다이아그리드 구조 시스템의 내진성능계수 평가

Evaluation of Seismic Performance Factors of Diagrid Structural System

김 경 환[1] · 주 영 규[2]† · 김 상 대[3]

Kim, Kyoung Hwan *Ju, Young Kyu* *Kim, Sang Dae*

요 약 : 새롭게 제안된 다이아그리드 구조 시스템은 경사진 기둥을 통해 구조물의 중력하중과 횡력을 모두 저항하는 시스템이다. 하지만 현재 내진설계 기준은 새로운 구조시스템에 대한 적절한 반응수정계수가 없다. 이에 새로운 시스템의 반응수정계수를 포함한 내진설계시 고려되는 내진성능계수들을 산정하기 위해 ATC-63(안)이 새롭게 제안되었다. ATC-63(안)에서는 구조 시스템의 여러 변수에 의해 다른 값을 가지게 되는 반응수정계수를 보완하기 위해 붕괴여유비를 함께 고려하여 건물의 내진성능을 판단한다. 본 논문에서는 4층에서 36층의 서로 다른 높이의 대각가새 구조물을 설계하여 ATC-63(안)의 방법론에 따라 비선형정적해석과 동적해석을 통해 대각가새 구조의 내진성능계수를 평가하였다.

ABSTRACT : As a new structural system, the diagrid system resists both gravity and lateral loads with diagonal columns. In current seismic design provisions, however, the response modification factor for a new structural system is not provided yet. ATC-63 provides a new methodology for defining various seismic performance factors, including the response modification factor. ATC-63 includes the collapse margin ratio in modifying the response modification factor, which can vary with many structural systems. In this paper, a non-linear static analysis and a dynamic analysis were conducted for four different diagrid models with 4-to 36-story heights. From these analyses, the response modification factor of the diagrid system was evaluated.

핵 심 용 어 : 다이아그리드 시스템, 내진성능계수, 비선형해석, 증분동적해석, 중간붕괴, 붕괴여유비, ATC-63(안)

KEYWORDS : diagrid system, seismic performance factors, nonlinear analysis, increment dynamic analysis(IDA), median collapse, collapse margin ratio, ATC-63(Draft)

1. 서 론

최근에는 기존의 정형화된 형태의 건물과는 다른 자유로운 형상을 가진 건축물에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 비정형 건물들의 특징을 살펴보면 비틀어져 있거나(Twisted) 기울어져 있거나(Tilted), 또는 가늘어지는(Tapered) 형태를 가지고 있다. 이러한 형태의 건물은 기존의 수직 기둥과 보로 구성된 시스템으로는 그 형상을 표현하는데 한계를 가진다.

이에 다이아그리드(Diagrid) 구조 시스템이 제안되었다. Diagrid는 Diagonal(대각선)과 Grid(격자)의 합성어로 여러 층을 지나는 대형 가새골조를 반복적으로 사용한 형태로 수직 기둥과 가새의 구조적 특성을 모두 포함하고 있다. 기존의 수직 기둥은 기울어진 형태가 되며 수평 부재가 추가되어 그림 1과 같이 삼각형 형태의 구조 시스템을 형성하게 된다. 이런 형태는 기존 수직기둥과 보가 만드는 사각형 형태와 비교했을 때 구조물의 평면과 입면상의 변화에 유연하게 대처할 수 있게 된다.

다이아그리드 구조 시스템(그림 1)의 구조적인 특징을 다른 구조 시스템과 비교해보면 가새골조 구조 시스템은 가새 부재가 수평하중만을 전달하고 수직기둥은 중력하중만을 전달한다. 그러나 다이아그리드 구조 시스템에서는 대각부재를 통해 중력하중뿐만 아니라 수평하중에도 저항하도록 하여 구조물의 효율성을 높일 수 있다. 아웃리거 벨트트러스 구조 시스템에서 아웃리거는 건물의 모멘트와 층간변위 감소에 효과적이지만 전단강성을 제공하지 못한다. 그러나 다이아그리드 구조는 횡력에 대한 휨 강성 뿐 아니라 전단 강성도 제공한다.

새로운 구조 시스템으로서 다이아그리드 구조 시스템에 대한

1) 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부, 석사, 동양구조안전기술, 사원(coma007@nate.com)
2) 교신저자. 고려대학교 건축사회환경공학부, 부교수, 공학박사
(Tel. 02-3290-3327, Fax. 02-921-2439, E-mail: tallsite@korea.ac.kr)
3) 고려대학교 건축사회환경공학부, 교수, 공학박사(sdk@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

내진설계를 수행하기 위해서는 내진성능을 나타낼 수 있는 계수들이 필요하다.

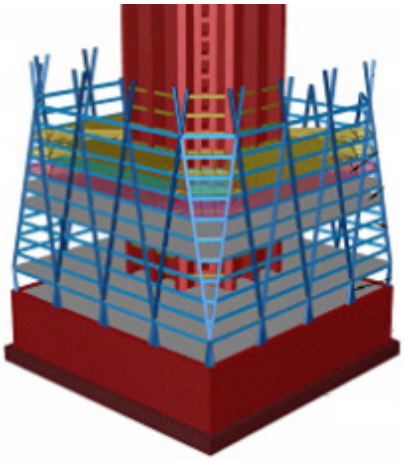

그림 1. 다이아그리드 구조의 기본 형태

기존에는 반응수정계수(Response Modification factor, R)을 이용하여 구조 시스템에 대한 내진성능을 평가했으나 반응수정계수에 대한 많은 문제점이 제기되고 있으며 최근에는 반응수정계수를 포함한 초과강도계수, 연성능력 등을 함께 고려하여 구조물의 내진성능을 평가하는 방법이 연구되고 있다. 그 중 ATC-63(안)은 이러한 평가방법을 정리하고 있다.

본 연구는 새로운 구조 시스템인 다이아그리드 구조 시스템에 대한 합리적인 내진성능 평가에 목적을 두었다. 따라서 ASCE/SEI 7-05및 ANSI/AISC 341-05 설계기준에 따라 높이가 다른 4개의 모델을 설계하고 ATC-63(안)에서 제안하는 내진성능평가 방법을 이용하여 다이아그리드 구조 시스템의 내진성능계수를 평가하였다.

2. 내진성능계수 평가의 개념

2.1 기존의 내진성능 평가

현재 내진규준에서는 반응수정계수를 통해 구조 시스템의 내진성능을 평가하고 있다. 등가정적해석법을 사용하여 내진설계를 하는 경우 지진하중은 밑면전단력(Base Shear) 값으로 적용하게 되는데 지진하중에 대해 구조물이 탄성영역에서 거동하기 위해 필요한 수평강도를 반응수정계수로 나누어줌으로써 산정한다.

현재 내진규준에서 사용되는 반응수정계수는 1995년에 미국의 응용기술협회(Applied Technology Council)에 의해 발간된 ATC-19와 ATC-34 보고서를 근거로 하고 있으나, 현재 반응수정계수의 값과 그 산정방법에는 몇 가지 문제점을 내포하고 있다. 그 중 하나는 주어진 구조형식만 동일하면 건물의 높이, 평면 형태, 구조 부재의 배치 등과 무관하게 동일한 반응수정계수 값을 사용한다는 것이다. 때문에 보다 정확한 반응수정계수의 산정을 위해서는 건물의 특성뿐 아니라 구조물의 주기, 지반조건, 에너지 소산능력 등에 대한 고려도 추가되어야 한다.

