

# 초대형 대각가새 구조의 건물 높이에 따른 반응수정계수 평가

## Evaluation of the Response Modification Factor for the Height of Diagrid Structure

김 경 환\*      주 영 규\*\*      김 상 대\*\*\*  
Kim, Kyoung-Hwan      Ju, Young-Kyu      Kim, Sang-Dae

### Abstract

As number of the buildings increases, it shows new trends such as twisted, tilted, taperer shape. As a structural solution for the new trend buildings, diagonal grid (Diagrid) structural system was developed. Since the diagrid system is a new one, there is no reliable response modification factor in the codes available. Therefore, that of the braced frame is used for diagrid system. The purpose of this study is to evaluate the value of response modification factor for diagrid structural system. The parameters are the building heights from 4 stories to 36 stories and nonlinear static analyses was used to find the behaviour of the diagrid system. As a result, the response modification factor of the diagrid was proposed based on the pushover analysis.

키워드 : 초대형 대각가새 시스템, 반응수정계수, 비선형 정적해석

Keywords : Diagrid System, Response Modification Factors, Nonlinear Analysis

### 1. 서 론

최근 계획되거나 건설 중인 건축물들 중에는 그 형태에 있어 기존의 건축물과는 다르게 자유로운 형상을 보이는 건축물이 많아지고 있다. 그 동안 건물들은 형태적인 아름다움보다는 높이나 넓은 공간에 중점을 두고 건설되어 왔다. 그러나 최근 들어 건축물은 단순한 생활의 공간으로서가 아닌 경관으로서의 중요성이 강조됨으로써 형태의 자유로움을 중요시 여기게 되었다. 또한 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 다양한 건물형태의 설계 및 건설이 가능해짐으로써 비틀어져 있거나(Twisted) 기울어져 있거나(Tilted), 또는 점점 줄어드는(Tapered) 형태의 건물들이 건설되고 있다.

이러한 건축동향에 부응하기 위해 새로운 구조 시스템으로써 수직 기둥과 가새의 구조적 특성을 모두 포함하고 있는 초대형 대각가새(이하 Diagrid) 구조 시스템이 제안되었다. Diagrid(대각가새)는 Diagonal(대각선)과 grid(격자)의 합성어로 여러 층을 지나는 대형 가새를 반복적으로 사용한 형태의 구조 시스템이다. 기존의 수직 기둥은 경사각을 가지며 기울어진 형태가 되고 경사진 수직 부재(Diagrid)와 보가 그림 1과 같이 삼각형 형태의 배치를 이루게 된다.

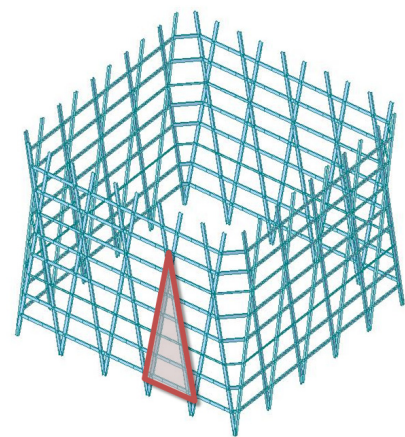


그림 1. Diagrid 구조의 기본 형태

이렇게 만들어진 삼각형 형태의 구조 골조는 기존 수직기둥이 만드는 사각형 형태의 입면과 비교하여 평면과 입면상의 변화에 유연하게 대처할 수 있다. 그리고 구조 시스템의 특성상 구조부재인 대각가새가 최외각에 위치하게 되어 건물 외부에 드러나게 되는데 이 구조부재는 개성 있는 건물의 입면을 제공하여 주변 고층건물들과는 다른 인상을 심어줄 수 있다. 또한 뉴욕에 건설된 Hearst H/Q의 경우 모멘트골조 시스템을 적용하여 시공하는 것

\* 고려대학교 대학원 석사과정

\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, 공학박사

\*\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사

에 비해서 20%의 비용절감이 가능하였다고 한다.<sup>1)</sup> 그리고, WTC의 경우와 같은 비정상 하중에 의한 충격에도 Diagrid는 상대적으로 안정성이 높다고 알려져 있다.

이러한 Diagrid 구조 시스템에 대한 내진설계를 위해서는 반응수정계수( $R$ )에 대한 평가가 있어야 한다. 그러나 현재 유용한 기준 및 지침에서는 이에 대한 규정이 없으며, 설계자는 집중가새 골조 또는 기타구조 등을 대안으로 사용하고 있다. 풍하중이 설계를 결정하는 경우에는 안전측으로 평가한 지진하중이 크게 영향이 없지만, 지진하중의 영향이 설계에 결정적인 경우에는 이에 대한 정확한 평가가 중요하며 이는 설계 효율성을 향상시키는데 많은 기여를 할 것이다.

본 연구에서는 새로운 구조 시스템인 Diagrid 구조 시스템에 대하여 보다 합리적인 반응수정계수( $R$ )를 산정하는데 목적을 두었다. 이러한 목적을 위해 ASCE/SEI 7-05<sup>2)</sup>와 ANSC/AISC 341-05<sup>3)</sup> 설계기준에 따라 높이가 다른 4개의 모델을 설계하여 비선형 정적해석을 수행하였으며 해석결과를 구조물의 주기를 고려하여 Diagrid 구조 시스템의 반응수정계수( $R$ )를 평가하였다.

