

실측 지진응답을 이용한 지진손상도 평가 및 소성모형 추정

Seismic Damage Assessment and Nonlinear Structural Identification Using Measured Seismic Responses

이 형 진^{*} 김 남 식^{*}
Lee, Hyeong Jin Kim, Nam Sik

국문요약

본 논문에서는 다자유도계 구조물의 진동대 실험결과 분석에서 효율적인 지진손상도 평가 및 소성모형 추정을 목적으로, 계측결과를 각 부재별 소성이력으로 환산하고 이 소성이력에 대해 비선형 계수 추정법을 적용하는 다단계 방안을 연구하였다. 이때, 추정된 부재별 소성이력은 부재별 지진 손상도를 평가하는 지표로 활용될 수 있으며, 추정된 비선형 모형 계수를 이용하여 구축된 비선형 다자유도계 구조는 다양한 구조해석의 모형으로 활용될 수 있다. 제시된 방법의 검증을 위해, 해석적 방법과 실험적 방법의 예제해석이 수행되었다. 예제해석 결과는 해석적 방법과 실험적 방법 모두에서 본 논문의 방법이 매우 효과적임을 보여 주고 있다.

주요어 : 지진손상도, 소성이력, 비선형 계수 추정, 구조해석

ABSTRACT

In this paper, the nonlinear parameter estimation method using the estimated hysteresis of each structural members was studied for the purpose of efficient seismic damage prediction and estimation of MDOF nonlinear structural model in the shaking table test. The hysteresis of each structural members can be obtained by the conversion of measured response histories into relative motions of each structural members and member forces. These hysteresis can be used to evaluate various kinds of damage indices of each structural members. The MDOF nonlinear structural model for further analysis(re-analysis) can be easily reconstructed using estimated nonlinear structural parameters of each structural members. To demonstrate the proposed techniques, several numerical and experimental example analyses are carried out. The results indicate that the proposed method can be very useful to assess local seismic damages of structures.

Key words : seismic damage, hysteresis, nonlinear parameter estimation, structural re-analysis

1. 서 론

최근 국내에서도 교량, 고층건물, 대형 산업설비 등의 사회 기간시설물을 대상으로 동적하중 특히, 풍하중, 교통하중 등의 장기지속 하중과 더불어 지진하중에 대한 효과적인 안전성 분석에 대한 관심이 증대하고 있다. 이에 따라 구조물의 지진 안전성 분석기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

구조물의 지진 안전성 분석기법으로는 해석적 방법⁽¹⁾과 실험적 방법⁽²⁾⁻⁽⁶⁾이 사용된다. 비선형 거동을 하는 구조물의 손상도는 소성이력거동(hysteretic behavior)을 통해 소산되는 에너지의 양과 관계가 있다. 특히, 강재 등과 같은 non-degradation 모형은 구조적 손상이 직접적인 강성 저하로 나타나지 않으므로, 소성에 의한 에너지 소산을 통해 지진 손상도를 평가하는 것이 매우 중요하다. 이러한 배경에서 지진 손상도를 평가하는 손상 지수들은 대부분 구조물의 소성이력을 기초로 정의한다.⁽³⁾ 구조물의 소성거동을 파악하기 위한 가장 효과적인 방법은 진동대 실험(shaking table test)이나 유사동적 실험(pseudo-dynamic test) 등과 같은 실험적 방법이라 할 수 있다. 실험적 방법의 장점은 실 구조물

(혹은 동일 형태의 축소모형)을 취급하므로, 보다 실제 구조 거동에 가까운 결과를 얻을 수 있다는 것이다. 그러나, 대규모 실험에 따른 비용 문제나 축소 모형실험으로 인한 오차, 계측상의 어려움, 분석의 제약 등의 이유로, 해석적 방법 역시 효과적인 분석의 수단이 된다. 해석적 방법은 비록 구조물의 실제 비선형 거동 파악에는 다소 미흡함이 있어도, 각 부재나 층별 소성이력의 파악이 손쉽고, 다양한 지진하중에 대한 응답해석이 손쉽게 이뤄질 수 있다는 큰 장점이 있다. 본 논문에서는 구조물의 실제 거동을 잘 반영하는 실험적 방법의 장점과 지진하중에 대한 다양한 분석이 용이한 해석적 방법의 장점을 함께 활용하기 위한 방안으로, 진동대 실험 자료를 활용하여 다자유도계 구조물의 지진 비선형 거동에 대한 수학적 모형을 구축하는 비선형 구조규명법(nonlinear structural identification)⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾에 대한 연구를 수행하였다. 구축된 비선형 모형은 추가적인 다양한 구조해석에 활용하여 보다 실제에 가까운 구조응답을 얻는 수단으로 활용될 수 있다.

통상 다자유도계 구조물 전체를 대상으로 비선형 구조규명법을 적용하는 것은 수치적 불안정의 원인이 되거나 정확도를 저하시키는 요인이 된다.^{(4),(6),(9)-(11)} 따라서, 본 논문에서는 기존 문헌에서 제시하고 있는 다자유도 구조계 계측자료에서 부재별 단자유도계 소성이력을 추정하는 방법⁽⁴⁾과 단자유도 비선형 계수 추정법⁽⁵⁾을 결합하여, 다자유도 구조계

* 정회원 · 장원대학교 토목공학과, 조교수(대표저자 : leehjn@sarim.changwon.ac.kr)

** 정회원 · 현대건설 기술연구소, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 8. 19 / 심사종료일 : 2002. 11. 7)

계측자료에서 부재별 단자유도 소성이력을 추정하고, 추정된 부재별 소성이력 거동 각각에 비선형 구조규명법을 적용시키는 다단계 방법을 구상하였다. 추정을 위한 소성모형은 Bouc-Wen 모형으로 가정하였고, 이에 대한 계수추정은 배치기법을 활용하였다. 제시된 방법의 검증을 위해, 단자유도 모의실험 예제를 수행하여 제시된 배치기법 비선형 구조규명법의 수치성능을 검토하였고, 실험 결과에 대한 적용 성능을 검토하기 위해, 1, 4층 빌딩 구조물(강재)의 진동대 실험 계측 데이터를 적용하였다. 수행된 예제해석을 통해, 제시된 부재별 소성이력 추정법 및 계수추정 방법이 실측 지진응답 결과를 이용한 지진손상도 평가 및 구조재해석을 위한 효과적인 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

