

구조물의 동특성치 예측을 위한 확장칼만필터기법의 초기치 설정에 관한 연구

Initial value assumption for Estimation of Structural Dynamic System using Extended Kalman Filtering

정인희^{*} 양원직^{**} 강대언^{**} 오종식^{***} 박홍신^{****} 이원호^{*****}
Jung, In-Hee Yang, Won-Jik Kang, Dae-Eon Oh, Jong-Sig Park, Hong-Shin Yi, Waon-Ho

ABSTRACT

Extended Kalman Filter iterate the prediction and the filtering based on Initial state for the next time step. EKF method for the estimation of nonlinear parameters of a structural dynamic system is necessary that initial of state vector and error covariance matrix. Because those are unknown exactly, generally selected random values. That occasion observability problem appear because of unknown initial values. In this study, for the estimation of the nonlinear parameters, a simple one degree of Freedom example is carried out by Extended Kalman Filter. And initial value assumption for Parameter Estimation of Dynamic System are developed. The result of analysis is compared with calculated standard values.

1. 서론

실제 사용하고 있는 구조물의 특성은 최초 설계당시의 특성과 많이 다르다. 이는 장기하중의 영향으로 인한 피로손상의 축적이나 지진과 같은 단기하중에 의한 순간적인 과도한 하중으로 인한 국부손상 때문이라 할 수 있다. 이러한 건축 구조물의 손상은 일반적으로 강성의 저하를 의미하는데 구조물의 부재에 균열이 생기거나 노후화로 강성이 저하되면 감쇠비(Damping ratio), 고유진동수(Circular frequency) 등과 같은 구조물만의 고유한 특성인 동특성치에 변화가 나타난다. 이러한 변화를 예측하려면 건축 구조물이 실제로 어떻게 거동하고 있는지 파악할 수 있는 시스템식별기법이 필요하다.

구조물의 동특성치를 추정할 수 있는 시스템식별기법에는 여러 종류의 해석기법이 있지만 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되어지고 있는 확장칼만필터기법(Extended Kalman Filter method)을 사용하였다. 이 기법은 선형시스템에서 유도된 칼만필터를 비선형계로 확장한 것으로 초기 상태벡터를 바탕으로 다음 상태에 대한 예측과 필터링 과정을 반복한다. 이러한 예측과 필터링 과정을 반복하기 위해서는 상태벡터와 오차공분산행렬의 초기치를 필요로 한다¹⁾. 이 초기치값을 어떠한 값으로 설정하느냐에 따라 시스템식별의 정밀도가 달라지는데 현재까지 그 값을 정확하게 알 수가 없어 기법 적용시 임의에 따라 가정하는 것이 일반적이다. 이러한 초기치 문제²⁾는 동적 시스템의 초기상태를 알지

* 정회원, 광운대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 광운대학교 에센스 구조연구센터 연구교수, 공학박사

*** 정회원, 한국시설안전기술공단 진단2본부 건축실 과장, 공학석사

**** 정회원, 한국시설안전기술공단 진단2본부 본부장, 공학박사

***** 정회원, 광운대학교 건축공학과 교수, 공학박사

못할 경우 발생될 수 있는 오차로서 상태벡터변수의 발산에 큰 영향을 미치므로 정밀도 높은 추정을 위해서는 초기값과 추정값과의 상관관계 규명은 불가피하다.

따라서 본 연구에서는 건축 구조물의 동특성치를 예측하는 방법으로 확장칼만필터기법을 적용할 경우 초기치 설정이 시스템식별의 정밀도에 미치는 영향에 관하여 비교·분석 하고자 한다.

2. 시스템식별 해석을 위한 입력데이터 및 초기치 가정

2.1 입력데이터

동특성치를 예측함에 있어 초기치 설정이 시스템식별 과정에 미치는 영향을 알아보기 위해 입력데이터로서 단자유도 수치해석을 통하여 구한 응답데이터를 이용하였다. 해석은 일반적으로 알려져 있는 철근콘크리트조 건물의 감쇠비인 0.03을 사용하여 모델링하였으며 가정한 단자유도시스템의 정보는 다음과 같다.

$$m = \frac{W}{g} = \frac{9.8 (tf)}{980 (cm/sec^2)} = 0.01 (tf \cdot sec^2/cm), \quad k = \frac{Q_y}{D_y} = \frac{0.1 (tf)}{0.1 (cm)} = 1 (tf/cm)$$

$$c = 2\xi\omega m = 2 \times 0.03 \times 10 \times 0.01 (tf \cdot sec^2/cm) = 0.006 (tf \cdot sec^2/cm)$$

$$\zeta = 0.03, \quad \omega = 10, \quad \sigma = 1$$

여기서 m 은 질량, c 는 감쇠계수, k 는 강성계수, Q_y 는 항복강도, D_y 는 변형, ζ 는 감쇠비, ω 는 고유진동수, σ 는 하중계수(단자유도이므로 1)를 나타낸다. 수치해석은 자유진동인 경우와 지진파를 사용한 경우로 나누어 해석을 실시하였고 그 결과 데이터 중 응답변위 데이터를 사용하였다. 자유진동인 경우에는 입력하중으로 지반가속도를 일정한 100(gal)로 설정하여 응답을 구하였고, 지진파를 사용한 경우에는 입력하중으로 Elcentro NS파를 이용하여 선형지진응답해석을 통해 구하였다.