## 2. Diagrid 구조 시스템

Diagrid 구조 시스템은 그림 2에서와 같이 수직하중을 시스템 전체에 적절하게 배분하여 기초로 전달하며, 대각가새의 집합부가 있는 층의 외각 보는 Strut-Tie와 유사한 메커니즘으로 외력에 저항하게 된다. 또한 Diagrid 부재가 건물의 최외각에 위치하여 바람이나 지진과 같은 수평하중에도 아주 효과적으로 대응할 수 있다.<sup>4)</sup>

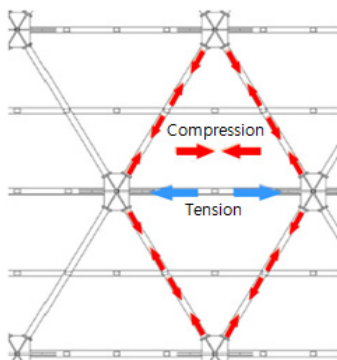
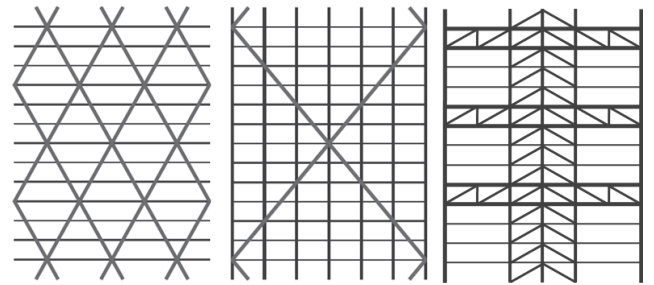


그림2. Diagrid 구조의 메커니즘

대각가새의 구조적인 특징을 다른 구조 시스템과 비교해보면 다음과 같다. 기존의 가새골조 구조 시스템(그림 3.b))은 가새 부재가 수평하중만을 전달하고 수직기둥은 중력하중만을 전달한다. 그러나 Diagrid 구조 시스템(그림 3.a))에서는 대각부재를 통해 중력하중뿐만 아니라 수평하중에도 저항하도록 하여 구조물의 효율성을 높일 수 있다. 또한 가새골조는 층간변위에 의해 발생하는 전단력

을 수직기둥의 휨 모멘트 형태로 전달하지만, Diagrid 구조는 대각가새 부재의 축력으로 전달한다.

아웃리거 벨트트러스 구조 시스템(그림 3.c))에서 아웃리거는 건물의 모멘트와 층간변위 감소에 효과적이지만 전단강성을 제공하지 못한다. 따라서 아웃리거를 큰 전단강성을 가진 코어와 벨트트러스로 연결해야만 한다. 그러나 Diagrid 구조는 횡력에 대한 휨 강성 뿐 아니라 전단강성도 제공하여 큰 강성의 코어가 필요하지 않게 된다.<sup>5)</sup>



a) Diagrid 구조      b) 외각가새 구조      c) 아웃리거 벨트트러스

그림3. 구조시스템의 종류별 입면

노먼 포스터에 의해 설계된 런던의 30 St Mary Axe (그림 4)와 최근에 지어진 뉴욕의 Hearst Tower(그림 5)가 Diagrid 구조 시스템을 사용한 대표적인 건물이다. 30 St Mary Axe는 대각가새 부재로 원형강관을 사용하였으며, Hearst Tower는 H 형강을 대각가새 부재로 사용하였다. 이외에도 현재 뉴욕에서 건설 중인 새로운 WTC는 Diagrid 구조 시스템을 적용한 Daniel Libeskind의 계획안을 채택한 것이다.



그림4. 30 St Mary Axe

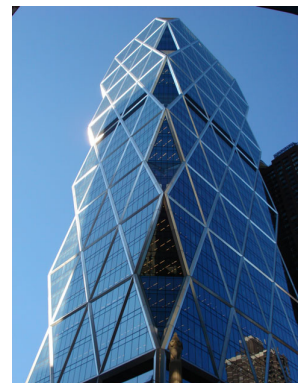


그림5. Hearst Tower

국내에서도 잠실 롯데 슈퍼타워를 포함하여 아산배방 싸이클론 타워, 대전 퓨처엑스 등에 Diagrid 구조 시스템이 검토되었으며 현재 싸이클론 타워는 Diagrid 구조와 중심 코어를 함께 사용하는 구조시스템을 적용하여 건설 중에 있다.

### 3. 반응수정계수 $R$ 의 평가방법

#### 3.1 기본개념

내진 설계에서 등가정적해석법을 사용한 경우에 지진 하중은 밑면전단력(base shear)이라는 값으로 적용하게 되어 있는데, 여기서 밑면전단력은 지진하중에 대하여 구조물이 탄성영역에서 거동하기 위해 필요한 수평강도를 반응수정계수( $R$ )로 나누어줌으로써 산정된다.

현재 내진설계기준을 살펴보면 구조설계에 있어서 탄성 설계가 기본 원칙이지만 예외적으로 지진하중에 대해서는 비탄성 설계를 허용하고 있다. 그 이유는 경제성과 안정성을 동시에 도모하기 위함이다.

내진설계시 규정하고 있는 설계지진하중은 건물의 수명을 50년이라 할 때 건물이 위치한 지역에서 건물의 수명동안 발생 확률 10%인 지진에 대한 하중이며 이러한 지진하중의 재현주기(return period)를 따져보면 475년 만에 한 번 발생하는 지진하중으로 연간 발생률로 보면 0.21%이다. 이러한 지진에 대해 건물이 탄성 거동하도록 설계하는 것은 비경제적이므로 구조물의 비탄성 거동을 허용하고 있는 현행기준은 타당하다고 할 수 있다.