2. 다자유도계 구조물에 대한 소성이력 추정법과 비선형 규명법 적용

지진하중에 의한 구조물 손상도 평가는 구조물의 소성이력을 구하는 문제에서 시작된다. 그러나, 소성이력을 구하기 위해서는, 변위와 내력을 동시에 계측해야 하는 어려움이 있다. 변위나 가속도는 계측기의 설치가 비교적 용이하나, 부재력의 계측을 위해서는 부재를 절단해야 하고 이로 인해 시험체의 경계조건이 변화되어 요구되는 시험체의 상태를 유지할 수 없다. 따라서, 통상 부재력은 계측기의 설치가 가능한 진동대와 시험체의 경계면에서 밀면 전단력을 계측하는 정도에 국한된다. 따라서, 계측이 가능한 가속도나 변위 계측 결과만으로 부재력을 환산하고, 구조물의 소성이력을 구하는 방법은 실험적 지진 손상도 분석에서 효과적으로 활용될 수 있는 방법이라 할 수 있다.^{(4),(6)}

가속도나 변위 계측만으로 구조물의 소성이력을 구하는 것은 비선형 구조규명법 적용 차원에서도 효과적인 방안이 될 수 있다. 구조물의 소성이력 모형 추정에 사용되는 많은 비선형 구조규명법들은 직접적인 소성이력을 필요로 하는 경우^{(5),(6)}와 가속도나 변위 계측 결과만을 이용하는 방법^{(7),(8)}으로 나눌 수 있다. 그러나, 통상 직접적인 소성이력을 필요로 하는 방법들이 계산량이 적고 수치적 안정성이 뛰어난 경우가 많다. 따라서, 본 논문에서는 소성이력을 필요로 하는 비선형 구조규명법을 채택하였다.

이때, 통상 비선형 거동을 보이는 구조물은 선형구조계와 달리 중첩법이 적용되기 어렵기 때문에, 다자유도 구조물 전체를 대상으로 한 비선형 구조규명법 정식화(formulation)는 매우 어려운 작업이 될 수 있다. 또한, 다자유도 구조계 전체에 대해 비선형 구조규명법을 적용하더라도 추정할 변수의 수가 매우 많아지고, 수치계산 오차가 커져 결과에 대한 신뢰성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서, 이러한 문제에 대처하기 위해 구조계를 등가 단일 자유도계로 가정하여 이에 대한 소성이력 및 비선형 계수추정을 수행하는 방법이 사용하기도 한다.⁽⁶⁾ 그러나, 보다 실제적인 구조계를 다루기 위해서는 여전히 다자유도 구조물 전체를 대상으로 비선형

구조규명법을 적용할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 실제 다자유도계 구조물을 다루면서도 단자유도계 비선형 구조규명법의 장점을 살릴 수 있도록, 전체 구조계에 대한 가속도나 변위 계측결과로부터 각각의 구조부재에 대한 소성이력을 구해 이들 소성이력 각각에 대해 비선형 구조규명법을 적용하는 단계적인 방안을 구상하였다(그림 1 참조). 이때, 본 연구를 통해 얻어진 부재별 소성이력은 다자유도 구조계에 대한 비선형 구조규명법 적용을 위한 예비적 성격 외에 각 부재별 손상도 분포를 파악할 수 있는 중요한 지표가 될 수 있다. 통상, 해석적 방법에서는 특정 부재의 내력을 구하는 것이 어렵지 않아 손쉽게 소성이력으로 환산될 수 있어 이에 대한 연구보다 전체 구조계의 소성이력을 정의하고 이에 대한 손상도 평가에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. 그러나, 실험적 방법에서는 앞서 언급된 내력의 계

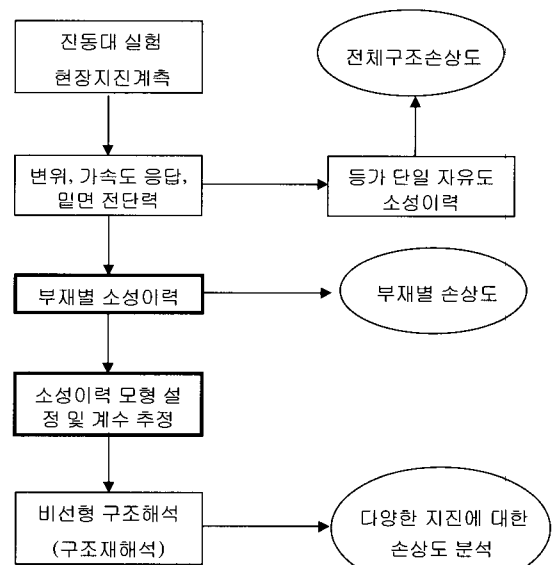


그림 1 실측 지진응답을 이용한 소성이력 추정 및 비선형 모형 추정 흐름도

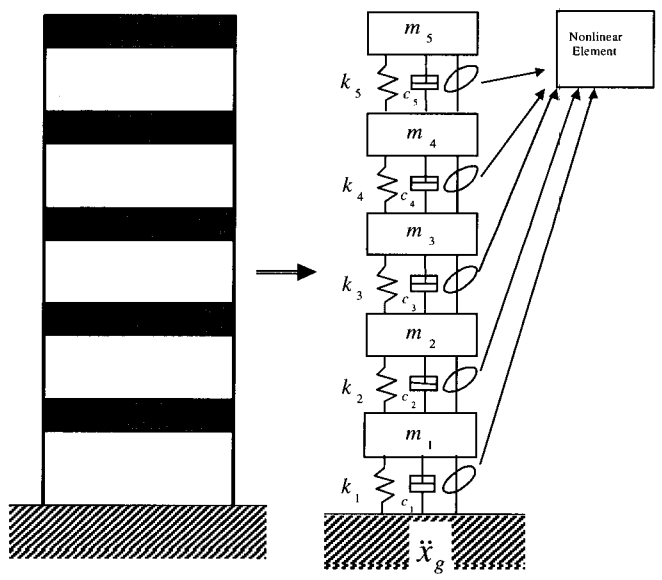


그림 2 다자유도 비선형 모형의 단순화 모형

측 문제로 국부적 위치에서의 소성이력 추정은 손상평가에서 상당히 의미있는 작업이라 할 수 있다. 더불어 최종적으로 구해진 부재별 소성모형(그림 2)은 구조재해석에서는 비선형 구조부재로 결합되어 다양한 구조재해석을 위한 비선형 모형으로 활용될 수 있다.

3. 비선형 다자유도계 구조물에서 부재별 소성이력 추정법

3.1 전단빌딩 모형의 부재별 소성이력 추정

부재별 소성이력 추정을 위한 방안은 몇몇 문헌에서 언급되고 있다.⁽⁴⁾ 그러나, 이 방법들은 전단빌딩 구조계와 같이 비교적 단순한 구조에 대해서만 적용하여 보다 일반적인 구조에 대해서는 적용의 한계가 있었던 것이 사실이다. 따라서, 본 논문에서는 먼저 이들 부재별(혹은 층별) 소성이력을 추정 방법을 좀 더 일반적 구조물에 대해 적용할 수 있도록 하였다. 먼저 본 절에서는 문헌상에 언급된 부재별 소성이력 추정법을 정리하였으며, 다음 절에 이 개념에 대한 확장을 다루었다.

