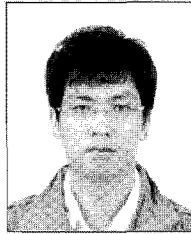
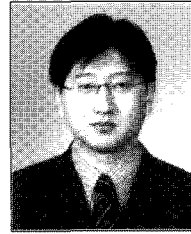


# FEMA 440 방법을 통한 구조물의 내진성능 평가

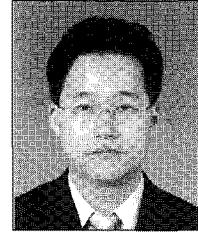
## Seismic Performance Evaluation of Structures Using FEMA 440 Method



박진화\*



김영주\*\*



안태상\*\*\*

\* DRB동일 면진제진기술연구소 책임연구원  
\*\* DRB동일 면진제진기술연구소 수석연구원  
\*\*\* DRB동일 면진제진기술연구소 소장

### 1. 서론

선진화된 대도시에서 발생한 미국의 노스리지(Northridge) 지진 및 일본의 고베 지진을 통하여, 생명보전을 목적으로 하는 전통적인 방법으로 내진설계된 구조물에 대규모 피해가 발생하는 것을 목격하였다. 이러한 결과는 기존의 설계 방법에 대한 타당성 및 신뢰성에 대한 의문을 가져오게 되었다.

전통적인 내진설계는 구조물의 주기를 구조설계 기준 상의 탄성 기본주기를 사용함으로써 비탄성 구간에서의 구조물의 진동 특성을 엄밀하게 반영하지 못하는 문제점이 있다. 또한 반응수정계수(R)를 적용하여 탄성 밀면전단력을 감소시킴으로서 전체 시스템은 실제 지진하중 하에서 비탄성 구간을 경험하게 되는데, 이러한 반응수정계수(R)를 선택함에 있어 실제 적정한 값을 산정하는 것은 매우 어려운 문제이며, 현실적으로 현행 내진설계에서 가장 불확실한 부분 중의 하나이다. 이러한 전통적인 내진설계의 불확실성은 내진공학의 획기적인 발전에도 불구하고 구조물이 갖고 있는 다양한 조건, 즉 지반의 특성, 구조물의 비정형성 및 이에 따른 다양한 동적거동을 구조설계 기준이 모두 수용할 수 없다는 태생적 한계에도 기인한다. 따라서 이러한 불확

실성을 탈피하여 다수의 성능목표에 대해 지진하중에 대한 구조물의 적합한 성능을 정확하게 평가하고, 이를 바탕으로 구조물을 설계하고자 하는 성능기반설계법(Performance Based Design Method)이 대두되었다.

본 고에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 성능기반설계법인 FEMA 440 방법 중에서 ATC 40의 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 개선시킨 선형화법(Linearization Method)에 대하여 구체적으로 소개하고자 한다.

### 2. 비선형 정적해석(Pushover Analysis) 이론적 배경

성능기반설계법(Performance Based Design Method)은 해석과정에서 비선형 정적해석 과정을 통한 다자유도 구조물의 등가 단자유도화 과정을 내포하고 있다(그림 1). 현재 주로 사용되는 비선형 정적해석 방법은 크게 ATC 40 보고서에서 제안한 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)과 FEMA 273에서 제안한 변위계수법(Displacement Coefficient Method)의 두 가지 방법을 기본으로, 여러 연구자들에 의해 구조물 비선형 동적특성 계수값을 수정하여 반영시킨 개선

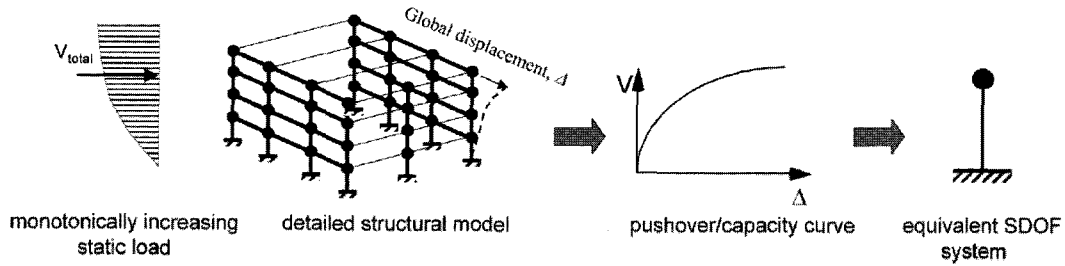


그림 1 비선형 정적해석에 의한 등가단자유도 모델 이상화 (출처 : FEMA 440)

된 방법들(FEMA 356, FEMA 440)이 사용되고 있다.