현재 기준에서 사용되는 반응수정계수( $R$ )는 1978년에 미국의 응용기술협회(Applied Technology Council)에서 발행한 ATC 3-06 보고서에서 처음으로 등장하였으며 그 후로 반응수정계수( $R$ )에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 1995년에 현행 내진설계법과 반응수정계수( $R$ )에 대한 검토보고서인 ATC-19<sup>6)</sup>와 ATC-34<sup>7)</sup>를 발간하였으며 보고서에서는 그 동안의 연구결과들을 종합하여 (1)식과 같이 반응수정계수( $R$ )를 3개의 구성요소로 표현하는 새로운 산정식으로 제시하였다.

$$R = R_s R_\mu R_R \quad (1)$$

여기서,  $R_s$ 는 주기에 의존하는 강도계수(strength factor),  $R_\mu$ 는 주기에 의존하는 연성계수(ductility factor)이며,  $R_R$ 는 잉여도계수(redundancy factor)를 나타낸다.

위와 같이 반응수정계수( $R$ )는 구조물이 가지는 연성능력(ductility), 초과강도(overstrength), 잉여도(redundancy) 및 감쇠특성을 반영하기 위한 설계 계수이다. 그러나 기준에서 제시하고 있는 반응수정계수( $R$ )는 과거 지진발생에 따른 피해와 거동특성을 관찰하여 그 내용을 바탕으로 기존의 구조 시스템의  $R$  값을 결정된 것으로 이론 및 실험적 산출근거는 미약한 상황이다.

FEMA 450 (FEMA, 2004a)<sup>8)</sup>를 통해 출판된 최신판에서는 다소 임의적으로 할당된  $R$  factor값을 가지는 75개 이상의 시스템을 포함하고 있다. 그러나 최근에 정의되는 많은 내진저항 시스템들은 적합한 수준에서의 지진지반진동(earthquake ground shaking)에 관해서는 제시된 적이 없다. 이러한 내진응답 특성과 그것들의 능력에 맞는

내진설계 성능요소들은 모두 테스트되거나 알려지지 않았다.

Berkeley대학 연구팀(Bertero, 1986)<sup>9)</sup>, ATC-19 및 ATC-34 연구팀에 의해서 수행된 최근의 연구결과에 의하면 현행 내진설계 기준에서 사용하고 있는 반응수정계수( $R$ ) 값과 산정방법에 있어서 몇 가지 문제점들을 언급하고 있는데 특히 주어진 구조형식이 동일하면 같은 건물의 높이, 평면 형태, 구조의 배치와는 무관하게 같은 반응수정계수( $R$ ) 값을 사용한다는 것은 부적합하다고 지적하고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 Diagrid 구조 시스템처럼 새롭게 만들어지는 구조 시스템은 실제 건물을 설계하는데 있어 많은 검토가 필요하며 기존에 정의되지 않은 시스템에 대해서는 설계기준에서 적정한 값을 정하기가 쉽지 않다. 싸이클론 타워는 현재 KBC 2005 에서 제시한 반응수정계수( $R$ ) 값 중에 기타 골조 시스템으로 분류하여 반응수정계수( $R$ ) 값으로 3을 사용하였다.<sup>10)</sup>

#### 3.2 초과강도계수와 연성계수

일반적으로 구조물은 설계밑면전단력 보다 큰 횡강도를 가지고 있으며 설계강도를 초과하는 이러한 강도를 초과강도(overstrength) 또는 보유강도(reserve strength)라고 한다. 초과강도계수( $R_s$ )는 구조물의 설계밑면전단력( $V_d$ )과 건물의 최대 밑면전단력( $V_o$ )사이의 차로써 구해진다. 연성계수( $R_\mu$ )는 구조물의 비탄성 거동을 고려한 연성비( $\mu$ )에 대한 계수로 구조물이 항복상태에 도달한 후에도 외부 하중에 대하여 부가적으로 저항할 수 있는 능력의 정도를 나타내며 내진설계의 개념과 가장 잘 부합되는 요소라고 볼 수 있다.

구조물의 잉여도가 충분히 크다고 가정하면 구조물의 잉여도 계수( $R_R$ )는 1이 된다. 이러한 조건하에서 반응수정계수( $R$ )는 (2)식으로 강도계수와 연성계수를 구한 후 (1)식을 통해 두 계수의 곱으로 산정할 수 있다.

$$R_s = \frac{C_y}{C_w}, \quad R_\mu = \frac{C_{eu}}{C_y} \quad (2)$$

여기서  $C_y$ 는 구조물의 전체중량( $W$ )에 대한 구조물의 비탄성 한계 밑면전단력의 비를 의미하며  $C_w$ 는 구조물의 전체 중량에 대한 구조물의 설계밑면전단력 비를 의미한다. 그리고  $C_{eu}$ 는 구조물의 전체 중량에 대한 구조물의 탄성 한계 밑면전단력의 비를 의미한다. 위의 계수들을 도식화하면 그림 6과 같다.

여기서 연성계수는 구조물의 한계상태를 규정하는 방법에 따라 달라지며 이러한 문제는 ATC-19에서도 언급하고 있다. 구조물의 한계상태는 구조물의 최대변위, 또는 층간변위 등 다양한 방법으로 규정할 수 있다. 일반적으로는 층간변위를 기준으로 선정하는 것이 가장 합리적

인 것으로 간주되고 있으나 이 방법 역시 구조 시스템에 따라 그 기준 값이 다르게 규정하고 있으며, 때문에 새로운 시스템에 적용하기에 어려움이 있다.