지진 하중이 가해지는 전단빌딩 모형에서의 운동 방정식은 아래와 같다.

$$M \ddot{X}(t) + F_R(\dot{X}(t), X(t)) = -M\{1\} \ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

여기서, $M = \text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 인 질량행렬이고, $F_R(\dot{X}(t), X(t))$ 은 비선형 복원력 및 감쇠력 벡터(이하 소성력)이며, $\{1\}$ 은 지진하중이 작용하는 방향의 자유도는 1, 그외에는 0인 위치지정벡터이고, $\ddot{X}_g(t)$ 는 지반가속도이다. 부재별 소성이력을 구하기 위해, 계측된 층변위 X 를 각 층별상대변위인 $y_j = x_j - x_{j-1}$ (큰 수가 고층)로 변수를 치환하면, 층별 내력($f_R(\dot{y}_j, y_j)$)의 식을 유도할 수 있다. 이때, j 번째 층의 운동방정식은 j 번째부재의 소성력과 $j+1$ 번째 부재에서의 소성력의 차이에 의해 아래와 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$m_j \ddot{x}_j^t + f_R(\dot{y}_j, y_j) - f_R(\dot{y}_{j+1}, y_{j+1}) = 0 \quad (2)$$

여기서, $\ddot{x}_j^t(t)$ 는 j 번째 층의 절대가속도를 나타낸다. 이 식을 연립시켜 각 부재별로 정리하면,

$$f_R(\dot{y}_j, y_j) = - \sum_{k=j}^N m_k \ddot{x}_k^t \quad (3)$$

으로 간단히 층별 내력을 구할 수 있고, 층별 소성이력은 $f_R(\dot{y}_j, y_j)$ 와 y_j 의 관계로 도시된다.

3.2 다자유도 구조의 부재별 소성이력 추정

상기 전단빌딩 모형에 대한 부재별 소성이력 추정법 문헌의 요지는, 계측된 절대 가속도 응답에 의한 관성력을 정적 구조계에 작용하는 가진 하중으로 고려하여 매시간 정적해

석을 수행하고, 이로부터 부재력을 환산했다는 것으로 다시 정리할 수 있다. 일반 다자유도계 정정구조(혹은 정정구조로 단순화한 구조)의 경우, 구조물 내력은 외력과의 평형관계식만으로 정의되므로, 구조계에 작용하는 하중만 알 수 있다면 구조물의 강성이나 변형에 관계없이 그 내력을 구할 수 있다. 구조물이 비선형 거동을 수행하는 경우에도 구조물의 내력은 탄성해석의 결과나 비탄성해석의 결과에서 동일하고, 구조물의 변형에서만 차이가 발생된다. 따라서, 이러한 원리를 이용하면 상기 전단빌딩 모형에 대한 부재별 소성이력 추정법은 간단히 일반 다자유도계 정정구조에 대한 방법으로 확대 적용할 수 있다. 즉, 계측된 가속도 응답을 이용하여 구해진 하중으로 매시간 간단한 선형 정적응답해석을 하면 손쉽게 부재력을 계산할 수 있다. 그 관계식은 아래 식 (4)에 기술하였다.

$$KU(t) = F_I(t), \quad f_R(t) = DU(t) \quad (4)$$

여기서, $F_I = -M\{1\} \ddot{x}^t$ 이며, K, U 는 구조물이 선형탄성거동을 가정하여 구성된 강성행렬과 변형벡터이고, D 는 부재력과 변형과의 관계행렬이다. 이 과정을 통해 구해진 부재별 소성이력 f_R 과 계측된 부재의 실제 비탄성 변형을 연결시키면 소성이력이 쉽게 구해진다. 이때, 정정 구조계에 대해서는 강성행렬 K 및 D 는 실제 구조물의 강성행렬이 될 필요는 없다.

부정정 구조에 대해서는 비탄성 관계식을 사용해야 하고, 강성행렬 또한 실제 강성행렬이 되어 하는 등 다소 복잡한 문제가 되어 이에 대한 연구가 필요하리라 사료되나, 본 논문에서는 교각이나 빌딩구조 등 정정구조 혹은 정정구조로 단순화할 수 있는 구조계에 대해 적용하는 경우만을 가정하였다. 이 경우는 엄밀하게 말하면, 구조부재별 소성이력 추정이라는 의미보다는 정정구조로 단순화된 구조계의 블록별 소성이력 추정이라 할 수 있다.

4. 구조물의 계수추정법

비선형 모형에 대한 구조추정법 연구⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾는 상대적으로 선형 모형에 대한 연구⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾에 비해 다소 부족하다. 그 이유는 선형시스템에 대해 통상적으로 사용되는 일반적인 기법인 모우드 해석법이나 응답함수법 등이 비선형 구조에는 부적합하기 때문이다.

구조물의 비선형성, 특히 재료적 비선형성을 나타내는 소성이력의 추정에 사용되는 모형은 크게 비물리적 계수 모형(nonparametric model)^{(4),(7)}과 물리적 계수 모형(parametric model)^{(5)-(6),(8)}으로 구분할 수 있다. 비물리적 계수 모형은 소성이력 모형을 물리적 의미가 없는 수학적 수열 등의 형태로 단순화하여 표현된 소성모형으로, 계수추정은 용이하나, 물리적 의미를 분석할 수 없어 모형의 신뢰성이나 적용성을 완전히 보장할 수는 없다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 다소 형태가 복잡하고 추정이 어렵지만 물리적 의미가 있는 계수로 표현되는 물리적 계수모형의 추정방법에 역점

을 두었다.

물리적 계수 모형의 대표적인 형태로는 Bilinear, Trilinear Model과 Bouc-Wen model 등이 있다. 그러나, 비선형 계수 추정에서 가장 많이 사용되는 모형은 Bouc-Wen model^{(5),(6),(8)}이다. 그 이유는 이 모형이 다양한 소성현상을 포괄하고 있을 뿐만 아니라 소성 관계식이 하나의 수식으로 표현되어 추정식의 정식화가 용이하기 때문이다. 앞서의 운동방정식 (1)에서 감쇠력 항을 포함시키고 단자유도계의 경우에 대해 나타내면 아래와 같다.