## 2.1 비선형 정적해석(Pushover Analysis)

ATC 40에서 제안하고 있는 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)은 Freeman et al.(1975)와 Freeman(1978)가 최초로 제안한 방법을 근거로 한 방법으로, 그 과정은 다음과 같다.

- 1) Pushover Curve 선정 : 단조 증가형태의 정적인 외력 작용에 따른 구조물의 최상층 변위( $U_N$ )와 밀면전단력( $V_b$ )의 관계곡선을 선정(그림 2(a)).
- 2) Pushover Curve → Capacity Diagram 변환 : 식 (1)의 관계식을 사용하여 1)에서 선정된 Pushover Curve를 Capacity Diagram으로 변환.

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2}, M_1^* = \frac{\left(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}\right)^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2} \quad (1)$$

여기서,  $m_j$  :  $j$ 층 바닥레벨의 집중질량,

$\phi_{j1}$  : 기본모드  $\phi_1$ 에서  $j$ 층 바닥요소

$N$  : 구조물 층수,

$M_1^*$  : 기본 진동모드에 대한 유효 모드질량

- 3) 주기  $T_n$ 에 대한 유사가속도  $A$  탄성응답(혹은 설계) 스펙트럼 작성.
- 4) 2)의 Capacity Diagram과 3)의 스펙트럼 중첩 → 성능점 선정(등가 선형시스템 변환과정을 필요로 함).
- 5) 4)에서 선정된 성능점으로부터 구조물 최상층 변위 및 구성부재 부재력 평가.