또한 다이아그리드 구조 시스템처럼 새롭게 제안되는 구조 시스템은 실제 건물을 설계하는데 있어 많은 검토를 필요로 한다. 반응수정계수 값은 내진설계기준에서 구조 시스템별로 그 값을 정해두고 있으나 새로운 시스템에 대해서는 적절한 값을 정하기가 쉽지 않다.

2.2 ATC-63(안)에서의 내진성능계수

ATC-63(안)(ATC, 2008)은 지진하중을 고려해야 하는 건물시스템의 성능과 응답에 관련된 요소들을 평가하기 위한 방법론을 제시하고 있는데, 반응수정계수뿐만 아니라 시스템 초과강도계수(System Overstrength Factor, Ω_o), 변위증폭계수(Deflection Amplification Factor, C_d)등 을 포함하는 내진성능계수 평가가 주 과정이 된다.

ATC-63(안)은 건물의 내진설계 규정에서의 기본적인 인명의 안전성(Life Safety)에 그 뜻을 두고 있으며 FEMA 450(FEMA, 2004a)과 ASCE/SEI 7-05(ASCE, 2006a)의 내진 규정을 기초로 하고 있다. 이 규정에서의 지반운동 지도의 지반운동 위험도와 다양한 수준의 내진설계범주에서의 최대예상지진 지반운동(MCE Ground Motions)을 고려하여 구조물의 붕괴를 평가한다. MCE 스펙트럼의 2/3 값인 설계응답스펙트럼을 내진형상계수 산정에 이용하는데 있어, 기준에서 정의한 MCE 지반운동은 구조적인 붕괴를 평가하기 위한 타당한 기준으로 받아들일 수 있다.

또한 ATC-63(안)은 FEMA 450(FEMA, 2004a)에서 말하는 근본적인 Pushover 개념과 보다 발전된 내진성능계수에 관한 내용을 포함하고 있다. 그림 2는 ATC-63(안)에 의해 정의된 내진성능계수들과 최대예상지진(MCE) 지반운동에서의 계수와의 관계를 도식화 것이다. 여기서 Pushover 곡선은 밑면전단력과 횡변위의 관계가 아닌 스펙트럼 가속도와 횡변위와의 관계를 통해 나타냈다.

밑면전단력을 스펙트럼 가속도로 변환하기 위해서는 구조물의 주기(T)와 유효질량(W)을 통해 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$V = C_s W \tag{1}$$

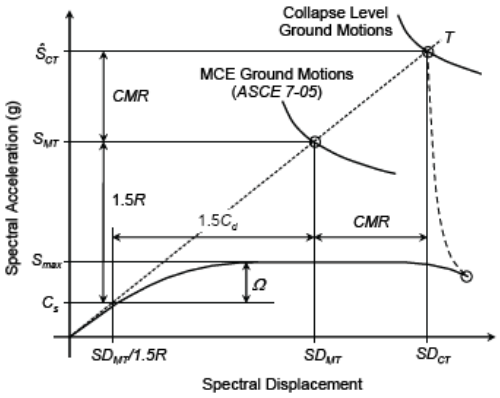

그림 2. ATC-63(안)에서 정의된 내진성능계수(R, Ω, C_d)의 도식화

그림 2에서 S_{MT}은 시스템의 주기(T)에서의 MCE 지반거동 스펙트럼 가속도 값이다. $S_{\max}$는 완전히 항복된 시스템의 최대항복강도이고, C_S은 내진응답계수이다. 그림 2에서 표현된 것과 식 (2)처럼 내진응답계수(C_S)에 대한 최대예상지진 스펙트럼 가속도(S_{MT})의 비는 R 값의 1.5배와 같다. 이때 1.5라는 값은 ASCE/SEI 7-05에서 설계지진지반운동을 최대예상지진 지반운동의 2/3로 정했기 때문이다.

$$1.5R = \frac{S_{MT}}{C_s} \tag{2}$$

또한, 초과강도계수(Ω)는 내진응답계수(C_S)에 대한 최대항복강도($S_{\max}$)의 비율로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\Omega = \frac{S_{\max}}{C_s} \tag{3}$$

ACSE/SEI 7-05의 초과강도계수(Ω_O)와 달리 ATC-63(안)의 초과강도계수(Ω)는 각 건물의 Pushover 해석 결과에 기초하여 계산된다. 따라서 같은 구조 시스템을 사용한 건물이라도 각각 다른 초과강도계수가 나타날 수 있다. 이것은 건물 각각의 특성이 설계에 반영될 수 있다는 것을 의미하므로, ATC-63(안)의 초과강도계수(Ω)를 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

기존의 방법에서 시스템의 탄성변위는 δ_E/R란 것을 알 수 있으며 그림 2를 바탕으로 이것을 $1.5C_d$배 하면 MCE에서의 시스템의 탄성변위 SD_{MT}와 같게 놓을 수 있다. 따라서 식 (4)와 같은 새로운 관계를 얻을 수 있다.

$$C_d = R \tag{4}$$

이처럼 MCE에서의 탄성변위를 비탄성변위와 같게 놓는 것은 대부분 사용되는 5%의 감쇠율을 사용하는 일반적인 구조 시스템에서는 아무런 문제없이 사용할 수 있다. 하지만 댐퍼 등이 사용되어 감쇠율이 큰 폭으로 변동하는 구조물에 대해서는 이러한 방법을 사용할 수 없다.

ATC-63(안)은 구조물이 붕괴되는 지반운동의 크기를 거주자의 생명을 위협할 수준의 붕괴를 일으키는 지반운동의 절반에 해당하는 크기(Median Collapse, 이하 중간붕괴)로 정의하고 있다. 그림 2에서 보듯이 이렇게 정의된 지반운동은 MCE 지반거동보다 더 큰 값을 나타낸다. 이러한 개념을 바탕으로 식 (5)와 같이 붕괴여유비(Collapse Margin Ratio, CMR)의 개념을 정리할 수 있다. 붕괴여유비는 붕괴수준에 해당하는 지반 거동의 가속도 중앙값($\hat{S}_{CT}$)에 대한 시스템의 기본주기에서의 스펙트럼 가속도 값(S_{MT})의 비율로 나타낼 수 있다. 이때 모든 스펙트럼에는 5%의 감쇠율을 적용한다.

$$CMR = \frac{\hat{S}_{CT}}{S_{MT}} = \frac{SD_{CT}}{SD_{MT}} \tag{5}$$

이렇게 정의된 구조물의 붕괴 수준과 붕괴여유비는 지반운동의 크기에 대한 함수로, 구조물의 설계, 해석 그리고 시공 상에 있어 지반운동의 가변성, 불확실성 등과 같은 요소들에 영향을 받는다.

붕괴에 대한 구조 시스템의 성능을 반응수정계수 값만으로 설명하는 것은 적절하지 못하다. 그림 3에서는 같은 내진응답계수(C_S)로 설계된 두 시스템의 취성곡선을 비교하고 있다. 두 시스템의 붕괴수준은 같으나 1번 시스템은 2번 시스템은 서로 다른 붕괴여유비를 가진다. 이로 인해 두 시스템 모두 동일한 크기의 붕괴수준의 지반거동 가속도 값($\hat{S}_{CT}$)을 가짐에도 불구하고 1번 시스템은 2번 시스템 보다 작은 R 값을 가지며 시스템의 내진저항 능력이 낮게 평가된다.

