

건축구조물의 지진해석에서 좌표축의 설정에 따른 보정계수 산정법

Scale-Up Factor for Seismic Analysis of Building Structure for Various Coordinate Systems

유일향¹⁾ · 이동근²⁾ · 고 현³⁾ · 김태호⁴⁾

Yu, Il-Hyang · Lee, Dong-Guen · Ko, Hyun · Kim, Tae-Ho

국문 요약 >> 실무에서 지진해석법으로 널리 쓰이는 방법은 등가정적해석법과 응답스펙트럼해석법이다. 이 중 등가정적해석법에 의한 밀면전단력은 구조물의 주축을 해석좌표축에 어떻게 배치하는가와 상관없이 일관된 값을 나타낸다. 그러나 응답스펙트럼해석은 해석좌표축에 구조물의 주축을 다르게 배치하여 해석을 수행하면 밀면전단력이 각기 다르게 발생한다. 이는 엔지니어가 구조물을 설계함에 있어 구조물의 주축을 해석좌표축에 어떻게 설정했는지에 따라 설계부재력이 모두 달라질 수 있음을 뜻한다. 또한 응답스펙트럼해석은 지진을 가한 방향의 직각방향에서 적지 않은 응답이 발생하는 경우가 생긴다. 한방향 해석에 대한 X와 Y축을 따라 분리되는 이러한 양방향 응답은 보정계수 산정시 쓰이는 밀면전단력을 작게 만들며 이는 결과적으로 보정계수를 크게하여 과다설계의 우려가 생긴다. 내진설계시 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 수평의 강성 차이에 따라 구조물을 크게 세 가지(양방향 대칭 구조물, 한방향 비대칭구조물, 양방향 비대칭구조물)로 분류하여 각각의 경우에 대하여 간단한 모델을 선정하고 구조물의 주축을 회전시켜가면서 지진해석을 수행하였다. 각 경우의 예제구조물이 가지는 동적특성과 설계부재력을 살펴보았다. 현재 실무에서 적용되는 보정계수 산정법에 의한 설계부재력과 앞선 문제들을 해결하고자 본 논문에서 제안하는 새로운 보정계수 산정법에 의한 설계부재력을 비교하여 제안하는 보정계수 산정법의 효율성을 검토하였다. 그 결과로 새로 제안된 보정계수 산정법에 의하여 설계부재력을 산정하는 것이 내진설계시 엔지니어들이 겪을 수 있는 혼란을 덜어주며 경제적인 부재설계가 가능함을 알 수 있었다.

주요어 내진설계, 응답스펙트럼해석, 등가정적해석, 구조물의 주축, 보정계수

ABSTRACT >> In a practical engineering, the equivalent static analysis (E.S.A) and the response spectrum analysis (R.S.A) are generally used for the seismic analysis. The base shears obtained from the E.S.A are invariable no matter how the principal axes of building structures are specified on an analysis program while those from the R.S.A are variable. Accordingly, the designed member size may be changed by how an engineer specify the principal axes of a structure when the R.S.A is used. Moreover, the base shears in the normal direction to the excitation axis are sometimes produced even when an engineer performs a response spectrum analysis in only one direction. This tendency makes the base shear, which is used to calculate the scale-up factor, relatively small. Therefore the scale-up factor becomes larger and it results in uneconomical member sizes. To overcome these disadvantages of the R.S.A, an alternative has been proposed in this study. Three types of example structures were adapted in this study, i.e. bi-direction symmetric structure, one-direction antisymmetric structure and bi-direction antisymmetric structure. The seismic analyses were performed by rotating the principal axes of the example structures with respect to the global coordinate system. The design member forces calculated with the scale-up factor used in the practice were compared with those obtained by using the scale-up factor proposed in this study. It can be seen from this study that the proposed method for the scale-up factor can provide reliable and economical results regardless of the orientation of the principal axes of the structures.

Key words seismic design, response spectrum analysis, equivalent static analysis, principal axis of building structures, scale-up factor

¹⁾ 학생회원·성균관대 건설환경시스템공학과, 공학석사
(대표저자: 1hyang@daum.net)

²⁾ 정회원·성균관대 건설환경시스템공학과, 교수

³⁾ 학생회원·성균관대 건설환경시스템공학과, 박사과정

⁴⁾ 정회원·대림산업 기술연구소 주임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 5. 30 / 심사종료일 : 2007. 8. 3)

1. 서론

건축 구조물의 내진설계에 널리 사용되는 해석법은 크게 등가정적해석법, 응답스펙트럼해석법, 시간이력해석법이다. 이 중 현재 국내에서 구조설계시 가장 많이 사용되고 있는

해석법은 등가정적해석법과 응답스펙트럼해석법이다. 동적 해석법의 경우에는 해석방법의 편의성과 상대적으로 짧은 해석시간 등을 이유로 실무에서는 시간이력해석법에 비하여 응답스펙트럼해석법이 구조물의 설계시 많이 사용되고 있다. 등가정적해석법과 응답스펙트럼해석법에 대하여 간략히 알아보면 다음과 같다.

등가정적해석법(Equivalent Static Analysis, ESA)은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후에 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 의한 거동을 예측하는 방법이다. 그러므로 비정형구조물에 대해서는 사용이 곤란하다. 또한 해석결과가 큰 오차를 가지지 않는 것으로 알려져 있으며 내진 설계의 편의성 때문에 널리 사용되고 있다.

현재 지진해석시 일반적으로 사용되고 있는 응답스펙트럼법(Response Spectrum Analysis, RSA)은 모드 중첩법을 응용한 해석법으로서 탄성해석에 국한된다. 그러나 고차모드의 영향까지 고려할 수 있어 비정형 구조물의 해석에도 사용되고 있다. 이 해석법은 구조물을 모드별로 분리시킨 후 각 모드의 최대응답을 응답스펙트럼에서 구한 후에 이를 SRSS(square root of sum of square)나 CQC(complete quadratic combination)기법으로 조합하여 구조물의 최대응답을 산정한다.

응답스펙트럼해석을 수행하여 얻은 밀면전단력은 엔지니어가 해석프로그램에 구조물을 입력할 때에 해석좌표축과 구조물의 주축을 어떻게 배치하느냐에 따라 제각기 달라진다. 따라서 설계시 어떠한 밀면전단력을 기준으로 설계를 하여야 하는지 모호한 경우가 생긴다. 또한 구조물의 주축과 해석좌표축을 어떻게 설정하느냐에 따라 밀면전단력이 각기 달라진다는 것은 하나의 구조물을 설계하는데 있어서 모두 다른 설계부재력으로 구조물을 설계하여야 하는 가능성이 있음을 뜻한다.

해석좌표축을 고정시킨 상태에서 구조물을 회전하여 구조물의 주축을 다르게 배치하여 해석한다는 것은 사실상 구조물을 고정하고 여러 방향에서 가진(加震)하는 것과 마찬가지로 이에 대한 연구 결과를 살펴보면 우선 Kiureghian 등⁽¹⁾은 여러 방향에서 가진되는 입력스펙트럼 상호간의 관계에 의한 효과는 대체로 작고, 주요한 축을 따라 가해지는 지반 가속도 성분이 같거나 거의 같은 강도를 가질 때 이러한 효과는 무시할 수 있다고 하였다. 또한 이런 경우 실제 적용을 위해서는 각 방향의 해석을 CQC기법에 의하여 조합하고, 각 방향의 입력 스펙트럼이 거의 같을 경우는 이 응답을 SRSS 조합함으로써 고려할 수 있다고 밝혔다. 그리고 Wilson^(2,4)은 각각의 입력스펙트럼이 같을 경우는 SRSS조합이 가장

보수적인 값을 준다고 밝히고 있으며 두 방향 가진시 많이 사용되는 100/30조합 보다는 100/40조합이 설계에서 좀 더 안전성을 줄 수 있다고 하였다.

본 논문에서는 구조물의 지진해석시 해석좌표축과 구조물의 주축의 차이에 따른 지진하중에 대한 설계부재력의 변화로 인한 문제점을 알아보고 적절한 대안을 제시하기 위하여 수평비정형 구조물을 대상으로 연구하였다. 구조물의 평면상의 강성 차이에서 기인한 동적특성에 따라 구조물을 크게 양방향 대칭구조물, 한방향 비대칭 구조물, 양방향 비대칭 구조물로 분리하여 각각의 구조물의 특성에 따른 밀면전단력의 양상을 살펴보았다. 각각의 경우에 대하여 단순한 모델을 선정한 후, 이를 해석좌표축과 구조물의 주축의 좌표축을 다르게 하여 지진해석을 수행하였다. 밀면전단력과 동적특성을 살펴본 후 설계부재력을 비교하여 보았다. 설계부재력은 기존의 실무에서 사용하고 있는 보정계수방법을 적용한 설계부재력과 본 논문에서 제시하고 있는 새로운 보정계수의 적용방법을 비교하였다. 구체적인 건물을 대상으로 본 논문에서 제시하고 있는 새로운 보정계수의 방법의 효과를 검증하였다.