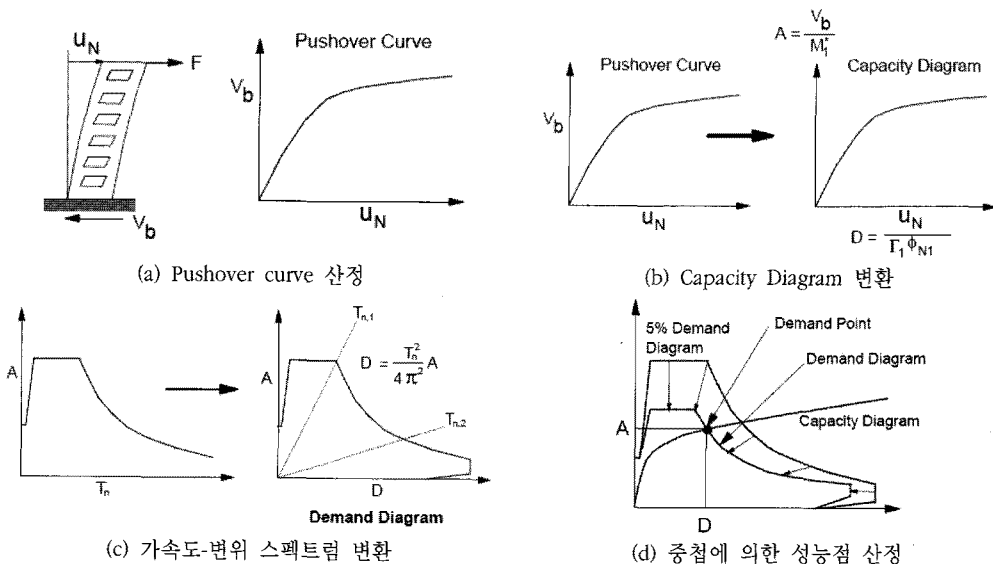


그림 2 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method) 과정

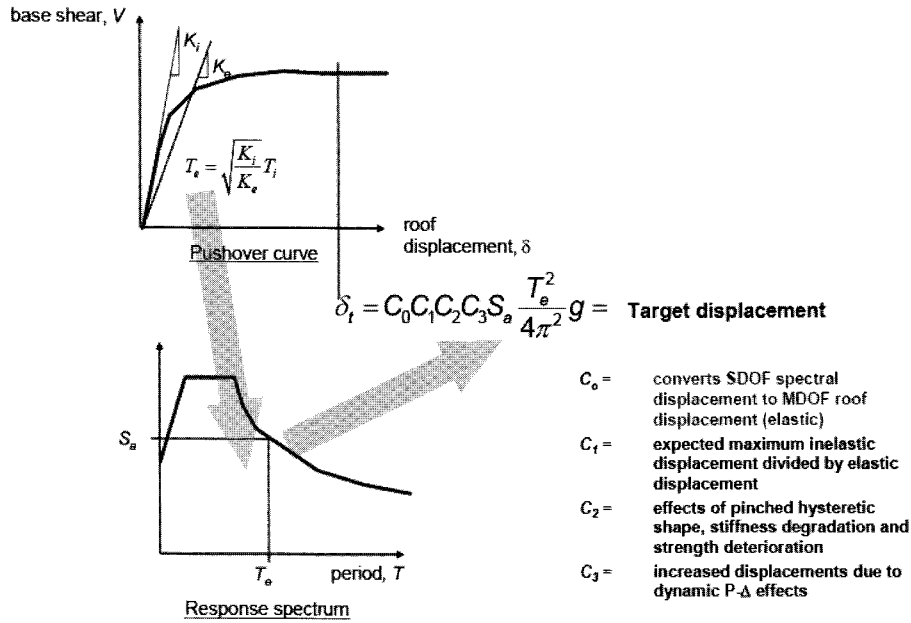


그림 3 Coefficient Method의 체계도(출처 : FEMA 356)

FEMA 273에서 제안한 변위계수법(Displacement Coefficient Method)의 경우, 상기의 과정과 거의 유사하나 4)의 성능점 산정과정에서 구조물의 기하학적 형상 및 동적 특성으로부터 산정되는 계수  $C_0 \sim C_3$ 로부터 목표변위를 산정하는 과정이 다르다.

## 2.2 등가선형시스템(Equivalent Linear System)

2.1절의 4) 과정은 성능기반설계법에서 중요한 등가선형화법을 함축적으로 포함하고 있다. 등가선형화법에서 주요 논쟁사항은 다자유도 구조물을 등가의 단자유도 구조물로 변환하는 과정에서 발생하는 등가주기  $T_{eq}$ 와 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 의 산정 부분에 있다. 여러 연구자들이 현재 이 두 주요 변수에 대하여 활발히 연구 중에 있으며, 초기의 이론적 배경은 다음과 같다(단, 변환과정은 이선형 모델(Bilinear Model)을 근거로 하였음).

1) 등가주기  $T_{eq}$ 의 산정 : 그림 4(a)와 같은 이선형 힘-변형 관계를 갖는 비탄성 단자유도 시스템에서 탄성강성을  $k$ , 항복 후 강성을  $\alpha k$ , 항복강도를  $f_y$ , 항복변위를  $u_y$ , 최대변위를  $u_m$ , 연성계수  $\mu = u_m/u_y$ 이라고 하면, 등가강성  $k_{sec}$ 를 갖는 등가선형시스템의 등가주기  $T_{eq}$ 는 선형과 이선형의 평형관계로부터 식 (2)와 같다.

$$T_{eq} = T_n \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (2)$$

2) 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 의 산정 : 등가감쇠비를 구하는 가장 일반적인 방법은 선형시스템과 비선형시스템의 1사이클에 대한 에너지 소산량에 대한 평형식 식 (3)으로부터 산정이 가능하다.

$$\beta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (3)$$

여기서,  $E_D$ 는 비선형 이력에 의한 1사이클 내부면적이고  $E_S = k_{sec}u_m^2/2$ 으로, 그림 4(b)로부터 식 (3)에 대입하여  $\beta_{eff}$ 를 구하면 식 (4)와 같고,

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\mu(1 + \alpha\mu - \alpha)} \quad (4)$$

등가선형시스템의 전체 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 는 식 (5)와 같다.

$$\beta_{eq} = \beta + \beta_{eff} \quad (5)$$

여기서,  $\beta$ 는 기본구조물의 고유감쇠비이다.