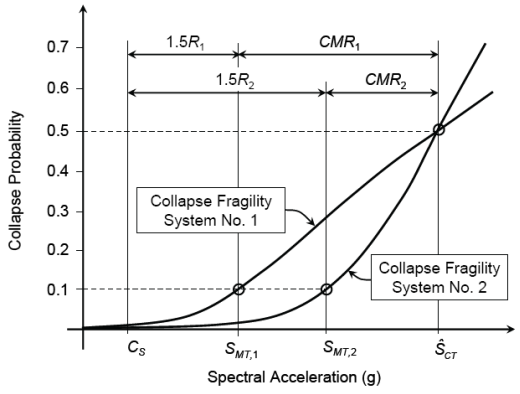

그림 3. 동일 붕괴수준의 내진저항시스템 취성곡선

그림 4에서는 역시 같은 내진응답계수(C_S)로 설계된 두 시스템의 취성곡선을 비교하고 있다. 그림 4에서의 두 시스템은 같은 반응수정계수를 가지는 시스템이다. 그러나 3번 시스템의 경우 1번 시스템에 의해 더 작은 붕괴여유비를 가지고 그로 이해 같은 크기의 중간붕괴 수준에 더 작은 가속도 값을 가지게 된다.

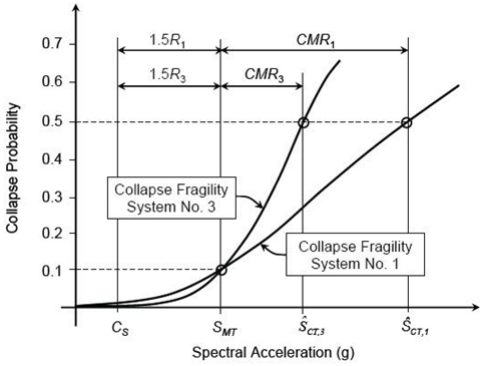

그림 4. 같은 R 값의 내진저항시스템 취성곡선

위의 내용을 정리해보면 반응수정계수가 다른 시스템이지만 붕괴수준에서 같은 성능을 가질 수 있으며 반응수정계수가 같더라도 붕괴수준에 있어 성능의 차이를 보일 수 있다는 것이다. 이러한 점을 고려하여 내진저항 시스템의 붕괴에 대한 성능을 판단하기 위해서는 반응수정계수와 함께 붕괴여유비 값을 함께 고려해야 한다.

2.3 내진성능계수 평가 절차

위에서 설명한 내진성능계수들과 붕괴여유비를 산정하고 평가하기 위한 주요 절차를 간략하게 정리하면 그림 5와 같다. 평가대상이 되는 구조 시스템에 대한 구조적인 특징을 파악하고 부재의 거동 특성, 재료 속성에 따른 영향, 실험데이터 등의 관련된 정보를 종합한다. 그 정보를 바탕으로 구조 시스템의 특성을 적절히 설명할 수 있는 최적화된 해석 모델을 설계한다. 그리고 비선형 해석을 위한 지진기록데이터들을 정규화하고 MCE 지반거동과 해석모델을 주기를 이용하여 연결한다.

비선형 정적해석을 통해 강도계수와 연성강도를 산정하고 비선형 동적해석을 통해 모델의 붕괴여유비를 산정한다. 이렇게 산정된 값을 평가하기 위해 해석 과정에서의 여러 요소들에 따른 불확실성을 고려하여 보정을 한다. 보정된 값은 기준 값과 비교하여 평가하게 된다. 평가된 내진성능계수는 구조 시스템의 해석모델의 특성별로 정리되어 객관적인 평가를 통해 구조 시스템에 적용하게 된다.

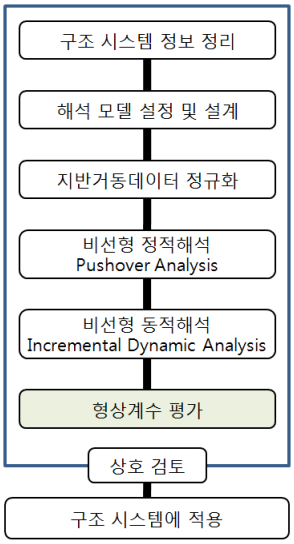

그림 5. 내진성능계수 평가 절차

3. 해석 모델 설계 및 지진데이터 정규화

3.1 해석 모델

기존의 연구결과에 의하면, 내진성능은 구조물의 높이에 따라 큰 변화를 나타내며, 설계 기준에서도 구조물의 높이에 대한 적용 기준을 두고 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 반응수정계수를 이용하여 새롭게 제안된 다이아그리드 구조 시스템의 높이에 따른 내진성능평가를 위해 그림 6과 같이 2개 층을 지나는 대각가새로 저층(4층, M02-S04), 중층(8층, M02-08 / 12층, M02-S12), 고층(36층, M02-S36)의 구조물을 설계하였다.

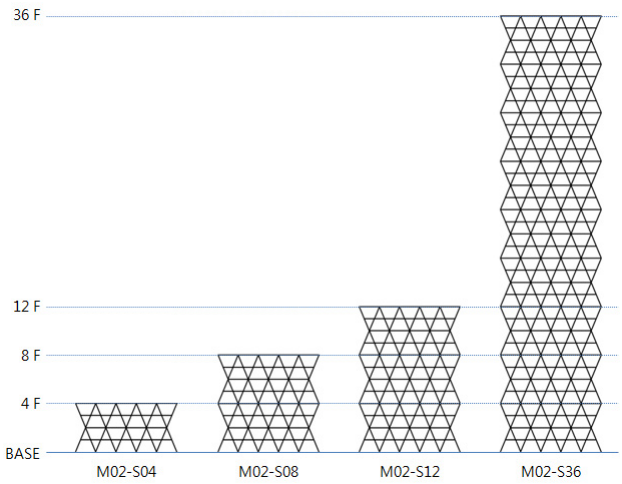

그림 6. 해석 모델 입면도

구조 시스템의 특성과 적절한 구조적 거동을 유도하기 위해 다음과 같은 사항을 고려하여 설계하였다.

해석모델의 기준층 평면에 대한 정보는 표 1과 같다. 업무용 건물로 기준층 평면은 그림 7과 같이 X, Y 축 방향으로 각각 5개의 대각가새 모듈이 배치된 정방형 평면으로 설계하였다. 대각가새 부재의 배치는 그림 8과 같이 층고 4.5m, 경간 9m로 63.4°의 경사각을 갖도록 하였다. 다이아그리드 구조 시스템의 경우 모서리 부분에서의 평면이 변화하는 것은 불가피한 사항이다. 이러한 부분에서 별도의 수직 기둥은 설계하지 않았고, 코어 부분은 횡력에 저항하지 않고 모든 횡력을 대각가새가 부담하도록 설계하였다. 대각가새 부재들은 그림 8과 같이 2개 층에 걸쳐 하나의 부재로 구성되었으며 중력하중은 중심 코어와 대각가새 간의 길이에 대해 유효 길이(6.75 m)로 보 부재에 등분포로 적용하였다. 해석 모델에서 강재는 대각가새 부재와 보 부재 모두 SM490(F_y=300MPa)을 사용하였다.