2.2 초기치 가정

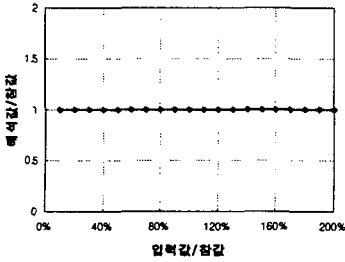
확장칼만필터기법은 초기상태를 바탕으로 다음 상태에 대한 예측과 필터링을 하기 때문에 이 기법을 적용하려면 상태벡터와 오차공분산행렬의 초기치를 설정해줘야 한다. 필터링 과정에서 발생하는 오차를 줄이기 위해서 오차공분산행렬의 값을 작게 설정할 경우에는 오차공분산값을 너무 작게 보는 방향으로 필터링을 진행하기 때문에 다음 상태를 보정하는데 필요한 칼만이득행렬과 관측값의 영향을 감소시키게 된다. 이러한 필터링 특징은 참값이 아닌 다른 값으로 수렴하거나 발산하게 하는 원인이 된다. 반면 오차공분산행렬의 값을 너무 크게 설정할 경우에는 오차공분산행렬의 민감도가 더욱 커지게 되어 필터링 과정이 불안정하게 된다. 이러한 이유 때문에 오차공분산행렬의 초기치는 알고리즘의 수렴성을 크게 하기 위해서 대개 1000정도로 가정하는 경우^{3), 4)}가 많은데, 본 연구에서도 가장 일반적으로 많이 쓰는 값인 1000으로 가정하고 해석하였다. 또한 상태벡터(감쇠비, 고유진동수, 하중계수)의 참값을 수치해석(응답해석)시 설정한 가정부재의 파라미터 값으로 설정하였다. 상태벡터 초기치가 시스템식별 과정에 미치는 영향을 평가하기 위하여 초기치를 참값(응답해석시 입력값)의 10% 간격으로 10%~200%의 범위로 설정하고 해석을 실시하였다. 자세한 초기치 파라미터를 표 1에 나타내었다.

3. 시스템 식별 해석결과 및 분석

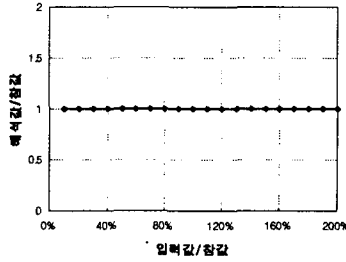
확장칼만필터기법 적용시 초기치가 추정값에 미치는 영향을 알아보기 위해서 표 1과 같은 초기치

표 1. 초기치 파라미터

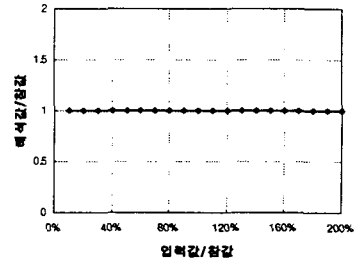
구분	자유진동의 경우			지진응답의 경우		
	해석 I	해석 II	해석 III	해석 IV	해석 V	해석 VI
감쇠비(ζ)	0.03×(10~200%)	0.03	0.03	0.03×(10~200%)	0.03	0.03
고유진동수(ω)	10	10×(10~200%)	10	10	10×(10~200%)	10
하중계수(σ)	1	1	1×(10~200%)	1	1	1×(10~200%)