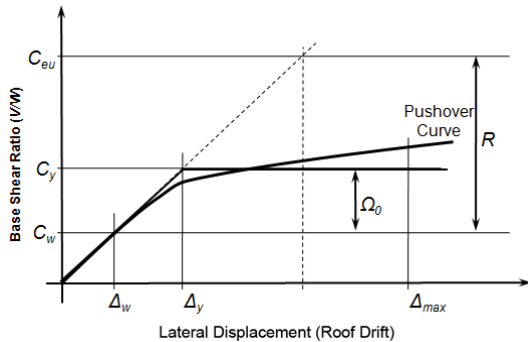


그림6. 구조물의 횡력-변위 관계와 반응수정계수( $R$ )

### 3.2 FEMA 450에서의 반응수정계수 산정방법

FEMA 450 (FEMA, 2004b)<sup>11)</sup>에서는 그림 7과 같이 반응수정계수( $R$ )와 그와 관련된 계수를 도식화하여 나타내었다.

FEMA 450에서는 규준에 포함된 지반운동지도(Ground Motion Map)의 가속도 성분들을 통해 정의된 지반운동 위험도에 따라 최대예상지진(MCE) 지반운동 하에서의 붕괴를 평가한다. 그리고 그림 7에서 MCE 스펙트럼의 2/3 값인 설계응답스펙트럼은 반응수정계수( $R$ )를 포함한 내진형상계수들을 산정하는데 이용하고 있다.

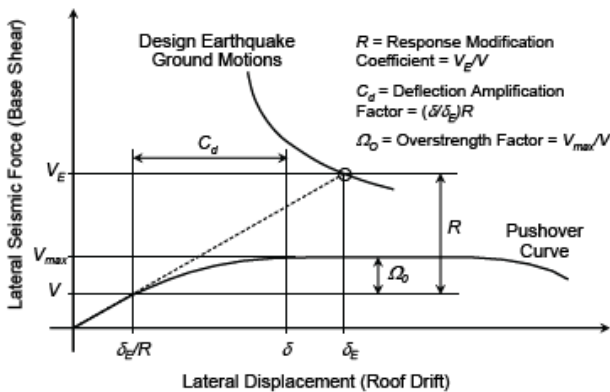


그림7. 내진성능계수( $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$ )의 도식화

그림 7을 보면 전체적인 비탄성 응답구간(이상화된 비선형 정적해석곡선)에서 내진저항 시스템의 내진성능계수를 정의한다. 그림 7에서 수평축은 횡변위(지붕층 변위)이고 수직축은 지반에서의 횡력(바닥층의 밀면전단력)이다. 그림 7에서  $V_E$ 는 설계지진지반운동에 대해 완전한 선형적인 탄성력거동을 할 때 내진저항시스템이 가지는 힘의 크기를 나타내며  $V_{max}$ 는 완전히 항복된 시스템의 최대강도에 대한 값을 나타낸다.  $V$ 는 구조물이 완전

탄성거동을 한다는 가정하에서의 설계 밀면 전단력이다.

그림 7에서 반응수정계수( $R$ ) 값은 (3)식과 같이 설계밀면전단력에 대한 설계지진지반운동에서 완전탄성거동을 할 때 가지는 힘의 크기의 비율로 정의된다.

$$R = \frac{V_E}{V} \quad (3)$$

그리고 초과강도계수( $\Omega_0$  factor)는 (4)식과 같이 정의되며 설계밀면전단력에 대한 시스템의 최대항복강도의 비로 표현된다.

$$\Omega_0 = \frac{V_{max}}{V} \quad (4)$$

그림 7에서  $\delta_E/R$ 는 시스템이 초기탄성 상태일 때 설계밀면전단력( $V$ )에 대한 내진저항시스템의 지붕층 변위를 나타낸다.  $\delta$ 는 설계지진지반운동에 대해 항복한 시스템의 지붕층 변위를 나타낸다. 그림 7에서 표현된 것과 (5)식의 정의에서와 같이 변위증폭계수( $C_d$ )는 반응수정계수( $R$ )의 일부이다.

$$C_d = \frac{\delta}{\delta_E/R} R \quad (5)$$

## 4. 해석 모델

기존의 연구결과에 의하면, 반응수정계수( $R$ )는 높이에 따라 변화한다고 알려져 있으며<sup>12)</sup>, 규준에서도 높이에 대한 적용규정을 두고 있다. 따라서 본 연구에서는 Diagrid 구조물의 높이에 따른 반응수정계수( $R$ )의 변화를 확인하기 위해 그림 8과 같이 저층(4층, M02-S04), 중층(8층, M02-S08 / 12층, M02-S12), 고층(36층, M02-S36)의 구조물을 설계하였다.

해석모델 설계는 ASCE/SEI 7-05 기준에 따라 설계하였다. 해석모델은 X, Y 축 방향으로 5개의 대각가새 경간을 가지는 정방형 평면으로 되었다. 층고는 4.5m, 경간의 길이는 9m로 하여 4개의 모델 모두 경간의 변화는 없고 높이 변화로 세장비의 차이가 나도록 설계하였으며 평면을 기준으로 대각가새의 경사각은 63.4°이다. 평면의 형태와 기본 입면의 크기는 그림 9와 그림 10과 같다. 건물용도는 업무용으로 가정하고 중력하중은 고정하중 0.62tonf/m<sup>2</sup> 과 적재하중 0.38tonf/m<sup>2</sup>을 사용하였다. 해석모델의 기본속성은 표 1에 정리하였다.

Diagrid 구조 시스템의 경우 그 형태의 특성으로 인해 모서리 부분에서 평면의 변화가 생기는데 이 부분에 별도의 수직 기둥은 설계하지 않았으며 코어 부분은 횡력에 저항하지 않고 모든 횡력을 대각가새가 부담하도록 설계하였다.

