C_{ij} = (\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j})/h^2 \quad (8)$$

여기서 C_{ij} 는 중앙차분법에 의해 구해진 절점 i에서의 j차 모드의 곡률을 표시한 것이다. h 는 절점 i-1에서 i+1까지의 거리를 나타낸다.

CCMS는 C_{ij} 가 손상 후 변화된 값이며 축방향에 대하여 2번 미분함으로써 감도를 높인 것이다.

3.4 정적 하중에 의한 변위의 변화(CSD)

δ_{ij} 는 정적 하중을 재하했을 때 절점 i에서의 j방향 변위를 표시한다. CSD는 δ_{ij} 가 손상 후 변화된 값이다.

3.5 정적 하중에 의한 변위의 곡률의 변화(CCSD)

정적 하중에 의한 변위의 곡률에 대해 다음과 같이 정의한다.

$$CD_{ij} = (\delta_{i-1,j} - 2 \times \delta_{i,j} + \delta_{i+1,j})/h^2 \quad (9)$$

여기서 CD_{ij} 는 중앙차분법에 의해 구해진 절점 i에서 j방향 변위의 곡률을 표시한 것이다. h 는 절점 i-1에서 i+1까지의 거리를 나타낸다.

CCSD는 CD_{ij} 가 손상 후 변화된 값이다. 지표는 축방향에 대하여 2번 미분함으로써 감도를 높인 것이다.

4. 수치해석 예

손상지표의 유효성 및 수렴성을 확인하기 위하여 그림 1의 2차원 트러스 구조물에 표 1과 같이 5개의 손상지표에 대해 각각 4~6가지 case로 나누어 손상 추정을 수행하였다. 이 트러스 구조물은 단면적 $A=100\text{cm}^2$, 영계수 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 밀도 $\rho=0.00787 \text{ kg/cm}^3$ 이다.

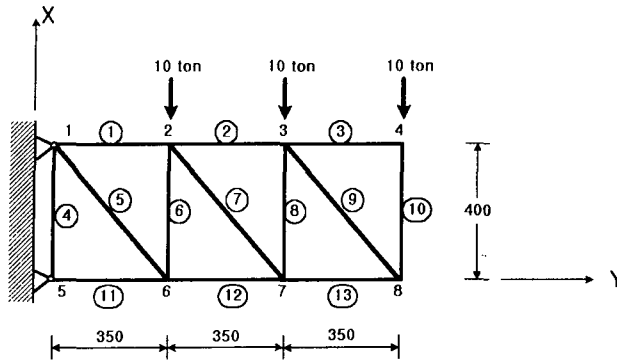


그림 1. 수치 해석 예제 모델

손상 추정을 위한 확률분포로는 관측값은 관측치의 30%를 표준편차로 하는 분포로 가정하고 초기조건으로 정상시의 강성을 초기 상태 벡터로 한다. 또 감도행렬 계산을 위한 초기치는 정상시의 30%의 손상으로 가정한다.

손상지표는 순해석에 의한 수치해를 사용하였고, 부재 손상도는 부재 강성의 저하로 나타내었다. 강성저하를 판단하는 강성비는 '손상 후 강성/손상 전 강성'으로 표시한다.

표 1의 case는 CNF의 경우 저차 모드, 고차 모드 및 전체모드에 대해, CMS 및 CSD는 상부

절점의 자유도, 하부 절점의 자유도 및 전체 자유도에 대해, CCMS 및 CCSD는 상하부 절점에 대해서 각각 x방향의 자유도, y방향의 자유도 및 모든 방향의 자유도에 대해서 나누었다. CCMS와 CCSD는 각각 CMS와 CCSD에 대해 2번 미분하여 감도를 높인 지표로써 CMS나 CSD보다 더 좋은 수렴결과가 예상된다.