2. 현행 기준 및 해석좌표축의 설정에 따른 밀면전단력

2.1 KBC2005에 기초한 보정계수 산정법 및 지진하중의 방향성 고려

(a) 보정계수의 산정

KBC2005⁽⁵⁾의 0306.7.7.2에는 “건물의 기본 진동주기에 정형구조물인 경우 1.5, 비정형 구조물인 경우 1.2를 곱하여 등가정적해석법을 이용하여 산정한 밀면전단력 V 가 모드 밀면전단력의 합 V_t 보다 큰 경우에는 0306.7.7.1에서 구한 값에 다음과 같은 보정계수 C_m 을 곱하여 사용한다.”고 제시하고 있다.

$$C_m = \frac{V}{V_t} \quad (1)$$

이는 등가정적해석법을 사용하여 구한 밀면전단력과 비교하여 모드해석법에 의하여 산정한 밀면전단력을 감소시키는 것을 제한하는 것으로 모드해석법에 의한 밀면전단력이 등가정적해석법에 의한 값보다 크면 등가정적해석법에 의한 값을 사용한다. 건물의 기본 진동주기를 구하는 식에 의하여 산정한 주기에 정형 구조물의 경우 1.5배, 비정형 구조물인 경우 1.2배하여 구한 등가정적해석법에 의한 밀면전단력 V 가 모드 밀면전단력의 합 V_t 보다 큰 경우에는 그 비율만큼 동적해석에 의한 설계값을 증가시킨다. 그러나 기준

에는 보정계수의 산정에 쓰이는 밀면전단력에 대한 정확한 언급이 없다.

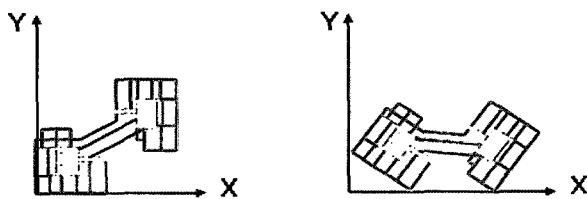
본 논문에서는 설명의 편의상 아래의 표 1과 같이 밀면전단력을 표기하고자 한다. OF₀₀의 O는 해석방법(E: E.S.A, R: R.S.A)을 나타낸다. 두개의 첨자 중 첫 번째 것의 의미는 해석좌표축의 X, Y 방향을 따라 발생한 밀면전단력을 나타내며 뒤의 첨자는 가진 방향을 나타낸다. 즉 F_{YX}는 X방향으로 가진하였을 경우에 Y축을 따라 발생하는 밀면전단력을 의미한다. 현재 실무에서는 X방향의 보정계수는 EF_{XX} / RF_{XX}, Y방향의 보정계수는 EF_{YY} / RF_{YY}의 값을 사용하고 있다.

실무에서 사용하는 보정계수 산정법의 문제점을 설명하기 위하여 그림 1과 같은 구조물을 예로 들었다. 그림 1의 (a)와 (b)처럼 구조물의 주축과 해석좌표축을 설정한 후 지진해석을 수행하여 표 2의 결과를 얻었다. 등가정적해석(E.S.A) 밀면전단력을 보면 해석좌표축에 구조물의 주축을 어떻게 설정하는지에 관계없이 동일한 밀면전단력을 얻는다. 그러나 응답스펙트럼해석(R.S.A)의 경우에는 Case 1과 Case 2의 밀면전단력이 각기 달라지므로 이를 사용하여 구하는 보정계수의 값 역시도 달라진다. 따라서 어떠한 값을 기준으로 내진설계를 해야 하는지 모호한 경우가 생긴다.

내진설계시 스펙트럼해석에 의하여 생길 수 있는 또 하나의

〈표 1〉 밀면전단력의 표기 방법

해석법	가진 방향	F _X	F _Y
E.S.A	X	EF _{XX}	0
	Y	0	EF _{YY}
R.S.A	X	RF _{XX}	RF _{YX}
	Y	RF _{XY}	RF _{YY}



(a) Case 1

(b) Case 2

〈그림 1〉 구조해석을 위한 좌표축 설정

〈표 2〉 좌표축 설정에 따른 밀면전단력의 예

단위: kN

해석법	가진 방향	Case 1		Case 2	
		F _X	F _Y	F _X	F _Y
E.S.A	X	26396.0	0.0	26396.0	0.0
	Y	0.0	26396.0	0.0	26396.0
R.S.A	X	14269.5	5302.6	13310.0	7968.6
	Y	5302.6	20384.2	7968.6	19264.4

문제점은 응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력이 양방향 응답을 나타낸다는 것이다. 표 2에서 볼 수 있듯이 X(Y)방향으로 해석을 수행하였을 경우 F_{XX}(F_{YY}) 이외의 F_{YX}(F_{XY}) 방향에서 적지 않은 응답이 발생함을 확인할 수 있다. 이렇게 양방향으로 응답이 분리되어 나오면 현재 실무에서 사용하고 있는 보정계수를 산정할 때 분모에 해당하는 응답스펙트럼해석의 밀면전단력 값을 상대적으로 작게 만든다. 결과적으로는 보정계수를 필요 이상으로 크게 만들며 엔지니어들이 내진설계를 함에 있어 비경제적인 설계를 하도록 한다.

(b) 지진하중의 방향

지진하중은 건물의 임의의 방향으로 작용할 수 있으며, 이러한 현상을 고려하기 위하여 기준에서는 일반적으로 직교하는 두 축의 지진하중의 효과를 조합하여 설계하도록 한다. 두 축에 대하여 최대 지진하중이 동시에 작용할 확률은 매우 작으므로 적절한 방법으로 직교하는 두 축에 대한 하중효과를 조합하여 사용하도록 하고 있다. KBC2005의 0306.8.4에는 내진설계 범주에 따라 설계부재력을 결정하는 방법에 대하여 언급하고 있다. 특히 내진 설계 범주 ‘C’나 ‘D’에 해당하는 경우에는 SRSS법과 100/30법 중 한 가지 방법을 이용하여 설계부재력을 결정하도록 하고 있다. 이 중 SRSS방법은 X방향의 지진력의 100%의 제공과 Y방향의 지진력의 100%의 제공의 값을 더하여 제공근을 적용하여 설계부재력을 결정하는 방법이다. 100/30법은 한방향 지진하중효과의 100%와 직각 방향 지진하중 효과의 30%를 합하여 설계부재력을 결정하는 방법이다.

2.2 지진해석법에 따른 밀면전단력의 차이

등가정적해석법은 구조시스템의 1차 모드가 전체의 동적 거동을 결정한다는 가정하에 1차 모드만 고려한 간편한 모드해석이라 할 수 있다. 등가정적해석에 의한 밀면전단력(V)은 식 (2)에 의하여 구하고 주기(T)는 건물의 높이(h_n)에 의하여 결정되는 값이다. 따라서 등가정적해석법의 경우는 가진한 힘에 대한 반력의 개념으로 가진 방향의 반대 방향에서만 응답이 나타내게 된다.

$$V = C_s W, \quad C_s = \frac{S_{D1}}{[\frac{R}{I_E}]T}, \quad T = C_T h_n^{3/4} \quad (2)$$

여기서, C_s는 지진응답계수, S_{D1}는 주기 1초의 스펙트럼 가속도, R은 반응수정계수, I_E는 중요도 계수이다.

응답스펙트럼해석법은 각 모드별로 건물의 모드형상, 주기 및 감쇠비를 중첩하여 다자유도계 건물의 선형응답을 구

하는 방법이다. 즉 건물의 응답은 선택된 모드를 나타내는 여러 개의 단자유도계 응답으로 모델링할 수 있으며, 각 주요 모드에서 건물의 최대응답을 구하고 적절한 방법으로 그 결과를 조합하여 최대 모드응답을 구한다. 따라서 응답스펙트럼해석법을 통하여 구한 밀면전단력은 모드의 방향에 영향을 받게 된다. 예를 들어 그림 2와 같은 골조구조물의 평면을 갖고, 가운데 대각선으로 브레이스가 있는 가상의 구조물을 생각하여 본다.

해석프로그램의 전체좌표축과 구조 모델의 배치가 그림 2와 같다고 할 때 굵은 화살표로 표기된 방향과 그 직각 방향은 구조물의 주축이 된다. 즉 브레이스의 직각방향이 가장 약한 축이 되므로 1차 모드의 방향은 굵은 화살표 방향으로 생기며, 또한 그와 직각방향으로 직교 모드가 발생할 것이다. 해석프로그램의 전체 좌표축과 구조물의 주축의 방향이 일치하지 않는 경우로 이렇게 각 모드마다 발생한 밀면전단력은 그림의 점선처럼 전체좌표계인 X와 Y방향으로 분리된다. 따라서 한방향 해석을 수행하여도 양방향 응답이 발생할 수 있는 것이다. 식 (3)에 의하여 각 모드의 응답이 결정되며, 이를 식 (4)에 의하여 모드좌표계에서 실질좌표계로 옮기는 과정에서 모드형상(ϕ)에 의하여 구조물의 응답이 영향을 받음을 확인할 수 있다.