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x} + q(\dot{x}(t), x(t)) = f(t) \quad (5)$$

이때, 소성력 $q(\dot{x}(t), x(t))$ 은 비소성복원력요소와 소성 복원력요소로 구분할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$q(\dot{x}, x) = \alpha k x(t) + (1 - \alpha) k z(t) \quad (6)$$

여기서, α 는 초기강성과 항복후 강성의 비이며, $z(t)$ 는 소성 특성치 (hysteretic characteristics)이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하고 선형모우드 계수 (ξ, ω)를 이용하여 표현하면 아래 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega \dot{x} + \alpha\omega^2 x + (1 - \alpha)\omega^2 z = p(t) \quad (7)$$

여기서, 소성특성치 $z(t)$ 는 Bouc-Wen 모형의 non-degradation 모형에 대해서는 아래와 같은 관계식을 만족한다.

$$\dot{z}(t) = A \dot{x}(t) - \beta \dot{x}(t)|z(t)|^{n-1} - \gamma \dot{x}(t)|z(t)|^n \quad (8)$$

여기서, A, β, γ, n 은 이력곡선의 형태를 결정짓는 변수이다. 이들 계수를 추정하는 방법으로는 여러 가지 기법들이 제시된바 있으나 가장 간단하며 안정적인 계수 추정법으로 알려진 방법은 Sues et al⁽⁵⁾에 의한 Batch 추정알고리즘이 있다. 이 방법에서는 계측된 변위 시간이력 x 와 계측 소성력으로 부터 환산된 소성 특성치 z 를 이용하여, 아래의 식 (8)과 같이 A, β, γ 변수의 추정식을 만들어 사용한다.

$$z(x_i) = z_0 + A \int_{x_0}^{x_i} dx - \beta \int_{x_0}^{x_i} |\dot{x}| |z|^{n-1} dx - \gamma \int_{x_0}^{x_i} \dot{x} |z|^n dx \quad (9a)$$

즉,

$$z(u_i) = z_0 + AI_{1i} - \beta I_{2i} - \gamma I_{3i} \quad (9b)$$

여기서, $I_{1i} = \int_{x_0}^{x_i} dx$, $I_{2i} = \int_{x_0}^{x_i} |\dot{x}| |z|^{n-1} dx$, $I_{3i} = \int_{x_0}^{x_i} \dot{x} |z|^n dx$ 이며, x_0 는 각 소성 사이클에 대한 초기변위, x_i 는 최종변위이다. 이때, Bouc-Wen 모형의 변수 A, β, γ 는 기지값 $z(u_i)$, z_0 및 I_{1i}, I_{2i}, I_{3i} 에 대한 선형결합의 형태로 나타내므로, 최소자승법(Least Square Method)을 이용하여 간단히 구해

질 수 있다.

이 배치(batch) 추정기법은 식 (9b)의 형태에서 직접 관찰할 수 있듯이, 수치적으로 상당히 안정된 방법이라는 점은 무엇보다 큰 장점이지만, 몇 가지 단점도 있다. 실험상에서 소성력(혹은 소성특성치 z)과 변위를 모두 계측해야 한다는 점과 단일 부재 혹은 단자유도계에 대해서만 적용되는 방법이라는 것이 그것이다. 따라서 이 방법을 통상의 다자유도계 구조에서 가속도나 변위 계측만 수행한 경우에 적용하기에는 어려움이 있다. 그러나, 본 논문에서 앞서 언급된 각 부재별 소성이력 추정법과 결합되어 사용되어 진다면 각 방법의 장점을 공유할 수 있게 된다.

또 다른 단점은 Bouc-Wen 모형의 또 다른 중요 변수인 α 와 n 을 가정(혹은 사전에 경험적 방법으로 추정)해서 사용한다는 것이다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 A, β, γ 와 α, n 을 동시에 추정하는 여타의 다른 알고리즘이 활용되어야 하나 이들 방법은 그 수렴성이나 안정성이 매우 떨어진다는 문제가 있다. 몇몇 연구자⁽⁶⁾는 이러한 문제를 해결하는 방안으로 Sues et al의 방법으로 A, β, γ 변수를 구해 A, β, γ 와 α, n 을 동시에 추정하는 알고리즘의 초기치로 활용하는 방안을 제시한 바 있다. 그러나, 이러한 해결 방안도 실제 실험결과에 대한 결과에서 충분한 알고리즘의 안정성을 보여주지 못하고 있다. 본 논문에서는 부재별 소성이력 추정법에 의한 단자유도 소성이력 추정법과 단자유도 소성이력에 대한 비선형 소성모형 추정법에 대한 결합 성능의 검토가 주요한 목적이므로, 비선형 소성모형 추정법은 기존의 Sues et al의 방법을 그대로 활용하였으며 이에 대한 개선은 추후 연구과제로 남겨두었다.

5. 예제해석

5.1 비선형 계수추정법 검증

제시된 방법의 검증을 위해 먼저 3절의 Sues et. al⁽⁵⁾의 비선형 계수 추정법(이하 Sues 알고리즘)의 성능을 검토하였다. 검증을 위한 예제는 비선형 단자유도계 구조에 대한 모의실험 결과를 이용하였다. 모의실험에 사용된 모형에서는 α 는 0.0으로 n 은 1로 가정하였고, 입력하중은 그림 3과 같은 Elcentro 지진을 사용하였다. 또한, 선형 모우드 계수는 각각 $\xi=0.02$, $\omega=12.5$ rad/sec으로 $\Delta t=0.02$ sec로 가정하였다. 추정에 사용된 계측이력은 모의실험 결과에 RMS(root mean square) 5% 노이즈를 첨가하였다. 이때, 해석적으로 구해진 소성이

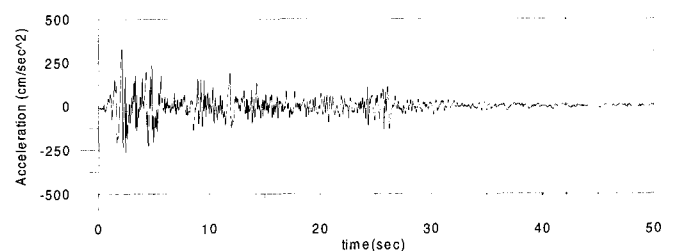


그림 3 입력 지진이력(Elcentro)

력과 추정에 의해 구해진 소성이력은 각각 그림 4에 도시되었으며, 추정된 계수는 표 1에 나타내었다.

결과로부터 Sues 알고리즘이 매우 안정적인 추정방법이고, 그 추정결과 또한 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있었다. 그러나, 이 예제가 계측오차(measurement error)가 매우 적고, 모형오차(unmodelled error)가 전혀 없는 경우임을 감안하면 실제 실험적 예제에 대한 계수 추정의 정확도는 아주 만족스러운 정확도는 아닐 수 있다. 그러나, 추정된 비선형 계수를 구조재해석에 활용하는 경우, 구조물 특성 값의 오차는 얻어진 응답에서는 상당히 줄어드는 특성이 있다는 것이 구조해석의 수치적 특성(정해석 문제의 수치특성)임을 감안하면, 본 논문에서 보인 계수추정 오차 정도는 추후의 재해석에서 얻어진 응답결과에는 큰 차이를 보이지 않으리라 사료된다. 이 계수 추정법의 특성은 아래의 실험적 예제해석을 통해 보다 자세히 검토하였다.