표1. 손상지표

	CNF	CMS	CCMS	CSD	CCSD
case 1	1st~4th	절점 2,3의 x,y 자유도	절점 2,3,4의 x,y 자유도	절점 2,3의 자유도	절점 2,3,4의 x,y 자유도
case 2	1st~6th	절점 2,3,4의 x,y 자유도	절점 2,3,4의 x 자유도	절점 2,3,4의 자유도	절점 2,3,4의 x 자유도
case 3	1st~12th	모든 절점의 x,y 자유도	절점 2,3,4의 y 자유도	모든 절점의 자유도	절점 2,3,4의 y 자유도
case 4	7th~12th	절점6,7,8의 x,y 자유도	절점 6,7,8의 x,y 자유도	절점6,7,8의 자유도	절점 6,7,8의 x,y 자유도
case 5			절점 6,7,8의 x 자유도		절점 6,7,8의 x 자유도
case 6			절점 6,7,8의 y 자유도		절점 6,7,8의 y 자유도

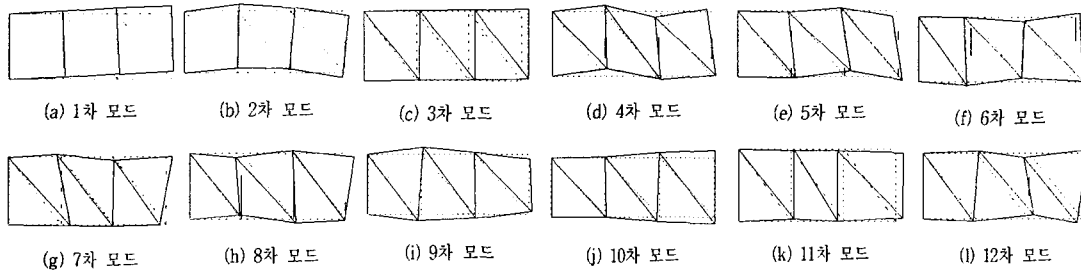


그림 2. 손상 전의 모드 형상

4.1 단일 부재 손상의 경우

단일 부재의 손상에 대해서는 부재 1, 3, 5, 7, 13이 각각 50% 손상되었을 경우에 대해 고려하였다.

표 2, 3, 4는 각 손상지표에 따른 결과를 나타내며, 각 표에 표시된 강성비는 표 1의 case에 대해 나타내었다.

CMS 및 CCMS는 저차 모드에서 대체적으로 결과가 좋다. 고차 모드의 경우 발산하는 경우가 많고 반복 계산 횟수도 많다. 특히 부재 3 손상의 경우 관측 데이터가 손상 전과 손상 후에 변화가 거의 없어 다른 손상지표에서 수렴이 잘 되지 않았으나 이 지표의 경우 추정결과가 좋다. 그리고 부재 13의 경우 저차 모드에서는 수렴하지 않으나 7, 8차 모드에서 수렴한다. CCMS는 CMS에 비해 수렴이 안정적이고 빠르며 고차 모드의 경우 수렴횟수도 적다. 또한 x 방

향의 데이터인 case 2, 4의 경우 좋은 수렴결과를 보인다.

CSD, CCSD의 경우 다른 지표보다 수렴이 빠르고 정확하나 부재 3이 손상하였을 경우 발산하였다. 그리고, 손상된 부재와 가까운 절점의 데이터가 많을수록 수렴결과가 좋다. 따라서, 이 지표로 대략적인 손상위치를 파악할 수 있다. CCSD도 CCMS와 마찬가지로 case 2, 4에서 좋은 수렴결과를 보인다.

4.2 복수 부재 손상의 경우

복수 부재의 손상에 대해서는 부재 2·11, 3·5, 9·12가 50% 손상되었을 경우에 대해 고려하였다.

표5, 6은 각 손상지표에 따른 결과를 나타내며, 각 표에 표시된 강성비는 표1의 case에 대해 나타내었다.

CMS는 저차 모드에서 특히, 1차 모드에서 수렴결과가 좋지만 다른 지표보다 반복 계산 횟수가 많다. 그리고, 부재 3·5 손상의 경우 부재 3의 강성비 수렴결과가 다른 지표에 비해 좋다. CCMS의 경우 단일 부재 손상 추정과는 달리 수렴결과가 좋지는 않지만 수렴하는 경우에 대해서는 수렴이 안정적이고 속도가 빠르다.

CSD와 CCSD는 단일 부재 손상과 마찬가지로 부재 3 손상의 경우 수렴이 되지않는다. 그이외에는 CCSD에서 부재 9와 12가 50% 손상했을 경우를 제외하고는 수렴결과가 좋고 수렴속도도 빠르다.

단일 부재와 복수 부재 손상의 경우 모두 손상 부재 강성비가 정확한 값에 수렴하지 않는 경우 손상되지 않은 부재의 강성비가 0.8~1.2 정도로 된다.