표1. 해석모델의 기준층의 기본속성

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

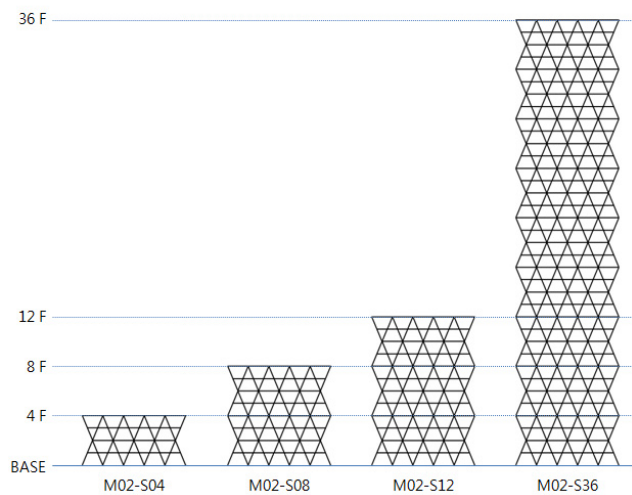


그림8. 해석 모델 입면도

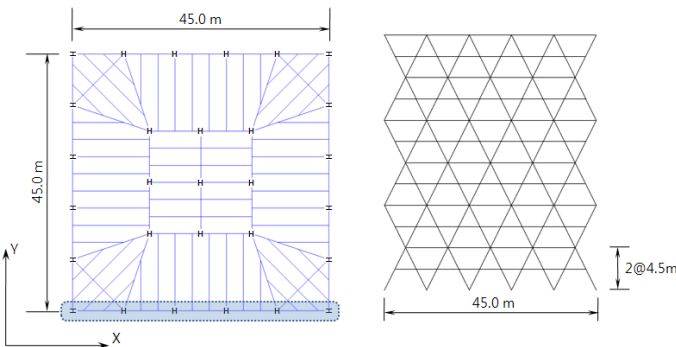


그림9. 기준층 평면

그림10. 기본 해석 모델

각 해석 모델은 표 2에서 보는 바와 같이 0.4에서 3.6의 세장비를 갖는다.

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

부재는 2개 층씩 같은 크기의 부재를 사용하였다. 강재는 대각가새 부재와 보부재 모두 SM490 (3.3 tonf/cm<sup>2</sup>)을 사용하였다. 모델에 작용하는 하중은 ASCE/SEI 7-05와 ANSI/AISC 341-05에 따라 MIDAS MODS GENw<sup>13)</sup>를 이용하여 설계를 진행하였다. 중력하중은 고정하중 0.62 tonf/m<sup>2</sup>와 적재하중 0.38tonf/m<sup>2</sup>를 적용하였으며, 지진하중은 강진지역(SDC : D)으로 가정하고 반응수정계수(R) 값은 4로 가정하였다.

현재 국내에서 구조계획이 구체화된 아산 싸이클론 타워의 경우 기타 구조물로 고려되어 반응수정계수(R) 값으로 3을 이용하였다. Diagrid 골조 시스템이 가새골조보다 더 큰 값을 가질 것을 기대하지만 현재 Diagrid에 대한 연구가 초기단계임을 고려하여 기타구조보다 큰 값으로 가정하여 반응수정계수(R) 값으로 4를 사용하였다.

풍하중에 대한 사용성의 검토는 계산된 설계풍하중에 의하여 건물 최상층의 변위가 H/500 (여기서 H : 건물 높이)이내가 되도록 한다. 이러한 기준으로 예제 건물을 검토한 결과 모든 해석모델 건물이 최상층 변위 제한 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 지진하중에 대해서는 탄성밀면전단력( $V_E$ )에 의해 사용성 검토를 실시하였다. 탄성밀면전단력( $V_E$ ) 수준의 하중에 대해서 어떤 층에서도 최대 층간변위비 (Interstory Drift Ratio, IDR)가 1.5%를 넘지 않아야 한다. 따라서 예제 건물에 대해 평가한 결과 모든 예제 건물이 기준 이내에 해당됨을 확인하였다. 표 3에는 M02-S08(8층)모델과 M02-S12(12층)모델의 대각가새 부재크기를 나타내었다.

표3. 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

## 5. 반응수정계수 산정

### 5.1 비선형 정적해석

그림 9의 하단에 음영으로 표시된 X 방향 외각부분의 대각가새를 비선형 해석을 위한 2D 모델로 사용하였다.

해석은 PERFORM-3D<sup>14)</sup>로 비선형 정적해석(Pushover analysis)을 수행하였다. PERFORM-3D는 비선형해석을 위한 전문프로그램이다. 기존에 비선형 해석에 주로 사용하던 DRAIN 계열의 프로그램을 기반으로 Berkeley 대학의 Graham H. Powell 교수와 CSI (Computers & Structures, Inc.)에 의해 개발되었다.

일반적인 다른 내진저항 골조의 부재들은 비선형 거동에서 지진하중을 소산시키기 때문에, 대각가새 골조 부재



역시 선형탄성한계를 넘어서 거동할 것이라 예상된다. 이에 따라 대각가새 단면에 대한 재료의 속성은 "Inelastic Steel Material, Buckling"을 사용하여 인장력에 대해서 항복응력  $F_y = 3.3 \text{ tonf/cm}^2$ 와 탄성계수  $E = 2,100 \text{ tonf/cm}^2$ 로 인장응력에 도달하면 선형탄성-완전항복모델을 따르도록 이상화하였으며, 압축력에 대한 임계변형율은  $\epsilon_{cr} = E/F_{cr}$ 이며  $F_{cr} = 0.80 F_y$ 일 때  $1.5\epsilon_{cr}$ ,  $0.20 F_{cr}$ 일 때  $90\epsilon_{cr}$ 인 선형탄성좌굴로 이상화하여 부재의 압축강도에 도달하면 좌굴하도록 모델링<sup>15)</sup>하였다. 가새부재의 단면은 "Column, Inelastic Fiber Section"로 모델링하였다. Fiber Section 단면은 24개의 비탄성 단면으로 모델링하였으며 각각의 단면은 그림 11의 속성을 가지도록 하였다.