표 1. 해석모델의 기준층의 기본속성

속 성	값
평 면	45m × 45m
대각가새 모듈	2개층
기둥 경사각	63.4°
코어-외벽 거리 (기준층)	13.5m
코어 면적	평면면적의 16%
층고 (기준층)	4.5m
스팬 (기준층)	9.0m
슬래브 두께	30cm

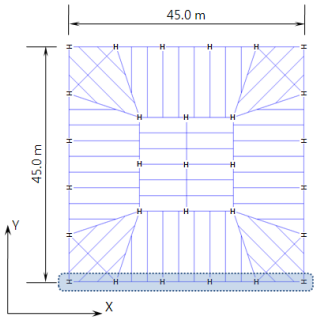

그림 7. 기준층 평면

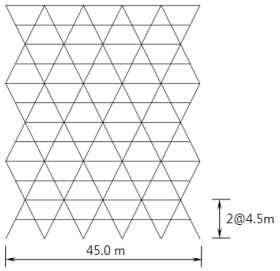

그림 8. 기본 해석 모델그림

해석 모델은 ASCE/SEI 7-05와 ANSI/AISC 341-05에 따라 MIDAS MODS GENw를 이용하여 설계를 진행하였다. 중력하중은 고정하중 6.0kN/㎡와 적재하중 4.0kN/㎡를 적용하였으며, 지진하중은 강진지역(SDC:D)으로 가정하고 반응수정계수 R 값은 4로 가정하였다.

이러한 과정을 거쳐 설계된 4개의 해석 모델은 표 2와 같이 0.4에서 3.6의 세장비를 나타낸다.

표 2. 해석모델의 크기와 세장비

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
층 수 (층)	4	8	12	36
높이(H) (m)	18	36	54	162
폭(B) (m)	45	45	45	45
세장비(H/B)	0.4	0.8	1.2	3.6

설계된 모델 중 M02-S08(8층)모델과 M02-S12(12층)모델의 대각가새 부재의 크기는 표 3과 같다.

표 3. 8층, 12층 해석모델의 대각가새 부재 크기

모델명	층	크 기	층	크 기
M02-S08	1-2	W14×149	5-6	W14×132
	3-4	W14×145	7-8	W14×132
M02-S12	1-2	W14×211	7-8	W14×176
	3-4	W14×193	9-10	W14×145
	5-6	W14×176	11-12	W14×132

비선형 해석을 위한 모델로는 그림 7에서 표시된 것과 같이 다이아그리드 부재가 포함된 X 방향 외각 부분만을 2D로 선택하여 진행하였다. 비선형해석은 PERFORM-3D를 이용하여 수행하였다. PERFORM-3D는 비선형해석 프로그램으로 Graham H. Powell 교수(Berkeley)와 CSI(Computers & Structures, Inc.)에 의해 개발되었다.

대각가새 단면의 재료 속성은 SOM(2008)에서 사용한 "Inelastic Steel Material, Buckling"으로 인장력에 대해서는 항복응력에 도달하면 선형탄성-완전항복 모델을 따르게 하였으며, 압축력에 대해서는 임계변형율 $\varepsilon_{cr} = E/F_{cr}$ 이며 $F_{cr} = 0.80F_y$일 때 $1.5\varepsilon_{cr}$, $0.20F_{cr}$일 때 $90\varepsilon_{cr}$인 선형탄성 좌굴로 이상화하여 모델링하였다.(그림 9) 단면은 "Column, Inelastic Fiber Section"을 선택하여 각 단면마다 24개의 비탄성 단면으로 모델링하였다. 보는 지진에너지 소산에 기여하지 않는 것으로 고려하였으므로 선형탄성재료로 모델링하였다.

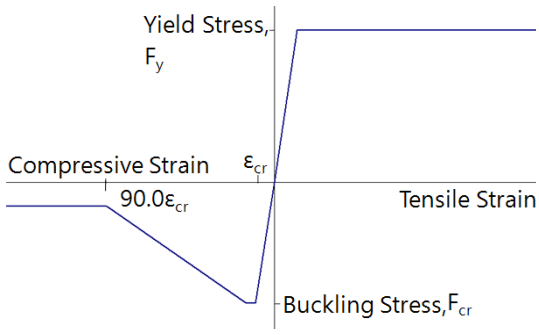

그림 9. 재료속성에 대한 이상화 곡선

비선형 해석은 계수하중을 고려한 중력하중을 적용한 후에 수행하였다. 횡력은 역삼각형 형태의 하중 패턴으로 점진적으로 증가시키면서 수행하였으며 P-Δ 효과는 고려하지 않았다.

3.2 지반거동데이터 정규화

ASCE/SEI 7-05에 따르면 붕괴에 대한 안전성은 MCE와 관련된 지반운동의 크기에 의해 평가된다. 붕괴 평가를 위한 지반거동 수준은 내진설계범주(SDC)에 상응한다. 본 해석에서는 지반계수 D(단단한 토사 지반)를 기본조건으로 내진설계범주는 D로 하였다. 동적해석을 위해 22개의 대표적인 지반운동에 대해 측정지역에 따라 각각 남북, 동서 방향의 지반운동 데이터 44개를 선정하였다. 표 4의 지진 데이터는 최대지반가속도, 지반조건, 진앙거리 등을 고려하여 선정하였으며, 지진에 의한 간섭 효과를 방지하기 위해 진앙에서부터 10km 이상 떨어진 지역에서 측정된 원거리 기록(Far-Field Record) 지진 데이터를 이용하였다.

지반운동 데이터 정규화는 크게 기록데이터의 정규화와 기록데이터 집합의 보정의 두 가지 절차를 거치게 된다. 지반거동 기록데이터는 기록된 데이터들 사이의 확실하지 않은 변수를 제거하기 위해 최대지반속도(PGV)에 의해 정규화되며 붕괴평가를 위해 MCE 지반거동과 기록데이터 집합의 보정이 필요하다. 기록데이터의 집합의 보정에서는 중간붕괴(Median Collapse)를 평가하기 위해 요구되는 강성으로 정규화된 기록데이터들 일부 증가시키거나 감소시키게 된다.

기록데이터의 정규화를 위한 정규화 계수 NM은 식 6과 같이 정의되며 식 7을 통해 데이터를 정규화한다.

$$NM_i = Median(PGV_{PEER,i})/PGV_{PEER,i} \quad (6)$$

$$NTH_{1,i} = NM_i \times TH_{1,i} \quad (7a)$$

$$NTH_{2,i} = NM_i \times TH_{2,i} \quad (7b)$$

여기서 $PGV_{PEER,i}$는 i번째 기록데이터의 최대지반속도이고 $Median(PGV_{PEER,i})$는 $PGV_{PEER,i}$의 중앙값이며 PGV_{PEER}는 각 지진 기록지역에서의 PGV 값들의 기하평균 값이다. NM_i는 i번째 기록데이터의 두 수평 요소의 정규화 계수이다. $TH_{1,i}$와 $TH_{2,i}$는 각각 i번째 수평성분1(C1)과 2(C2)의 기록 데이터이고, $NTH_{1,i}$와 $NTH_{2,i}$ 는 i번째 수평성분1(C1)과 2(C2)의 정규화된 기록 데이터이다. 지진 기록데이터 선택과 정규화에 관한 세부적인 절차는 ATC-63(안)의 참고부록 A에서 상세히 설명되고 있다.