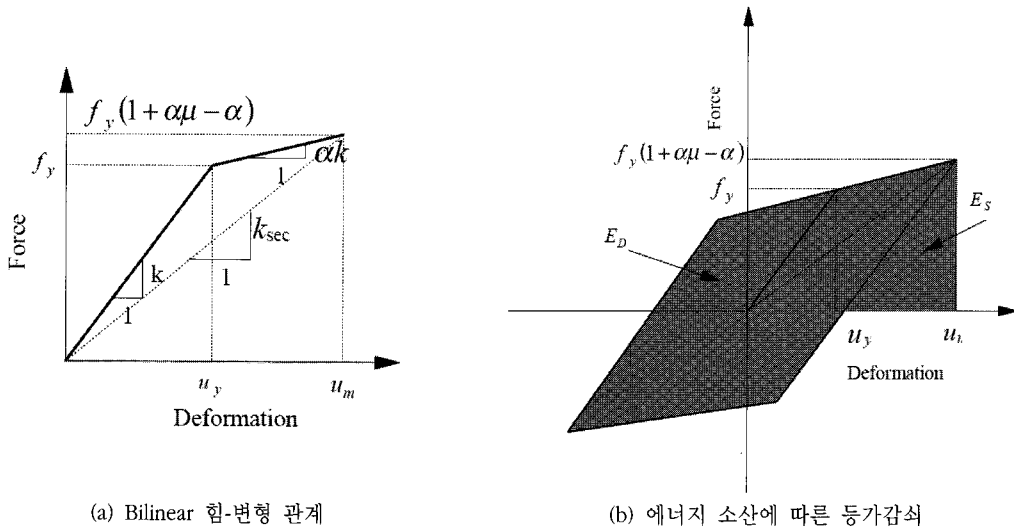


그림 4 비탄성 단자유도 시스템

### 3. 구조물 성능평가

#### 3.1 선형화법(Linearization Method)

ATC 40을 개선시킨 Linearization 방법과 FEMA 356을 개선시킨 Coefficient 방법으로 구성된 FEMA 440 방법은 기존의 방법과 다른 새로운 형태의 구조물 성능평가 방법을 제안하는 것이 아니라, 기존에 제안된 비선형 정적해석법인 ATC 40과 FEMA 356 평가방법의 일부를 개선하여 향상된 성능평가 결과를 얻을 수 있도록 하는 것을 그 목표표로 삼고 있어, ATC 40과 FEMA 356에서 제안한 방법과 거의 유사하다.

FEMA 440 Linearization 방법은 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)이라고도 하며, 기존 ATC 40의 방법에서 많은 연구자들에 의해서 문제시되었던 등가 단자유도 모델 변환 과정에서 등가감쇠비 및 등가주기에 대한 산정 관계식을 대폭적으로 수정하여 개선하였고, 여기에 지반과 구조물의 상호작용 효과 등을 고려하고 있는 점에서 큰 차이를 나타내고 있다.

FEMA-440 Linearization 방법에 의한 구조물 성능평가 과정은 다음과 같다.

- 1) 동적특성(기본 모드형상)을 고려한 Pushover 해석수행 (Capacity Curve 산정).
- 2) 5% 탄성스펙트럼(Demand Spectrum) 산정.
- 3) 1)단계의 Capacity Curve와 2)의 Demand Spectrum을 중첩하여 초기 가상성능점(그림 5 ①)을 구한 후 이 값을 근거로 1)에서 구한 Capacity Curve 이상화 → 이상화 이력곡선으로부터 구조물 초기강성  $k_0$ , 항복

후 강성  $\alpha k_0$ , 초기고유주기  $T_0$ , 연성비  $\mu$  결정.

- 4) 3)단계의 동적 특성값을 이용한 등가선형모델 산정 → 등가강성  $k_{eq}$ , 등가주기  $T_{eq}$  및 등가감쇠비  $\beta_{eq}$  산정.

- ATC 40에서 구조물 이력모델을 Type A, B, C로 구분하여 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 를 정의하고 있으나, FEMA 440에서는 탄소성(Bilinear Hysteretic), 강성저감(Stiffness Degrading), 강도저감(Strength Degrading) 모델의 특성에 따라 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 를 연성비  $\mu$ 로 변수로 하는 다음과 같은 식을 제시하고 있다.

$$1.0 < \mu < 4.0,$$

$$\beta_{eq} = A(\mu - 1)^2 + B(\mu - 1)^3 + \beta \quad (6)$$

$$4.0 \leq \mu \leq 6.5,$$

$$\beta_{eq} = C + D(\mu - 1) + \beta \quad (7)$$

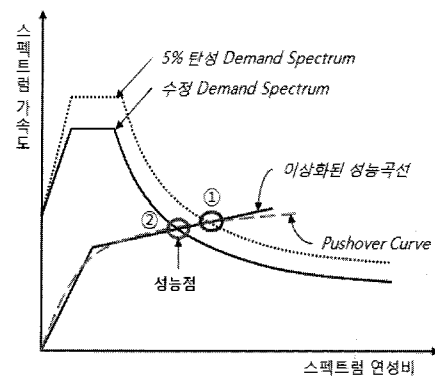


그림 5 FEMA 440 Linearization Method

표 1 등가감쇠비  $\beta_{eq}$  산출시 관련 계수값(출처 : FEMA 440)