보는 지진에너지소산에 기여하지 않는 것으로 고려하였으므로 선형탄성재료로 모델링하였다.

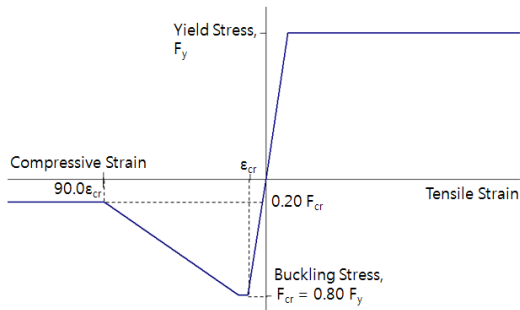


그림 11. 재료속성에 대한 이상화 곡선

대각가새 부재들은 2개 층에 걸쳐 하나의 부재로 구성되었으며 대각부재가 교차되는 접합조건은 핀접합으로 모델링하였다. 보 요소는 선형 탄성재료로 모델링하였고 각 단부 조건은 핀접합으로 모델링하였다. 중력하중은 중심코어와 대각가새 간의 길이에 대해 유효 길이(6.75 m)로 보 부재에 등분포로 적용하였다. Pushover 해석은  $1.05D + 0.25L$ 의 중력하중을 적용한 후에 수행하였다.

형력은 삼각형 형태의 하중 패턴으로 점진적으로 증가시키면서 수행하였으며 P-Δ 효과는 고려하지 않았다.

## 5.2 반응수정계수 평가

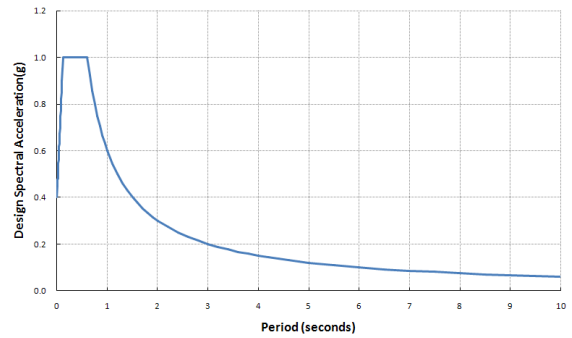
설계스펙트럼을 이용하여 완전탄성 거동시의 밀면전단력  $V_E$  값을 해석모델의 주기를 고려하여 산정하기 위해 설계밀면전단력을 가속도 값으로 치환하여 산정하였다.

설계스펙트럼은 위에서 언급했던 것과 같이 내진설계범주(SDC)가 D일 경우로  $S_{DS} = 1.0g$ ,  $S_{DI} = 0.602g$  값을 사용하였으며 ATC-40<sup>16)</sup>에서 제시한 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)을 이용하여 설계스펙트럼을 응답변위로 표현하였다.

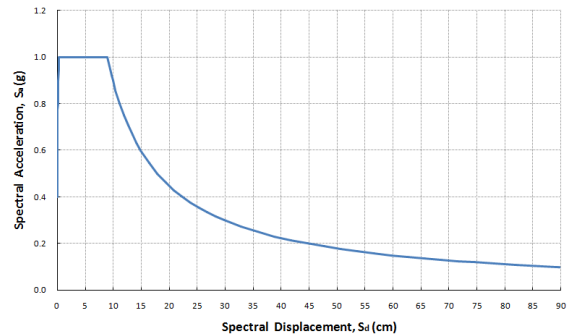
일반적으로 설계스펙트럼은 주기( $T$ )에 대한 응답가속도( $S_a$ )의 형태로 표현되며 응답가속도( $S_a$ )와 응답변위( $S_d$ )로 표현하기 위해서는 응답변위를 산정할 필요가 있다. 일반적으로 응답변위( $S_d$ )는 (6)식과 같이 주기와 관계된

응답가속도로 산정할 수 있으며, (6)식을 통해 그림 12.a)의 설계스펙트럼을 그림 12.b)와 같이 응답가속도( $S_a$ )와 응답변위( $S_d$ )의 관계로 표현하였다.

$$S_{d_i} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} \cdot S_{a_i} \cdot g \quad (6)$$



a)  $S_a - T$  설계스펙트럼



b)  $S_a - S_d$  설계스펙트럼

그림 12. 설계스펙트럼

각 모델별 Pushover 해석결과는 그림 13과 같다. 8층(M02-S08)과 12층(M02-S12) 모델은 강성이 유사하게 나타났으며 전반적으로 층고가 커질수록 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. 밀면전단력은 8층(M02-S08), 12층(M02-S12), 36층(M02-S35) 모델에서 비슷한 값을 나타냈으나 4층(M02-S04) 모델은 작은 값을 나타내었다.