비선형 해석에서 사용한 기록데이터의 PGV_{PEER}와 정규화 계수(NM), 그리고 정규화 된 지진데이터에 대한 PGA와 PGV는 표 4와 같다.

표 4. 지반거동 기록데이터(일부)의 기본정보와 정규화한 계수

No.	Name	PGV_{max} (cm/s)	PGV_{peer}	정규화 계수(NM)	정규화된 거동	
					PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Northridge-A-C1	62.78	60.8	0.625	0.26	36.82
	Northridge-A-C2				0.32	39.21
2	Northridge-B-C1	45.14	44.1	0.862	0.35	37.09
	Northridge-B-C2				0.42	38.93
3	Duzce, Turkey-C1	62.07	59.2	0.642	0.47	36.23
	Duzce, Turkey-C2				0.53	39.86
4	Hector Mine-C1	41.77	34.6	1.100	0.29	31.44
	Hector Mine-C2				0.37	45.93
5	Imperial Valley-A-C1	33.01	29.3	1.297	0.31	33.73
	Imperial Valley-A-C2				0.46	42.81
6	Imperial Valley-B-C1	42.15	38.1	0.997	0.36	34.36
	Imperial Valley-B-C2				0.38	42.03
7	Kobe, Japan-A-C1	37.27	36.9	1.029	0.52	38.34
	Kobe, Japan-A-C2				0.52	37.66
8	Kobe, Japan-B-C1	37.78	32.5	1.171	0.28	44.23
	Kobe, Japan-B-C2				0.25	32.65
9	Kocaeli, Turkey-A-C1	58.82	52.2	0.728	0.23	42.79
	Kocaeli, Turkey-A-C2				0.26	33.74
10	Kocaeli, Turkey-B-C1	39.55	17.7	2.149	0.47	38.00
	Kocaeli, Turkey-B-C2				0.32	38.00
11	Landers-A-C1	51.49	39.1	0.971	0.24	49.98
	Landers-A-C2				0.15	28.89
12	Landers-B-C1	42.35	33.0	1.153	0.33	29.57
	Landers-B-C2				0.48	48.83
13	Loma Prieta-A-C1	35.03	32.0	1.187	0.63	41.59
	Loma Prieta-A-C2				0.53	34.71
14	Loma Prieta-B-C1	44.67	39.9	0.951	0.53	33.97
	Loma Prieta-B-C2				0.35	42.50
15	Manjil, Iran-C1	53.93	48.3	0.787	0.40	34.02
	Manjil, Iran-C2				0.39	42.44
16	Superstition Hills-A-C1	46.36	43.5	0.873	0.31	40.47
	Superstition Hills-A-C2				0.23	35.68
17	Superstition Hills-B-C1	35.75	34.2	1.110	0.50	39.67
	Superstition Hills-B-C2				0.33	36.40
18	Cape Mendocino-C1	43.96	43.0	0.883	0.34	38.83
	Cape Mendocino-C2				0.48	37.19
19	Chi-Chi, Taiwan-A-C1	114.98	90.1	0.422	0.15	29.78
	Chi-Chi, Taiwan-A-C2				0.19	48.49
20	Chi-Chi, Taiwan-B-C1	39.11	37.9	1.003	0.48	36.82
	Chi-Chi, Taiwan-B-C2				0.51	39.22
21	San Fernando-C1	18.90	16.8	2.267	0.48	42.85
	San Fernando-C2				0.39	33.69
22	Friuli, Italy-C1	30.81	26.1	1.458	0.51	32.14
	Friuli, Italy-C2				0.46	44.92

앞서 선정한 22개 지진의 각 두 개 방향 성분별로 총 44개 지진 데이터에 대해 정규화 계수를 이용한 정규화에 따른 기록데이터 그룹의 특성 변화는 표 5와 같이 나타났다.

표 5. 정규화에 따른 기록 데이터 그룹에 특성 변화 비교

	PGA (g)		PGV (cm/sec)	
	기록 데이터	정규화	기록 데이터	정규화
최소값	0.21	0.19	18.90	38.34
최대값	0.82	0.63	114.98	84.97
차이	0.61	0.44	96.08	46.63
평균	0.42	0.42	46.26	44.49
최대/최소	3.92	3.38	6.08	2.22

정규화계수(NM)는 0.422에서 2.267의 값을 가진다. 정규화를 통해 최대지반가속도(PGA)의 값은 0.19g에서 0.63g의 평균 0.42g 값을 가지게 된다. 여기서 최대지반가속도(PGA)의 범위는 큰 변화가 없으며 평균값 역시 같은 값을 가지게 된다. 최대지반속도(PGV)는 최소 38.34cm/sec에서 최대 84.97cm/sec 의 값을 가지며 그 값의 차이가 96.08에서 46.63으로 크게 줄어들었으며 편차는 6.08에서 2.22로 크게 감소된 것을 알 수 있다.

정규화된 지반거동 기록데이터 집합은 구조물의 중간붕괴 능력($\hat{S}_{CT}$)을 구하는데 사용된다. MCE 스펙트럼에 정규화된 원거리 기록데이터 집합을 조합하기 위해 필요로 하는 보정계수는 건물의 기본주기(T)에 따라 결정된다. 그림 10은 기록데이터를 정규화한 후 정규화 데이터 집합의 응답스펙트럼값들과 그에 대한 중앙값의 스펙트럼을 나타내는 그래프이다.

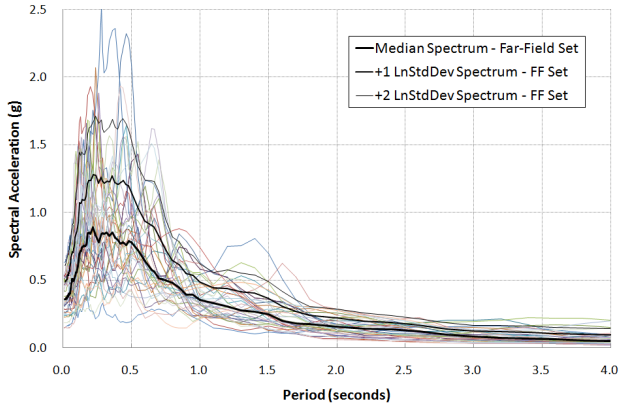

그림 10. 일반화 후 기록데이터에 대한 응답 스펙트럼

위에서 구한 일반화된 기록데이터 집합에 대한 중앙스펙트럼을 건물의 고유주기(T)를 기준으로 하여 설계에 이용한 내진설계범주 D 등급에 대한 MCE 스펙트럼에 따라 보정한다. 각 해석모델에 대한 기본주기는 다음 표 6과 같으며 각 해석모델의 주기에 따른 크기만큼의 보정을 통해 그림 11과 같이 스펙트럼이 그려질 수 있다. 보정한 스펙트럼 가속도 값으로 S_{MT}를 구하였다. 표 6에서의 해석모델 주기는 비선형해석에서 이용한 2D 모델에 대한 고유주기(T)이다.