표 2. 부재 1,3,5,7,13이 각각 50% 손상된 경우 각각의 손상지표 결과

damaged member	1.CNF			4. CSD			5. CCSD		
	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration
No. 1	3	0.5	100	1,2,3	0.5	20	1,2,4	0.5 0.7	20 100
No. 3	4	0.65	100	발산	-	-	발산	-	-
No. 5	1,2,3	0.5	50	1,2,3,4	0.5	20	4	0.5	500
No. 7	발산	-	-	3,4	0.5	50	4,6	0.6	20
No. 13	3	0.5	100	1,2,3,4	0.5	100	4,5	0.5	20

표 3 부재 1,3,5,7,13이 각각 50% 손상된 경우 CMS(지표2)의 결과

member mode	No. 1			No. 3			No. 5			No. 7			No. 13		
	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration
1st	1,2,3,4	0.5 0.65	50 100	3	0.75	3000	1,3,4	0.5	50	1,3,4	0.5	50	3,4	0.5	150
2nd	발산	-	-	2,3	0.5 0.75	150	3	0.5	100	발산	-	-	발산	-	-
3rd	발산	-	-	3	0.75	300	1,2,3	0.3	30	발산	-	-	발산	-	-
4th	2,3	0.8 0.5	100	1	0.5	30	발산	-	-	1,2,3	0.5 0.5	70 100	2	0.7	100
5th	4	0.5	100	1,3	0.5	10	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
6th	발산	-	-	3	0.5	2000	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
7th	발산	-	-	발산	-	-	1,3	0.25 0.5	50 30	발산	-	-	3	0.7	3000
8th	1,3,2	0.5 0.55	100 100	발산	-	-	3	0.3	30	발산	-	-	2,3	0.5 0.5	50 100
9th	3	0.55	2000	발산	-	-	3	0.6	3000	발산	-	-	발산	-	-
10th	발산	-	-	발산	-	-	3	0.6	3000	발산	-	-	발산	-	-
11th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
12th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-

표 4. 부재 1,3,5,7,13이 각각 50% 손상된 경우 CCMS(지표3)의 결과

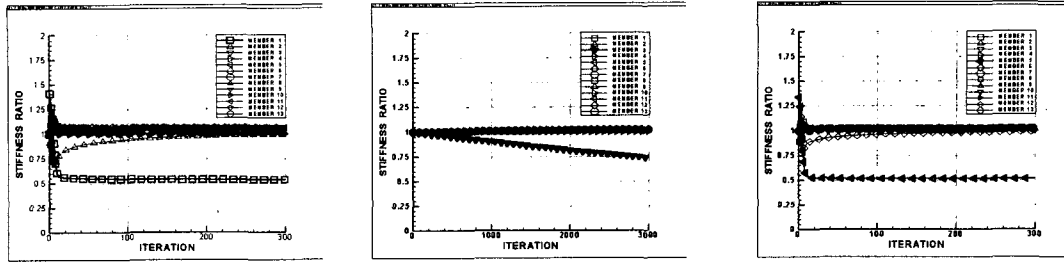
member mode	No. 1			No. 3			No. 5			No. 7			No. 13		
	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration
1st	1,2 4,6	0.5 0.55	20	1,2	0.5	500	5	0.6	30	발산	-	-	발산	-	-
2nd	발산	-	-	1,2	0.5	10	1,3	0.6	1500	1,3	0.8	300	발산	-	-
3rd	발산	-	-	1	0.7	50	2 5	0.6 0.5	200 10	발산	-	-	발산	-	-
4th	발산	-	-	발산	-	-	1 2	0.5 0.6	20 20	2,4 5	0.4 20	50 20	발산	-	-
5th	4	0.5	100	1	0.5	500	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
6th	발산	-	-	2	0.5	300	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
7th	3,5	0.5	50	발산	-	-	1	0.3	100	6	0.2	50	3	0.4	20
8th	1	0.6	300	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	1,6 3	0.6 0.6	20 100
9th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	5	0.65	100	발산	-	-
10th	발산	-	-	2	0.5	50	발산	-	-	3	0.6	100	발산	-	-
11th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	4,6	0.7	500	발산	-	-
12th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-