Model	$\alpha(\%)$	G	H	I	J	K	L
Bilinear hysteretic	0	0.11	-0.017	0.27	0.090	0.57	0.00
Bilinear hysteretic	2	0.10	-0.014	0.17	0.12	0.67	0.02
Bilinear hysteretic	5	0.11	-0.018	0.09	0.14	0.77	0.05
Bilinear hysteretic	10	0.13	-0.022	0.27	0.10	0.87	0.10
Bilinear hysteretic	20	0.10	-0.015	0.17	0.094	0.98	0.20
Stiffness degrading	0	0.17	-0.032	0.10	0.19	0.85	0.00
Stiffness degrading	2	0.18	-0.034	0.22	0.16	0.88	0.02
Stiffness degrading	5	0.18	-0.037	0.15	0.16	0.92	0.05
Stiffness degrading	10	0.17	-0.034	0.26	0.12	0.97	0.10
Stiffness degrading	20	0.13	-0.027	0.11	0.11	1.0	0.20
Strength degrading	-3 <sup>a</sup>	0.18	-0.033	0.17	0.18	0.76	-0.03
Strength degrading	-5 <sup>a</sup>	0.20	-0.038	0.25	0.17	0.71	-0.05

$\mu > 6.5,$

$$\beta_{eq} = E \left[ \frac{F(\mu-1)-1}{F(\mu-1)^2} \right] \left( \frac{T_{eq}}{T_0} \right)^2 + \beta \quad (8)$$

으로, A~F는 구조물의 이력곡선별, 항복 후 강성비  $\alpha$ 에 따라 표 1과 같다. 이 값들은 단자유도 구조물에 대한 이력곡선별 비선형 시간 이력해석 최대변위와 비선형 정적해석 최대변위간의 오차를 최소화시키도록 회귀분석을 통하여 구한 계수값이다. 그러나, 일부 특정 구조요소의 이력특성을 구하기가 어려운 구조물의 경우, 구조물 전체의 이력특성을 결정하기가 어렵기 때문에 구조물의 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 를 다음 식을 사용하여 구하도록 제안하고 있다.

$1.0 < \mu < 4.0,$

$$\beta_{eq} = 4.9(\mu-1)^2 - 1.1(\mu-1)^3 + \beta \quad (9)$$

$4.0 \leq \mu \leq 6.5,$

$$\beta_{eq} = 14 + 0.32(\mu-1) + \beta \quad (10)$$

$\mu > 6.5,$

$$\beta_{eq} = 19 \left[ \frac{0.64(\mu-1)-1}{0.64(\mu-1)^2} \right] \left( \frac{T_{eq}}{T_0} \right)^2 + \beta \quad (11)$$

등가주기  $T_{eq}$ 에 대해서도 등가감쇠  $\beta_{eq}$ 와 동일한 이유로 이력모델이 정해질 경우,

〈표 2〉 등가주기  $T_{eq}$  산출시 관련 계수값(출처 : FEMA 440)

Model	$\alpha(\%)$	G	H	I	J	K	L
Bilinear hysteretic	0	0.11	-0.017	0.27	0.090	0.57	0.00
Bilinear hysteretic	2	0.10	-0.014	0.17	0.12	0.67	0.02
Bilinear hysteretic	5	0.11	-0.018	0.09	0.14	0.77	0.05
Bilinear hysteretic	10	0.13	-0.022	0.27	0.10	0.87	0.10
Bilinear hysteretic	20	0.10	-0.015	0.17	0.094	0.98	0.20
Stiffness degrading	0	0.17	-0.032	0.10	0.19	0.85	0.00
Stiffness degrading	2	0.18	-0.034	0.22	0.16	0.88	0.02
Stiffness degrading	5	0.18	-0.037	0.15	0.16	0.92	0.05
Stiffness degrading	10	0.17	-0.034	0.26	0.12	0.97	0.10
Stiffness degrading	20	0.13	-0.027	0.11	0.11	1.0	0.20
Strength degrading	-3 <sup>a</sup>	0.18	-0.033	0.17	0.18	0.76	-0.03
Strength degrading	-5 <sup>a</sup>	0.20	-0.038	0.25	0.17	0.71	-0.05