표 6. 해석모델의 주기와 그에 따른 스펙트럼 보정계수

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
T (sec)	0.835	1.393	1.905	7.392
S_a	0.454	0.268	0.168	0.021
보정계수	2.374	2.411	2.810	5.640
S_{MT}	1.077	0.646	0.4724	0.118

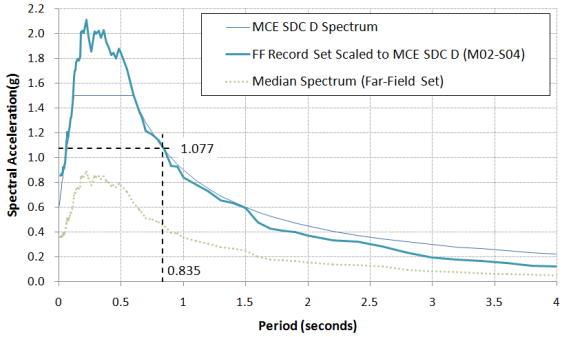

그림 11. MCE 스펙트럼과 보정된 스펙트럼 중앙값 (M02-S04)

4. 비선형 해석과 내진성능계수 평가

건물의 붕괴 평가를 위해 비선형 정적해석(Pushover)과 비선형 동적해석(Response history)을 수행한다. 비선형 정적해석은 비선형 모델의 거동을 증명하는데 사용되며 비선형 동적해석은 중간붕괴(Median Collapse)능력과 붕괴여유비를 평가하기 위해 사용된다.

4.1 비선형 정적해석

비선형 정적해석은 역삼각형과 같은 형태의 횡하중을 점진적으로 증가시키는 방법으로 수행하였다. M02-S08(8층)과 M02-S12(12층) 모델은 강성이 유사하게 나타냈으며 전반적으로 고층화될수록 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. 밑면전단력은 M02-S08(8층), M02-S12(12층), M02-S36(36층) 모델에서 비슷한 값을 나타냈으나 M02-S04(4층) 모델은 작은 값을 나타내었다. 비선형 정적해석을 통해 해석모델의 연성능력(μ_c)과 시스템초과강도계수(Ω)를 산정하였다. ASCE/SEI 341-06(ASCE, 2006b)에서는 Pushover 해석 결과 그래프를 이용하여 그림 12에서와 같이 간단한 절차를 통해 항복 상태의 지붕층 변위(Δ_y)와 한계상태의 지붕층 변위(Δ_u)를 산정하고 있다.

항복이후 최대밑면전단력($V_{\max}$)보다 20% 낮은 값에서의 변위를 한계상태의 지붕층 변위로 하고 있으며, $V_{\max}$의 60%가 되는 값을 지나는 선이 $V_{\max}$ 값을 가질 때의 변위를 항복

상태의 지붕층 변위로 하고 있다. ATC-63(안)에서 시스템의 연성능력(μ_c)과 초과강도계수(Ω)를 산정하는데 이 과정을 이용하였으며 그에 따른 각 해석모델의 연성계수와 시스템 초과강도는 표 7에 정리하였다. 밑면전단력의 단위는 tonf이고 지붕층 변위의 단위는 cm이다. Pushover 결과는 그림 13 - 그림 16의 그래프와 같다.

초과강도계수는 저층(4층, M02-S04) 모델의 경우 2보다 큰 값을 가지지만 다른 3개의 모델에서는 2보다 작은 값(1.96-1.61)을 가지며 건물이 높아질수록 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 연성능력 또한 저층에서 매우 큰 값을 나타내며 건물이 높아질수록 큰 폭을 가지며 감소되고 있다. 따라서 내진성능계수로서 초과강도계수(Ω)와 연성능력(μ_c)값은 건물의 높이에 따라 상이하게 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

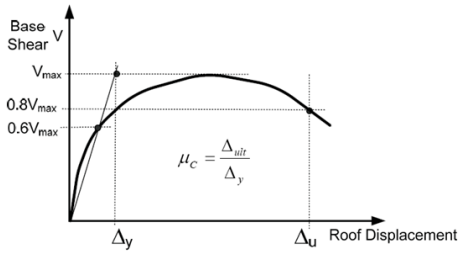

그림 12. Pushover 곡선에서 연성능력 값 선정

표 7. Pushover 해석 결과

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
V_{design}	598.81	1,159.05	1,181.84	1,395.93
$V_{\max}$	1,600.31	2,271.28	2276.97	2,244.56
$0.8\,V_{\max}$	1,280.26	1,817.02	1821.58	1,795.65
$0.6\,V_{\max}$	960.19	1,362.77	1366.18	1,346.74
Ω	2.67	1.96	1.93	1.61
Δ_y	1.76	9.6	16.22	107.13
Δ_{ult}	16.5	35.57	47.26	190.18
μ_c	9.37	3.71	2.91	1.78