표 5. 부재 2·11, 3·5, 9·12가 각각 50% 손상된 경우 각각의 손상지표 결과

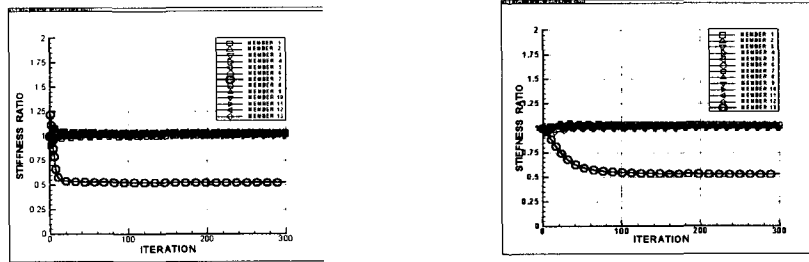
damaged measure member	1.CNF			4. CSD			5. CCSD		
	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration
No. 2 and No. 11	2,3	1, 0.6	100	1,2,3	0.5, 0.5	20	1 2 4,5,6	0.5, 0.5 0.5, 1 1, 0.5	50 20 20
No. 3 and No. 5	1 4	1, 0.5 0.55, 1	50 150	3,4	1, 0.5	10	4	1, 0.5	300
No. 9 and No. 12	발산	-	-	3	0.5, 0.5	150	발산	-	-

표 6. 부재 2·11, 3·5, 9·12가 각각 50% 손상된 경우 CMS, CCMS의 결과

member mode	CMS									CCMS								
	No. 2 and No. 11			No. 3 and No. 5			No. 9 and No. 12			No. 2 and No. 11			No. 3 and No. 5			No. 9 and No. 12		
	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration	case	강성비	iteration
1st	1,2,3 4	0.5,0.5 1.0,5	50	2 3, 4	1,0.5 1.0,5	100 30	3 4	0.5,0.5 0.55,0.65	100 1000	5	1,0.5	20	5	1,0.6	50	발산	-	-
2nd	3	0.7,0.75	50	3	0.4,0.4	300	발산	-	-	발산	-	-	4	0.8,0.35	50	4 5	0.5,0.5 1.0,55	50 50
3rd	발산	-	-	2 3	0.45,0.4 0.35,0.35	100 100	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
4th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
5th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
6th	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	1	0.55,0.75	100	발산	-	-
7th	3	0.3,0.45	100	발산	-	-	발산	-	-	5	0.9,0.65	200	발산	-	-	발산	-	-
8th	3	0.45,0.5	2000	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-	1	0.75,1.15	50
9th	3	0.45,0.6	3000	발산	-	-	-	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
10th	발산	-	-	발산	-	-	-	-	-	4	0.6,0.85	50	2	0.5,1	20	발산	-	-
11th	발산	-	-	발산	-	-	-	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-
12th	발산	-	-	발산	-	-	-	-	-	발산	-	-	발산	-	-	발산	-	-