응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력(V_m)은 식 (5)에서 보는 것처럼 모드의 지진계수(C_{sm})와 유효모드질량(\overline{W}_m)의

곱으로 정의된다. 지진계수는 모드별 주기에 대응하는 모드 설계스펙트럼 가속도에 영향을 받으며 유효모드질량은 고유치해석을 통한 모드의 질량참여율을 보면 쉽게 얻을 수 있다.

$$q_{i,max} = \max|q_i(t)| = \frac{L_i}{\mu_i} S_d(\omega_i, \xi_i) \tag{3}$$

$$\{X\}_{(i),max} = \{\phi\}^{(i)} q_{i,max} = \{\phi\}^{(i)} \frac{L_i}{\mu_i} S_d(\omega_i, \xi_i) \tag{4}$$

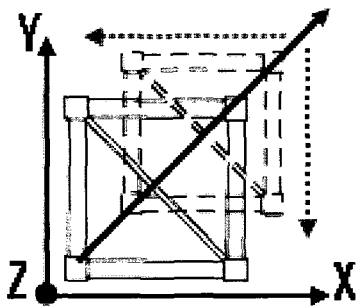
$$V_m = C_{sm} \overline{W}_m, \quad \overline{W}_m = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im})^2}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im}^2} \tag{5}$$

여기서, L_i 는 모드참여계수, μ_i 는 일반화 질량, $S_d(\omega_i, \xi_i)$ 는 진동수 ω_i 이고 감쇠율이 ξ_i 인 경우에 대한 응답스펙트럼 값이다.

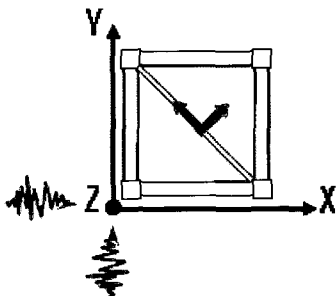
2.3 구조물의 주축과 해석좌표축의 차이에 따른 밀면전단력의 변화

응답스펙트럼해석법은 구조물의 주축과 해석좌표축이 일치하지 않으면 가진방향 이외의 직각방향 성분이 응답에 섞여서 발생한다. 따라서 구조물의 주축과 해석좌표축을 일치시킨다면 해석을 수행한 방향만으로 응답을 얻을 수 있음을 예상할 수 있다. 이렇게 구한 응답은 다른 방향의 성분이 섞여 나오지 않으므로 최대값이 된다.

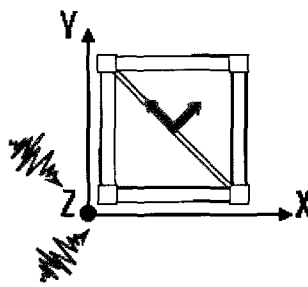
구조물의 주축과 해석좌표축의 변화에 따라서 응답이 어떻게 달라지는지 알아보기 위하여 그림 3과 같은 세 가지 경우에 대하여 알아보았다. 그림 3과 같은 평면을 갖는 가상의 구조물이 있다고 할 때 전체 좌표축은 고정시키고 구조물의 주축을 그림과 같이 다르게 하여 지진해석을 수행하여 보았다. 굵은 화살표는 구조물의 주축의 방향을 나타낸다. 그림 3의 (a)와 (b)는 구조물의 주축과 해석좌표축이 일치하지 않은 경우이고 (c)는 구조물의 주축과 해석좌표축의 방향을 일치시킨 것이다. (b)는 (c)와 물리적으로 동일한 의미



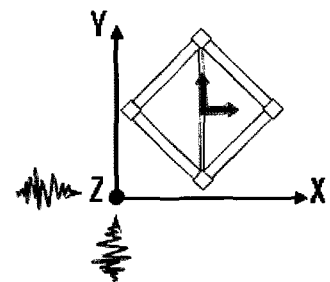
<그림 2> 모드 방향과 해석좌표축의 관계



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

<그림 3> 해석좌표축과 구조물 주축의 배치

를 갖도록 지진을 전체 좌표축을 따라 가진하지 않고 구조물의 주축을 따라 가진한 것이다. 각각의 경우에 대한 동적 특성이 표 3에 나타나 있다. 동일한 구조물이므로 주기는 모두 같으며 질량참여율은 Case 3의 경우만 달라짐을 확인할 수 있다. Case 1, 2는 모드의 방향이 전체좌표축과 일치하지 않기 때문에 X와 Y의 이동질량참여율이 각 모드에서 섞여서 나오며 Case 3은 해석좌표축과 구조물의 주축을 정확히 일치시켰기 때문에 X와 Y의 이동질량참여율이 독립적으로 나온다. 표 3을 통하여 이 구조물은 2차 모드가 회전 모드이며, 회전성분의 질량참여율과 이동성분의 질량참여율이 섞여 있지 않으므로 회전과 이동 모드가 독립되어 있음을 알 수 있다.

지진해석을 수행한 결과를 표 4에 나타내었다. 등가정적 해석의 밀면전단력은 (a), (b), (c) 모두 동일한 밀면전단력이 발생하며 가진한 방향에서만 밀면전단력이 발생함을 확인할 수 있고 응답스펙트럼해석은 구조물의 주축과 해석좌표축의 설정에 따라 밀면전단력이 각기 달라진다. Case 1과 Case 3을 비교하면 Case 1이 실무에서 일반적으로 모델링하는 방법이고 Case 3은 구조물의 주축과 해석좌표축을 일치시켜 모델링한 것이다. 응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력에서 Case 1은 X와 Y의 각 방향 해석에 대하여 F_{X0} 와 F_{Y0} 가 동시에 발생함을 확인할 수 있다. Case 3은 가진한 방향으로만 밀면전단력(F_{XX} 와 F_{YY})이 발생함을 확인할 수 있으며 이는 최대값이 된다. Case 1의 밀면전단력을 사용한 보정계수와 Case 3의 밀면전단력을 사용한 보정계수를 비교하면 보정계수의 값은 Case 1의 경우가 커지게 된다. 이는 설계부재의 크기가 커진다는 것과 동일한 뜻이 된다.

실제의 구조물에 지진은 어떠한 방향으로든 발생할 수 있

다. 따라서 구조물의 설계시 모든 발생 가능한 지진의 방향에 대하여 해석을 수행하여 가장 취약한 방향으로 설계를 하는 것이 가장 합리적인 방법이다. 그러나 이는 시간과 노력이 굉장히 많이 들기 때문에 사실상 불가능하다. 구조물의 주축을 정확히 알 수 있다면 구조물의 주축과 해석좌표축을 일치시켜 해석을 수행하는 것이 최대의 응답을 얻을 수 있으므로 합리적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 실제의 구조물에서 주축을 정하는 것이 쉽지 않다.

Case 1과 3의 밀면전단력의 차이는 구조물의 모드 방향의 영향에 의한 것이기 때문에 직교 좌표계에서 Case 3의 밀면전단력은 Case 1의 밀면전단력을 SRSS(Square Root of Sum of Square)하면 얻을 수 있다. 예를 들어 표 4의 응답스펙트럼 해석에서 X방향으로 가진했을 경우를 생각해 보면, Case 1의 X방향 해석에 의한 밀면전단력(F_{XX} , F_{YX})의 SRSS 값은 $595.7\text{kN}(=\sqrt{432.4^2+409.7^2})$ 이 되며 이는 Case 3의 584.2kN 과 비슷한 값을 갖는다. 값이 정확히 일치하지 않는 것은 Case 1과 Case 3이 물리적으로 동일한 의미를 갖지 않기 때문이다. Case 3과 동일한 의미를 갖는 Case 2와 3을 비교하여 보면 Case 2의 SRSS한 값은 Case 3과 정확히 같은 값을 갖는다.

지진해석을 수행할 경우에 구조물의 주축과 해석좌표축을 일치시켜 해석하는 것이 조금 더 합리적인 해석법임을 위에서 설명하였다. 그러나 구조물의 주축을 정하기 어려운 경우는 주축을 일치시켜 해석한 것과 비슷한 결과를 얻기 위하여 해석한 결과를 SRSS 조합하여 사용하면 그와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 즉 임의의 구조물을 해석하여 그 구조물에 발생하는 최대의 밀면전단력을 얻기 위한 방법은 설계자 편의대로 해석좌표축과 구조물의 주축을 설정하여

〈표 3〉 모드별 주기와 질량참여율

단위: %

모드 No.	주기 (초)	Case 1, 2			Case 3		
		X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전
1	0.65	40.41	40.41	0.00	80.83	0.00	0.00
2	0.59	0.00	0.00	81.79	0.00	0.00	81.79
3	0.42	41.57	41.57	0.00	0.00	83.14	0.00

〈표 4〉 좌표축의 설정에 따른 밀면전단력

단위: kN

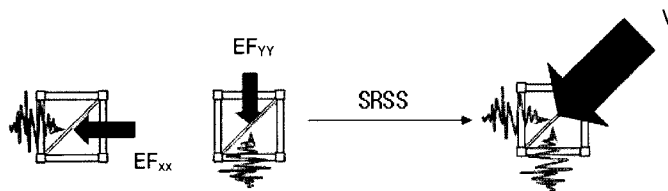
해석법	가진 방향	Case 1		Case 2		Case 3	
		F_x	F_y	F_x	F_y	F_x	F_y
E.S.A	X	722.7	0.0	722.7	0.0	722.7	0.0
	Y	0.0	722.7	0.0	722.7	0.0	722.7
R.S.A	X	432.4	409.7	413.1	413.1	584.2	0.0
	Y	409.7	432.4	429.1	429.1	0.0	606.8

해석을 수행한 후 그로부터 얻은 밀면전단력을 SRSS 조합하여 사용하는 것이다.