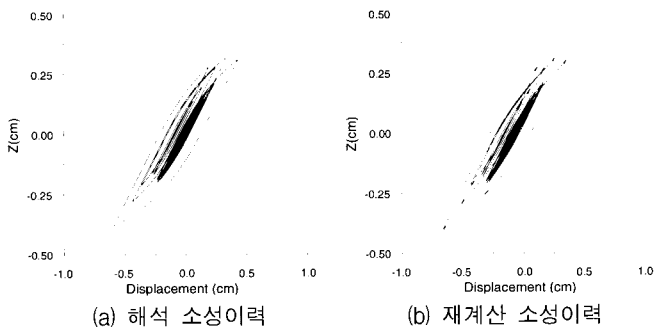


그림 4 해석된 소성이력과 추정된 계수에 의해 재계산된 소성이력

표 1 추정된 비선형 계수

	비선형 계수		
	A	β	γ
가정치	1.0000	1.0000	1.0000
추정치	1.0017	1.0676	0.8711

5.2 강골조 빌딩구조물

제시된 소성이력 추정법과 소성모형의 계수 추정법의 결합성을 실험적으로 검증하기 위해, 일본 교토대의 DPR1 연구소에서 그림 5와 같은 1층, 4층 전단빌딩 구조물에 대해 수행된 진동대 실험데이터를 이용하였다. 이 실험에서 사용된 하중은 대상구조물에 크기가 조정된 Elcentro 지진으로 900gal 및 500gal의 지진이 약축(y-방향)에 가해졌으며, 각 층별 계측결과는 층별 계측 값들의 평균값을 사용하였다.

5.2.1 1층전단빌딩 모형(900gal의 경우)

먼저 실험결과에 대한 Sues 알고리즘의 수치성능을 검토하기 위해, 예제 구조물 중 1층 단자유도계 구조물을 대상으로 계측된 변위와 밑면 전단력의 시간이력으로 비선형 계수를 추정하였다. 이때, 질량 및 감쇠 그리고 초기강성은 각각 $m=8444\text{kg}$, $c=3.87\text{kN}\cdot\text{sec}/\text{m}$, $k=4.44\times 10^3\text{kN}/\text{m}$ 으로 가정하였다. 이 값들은 계측이력의 초기 선형 응답부에서 추정된 값($\xi=0.01$, $\omega_n=22.94\text{rad}/\text{sec}$)을 참조하여 계산된 값이다. 또한, Bouc-Wen 모형 계수 추정에서는 앞 절에서와 같이 $n=1.0$, $\alpha=0.0$ 을 사용하였다. 추정된 Bouc-wen 모형 계수 추정값은 $A=0.998$, $\beta=14.60$, $\gamma=32.81$ 이다. 사용된 하중과 응답은 그림 6에 나타내었으며, 추정된 비선형 계수에 의해 재계산된 소성이력과 계측된 소성이력을 그림 7에 보이었다. 두 소성이력은 끝부분의 모양을 제외하고는 그 형태나 크기에서 대단히 유사한 결과를 보여주고 있다. 소성이력의 모양이 계산된 소성이력에서 보다 예각으로 꺾어지는 이유는 $n=1$ 로 가정하였기 때문이다. 소성이력의 모양은 n 값이 점점 커짐에 따라 bilinear 모양에 가까워진다. 이론적으로는 $n=\infty$ 일 때, 완전한 bilinear 모양이 된다. 이 n 치의 정확한 값을 추정하기 위해서는 앞서 언급된 바와 같이 Sues 알고리즘의 개선이 필요하나, 추후 연구과제로서 본 예제에서는 생략하였다.

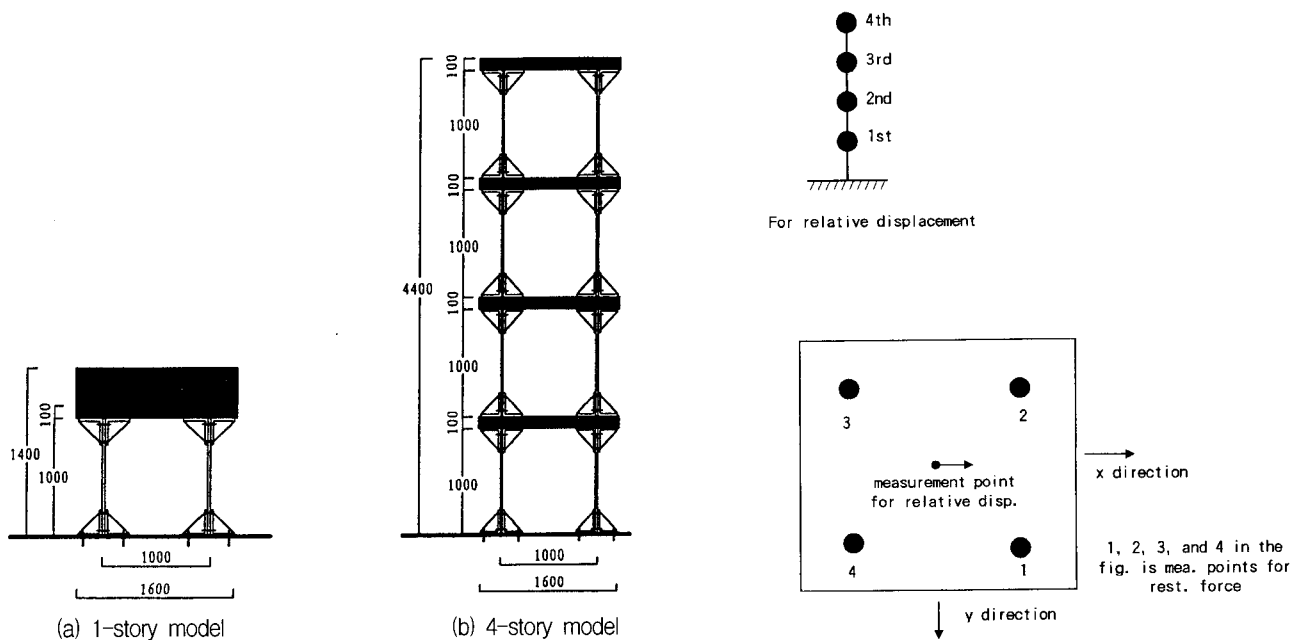
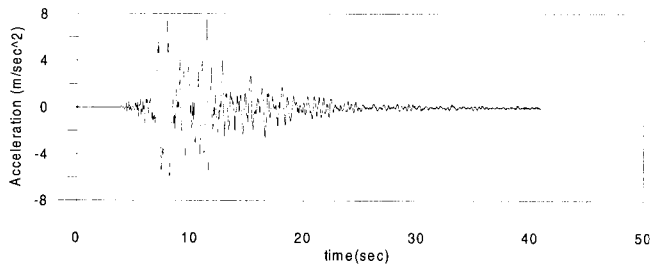
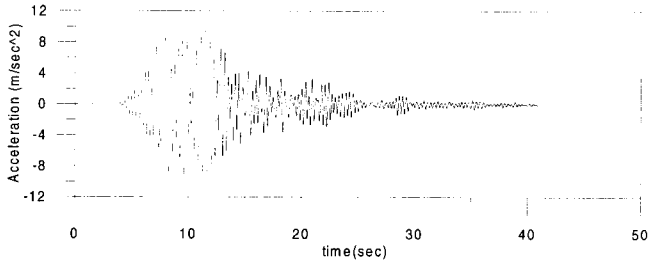