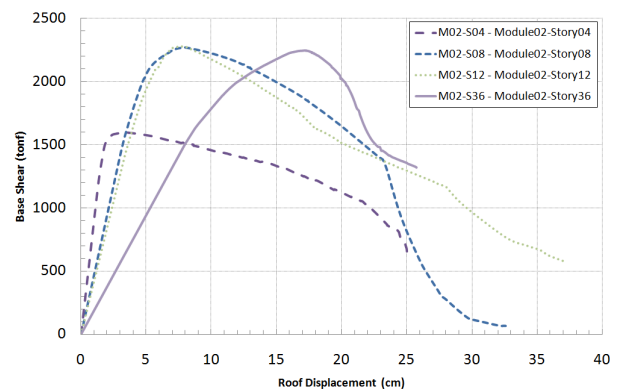


그림 13. 해석 모델에 대한 Pushover 곡선

각 해석모델의 주기를 고려하여 그림 13의 Pushover 해석 결과를  $S_a - S_d$  설계스펙트럼으로 작성하였으며 그 결과는 그림 14와 같이 나타났다. 저층(4층, M02-S04)에서는 낮은 변위에서 높은 가속도를 나타내고 있으며, 건물의 층수가 높아질수록 높은 변위에서는 낮은 가속도를 나타낸다. 이것은 기존의 연구결과들과 유사한 경향을 나타내고 있다고 할 수 있다.<sup>17)</sup>

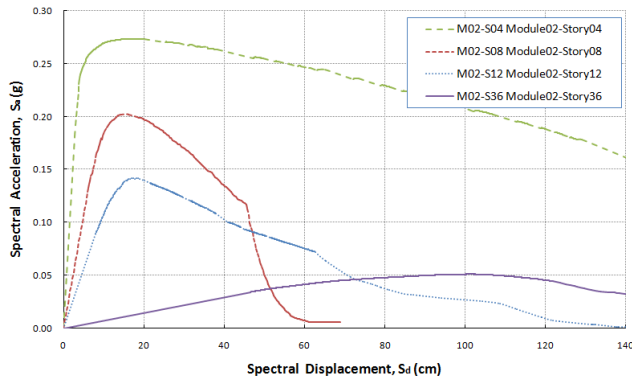


그림 14. 해석 모델의 주기를 고려한 Pushover 곡선

그림 14에서의 결과를 이용하여 각 해석 모델의 반응수정계수( $R$ ) 값을 산정하였다. 그림 15부터 그림 18까지는 각 해석 모델에서의 계수 값을 표현한 것이다.