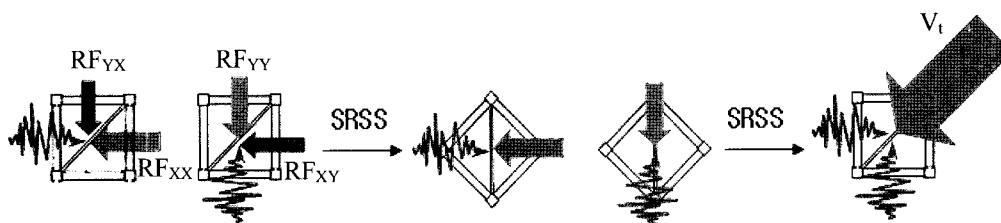
3. 새로운 보정계수 산정법 제시

본 논문에서는 앞서 언급한 내진설계시 발생할 수 있는 문제점들을 해결하기 위하여 새로운 보정계수 산정법을 제시하였다. 새로운 보정계수 산정법에 사용되는 등가정적해석법에 의한 밀면전단력과 응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력의 개념이 아래 그림 4, 5에 제시되어 있다. 그림 4는 등가정적해석법에 의한 밀면전단력을 나타낸다. 기존의 보정계수 산정법이 가진 방향에 대한 밀면전단력만을 사용하였다면 본 논문에서 제시하고 있는 보정계수 산정법은 한 방향씩 해석한 각 방향의 응답을 SRSS 조합하여 식 (6)에 의한 최대값의 밀면전단력을 사용한다. 응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력의 개념은 그림 5에 나타나 있다. 먼저 구조물의 주축과 해석좌표축이 일치되지 않은 일반적인 해석으로부터 구조물의 주축과 해석좌표축을 일치시켜 해석한 결과와 비슷한 값을 얻기 위하여 SRSS조합한다. 그 후 직교좌표계에서 최대값을 얻기 위하여 이를 다시 SRSS 조합한다. 식 (7)에 의한 밀면전단력을 등가정적해석에 의한 최대 밀면전단력과 비교하여 보정계수를 산정한다. 이렇게 최대 밀면전단력을 사용하여 보정계수를 산정하여 설계부재력을 구하면 구조물의 주축과 해석좌표축의 차이에 따라 밀면전단력이 변화하여 생기는 혼란을 없앨 수 있으며 경제적인 설계부재력을 얻을 수 있다.

$$V = \sqrt{(EF_{XX})^2 + (EF_{YY})^2} \tag{6}$$



〈그림 4〉 등가정적해석 밀면전단력의 최대값 산정



〈그림 5〉 응답스펙트럼해석 밀면전단력의 최대값 산정

4. 평면의 강성 차이에 따른 건축 구조물의 분류

응답스펙트럼해석은 구조물의 모드방향을 해석좌표축과 일치시켜 해석하였을 경우에 밀면전단력은 X와 Y 방향이 독립적으로 각각 발생하지만 그렇지 않았을 경우는 F_x 와 F_y 가 섞여서 나오게 된다. 그러나 모든 구조물이 그런 것은 아니다. 이는 구조물이 정확히 대칭을 이루어 X와 Y 방향의 성분이 Z 축을 중심으로 회전하는 성분과 독립되어 있기 때문에 가능한 것이다. 응답스펙트럼해석의 밀면전단력은 구조물의 동적특성인 이동질량참여율의 값에 영향을 받는다. 또한 질량참여율은 구조물의 이동성분과 회전성분의 독립 여부와 해석좌표축과 구조물의 주축의 관계에 따라 그 양상이 달라진다. 앞서 제시한 보정계수 산정법의 효율성을 검토하기 위하여 질량참여율에 의하여 구조물을 크게 세 가지 형태로 분리하여 연구하였다.

본 논문에서는 구조물의 전 층에 질량은 동일하다고 가정 한 후 강성에 변화를 주어 구조물을 분리하였다. 즉 구조물의 질량참여율에 영향을 미치는 변수를 수평의 강성 차이에 두어 수평 정형과 비정형 건물을 대상으로 연구하였다.

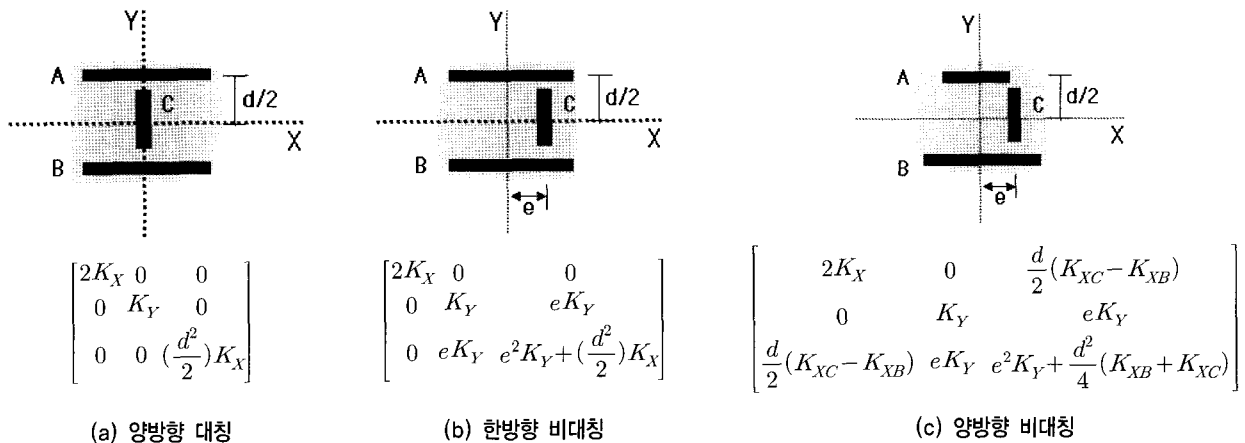
하나의 건축 구조물은 평면 내에서 직교하는 모드형상을 갖는다. 즉 두개의 평면축을 중심으로 이동하는 모드와 한 개의 수직축을 중심으로 회전하는 모드 형상을 갖으며 이동하는 모드와 회전하는 모드의 독립 여부에 따라 구조물의 대칭성이 결정된다. 가장 특수한 경우로 양방향 대칭 구조물은 구조물의 강성이 평면의 두개의 축을 중심으로 각각

대칭을 이룬 경우이다. 예를 들어 그림 6 (a)와 같은 평면의 구조물을 생각해보면, 기둥 A와 B는 X축을 중심으로 대칭이며 기둥 C는 Y축을 중심으로 대칭을 이룬다. 즉, 강성의 중심과 질량의 중심이 정확히 일치하였기 때문에 X와 Y의 이동모드가 회전모드로부터 각각 독립되어 있다. 여기에서 K_O 에서 첨자는 방향을 의미하고 K_O 는 O방향에 기여하는 강성을 나타내며, d 는 A와 B기둥 사이의 거리, e 는 질량 중심과 C기둥의 강성중심 사이의 거리를 나타낸다.⁽⁶⁾

강성행렬은 그림 6과 같이 구성된다. 질량참여율에 영향을 미치는 요소인 강성과 질량행렬 중 본 논문에서는 질량이 구조물의 전 층에 동일하다고 가정하여 강성 행렬만 변수로 삼았기 때문에 강성행렬을 통하여 질량참여율이 어떻게 결정될지 예측할 수 있다. 즉 (a) 구조물의 경우 X축 이동과 Z축을 중심으로 회전하는 모드는 독립되어 있고, Y축 이동과 Z축을 중심으로 회전하는 모드 역시 독립되어 있을 것이다. 이러한 양방향 대칭축을 갖는 구조물은 두 가지 경우로 나눌 수 있다. 첫 번째는 $K_{XA} = K_{XB}$, $2K_{XA} = K_{YC}$ 인 구조물로서 대칭을 이루는 두 축의 강성 차이가 존재하지 않아 구조물의 양방향에 주기 차이가 나지 않는 것이며, 두 번째는 $K_{XA} = K_{XB}$, $2K_{XA} \neq K_{YC}$ 인 구조물로서 대칭을 이루는 두 축의 강성 차이가 존재하여 구조물의 양방향에 주기 차이가 나는 경우이다. 이러한 두 가지의 양방향 대칭 구조물의 동적특성의 예를 살펴보면 표 5의 양방향 대칭 구조

물의 질량참여율의 예와 같다. Z의 회전 질량참여율이 이동 모드에서 모두 0이므로 X축과 Y축으로 정확히 대칭을 이루어 구조물의 회전이 발생하지 않는다. 따라서 이 구조물은 양방향 대칭 구조물로 판단할 수 있는 것이다. 또한 이러한 구조물의 각 방향 1차 모드(여기에서는 1차와 3차 모드가 각각 이동 방향의 1차 모드가 된다.)의 주기를 비교하여 각 방향 1차 모드의 주기가 같을 경우에는 서로 직교하는 방향의 강성에 차이가 나지 않는 구조물에 해당하며 다를 경우에는 주축의 강성에 차이가 존재하는 구조물에 해당한다.