$1.0 < \mu < 4.0,$

$$T_{eq} = [G(\mu-1)^2 + H(\mu-1)^3 + 1] T_o \quad (12)$$

이고, 이력모델이 정해지지 않은 경우는

$4.0 \leq \mu \leq 6.5,$

$$T_{eq} = [I + J(\mu-1) + 1] T_o \quad (13)$$

$1.0 < \mu < 4.0,$

$$T_{eq} = [0.2(\mu-1)^2 - 0.038(\mu-1)^3 + 1] T_o \quad (15)$$

$\mu > 6.5,$

$$T_{eq} = \left\{ K \left[ \sqrt{\frac{(1-\mu)}{1+L(\mu-2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_o \quad (14)$$

$4.0 \leq \mu \leq 6.5,$

$$T_{eq} = [0.28 + 0.13(\mu-1) + 1] T_o \quad (16)$$

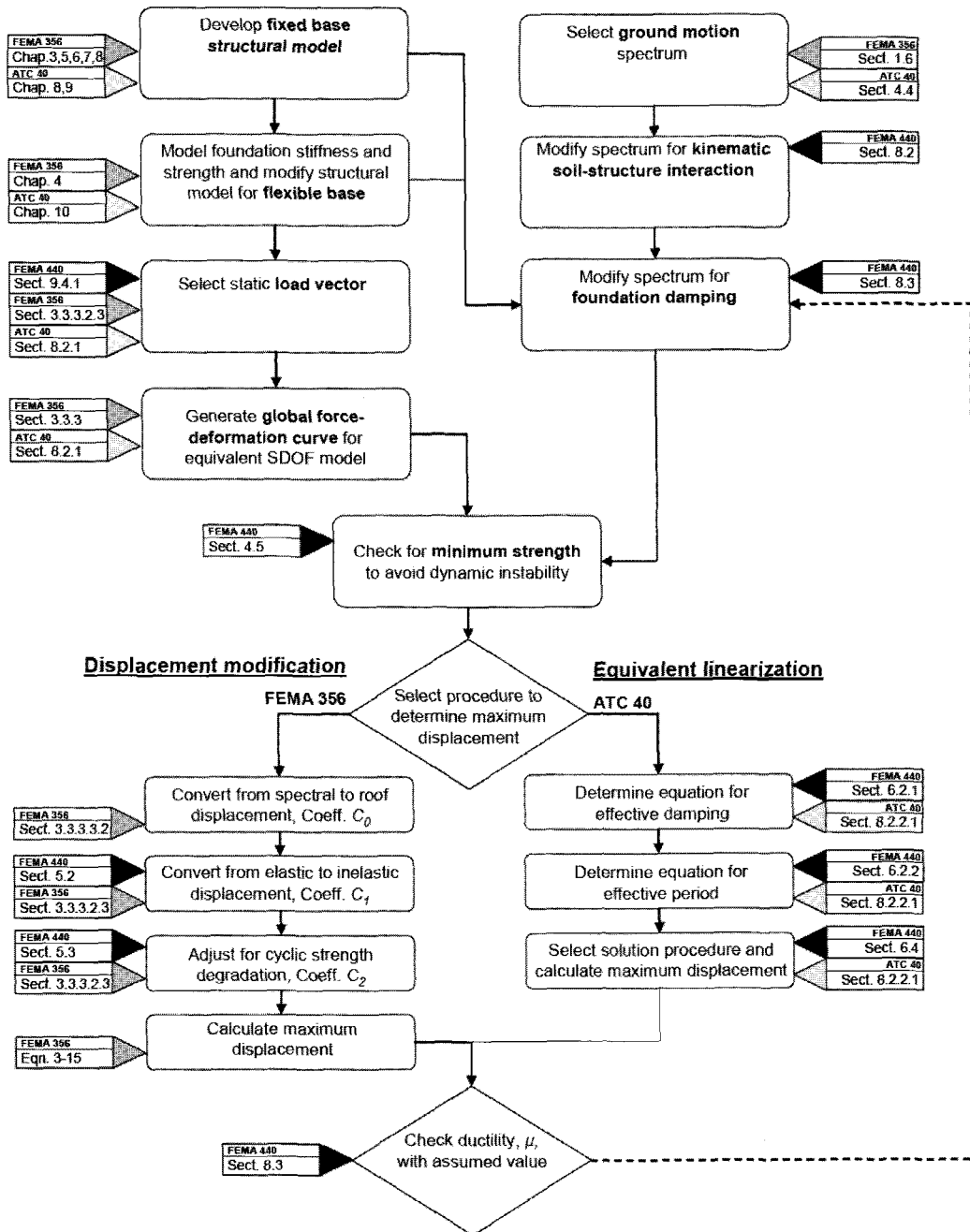


그림 7 FEMA 440 Method Flow Chart(출처 : FEMA 440)

$\mu > 6.5$ ,

$$T_{eq} = \left\{ 0.89 \left[ \sqrt{\frac{(1-\mu)}{1+0.05(\mu-2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 \quad (17)$$

을 제안하고 있고, G-L의 계수값은 표 2와 같다.