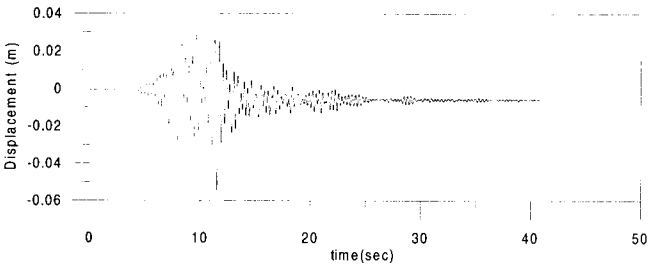
그림 5 시험체 구조물과 계측점



(a) 입력 지진이력

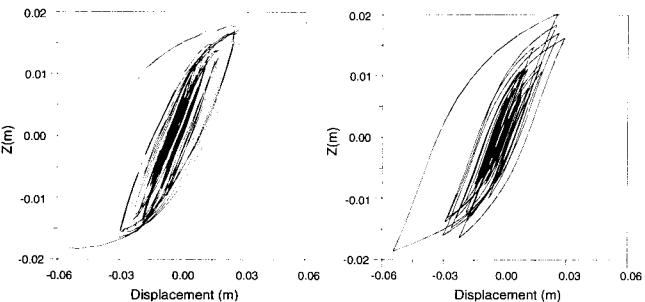


(b) 절대가속도 응답



(c) 절대 변위응답

그림 6 계측된 입력 지진이력과 응답



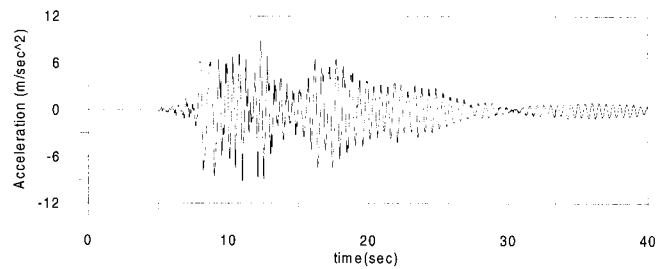
(a) 계측된 소성이력

(b) 재계산 소성이력

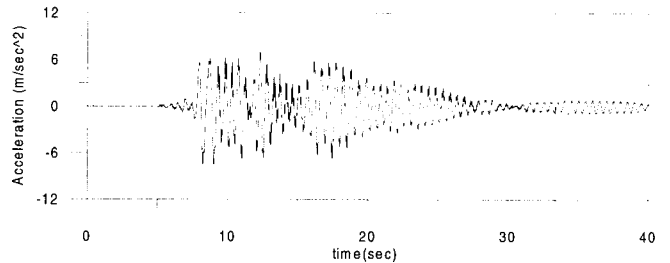
그림 7 계측된 소성이력과 재계산된 소성이력

5.2.2 4층 전단빌딩 모형(500gal의 경우)

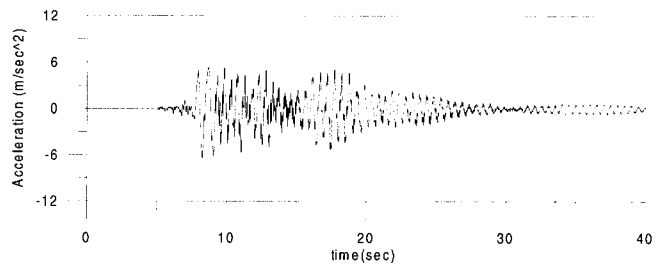
다음은 4층전단빌딩 모형(500gal의 경우)를 대상으로 부재별 소성이력추정 및 Bouc-wen 모형 계수 추정을 수행하였다. 사용된 하중은 1층 전단빌딩 실험에서와 동일하며, 계측된 응답은 그림 8과 9에 보였다. 제시된 방법에 의해 추정된 각 부재별 소성이력은 그림 10에 나타내었으며, 추정된 비선형 계수는 표 2에 보였다. 1층 부재에 대해서는 계측 부재력이 있으므로, 추정된 소성이력과 계측소성이력을 같이 보였다. 또한, 추정된 Bouc-Wen 계수를 이용하여 다시 계산된 Bouc-Wen 모형 소성이력은 그림 11에 나타내었다. 가정에 사용된 고유진동수와 감쇠값은 앞의 단자유도 실험결과에 사용된 고유진동수를 질량의 비로 환산한



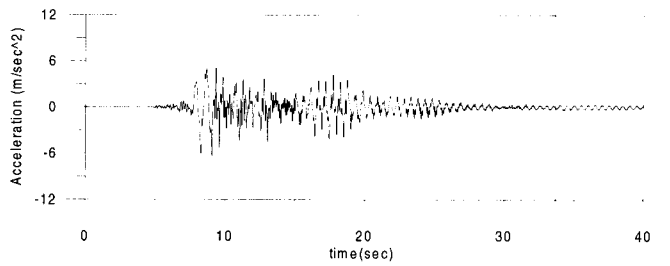
(a) 4층



(b) 3층



(c) 2층



(d) 1층

그림 8 계측된 절대 가속도 응답

값이다.

추정된 부재별 소성이력 결과에서는 1층 부재에 소성현상이 집중되고 있으며 점차 고층으로 감에 따라 소성현상이 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 소성모형 추정에서는 사용된 데이터의 구간에 따라 계수추정결과가 수치해석 결과에 비해 다소간의 변동을 보였으나, 계측오차나 비모형화 오차가 많이 포함된 실험결과임에도 추정된 소성이력과 재계산된 소성이력의 경향이 매우 유사하고 추정 알고리즘이 매우 안정적임을 확인할 수 있었다. 추정된 소성이력과 재계산된 소성이력의 정량적인 특성에서는 다소간의 차이를 보였다. 이는 Sues 알고리즘이 n 값과 α 값을 추정할 수 없다는 단점에 기인한 것으로, 이 알고리즘의 보완이 필요하다 판단되었다. 그러나, 현 단계의 결과로도 진동대 실험결과와의 분석을 위한 체계의 구축이라는 측면에서는 상당히 의미있는 결과라 사료된다.