한방향 비대칭 구조물은 대칭축이 하나만 존재하는 경우의 구조물로서 하나의 축은 그 축을 중심으로 대칭을 이루며, 나머지 하나의 축은 편심이 존재하여 구조물의 이동과 회전이 종속적으로 발생한다. 그림 6의 (b) 구조물처럼 X축을 기준으로 기둥 A와 B의 강성이 같아 대칭을 이루며, Y축을 중심으로 기둥 C가 구조물의 질량중심에서 e 만큼의 편심이 발생하여 Y축의 이동모드가 발생할 때 필연적으로 Z축의 회전모드가 섞여서 발생하게 되는 경우가 한방향 비대칭 구조물에 해당한다. 즉 X축으로는 강성이 $K_{XA} = K_{XB}$ 를 이루며 동일한 거리만큼 떨어져 있기 때문에 질량중심과 강성중심이 일치하여 대칭을 이루며, Y축은 기둥 C가 질량중심으로부터 e 만큼 떨어져 있기 때문에 강성중심과 질량중심이 일치하지 않는 경우이다. 표 5의 질량참여율을 보면 1차 모드에서 Y방향 이동모드가 발생할 때 Z방향 회전 질



〈그림 6〉 구조물의 분류

〈표 5〉 구조물의 분류에 따른 질량참여율의 예

단위: %

모드 No.	양방향 대칭 구조물			한방향 비대칭 구조물			양방향 비대칭 구조물		
	X 이동	Y 이동	Z 회전	X 이동	Y 이동	Z 회전	X 이동	Y 이동	Z 회전
1	80.83	0.00	0.00	0.00	43.17	36.11	5.23	37.99	33.82
2	0.00	0.00	81.79	81.74	0.00	0.00	65.41	0.00	15.90
3	0.00	83.14	0.00	0.00	37.66	46.04	7.41	43.31	32.75

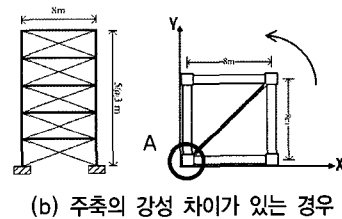
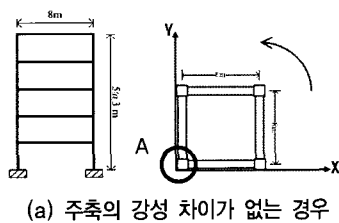
량참여율이 나타난 것으로 보아 Y축을 기준으로 구조물이 비대칭을 이루며, 2차 모드에서는 X방향의 이동질량참여율이 발생할 때 Z방향 회전 질량참여율이 0이므로 X축으로는 구조물이 대칭을 이루는 것을 판단할 수 있다.

수평 비정형의 건축구조물 중 가장 일반적인 경우는 양방향 비대칭 구조물이다. 그림 6 (c)처럼 X축 강성에 기여하는 기둥 A와 B의 강성이 같지 않아 X방향으로 이동모드가 발생할 때 필연적으로 회전 모드가 섞여서 나오게 된다. 또한 Y축의 강성에 기여하는 C기둥은 질량중심점으로부터 e만큼의 편심이 존재하므로 이 역시도 이동모드와 회전모드가 종속적으로 발생한다. 이러한 분류에 해당하는 구조물은 이동모드와 회전모드가 종속적으로 발생하기 때문에 표 5에 나타난 예처럼 모든 모드에서 Z방향 질량참여율이 발생한다. 또한 앞선 두 가지 경우의 구조물과 다른점은 X와 Y의 이동모드가 각각 독립적인 경우를 찾지 힘들다는 것이다. 표의 양방향 비대칭 구조물의 질량참여율을 예로 들면, 2차 모드에서 X와 Y의 이동질량참여율이 정확히 분리되어 나오지만 동시에 1차 모드에서 X와 Y의 이동질량참여율이 독립적으로 발생하지 않는다. 즉 이러한 구조물의 질량참여율을 보면 구조물의 주축을 정하기 힘들다는 판단을 할 수 있으며 이는 곧 해석좌표축과 구조물의 주축을 일치시킬 수 없다는 결론을 얻을 수 있다.

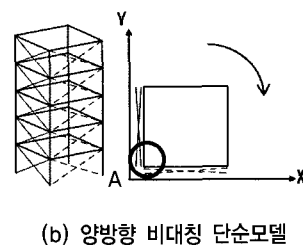
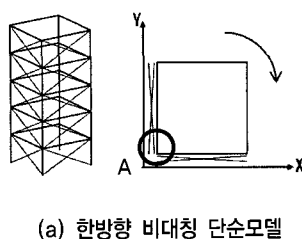
〈표 6〉 예제구조물 단면 정보

단위: mm

부재명	양방향 대칭	한방향 비대칭	양방향 비대칭
기둥	600×600	600×600	600×600
보	700×400	700×400	700×400
브레이스	-	200×200	200×200
			300×300



〈그림 7〉 양방향 대칭 단순모델



〈그림 8〉 비대칭 단순모델

5. 구조모델의 지진해석

기존의 보정계수 산정법에 의한 설계부재력과 본 논문에서 제안하고자하는 설계부재력을 비교하기 위하여 4장에서 분류했던 구조물의 동적특성과 유사한 모델을 선정하여 지진해석을 수행하여 보았다.

5.1 단순모델 개요

구조물의 동적특성을 파악하고 지진해석을 수행하기 위하여 아래 그림 7, 8과 같은 단순모델을 사용하였다. 그림 7의 (a)는 양방향 대칭 단순모델로 콘크리트 모멘트골조의 층고 3m의 5층, 스패 8m의 정방형 평면의 구조물이다. 그림 7의 (b)는 구조물에 강성 차이를 두기 위하여 브레이스를 설치하였다. 한 방향 비대칭 구조물은 스패 9m로 구조물의 양 면에 동일한 브레이스를 설치하였다. 양방향 비대칭 구조물은 한방향 비대칭 구조물의 한쪽 면의 브레이스를 다른 크기의 브레이스로 바꾼 것이다. 중력하중은 고정하중 4.41N/m²(0.45kgf/m²), 활하중 3.43N/m²(0.35kgf/m²)를 사용하였다.

구조물의 주축과 해석좌표축과의 관계를 살펴보기 위하여 그림 7, 8과 같은 초기의 구조물의 배치를 Case 1이라고 하고 이로부터 45°까지 구조물을 15°씩 그림에 표기된 방향으

로 회전하여 가면서 Case 2, 3, 4의 네 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

5.2 설계스펙트럼 및 지진하중

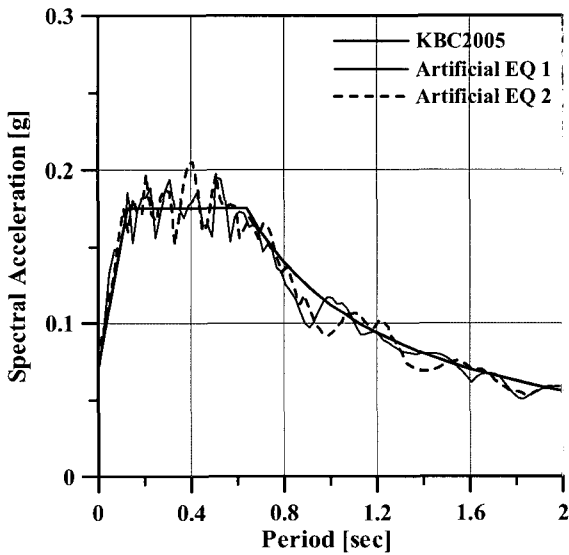
KBC2005의 설계스펙트럼을 적용하였으며 5%의 감쇠를 고려하여 지진해석을 수행하였다. 그림 9의 설계스펙트럼은 지진지역 1, 지반 종류 S_b , 중요도계수 1.0, 내진설계범주 D, 반응수정계수 3에 의한 것이다. 시간이력해석에 사용한 지진하중은 설계스펙트럼과 비슷한 수준의 인공지진하중을 만들어 사용하였다.