5) 2)단계의 최초 Demand Spectrum에 대하여, 구조물 이력특성을 고려한 수정 Demand Spectrum 산정.

- FEMA 440에서는 보다 정확한 구조물의 최대성능을 평가하기 위하여, 수정 Demand Spectrum 산정 시 ATC 40의 등가주기  $T_{eq}$ 에 대한 식 (2)와 등가감쇠비  $\beta_{eq}$ 에 대한 식 (5)산정의 문제점에 대하여 회귀분석을 통하여 식 (18)과 식 (19)의 계수를 통한 그림 6와 같은 보정과정을 제안하고 있다.

$$M = \left( \frac{T_{eq}}{T_{sec}} \right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \left( \frac{T_{eq}}{T_0} \right)^2 \quad (18)$$

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_{eq} \times 100)} \quad (19)$$

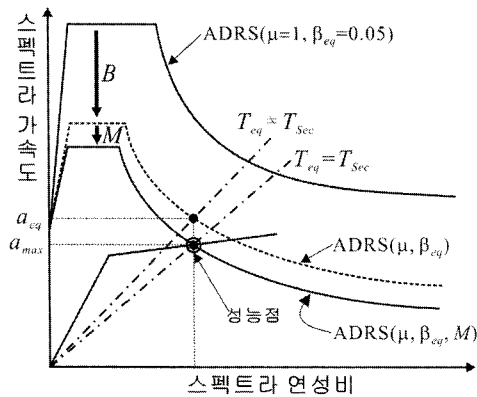


그림 3.2 수정 Demand Spectrum 산정

6) 5)단계 수정 스펙트럼과 3)단계 Capacity Curve를 중첩하여 성능점(그림 5 ㉔) 산정.

7) 3)단계에서 구한 초기 가상성능점과 6)단계에서 구한 성능점을 비교하여 허용오차(일반적으로 5% 이내)의 수렴여부를 판단.

8) 7)단계에서 구한 오차가 허용오차를 초과할 경우, 6) 단계에서 구한 성능점을 기준으로 3)단계~7)단계 과정을 반복하여 수렴 할 때까지 반복수행.

이상과 같은 FEMA 440 Linearization 방법을 포함하여, 기존의 ATC 40과 FEMA 356 방법의 개선사항과 추가부분을 포함한 전체 FEMA 440 평가법 Flow Chart는 그림 7과 같다.

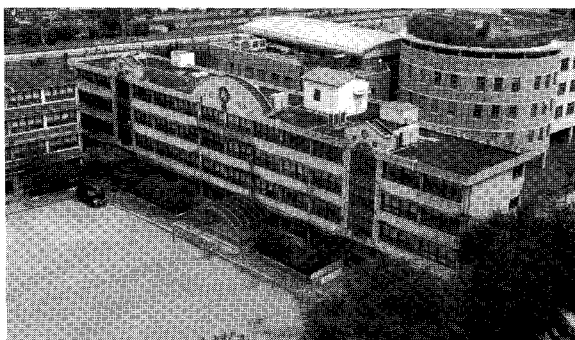
### 3.2 구조물 적용사례

#### 3.2.1 구조물 개요

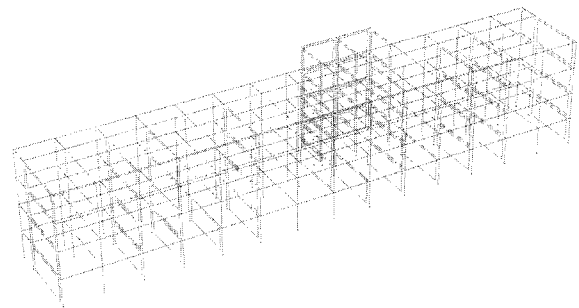
FEMA 440의 Linearization 방법을 사용하여 구조물 성능을 평가하기 위해 선정한 대상 구조물은 1988년 내진설계가 도입되기 이전인 1972년에 건립된 현재 서울에 위치하고 있는 00초등학교 구조물이다. 본 해석대상 구조물은 전형적인 형상의 학교 구조물로 중앙부에 계단실이 위치하고 있고, 좌우로 긴 복도로 연결된 교실 등이 배치된 일자형 평면형상을 하는 4층 규모의 구조물이다.