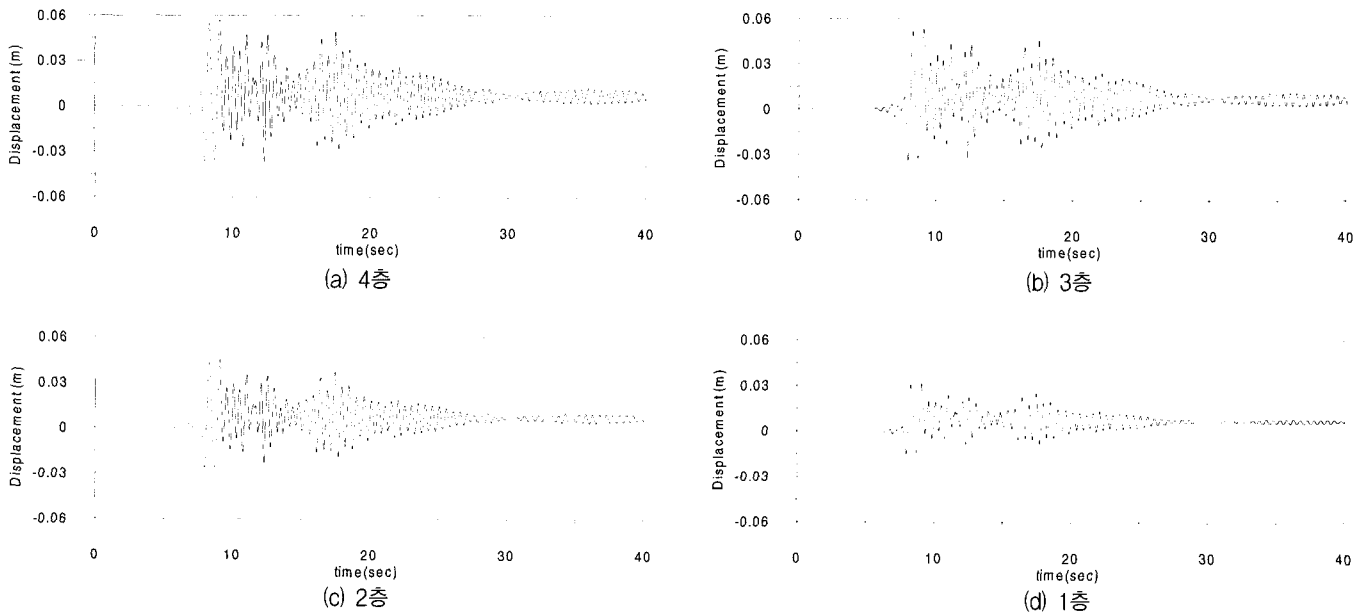


그림 9 계측된 상대 변위 응답

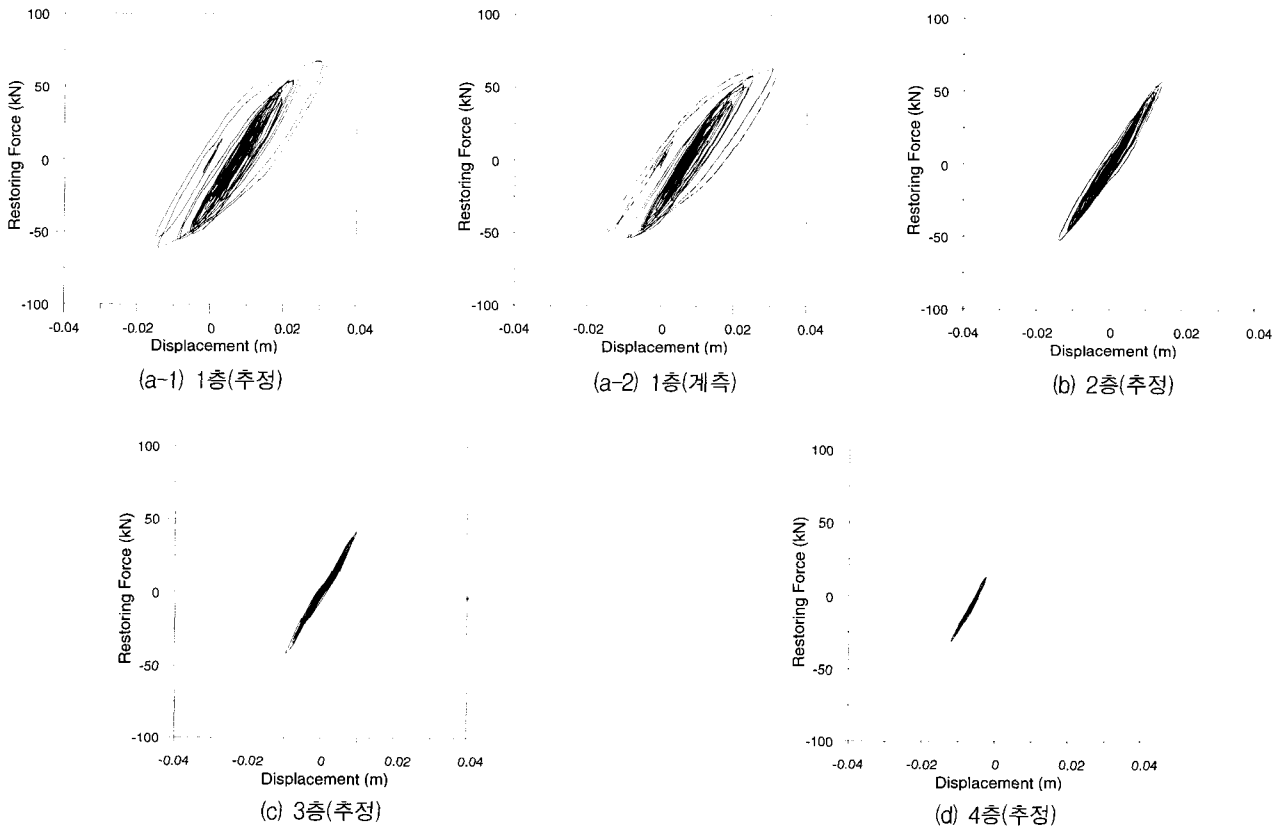


그림 10 계측 소성이력과 부재별 소성이력 추정법에 의한 층별 소성이력

표 2 추정된 비선형 계수

층	층별 모드 계수(가정)		추정된 Bouc-Wen 모형 계수		
	ω_n	ξ_n	A	β	γ
4	42.6400	0.01	1.0719	10.1953	33.5853
3	39.2255	0.01	0.8881	5.8083	-18.7577
2	39.2255	0.01	0.9530	3.8505	14.5529
1	39.2255	0.01	0.8254	39.5017	-14.9309