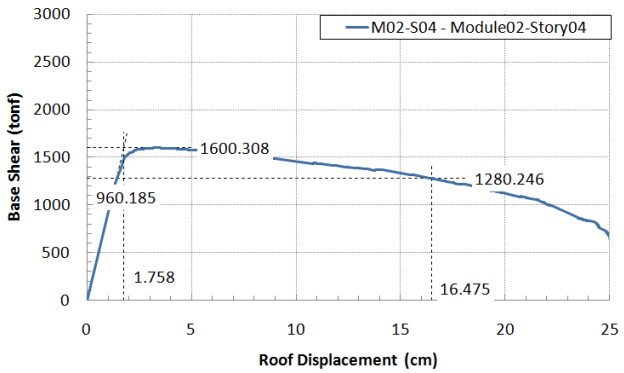

그림 13. M02-S04에 대한 Pushover 해석 결과 그래프

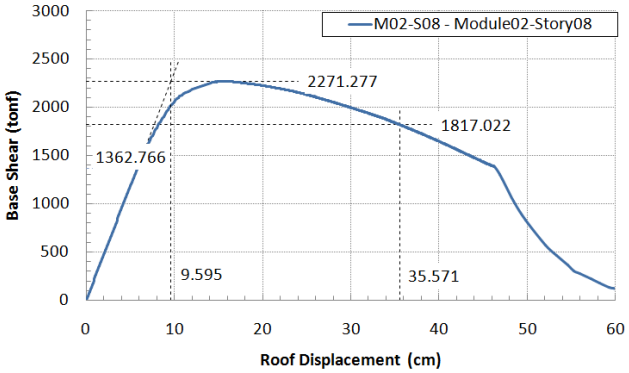

그림 14. M02-S08에 대한 Pushover 해석 결과 그래프

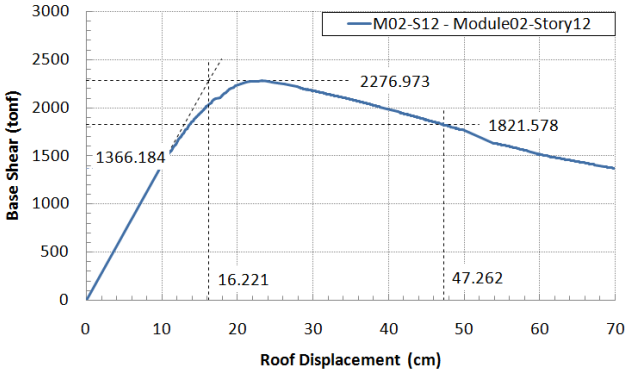

그림 15. M02-S12에 대한 Pushover 해석 결과 그래프

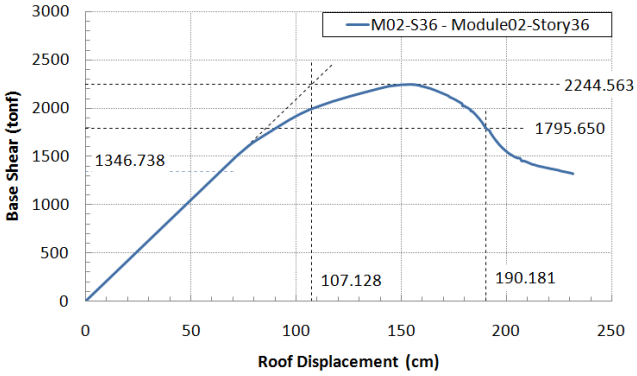

그림 16. M02-S36에 대한 Pushover 해석 결과 그래프

4.2 비선형 동적해석

비선형 동적해석을 위한 지반거동 데이터는 구조물이 중간붕괴(Median Collapse)에 도달될 때 까지 지진의 크기를 증가시키면서 수행하였다. 44개의 지진데이터에 대하여 해석모델이 중간붕괴를 일으킬 때의 지진데이터 값을 구하고, 얻어진 값들의 중앙값에 해당하는 크기를 구조물의 중간붕괴능력($\widehat{S_{CT}}$)으로 산정하였다. 이 과정은 Vamvatsikos & Cornell (2002)에 의해 제안된 증분동적해석(Incremental Dynamic Analysis, IDA)의 개념을 근거로 하였다. 앞서 수행된 지진데

이터 보정과정을 통해 산정한 각 모델의 고유주기에 따른 스펙트럼 가속도(S_{MT})을 0.1g 가 되도록 조정하여 비탄성 동적해석을 수행하여 최대층간변위를 산정한다. 해석모델의 주기에 따라 증가량을 0.1g에서 0.2g사이로 조정하여 증가시키면서 최대층간변위비가 0.15이상이 될 때까지 해석을 반복 수행하였다. 이러한 반복수행은 44개의 지진데이터에 대하여 각각 최소 10회 이상의 해석이 수행되었고 각 모델별로 700회 이상의 해석을 수행하였다, IDA를 수행한 결과는 모델별로 그림 17-그림 20 그래프를 작성하여 $\hat{S}_{CT}$ 값을 산정하였고 이 값과 앞에서 구한 S_{MT} 를 이용하여 식 (5)를 통해 각 해석 모델의 붕괴여유비 값을 산정하였으며 그 값은 표 8과 같다.

CMR값은 전체적으로 2.8~5.0 정도의 값을 가지게 된다. S_{MT} 값 산정과정에서 2D 모델에 대한 고유주기를 고려하여 스펙트럼 가속도를 산정함으로서 M02-S36(36층)모델의 경우 큰 주기로 인해 S_{MT}값이 낮게 산정되었다. 낮은 S_{MT}값으로 인해 CMR값이 다른 모델과 비교하여 큰 값을 나타낸다.

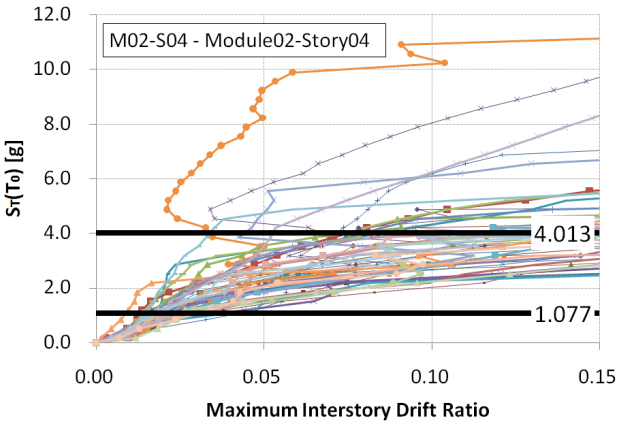

그림 17. M02-S04 에 대한 IDA 결과 그래프

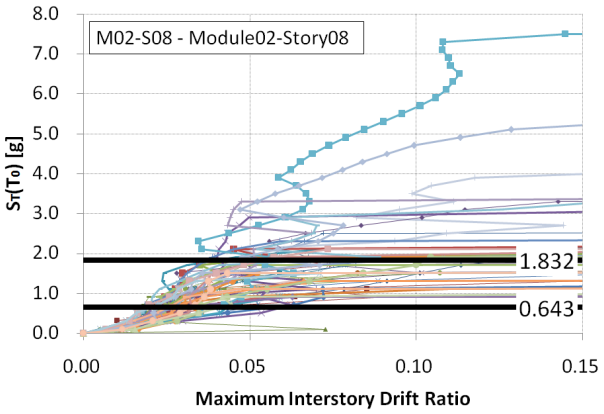

그림 18. M02-S08 에 대한 IDA 결과 그래프

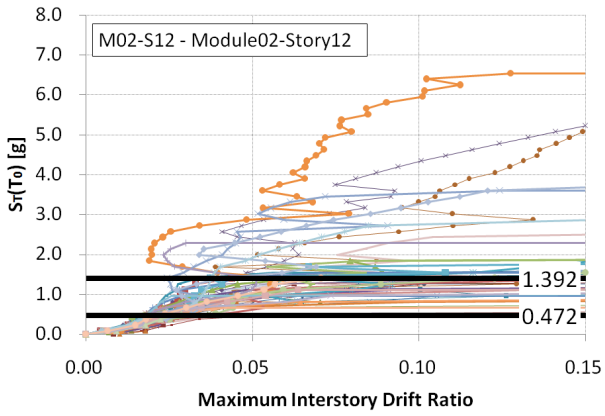

그림 19. M02-S12 에 대한 IDA 결과 그래프

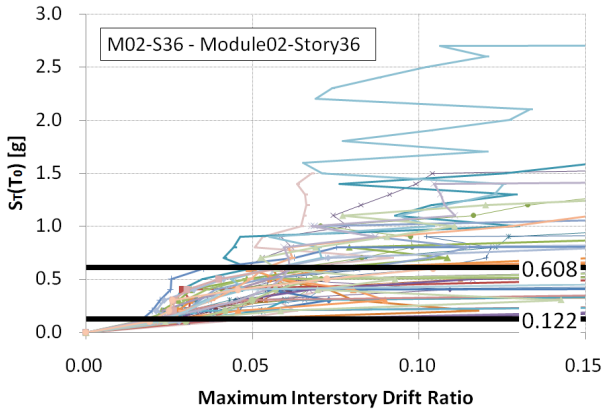

그림 20. M02-S36 에 대한 IDA 결과 그래프

표 8. 동적해석 결과

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
$\hat{S}_{CT}$	4.01	1.83	1.37	0.61
S_{MT}	1.08	0.65	0.47	0.12
CMR	3.73	2.84	2.91	4.98

4.3 내진성능계수 평가

최종적으로 내진성능계수 평가하기 위해 비선형 해석을 통해 산정된 붕괴여유비(CMR)값을 보정작업을 통해 보고서에서 제시하는 기준 값과 비교하여 설계에 사용한 반응수정계수 값의 타당성을 검증하고자 한다. 검증 과정을 통해 해석 모델의 강도계수와 연성성능 값도 함께 검증하게 된다.

보정 절차에는 구조 시스템을 표현하기 위해 모델 설계시 사용한 조건의 정도, 구조 시스템과 관련된 실험으로 검증된 성능평가 자료 등에 의해 보정에 필요로 하는 계수를 채택한다. 첫 번째로 비선형해석을 통해 산정된 붕괴여유비 값을 보정한다. ATC-63(안)의 표 7-1a, b에서는 붕괴여유비를 보정하는

데 사용되는 스펙트럼 형상계수(Spectral shape factors, SSF)를 내진설계범주(SDC)에 따라 분류하였고 해석모델의 주기(T)와 연성능력(μ_c)값을 이용하여 구할 수 있도록 제공하고 있다.