5.3 동적특성 및 밀면전단력

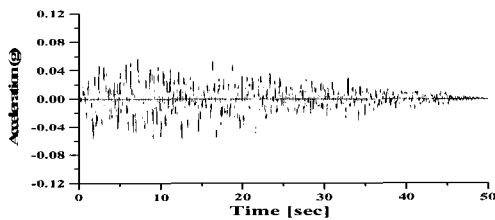
고유치해석을 통하여 얻은 단순모델의 동적특성을 표 7~11에 나타내었다. 양방향 대칭 구조물 중 주기 차이가 없

는 구조물은 표 7처럼 구조물의 주축이 특별하게 정해지지 않기 때문에 구조물의 회전량에 상관없이 질량참여율이 나온다. 이는 아주 특별한 경우로서 평면이 정방형을 하고 있으나 사실상 평면의 모양이 원(圓)인 구조물과 같다고 생각할 수 있다. 즉 구조물의 강성이 모든 방향으로 동일하여 구조물의 주축이 해석알고리즘에 따라 어느 방향으로든 발생할 수 있다는 것이다.⁽⁷⁾ 지진해석을 수행한 결과를 보면 표 8과 같다. 이러한 특성을 갖는 구조물은 응답스펙트럼해석 시 모드조합법으로 고려되는 SRSS법과 CQC법에 의하여 밀면전단력이 많이 달라진다. 그러나 CQC 모드조합법에 의한 밀면전단력은 구조물의 회전에 관계없이 일정한 값을 준다. 이는 구조물의 양방향에 주기차이가 발생하지 않으므로 모드조합시 사용되는 비대각 행렬의 값이 크기 때문에 생기는 것으로, 쌍으로 발생하는 모드에서 부호의 방향이 반대인 응답을 상쇄(Canceling)하는 효과에 의한 것이다. 따라서 CQC 모드 조합법을 사용하면 SRSS 모드 조합법을 사용하여 생긴 문제를 해결할 수 있다. 비대각 행렬의 영향이 작아지면 이러한 영향도 줄어들 것이므로 다음에 다룰 양방향 비대칭 구조물의 주기 차이가 있는 경우에는 CQC 모드 조합법을 사용하여 해석을 수행한다고 하여 우리가 원하는 가진 방향으로만 발생하는 최대의 응답을 얻기는 어려울 것이다.

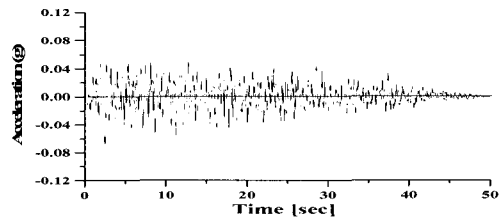
양방향 대칭의 주기 차이가 있는 단순모델은 앞선 경우의 단순모델에 브레이스를 설치하여 임의로 구조물의 주축을 정하였다. 이처럼 구조물의 주축이 정하여지면 표 9와 같이 구조물의 질량참여율은 구조물을 회전에 상관없이 일정한 방향으로 발생함을 확인할 수 있다. 또한 Case 4의 경우가 구조물의 주축과 해석좌표축이 일치된 경우임은 쉽게 판단할 수 있다.



〈그림 9〉 가속도 응답 스펙트럼



(a) Artificial EQ 1



(b) Artificial EQ 2

〈그림 10〉 인공지진하중

〈표 7〉 주기 차이가 없는 단순모델의 동적특성

단위: %

모드 No.	주기 (초)	Case 1(0°)			Case 2(15°)			Case 3(30°)			Case 4(45°)		
		X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전
1	0.65	80.83	0.00	0.00	53.26	27.57	0.00	47.34	33.49	0.00	32.44	48.39	0.00
2	0.65	0.00	80.83	0.00	27.57	53.26	0.00	33.49	47.34	0.00	48.39	32.44	0.00
3	0.59	0.00	0.00	81.78	0.00	0.00	81.78	0.00	0.00	81.78	0.00	0.00	81.78

〈표 8〉 주기 차이가 없는 양방향 대칭 구조물의 밀면전단력

단위: kN

해석법	가진 방향	Case 1(0°)		Case 2(15°)		Case 3(30°)		Case 4(45°)		
		F _x	F _y	F _x	F _y	F _x	F _y	F _x	F _y	
E.S.A	X	722.71	0.00	722.71	0.00	722.71	0.00	722.71	0.00	
	Y	0.00	722.71	0.00	722.71	0.00	722.71	0.00	722.71	
R.S.A	SRSS	X	581.25	54.20	422.33	402.80	421.64	403.52	413.64	411.70
		Y	54.20	581.25	402.80	422.33	403.52	421.64	411.71	413.64
	CQC	X	584.22	0.00	584.22	0.00	584.22	0.00	584.22	0.00
		Y	0.00	584.22	0.00	584.22	0.00	584.22	0.00	584.22
T.H.A	X	601.61	0.00	601.61	0.00	601.61	0.00	601.61	0.00	
	Y	0.00	601.61	0.00	601.61	0.00	601.61	0.00	601.61	

〈표 9〉 주기 차이가 있는 단순 모델의 동적특성

단위: %

모드 No.	주기 (초)	Case 1(0°)			Case 2(15°)			Case 3(30°)			Case 4(45°)		
		X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전
1	0.65	40.41	40.41	0.00	60.62	20.21	0.00	75.41	5.41	0.00	80.83	0.00	0.00
2	0.59	0.00	0.00	81.79	0.00	0.00	81.79	0.00	0.00	81.79	0.00	0.00	81.79
3	0.42	41.57	41.57	0.00	20.79	62.36	0.00	5.57	77.57	0.00	0.00	83.14	0.00

〈표 10〉 한방향 비대칭 단순모델의 동적특성

단위: %

모드 No.	주기 (초)	Case 1(0°)			Case 2(15°)			Case 3(30°)			Case 4(45°)		
		X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전
1	0.56	21.58	21.58	36.39	10.79	32.37	36.39	2.89	40.27	36.39	0.00	43.17	36.39
2	0.38	40.87	40.87	0.00	61.30	20.43	0.00	76.26	5.48	0.00	81.74	0.00	0.00
3	0.29	18.99	18.99	45.84	9.50	28.49	45.84	2.54	35.44	45.84	0.00	37.99	45.84

〈표 11〉 양방향 비대칭 단순모델의 동적특성

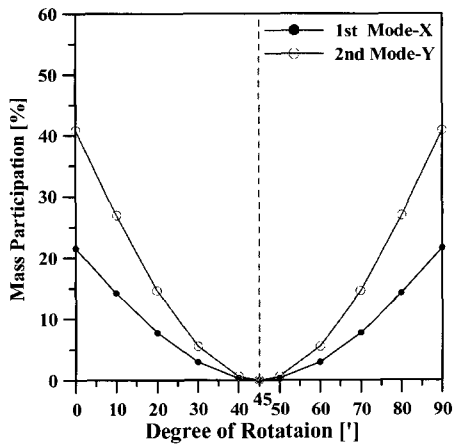
단위: %

모드 No.	주기 (초)	Case 1(0°)			Case 2(26°)			Case 2(45°)			Case 2(51°)		
		X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전	X이동	Y이동	Z회전
1	0.56	27.89	18.34	33.82	5.23	37.99	33.82	0.50	45.73	33.82	0.00	46.23	33.82
2	0.47	52.73	12.68	15.90	65.41	0.00	15.90	58.56	6.85	15.90	53.83	11.58	15.90
3	0.24	0.19	50.53	32.75	7.41	43.31	32.75	22.24	28.48	32.75	27.54	23.18	32.75

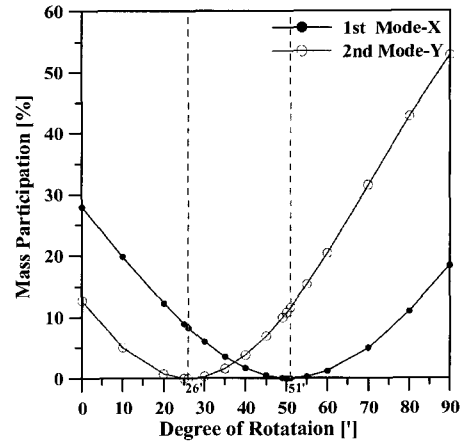
한방향 비대칭 단순모델의 고유치해석 결과를 표 10과 같이 얻었다. 초기에 Case 1과 같이 해석하여 얻은 질량참여율에서 2차 모드에서 회전과 이동질량참여율이 독립적으로 발생하였으므로 2차 모드가 생긴 방향으로 구조물의 강성중심과 질량중심이 한 축에 놓여 있다고 할 수 있다. 질량중심에 힘을 가하여도 강성중심이 한 축선에 놓여 있으므로 회전모드가 발생하지 않는다. 이와 반대로 직교하는 방향으로 힘을 가하면 질량중심과 강성중심 간에 편심이 존재하므로 이동모드와 회전모드가 필연적으로 섞여서 발생한다. 구조물의 좌표축의 설정에 따라 질량참여율이 어떻게 변화하는지 조금 더 자세하게 알아보기 위하여 단순모델을 Case 1의 좌표축으로부터 시계 방향으로 회전하여 고유치 해석을 수

행하여 그림 11의 (a)와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 속이 칠해진 동그라미의 선은 1차 모드의 X방향 이동모드를 기준으로 그린 것이며 속이 비어있는 동그라미의 선은 2차 모드의 Y방향 이동모드를 나타낸 것이다. 그래프를 통하여 알 수 있듯이 특정한 45°의 각에서 구조물의 1차 모드의 X방향 질량참여율이 0, 2차 모드의 Y방향 질량참여율이 0이 됨을 확인할 수 있다. 즉 서로 다른 모드에서 X와 Y의 질량참여율이 동시에 독립적으로 발생하는 각이 존재하며 그러한 각을 찾아 구조물을 회전시켜 해석하면 X와 Y가 서로 독립된 밀면전단력을 얻을 수 있다.