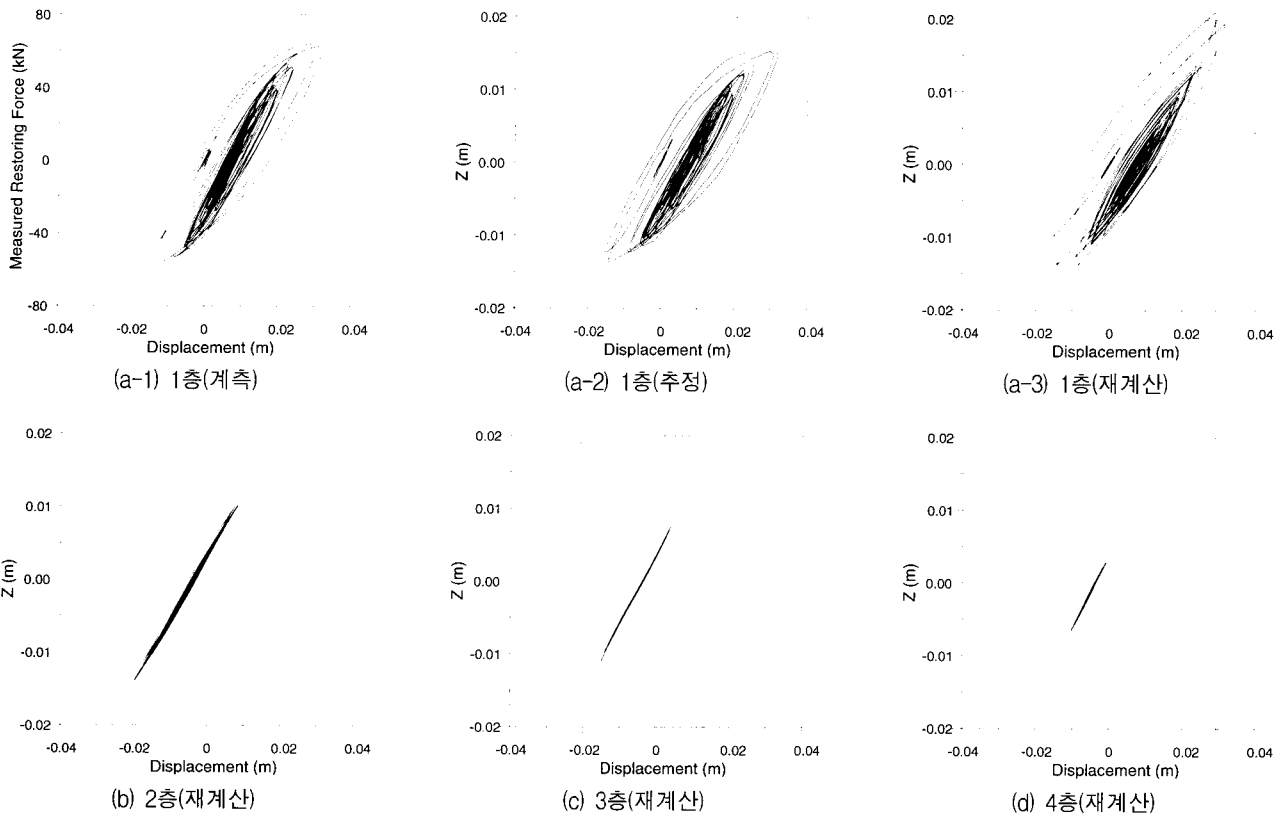


그림 11 추정된 Bouc-Wen 모형 계수를 이용해 재계산된 소성이력

6. 결 론

본 연구에서는 진동대 실험결과와 효과적 분석을 위해 지진하중에 대한 비선형 구조규명법에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 아래에 정리하였다.

- 1) 진동대 실험을 통해 얻어진 계측결과를 이용하여 부재별 소성이력을 추정하는 방법과 단자유도 소성이력 계수 추정법을 결합하여, 다자유도 구조물의 전체 및 부재별 손상도 추정을 위해 필요한 소성이력추정법을 체계화하였다. 특히, 소성이력 계수 추정법으로는 실용적 사용에 초점을 두어 안정적인 추정 알고리즘인 배치기법을 적용하였다.
- 2) 실제 진동대 실험결과에 대한 특성을 고찰하기 위한 예제 해석을 통해 이 방법들이 실제 구조물의 소성이력 추정에 매우 효과적임을 볼 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 협동연구과제(2000-042-E00134)의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로, 저자는 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 송종걸, "강구조물의 시스템 지진응답 산정과 지진손상도 해석", 박사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과, 1997. 6.
2. Chung, W. J., Yun, C. B., Kim, N. S., and Seo, J. W., "Shaking table and pseudodynamic tests for the evaluation of the seismic performance of base-isolated structures," *International Journal of Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 365-379.
3. 박연수, 박선준, "강한 지진하중하에서 강부재의 정량적 손상 모델", 한국강구조학회 논문집, 제10권, 제3호, 1998, pp. 339-353.
4. Sassan Toussi and James T. P. Yao, "Hysteretic identification of existing structures," *J. of Engrg Mech*, ASCE, Vol. 109, No. 5, 1983, pp. 1189-1202.
5. Sues, R. H. Mau, S. T., and Wen, Y. K., "System identification of degrading hysteresis restoring forces," *J. of Engrg Mech*, ASCE, Vol. 114, No. 5, 1988, pp. 833-846.
6. Chin-Hsiung Loh and Sheng-Tsai Chung, "A three-stage identification approach for hysteretic systems," *Earthquake Engrg and Struct. Dynamics*, Vol. 22, 1993, pp. 129-150.
7. Lin, C. C., Soong, T. T., and Natke, H. G., "Real-time system identification of degrading systems," *J. of Engrg Mech*, ASCE, Vol. 116, No. 10, 1990, pp. 2258-2274.
8. Maruyama, O., Yun, C. B., Hoshiya, M., and Shinozuka, M., "Program Exkal2 for identification of structural dynamic systems," Technical report NCEER-89-0014, 1989.
9. Andres W. C. Oreta and Tada-aki Tanabe, "Localized

- identification of structures by Kalman filter," *Str. Eng./ Earthquake Eng.*, JSCE, Vol. 9, No. 4, January, 1993, 217s-225s
10. Duan Wang and Archinotya Haldar, "Element-level system identification with unknown input," *J. of Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 120, No. 1, January, 1994, pp. 159-176.
11. 이형진, 대형구조물의 손상도 평가를 위한 부분구조 추정법, 박사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과, 1997. 2.