(a) 감쇠비 추정결과

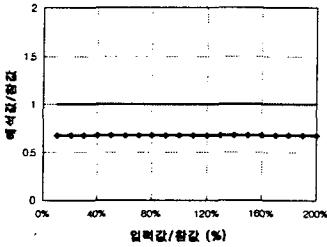


(b) 고유진동수 추정결과

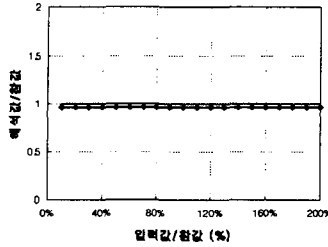


(c) 하중계수 추정결과

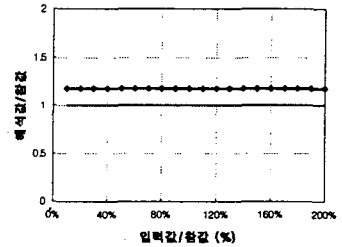
그림 1. 해석 I의 결과



(a) 감쇠비 추정결과

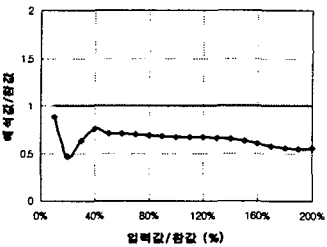


(b) 고유진동수 추정결과

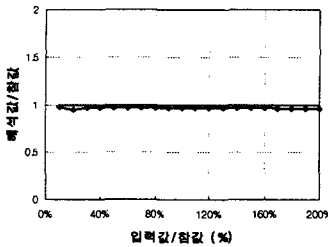


(c) 하중계수 추정결과

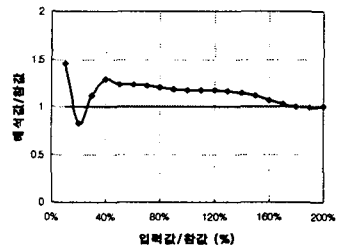
그림 2. 해석 II의 결과



(a) 감쇠비 추정결과

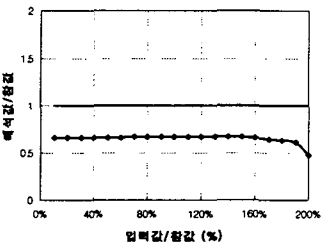


(b) 고유진동수 추정결과

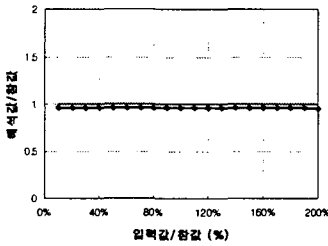


(c) 하중계수 추정결과

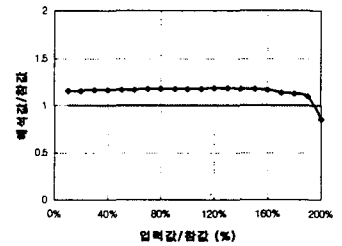
그림 3. 해석 III의 결과



(a) 감쇠비 추정결과



(b) 고유진동수 추정결과



(c) 하중계수 추정결과

그림 4. 해석 IV의 결과

파라미터를 이용하여 동특성치를 추정하여 보았다. 그림 1은 자유진동인 경우로 표 1의 해석 I에 대한 결과를 나타낸 그래프이다. 해석 II와 해석 III도 해석 I과 같이 정밀도 높은 동일한 결과를 얻을 수 있었으므로 자유진동인 경우에 대해서는 해석 I의 결과만 그래프로 나타내었다. 그림 2~그림 4는 선형 지진응답의 경우로 표 1의 해석 IV, 해석 V, 해석 VI에 대한 추정 결과를 나타낸 그래프이다.

그림 2~그림 4에서 나타난 것과 같이 지진응답의 경우에는 자유진동의 경우와는 달리 참값과 추정값 사이에 어느 정도 오차가 생겨 신뢰성이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 고유진동수는 초기값에 관계없이 추정값의 정밀도가 좋은 것으로 나타났으나 감쇠비와 하중계수는 고유진동수의 초기값을 어떻게 설정하느냐에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 고유진동수의 초기치가 시스템식별 과정에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 변수라는 것을 말해준다. 그림 3과 그림 4의 감쇠비와 하중계수 그래프를 비교해 보면 그래프의 패턴이 비슷함을 알 수 있으며 해석결과 하중계수 추정값이 감쇠비 추정값의 20배인 것으로 나타났다.

4. 결론

이상 구조물의 동특성치 예측을 위한 확장칼만필터기법의 적용시 시스템식별기법의 초기치 설정에 따른 추정값과의 관계를 비교·분석하였다. 그 결과를 다음의 몇 가지로 정리하였다.

- 1) 자유진동 데이터에 대해서는 초기치의 설정에 관계없이 항상 정밀도 높은 추정이 가능하였다.
- 2) 실제 미진동 데이터를 상정하여 작성하는 지진응답 데이터를 이용한 경우 감쇠비와 하중계수의 초기치에 대한 영향은 적었으나 고유진동수의 초기치는 추정값에 큰 영향을 미치는 것을 알았다.

향후 추정값의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 초기값 중 고유진동수 초기값에 대하여 더욱 상세한 관계 규명 및 근본 원인에 대하여 연구가 필요할 것으로 사료되며, 단자유도만이 아닌 다자유도에 대한 검토도 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Yun CB. and Shinozuka M, "Identification of Nonlinear Structural Dynamic System" J. Engrg. Mech, ASCE, 8(2), pp. 187-203
2. Jazwinski. A. H., "Limited Memory Optimal Filtering", IEEE Trans. on Automatic, Vol. 13, 1968, pp. 558-563
3. 이 경재, "System Identification 기법을 이용한 구조물의 동특성 추정 및 손상 부위 색출에 관한 실험적 연구", KAIST 석사학위논문, 1991년
4. 이 상훈, "개선된 Extended Kalman Filter를 이용한 비선형 계수의 추정", KAIST 석사학위 논문, 1989년
5. Schlee. F. H., Standish. C. J. and Toda. N. F., "Divergence in the Kalman Filter", AIAA Journal, Vol. 5 No. 6, June, 1967, pp. 1114-1120
6. Hoshiya. M. and Saito. E., "Structural Identification by Extended Kalman Filter", J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 110 No.12, December, 1984, pp. 1757-1770