양방향 비대칭 단순모델의 고유치해석결과는 표 11과 같으며 그림 11의 (b)에서 볼 수 있듯이 1차 모드의 질량 참여



(a) 한방향 비대칭 구조물



(b) 양방향 비대칭 구조물

〈그림 11〉 회전에 따른 질량참여율의 변화

〈표 12〉 비대칭 구조물의 밀면전단력

단위: kN

해석법	한방향 비대칭 구조물				양방향 비대칭 구조물			
	가진 방향	F_x	F_y	가진 방향	F_x	F_y		
E.S.A	X	629.08	0.00	X	589.7	0.0		
	Y	0.00	629.08	Y	0.0	589.7		
R.S.A	Case 1(0°)	X	353.01	312.94	Case 1(0°)	X	405.6	189.7
		Y	312.94	353.01		Y	189.7	354.4
	Case 2(15°)	X	430.45	271.02	Case 2(26°)	X	426.6	154.5
		Y	271.02	336.02		Y	154.5	363.8
	Case 3(30°)	X	510.63	156.47	Case 3(45°)	X	395.3	202.8
		Y	156.47	367.94		Y	202.8	351.5
	Case 4(45°)	X	543.07	0.00	Case 4(51°)	X	381.6	217.5
		Y	0.00	387.52		Y	217.5	349.0

율이 0이 되는 각은 구조물이 51° 회전한 경우이다. 또한 2차 모드의 Y방향 질량참여율이 0이 되는 각은 26° 회전한 경우이다. 이러한 구조물은 어느 특정의 각에서 X방향의 질량참여율이 0이 되면서 동시에 Y방향의 질량참여율이 0이 되는 각이 존재하지 않는다. 즉 응답스펙트럼해석을 수행하면 X와 Y의 질량참여율이 종속적으로 발생하므로 필연적으로 가진방향 이외의 방향에서 응답이 발생하는 특성을 갖는다. 따라서 구조물의 주축을 정하기 어렵고 좌표축을 어떻게 설정하더라도 밀면전단력의 값은 모든 경우에 양방향 응답이 발생한다. 한 방향 비대칭 구조물과 양방향 비대칭 구조물의 해석결과인 표 12를 통하여 이를 확인할 수 있다.

5.4 보정계수의 적용에 따른 설계부재력

등가정적해석과 응답스펙트럼해석을 수행하여 얻은 밀면전단력을 가지고 보정계수를 산정하여 표 13에 나타내었다. 현재 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 산정법에 의한 보정계수를 S.U 1이라 하고 본 논문의 3장에서 설명한 최대

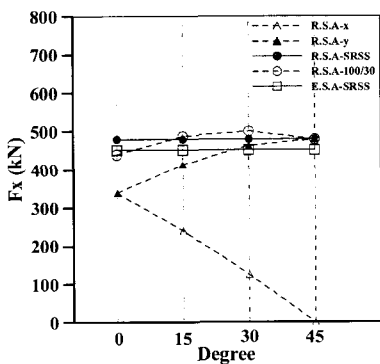
의 밀면전단력을 이용한 산정법에 따른 보정계수를 S.U 2라고 표기하였다. 표 13의 S.U 1을 보면 Case 4의 경우만이 등가정적해석에 의한 밀면전단력이 스펙트럼해석에 의한 밀면전단력 보다 큰 값이 나오므로 보정계수를 적용할 필요가 없다고 판단된다. Case 1은 Case 4에 비하여 28%나 큰 보정계수가 적용된다. S.U 2에 의한 보정계수는 어느 경우에도 응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력이 등가정적해석에 의한 밀면전단력보다 크기 때문에 보정계수를 적용할 필요가 없다고 판단된다. 그림 12를 통하여 보정계수를 적용하기 전의 부재력을 살펴보면 응답스펙트럼해석에 의한 부재력이 등가정적해석에 의한 부재력보다 크게 나타나 있다. 따라서 보정계수를 적용할 필요가 없다.

보정계수를 적용하기에 앞서 지진하중의 방향성을 고려하기 위한 방법으로 기준에 제시되어 있는 SRSS법과 100/30법을 이용하여 그림 8에서의 기둥 A에 대하여 축력(F_x)과 모멘트(M_y, M_z)를 그림 12에 나타내었다. 구조물의 회전에 상관없이 SRSS법을 사용하면 Case 1에서부터 Case 4까지

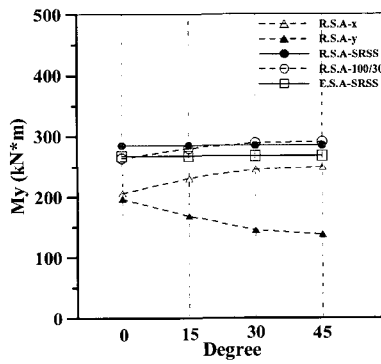
〈표 13〉 강성 차이가 있는 양방향 대칭 구조물의 보정계수의 산정

단위: kN

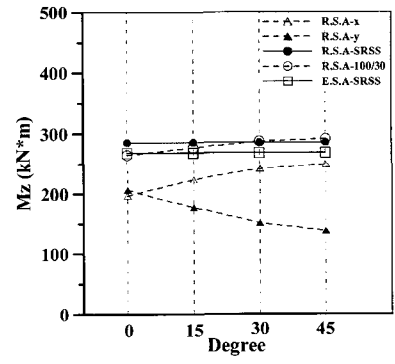
해석법	가진 방향		F _x	F _y	SRSS	
					1 단계	2 단계
E.S.A	X		553.20	0.00	553.20	782.34
	Y		0.00	553.20	553.20	
R.S.A (CQC)	Case 1(0°)	X	432.39	409.65	595.63	842.35
		Y	409.65	432.39	595.63	
	Case 2(15°)	X	471.38	354.77	589.97	842.35
		Y	354.77	485.42	601.24	
	Case 3(30°)	X	548.81	204.83	585.79	842.35
		Y	204.83	569.61	605.32	
	Case 4(45°)	X	584.25	0.00	584.25	842.35
		Y	0.00	606.80	606.80	
			보정계수의 산정			
			S.U 1		S.U 2	
R.S.A	Case 1(0°)	X	553.20 / 432.39 = 1.28		782.34/842.35=1.0	
		Y	553.20 / 432.39 = 1.28			
	Case 2(15°)	X	553.20 / 471.38 = 1.17			
		Y	553.20 / 485.42 = 1.14			
	Case 3(30°)	X	553.20 / 548.81 = 1.01			
		Y	553.20 / 569.61 = 1.00			
	Case 4(45°)	X	553.20 / 584.25 = 1.00			
		Y	553.20 / 606.80 = 1.00			



(a) 기둥 A의 축력(F_x)



(b) 기둥 A의 모멘트(M_y)



(c) 기둥 A의 모멘트(M_z)

〈그림 12〉 양방향 대칭 구조물의 SRSS와 100/30법에 의한 설계부재력

모두 동일한 설계부재력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 100/30법은 Case 별로 각각 다른 설계부재력을 준다. 100/30법이나 SRSS법이 값의 차이는 크지 않지만 Case 별로 동일한 설계부재력을 얻을 수 있는 SRSS법이 좀 더 합리적이라 판단할 수 있다.

그림 13을 보면 S.U 1에 의한 방법이 때에 따라서 필요 이상으로 부재를 과다 설계할 우려가 있음을 확인할 수 있다. 또한 구조물과 해석좌표축이 어떻게 설정되는지에 따라서도 설계값이 모두 변화한다는 문제점이 있음을 알 수 있다. S.U 2의 방법을 사용하면 구조물의 주축을 찾아 해석한

(Case 4) 후 S.U 1에 의하여 보정계수를 산정하여 설계부재력을 구한 것과 유사한 수준의 설계부재력을 모든 경우에 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 구조물과 해석좌표축이 어떻게 설정되는지에 관계없이 일정한 설계부재력을 얻을 수 있으므로 합리적인 방법이라 판단된다. 따라서 주축을 정확히 일치시켜 해석할 필요 없이 엔지니어 임의로 구조물의 주축과 해석좌표축을 설정한 후 해석을 수행하더라도 S.U 2에 의한 방법으로 설계부재력을 구한다면 어느 경우에도 동일한 설계부재력으로 설계가 가능하다.