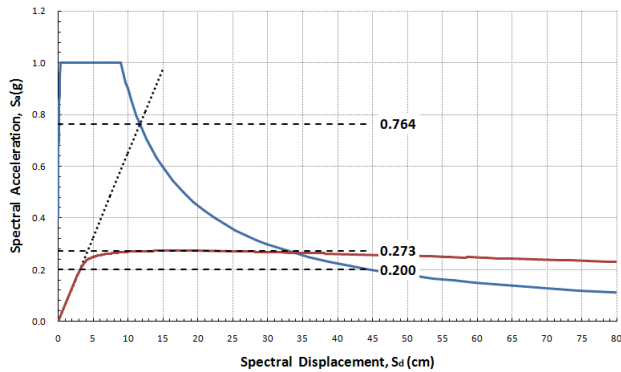


그림 15. M02-S04 (4층) 모델에 대한 내진성능계수

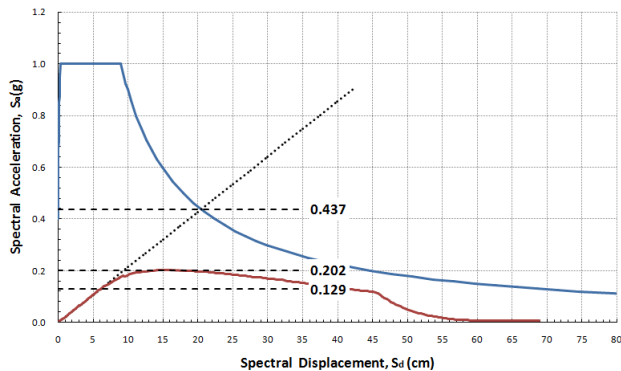


그림 16. M02-S08 (8층) 모델에 대한 내진성능계수

초대형 대각가새 구조의 건물 높이에 따른 반응수정계수 평가

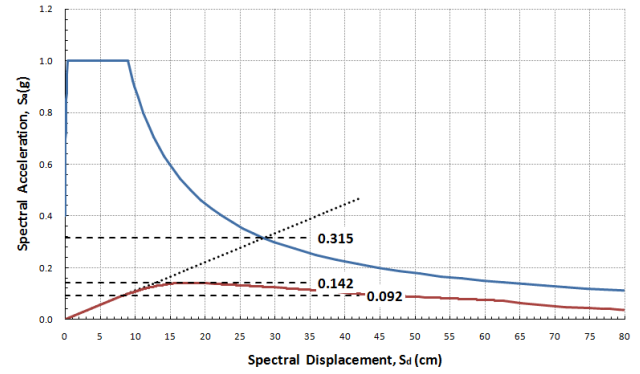


그림 17. M02-12 (12층) 모델에 대한 내진성능계수

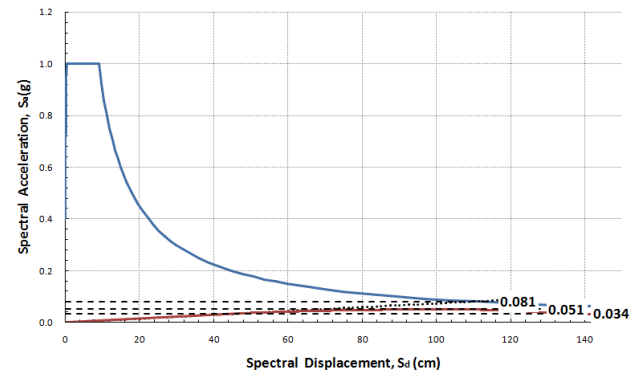


그림 18. M02-36 (36층) 모델에 대한 내진성능계수

표 4에서  $S_d$ 는 설계밀면전단력( $V$ )에 대한 스펙트럼 값이다. 건물의 층수가 높아질수록 0.2에서 0.036으로 작아지고 있음을 알 수 있다.  $S_{max}$ 는 모델의 최대 밀면전단력( $V_{max}$ )의 스펙트럼 값이다. 이 값도 건물의 층수가 높아질수록 0.27에서 0.051로 감소하고 있음을 알 수 있다.  $S_{DT}$ 는 모델의 기본주기( $T$ )에 따른 최대 밀면전단력을 나타낸 값이다. 건물의 주기가 길어질수록  $S_{DT}$ 값이 감소함을 알 수 있다. 해석 결과 초과 강도계수가 해석모델 모두 2보다 작은 값(1.4-1.6)을 가지지만, 건물의 높이에 따른 변화는 없다고 할 수 있다.

Diagrid 구조시스템의 반응수정계수( $R$ ) 값은 중저층(4층-12층)의 경우 설계에서 사용한 4값과 근사한 3.4-3.8을 갖지만, 고층의 경우 2.2로 대폭 감소된다. 따라서 반응수정계수( $R$ ) 값은 건물의 높이에 따라 상이하게 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

표 4. Pushover 해석에 따른 내진성능계수

	M02-S04	M02-S08	M02-S12	M02-S36
$S_d$	0.20	0.13	0.09	0.04
$S_{max}$	0.27	0.20	0.14	0.05
$S_{DT}$	0.76	0.44	0.32	0.08
$\Omega_o$	1.36	1.57	1.55	1.43
$R$	3.81	3.39	3.44	2.27

## 6. 결론

본 연구에서는 Diagrid 구조 시스템 건물의 높이에 따른 반응수정계수( $R$ )를 평가하기 위하여, 건물 높이를 변수로 하여 ASCE7-05 와 AISC 341-15에 따라 4종류 높이의 해석 모델을 설계하고 Diagrid 구조 부분에 대하여 비탄성 정적해석을 수행하였다. 해석을 통해 모델의 초과강도계수와 반응수정계수( $R$ )를 산정하였고 설계에 사용한 값과 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 구조물의 높이에 따라 반응수정계수( $R$ )의 차이(2.2-3.8)를 나타낼 수 있었다. 장주기인 고층의 구조물일수록 저층 구조물에 비해 작은 반응수정계수( $R$ ) 값을 가지며, 또한 36층 모델의 경우 4층 모델보다 작은 초과강도계수를 나타내었다.

2) 초과강도계수는 기존의 구조시스템에 대하여 AISC에서 제시하는 2~3값 보다 작은 값(1.3-1.6)을 나타내었다. 저층건물의 경우 반응수정계수(3.8-3.4)는 기타 구조시스템의 반응수정계수( $R$ ) 값인 3보다 크게 산정되었으나 전단벽 시스템을 제외한 가새골조 시스템과 이중골조 시스템의 반응수정계수( $R$ ) 값보다 작은 값을 나타내었다. 그러나 고층건물의 경우 2.2로 작게 평가되었다.

3) Diagrid 구조 시스템의 특징을 고려한 대각가새의 경사각 변화에 따른 반응수정계수( $R$ ) 값, 또는 다른 여러 변수를 고려한 추가적인 연구를 통해 새로운 구조시스템에 대한 좀 더 객관적인 반응수정계수( $R$ ) 값을 선정하는 것이 필요하며, 반응수정계수( $R$ ) 평가방법론의 개선을 위한 지속적인 연구가 이루어져야 한다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. STRUCTURE magazine, New York's Hearst Towers, February 2006, pp.25-29.
2. ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2006.
3. AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-05, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 2005.
4. 주영규, 김경환, Diagrid 구조 시스템의 최근 동향, 대한건축학회지, Vol.52, No.04, 2008, pp.72-76.
5. Moon, K. S., Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics & Methodology for Preliminary Design, The Structural Design of Tall & Special Buildings, Vol.16, 2007, pp.205-230.

6. ATC, Structural response modification factors, ATC 19, Applied Technology Council, 1995, pp. 5-32.
7. ATC, A critical review of current approaches to earthquake-resistant design, ATC 34, Applied Technology Council, Redwood City, 1996.
8. FEMA, 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., 2004a.
9. Bertero, V. V., Evaluation of response reduction factors recommended by ATC and SEAOC, Proceedings of the Third U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Charleston, North Carolina, 1986.
10. Kim, J. S., Kim, Y. S. and Lho, S. H., Structural Schematic Design of a Tall Building in Asan using the Diagrid System, CTBUH 8th World Congress, Dubai, March 3-5, 2008, pp.433-440.
11. FEMA, 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., 2004b.
12. 김진구, 박준희, 좌굴방지가새가 설치된 골조의 반응수정계수, 대한건축학회논문집 구조계, Vol.21, No.9, 2005, pp.19-25.
13. MIDAS, MIDAS MODS GENw., General Structure Design System for Windows, 2008.
14. PERFORM-3D., Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures - User Guide, Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA, 2006.
15. SOM, Proposed Methodology to Determine R-Values For Steel Diagrid Framed Systems, Final Report, Chicago, 2008.
16. ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Vol.1, 1996.
17. 윤정배, 이철호, 최정욱, 송진규, N2Method를 이용한 RC 중간모멘트 연성골조의 반응수정계수 및 내진성능평가, 한국지진공학회 논문집, Vol.6, No.6, 2002, pp.33-39.

(接受: 2008. 11. 6)