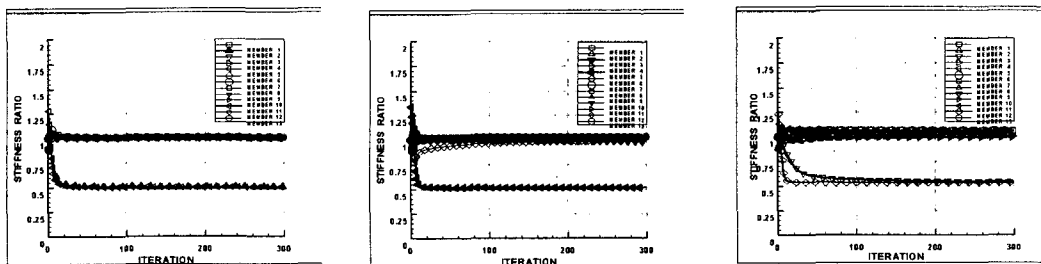


(a) 부재 1 손상 (b) 부재 3 손상 (c) 부재 5 손상



(d) 부재 7 손상 (e) 부재 13 손상

그림 2. 단일 부재 손상의 경우 CMS 1차 모드 case 3의 추정 결과



(a) 부재 2&11 손상 (b) 부재 3&5 손상 (c) 부재 9&12 손상

그림 3. 복수 부재 손상의 경우 CMS 1차 모드 case 3의 추정 결과

5. 결론

본 논문에서는 확장 칼만 필터를 이용한 트러스 구조물의 손상 추정에서 5가지 손상지표를 제시하고 그 유효성과 수렴성에 대해 연구하였다. 손상지표는 순해석을 통한 결과를 이용하였고, 부재 손상도는 부재 강성의 저하로 나타내었다. 본 논문에서는 2차원 트러스 구조물에 대한 수치예제를 통하여 5가지 손상지표에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) CNF는 단일 부재 손상의 경우 비교적 우수하지만 복수 부재 손상의 경우 정확한 결과를 나타내지 못한다.
- (2) CMS 및 CCMS는 저차 모드에서 수렴결과도 좋고 속도도 고차 모드보다 빠르다. 수렴결과는 다른 지표보다 좋으나 반복 계산 횟수가 많다.
- (3) CCMS는 CMS에 비해 발산폭이 크지않고 수렴속도가 빠르지만 전체적인 손상 추정의 결과는 CMS가 우수하다. 그러나 표 1에서 CCMS는 CMS보다 각각 case에서 데이터수가 작는데, 이에 비해서는 수렴속도와 결과가 아주 우수하다. 그리고 case 2, 4에 대해 결과가 좋다.

(4) CSD 및 CCSD는 다른 지표보다 수렴이 빠르고 결과도 좋지만 구조물에 큰 영향을 미치지 않는 위치의 부재가 손상된 경우 수렴이 잘 되지 않는다. 그리고 손상 부재 근처 절점의 데이터가 많을수록 수렴결과가 좋다.

(5) CCSD는 CSD에 대해 2번 미분한 지표로써 CCMS와 비슷한 결과를 보인다.

(6) 모든 지표는 데이터의 갯수가 많은 case에 대해 좋은 수렴결과를 보였다. 따라서, 제시된 손상지표의 적절한 조합으로 정보량을 늘린다면 더 정확한 수렴결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

(7) CNF, CMS 및 CCMS는 저차 모드에서 좋은 결과를 얻었다. CMS 및 CCMS는 상부 절점에 대해, CSD 및 CCSD는 손상 부재에 가까운 절점의 데이터가 많을수록 좋은 결과를 얻었다. 또한 곡률에 관한 지표인 CCMS와 CCSD는 x 방향의 데이터에서 좋은 결과를 얻었다.

전체적으로 손상 전과 손상 후의 데이터의 변화값이 큰 부재일수록 모든 지표에 대해 수렴결과가 좋다.

이상의 내용은 그림 1의 2차원 트러스에 대한 결과이며 3차원 트러스나 라멘구조등 구조시스템에 따라 결과가 다를 수도 있을 것이다. 본 논문에서 제시한 방법과 손상지표는 2, 3 차원의 다양한 구조시스템에 대해 적용 가능하며 앞으로 그 유효성을 밝혀 나갈 예정이다.

참고문헌

1. 서일교, "확장 칼만 필터를 이용한 2차원 트러스 구조물의 손상 추정," 대한건축학회 논문집, 제 15권 4호, pp3-12, 1999
2. Papadopoulos, L., Garcia, E., "Structural Damage Identification : A Probabilistic Approach," AIAA JOURNAL, Vol. 36, No.11, 1998
3. Abdalla, M., Grigoriadis, K., Zimmerman, D., "Enhanced Structural Damage Detection Using Alternating Projection Methods," AIAA JOURNAL, Vol. 36, No.7, 1998
4. Liu, P.L., "Identification and Damage Detection of Trusses Using Modal Data," Journal of Structural Engineering, p.p.599-608
5. Hjela, P. and Soerio, F. J., "Structural Damage Detection Based on Static and Modal Analysis," AIAA JOURNAL, Vol. 28, No.6, 1990
6. Koh, C. G., See, L. M. and Balendra T., "Damage Detection of Buildings : Numerical and Experimental Studies", Journal of Structural Engineering, p.p.1155-1160, 1995
7. 윤정방, 송종걸, 김유진, "기설구조물의 손상도 및 내진능력 평가방법," 전산구조공학회 논문집, 제 11권 제 3호, p.p.199-212, 1998
8. 片山 徹, 應用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 1983
9. 西山 清, パソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善株式會社, 1994
10. Brown.R.G. and Hwang. Patrick. Y. C., Introduction to random signals and applied kalman filtering, John wiley and sons, 1997
11. 濱本卓司, 田野畑月人, "多層建築物の損傷層特定のために4つの損傷指標の有効性と限界," 構造工學論文集, Vol.42B, p.p.321-326, 1996

"이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었음."