붕괴여유비 값은 식 (8)과 같이 스펙트럼 형상계수와의 곱으로 계산된다.

$$ACMR_i = SSF \times CMR_i \quad (8)$$

여기서, $ACMR$은 보정된 CMR값이고 i는 각 해석모델을 의미한다. 4개의 해석모델에 대한 $ACMR$ 산정 값은 표 9에 정리하였다.

표 9. SDC D로 설계한 해석모델의 SSF

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
T (sec)	0.84	1.39	1.91	7.39
μ_c	9.37	3.71	2.91	1.78
SSF	1.40	1.35	1.30	1.20
CMR	3.73	2.84	2.91	4.98
ACMR	5.22	3.83	3.78	5.98

두 번째 보정 절차로 시스템 붕괴의 불확실성을 평가하는데 해석모델과 관련된 정보에 대한 불확실성을 근거로 하고 있다. 동적해석을 통해서 판단되는 전체 시스템의 붕괴에 대한 불확실성을 고려하기 위해 시스템의 중간붕괴를 일으키는 크기만큼 증가된 지진데이터 가속도 값을 자연로그로 치환된 정규분포로 표현할 경우 표준편차계수 β_{TOT}를 이용한다.

β_{TOT}에는 시스템의 붕괴 불확실성, 지진기록데이터에 대한 불확실성, 실험데이터에 대한 불확실성, 해석 모델 설계의 불확실성 등이 고려되어 결정된다. ATC-63(안)의 표 7-2에서 고려된 사항들에 대한 불확실성을 등급화하여 계수를 산정하도록 제공하고 있다. 본 연구에서는 해석 모델에 대한 등급을 (A) Superior로 선정하고 실험데이터와 설계요구조건 등을 고려하여 β_{TOT} 값을 0.65로 선정하였다.

최종적으로 수정된 붕괴여유비($ACMR$) 값을 평가하기 위한 기준값을 결정하고 그 값을 이용하여 평가하게 된다. 기준값은 식 (9), 식 (10)과 같이 평가된다.

$$\overline{ACMR_i} \geq ACMR10\% \quad (9)$$

$$ACMR_i \geq ACMR20\% \quad (10)$$

$ACMR_i$는 각 해석 모델에 대한 CMR값을 보정한 값이고 $\overline{ACMR_i}$은 각 해석 모델의 $ACMR_i$ 값의 평균값을 말한다. $ACMR10\%$와 $ACMR20\%$는 β_{TOT} 값에 따라 결정되는데 ATC-63(안)의 표 7-3에서 그 값을 제공한다. 이에 따라 β_{TOT}가 0.65인 경우 $ACMR10\%$는 2.30 값으로, $ACMR20\%$는 1.73 값으로 정해진다.

위의 철자에 따라 평가된 해석모델에 대한 결과와 모델 정보를 종합하여 표 10, 표 11에 정리하였다.

표 10. 내진성능계수와 해석모델에 대한 평가

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
층 수	4	8	12	36
SDC	$D_{\max}$	$D_{\max}$	$D_{\max}$	$D_{\max}$
CMR	3.73	2.84	2.91	4.98
μ_c	9.37	3.71	2.91	1.78
SSF	1.40	1.35	1.30	1.20
ACMR	5.22	3.83	3.78	5.98
Acceptable ACMR	1.73	1.73	1.73	1.73
	Pass	Pass	Pass	Pass

표 11. 해석모델그룹에 대한 평가

	ACMR	Acceptable ACMR	Pass/Fail
모델 그룹 평균	4.70	2.30	Pass

5. 결 론

본 연구에서는 새롭게 제안된 다이아그리드 구조 시스템의 반응수정계수를 산정하기 위해 ATC-63(안)을 이용하여 반응수정계수를 포함한 내진성능계수에 대한 평가를 수행하였으며 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) ATC-63(안)을 이용한 내진성능계수 평가 결과 초과강도계수(Ω)는 높이 변화에 따라 1.61(36층) - 2.67(4층)을 나타내며, 고층화할수록 작아진다. 연성능력(μ_c)도 높이 변화에 따라 1.78(36층) - 9.37(4층)을 나타내며, 고층화할수록 작아진다.

(2) ATC-63(안)을 이용한 수정붕괴여유비(ACMR)은 3.88 - 5.98 로 허용값(1.73)을 모두 만족하고 있으며, 이는 가정한 반응수정계수 4에 대해서는 다이아그리드 구조가 적정함을 보여 주고 있다.

(3) 다이아그리드 구조시스템의 내진성능을 평가함에 있어서 ATC-63(안)은 유효한 방법으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 시행한 2008년도 기초과학연구지원사업 (R01-2008-000-11961-0)에 의한 것임.

참 고 문 헌

주영규, 김경환(2008) 다이아그리드 구조 시스템의 최근 동향, **대한건축학회지**, 대한건축학회, 제52권, 제4호, pp.72-76.

AISC (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings,* ANSI/AISC 341-05, American Institute for Steel Construction, Chicago, Illinois.

ASCE (2006a) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,* ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, Including Supplement No. 1, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

ASCE (2006b) *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings,* ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

ATC (1995) *Structural Response Modification Factors,* Report No. ATC-19, Applied Technology Council, Redwood City, California.

ATC (1996) *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design,* Report No. ATC-34, Applied Technology Council, Redwood City, California.

ATC (2008) *Quantification of Building Seismic Performance Factors,* 90% Draft report, Report No. ATC-63, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Bertero, V.V. (1986) Evaluation of Response Reduction Factors Recommended by ATC and SEAOC, *Proc. the Third U.S. National Conference on Earthquake Engineering,* Charleston, North Carolina.

CSI (2006) *PERFORM-3D, Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures-User Guide,* Computers & Structures Inc., Berkeley, CA.

FEMA (2004a) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures,* FEMA 450-1/2003 Edition, Part 1: Provisions, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

FEMA (2004b) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures,* FEMA 450-2/2003 Edition, Part 2: Commentary, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Kim, J.S., Kim, Y.S., and Lho, S.H. (2008) *Structural Schematic Design of a Tall Building in Asan using the Diagrid System, CTBUH 8th World Congress,* Dubai, pp.433-440.

MIDAS IT (2008) *MIDAS MODS GENw.,* General Struc- ture Design System for Windows, MIDAS IT, Korea.

Moon, K. S. (2007) Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics & Methodology for Preliminary Design, *The Structural Design of Tall & Special Buildings,* Vol.16, pp.205-230.

PEER (2006) *PEER NGA Database,* Pacific Earth- quake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Rahimian, A., Eilon, Y. (2006) *New York's Hearst Towers,* STRUCTURE magazine, pp.25-29.

Skidmore, Owings & Merrill LLP (2008) Methodology to determine R-values for steel Diagrid magazine framed systems, Project Report.

Vamvatisikos D, Cornell C.A. (2000) *Incremental dynamic analysis,* Earthquake *Engineering and Structural Dynamics,* Vol.31, pp. 491-514.

(접수일자 : 2008. 11. 15 / 심사일 2008. 11. 19 / 게재확정일 2010. 2. 1)