#### 3.2.2 해석결과

구조물 성능평가를 위한 해석 시 비선형 전용해석 프로그램인 Perform 3D를 사용하였고, 구조물 구성부재의 이력은 FEMA 356에서 정의하고 있는 FEMA 모델을 사용하였고, Demand Spectrum은 KBC2009 기준에 준하여 작성하여

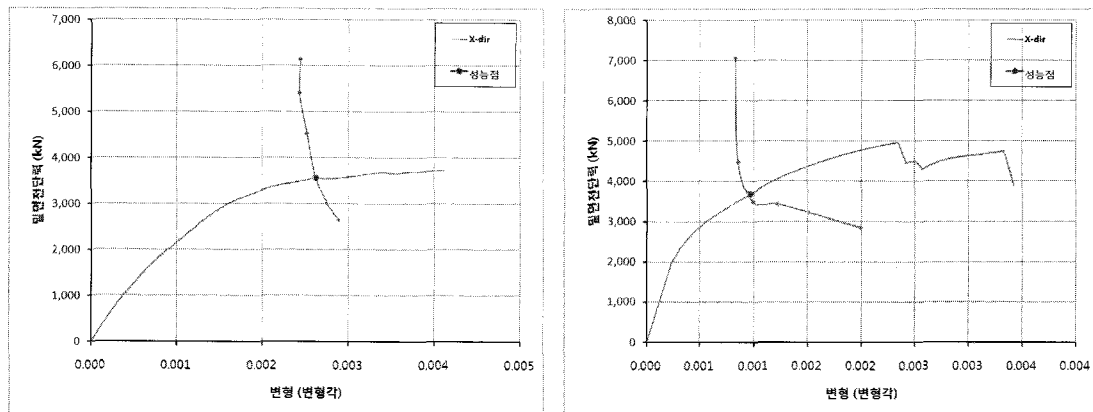


(a) 대상 구조물 전경



(b) 대상 구조물 Perform 3D Model

그림 8 대상 구조물 개요



(a) X방향 성능점

(b) Y방향 성능점

그림 9 FEMA-440 Linearization Method에 대한 결과

해석을 수행한 내진성능 평가결과는 그림 9와 같다.

KBC 2009 규준에서 정하고 있는 변형각 0.01을 기준으로 구조물 성능을 검토한 결과, Y방향으로는 성능점이 성능목표값 이내에서 형성되었고, 구조물 연성능력도 크게 나타나 별도의 내진보강이 필요하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Y방향으로는 보와 기둥의 골조 내부에 위치한 조적벽체의 영향인 것으로 판단된다. X방향으로는 성능점이 규준에서 허용하는 목표변위는 만족하고 있으나, 구조물이 상당한 소성변형이 이루어진 지점에서 성능점이 형성되어 구조물의 안전성을 향상시키기 위한 별도의 내진보강이 필요한 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본고에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 성능기반설계법인 FEMA 440 방법 중에서 ATC 40의 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 개선시킨 Linearization Method를 중심으로 구체적 개선사항을 살펴보고, 이 방법을 적용하여 기존 학교구조물의 내진성능을 평가하였다.

• FEMA 440 방법의 경우,

- 1) 기존 ATC 40 및 FEMA 356 등가선형화 방법의 등가주기  $T_{eq}$  및 등가감쇠  $\zeta_{eq}$ 를 구하는 부분을 구조물 이력특성을 반영하여, 소성을  $\mu$ 의 관계식으로 세분화하여 제시

- 2) 지반과 구조물 상호작용에 대한 효과 고려

- 3) FEMA 356의 목표변위 산정 시 사용되는 계수  $C_0 \sim C_3$  개선

등이 포함되었고, 이 방법을 사용하여 4층 규모의 학교구조물에 적용한 결과, Y방향으로는 보와 기둥의 골조 내부에 위치한 조적벽체의 영향으로 별도의 내진보강이 필요가 없고, X방향으로는 별도의 내진보강이 필요한 것으로 평가되었다.

#### 참고 문헌

1. ATC 40, Applied Technology Council(ATC), 1996, "Seismic evaluation and retrofit of concrete building."
2. FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, 2000, "Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings"
3. FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, 2005, "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure"
4. Anil K. Chopra and Rakesh K. Goel, PEER, 1999, "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structure : SDF System"

[담당 : 김명한, 편집위원]