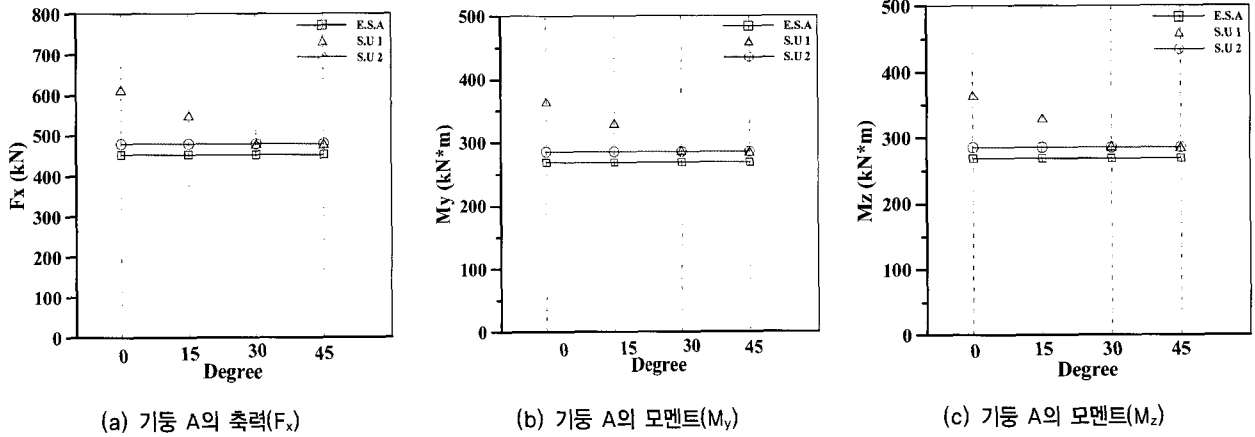
한방향 비대칭 구조물과 양방향 비대칭 구조물의 경우에

도 동일한 방법으로 보정계수를 산정하여 비교하여 보았으며 양방향 대칭구조물과 동일한 결론을 얻을 수 있음을 그림 14와 15를 통하여 확인할 수 있다. 특히 양방향 비대칭 구조물처럼 주축을 정하기 힘든 경우에는 본 논문에서 제시하는 S.U 2에 의한 방법을 사용하여 해석을 수행하는 것이 내진설계시 발생했던 좌표축의 설정에 따른 부재력의 변화로 인한 엔지니어의 혼란을 덜어줄 뿐만 아니라 경제적인

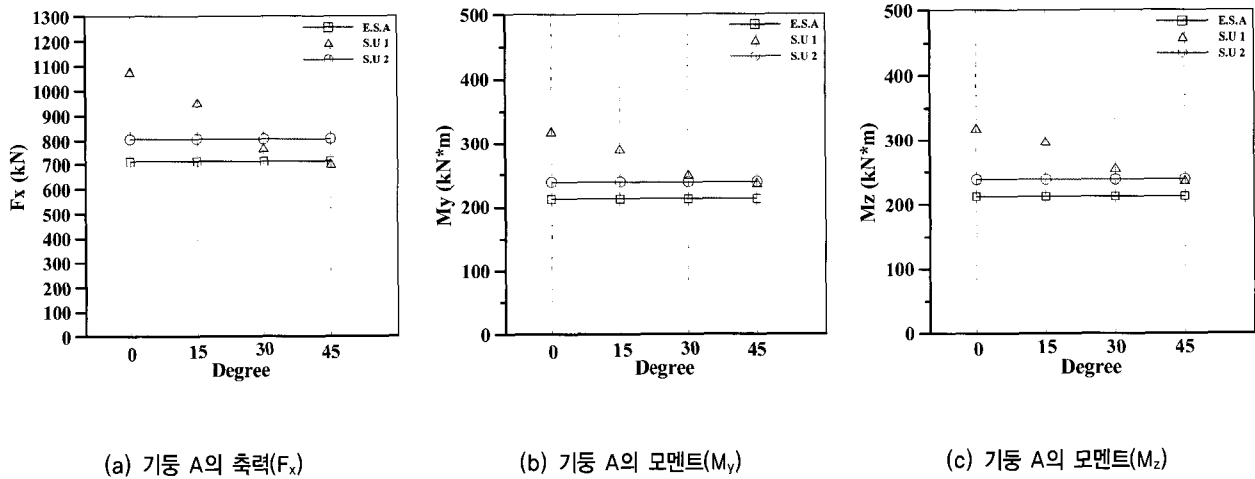
부재설계를 가능하게 하는 이점이 있다.

5.5 예제구조물의 지진해석

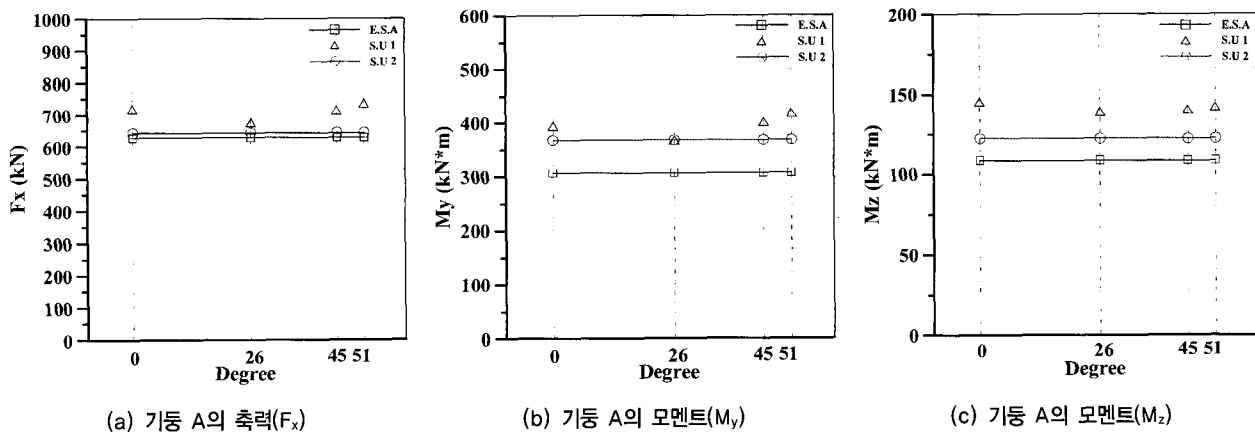
단순모델을 통하여 얻을 수 있었던 결론을 그림 16의 예제구조물을 시계 방향으로 15°간격으로 회전하여 결과를 확인하여 보았다. 표 14의 예제구조물의 동적특성을 통하여 회전모드가 이동모드와 모든 모드에서 서로 영향을 미치면



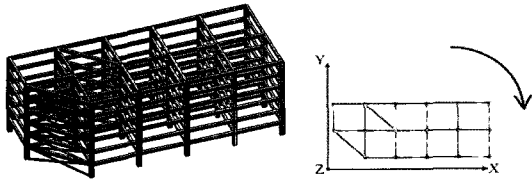
〈그림 13〉 양방향 대칭 구조물의 보정계수를 적용한 설계부재력



〈그림 14〉 한방향 비대칭 구조물의 보정계수를 적용한 설계부재력



〈그림 15〉 양방향 비대칭 구조물의 보정계수를 적용한 설계부재력



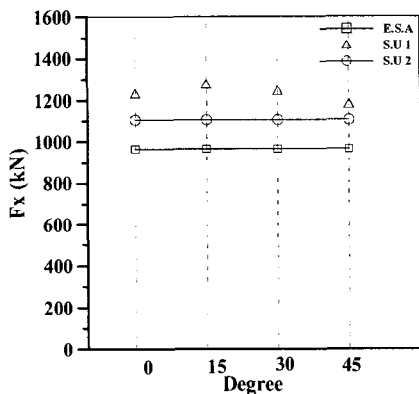
〈그림 16〉 예제구조물

〈표 14〉 예제구조물 동적특성

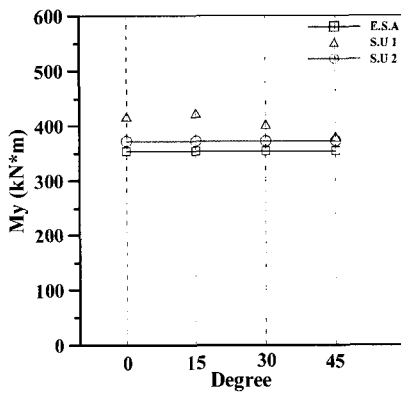
모드 No.	주기(초)	단위: %		
		X 이동	Y 이동	Z 회전
1	0.7584	20.22	58.46	1.22
2	0.6998	41.08	8.69	30.47
3	0.4906	19.59	13.10	49.34
4	0.2313	3.04	7.89	0.10
5	0.2148	5.25	1.51	4.12
6	0.1580	2.46	1.64	6.48

〈표 15〉 예제구조물의 밀면전단력 및 보정계수

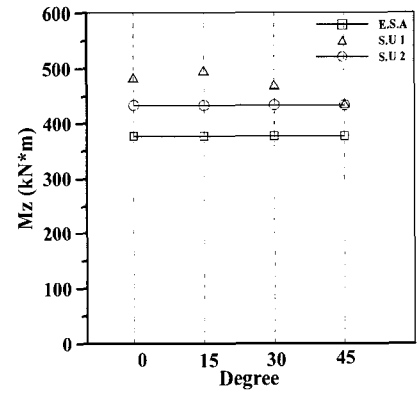
해석법	가진 방향		F _x	F _y	SRSS	
					1 단계	2 단계
E.S.A	X		2949.77	0.00	2949.77	4171.60
	Y		0.00	2949.77	2949.77	
R.S.A	Case 1(0°)	X	1964.61	1000.84	2204.85	3165.66
		Y	1000.84	2039.20	2271.57	
	Case 2(15°)	X	2020.72	1096.58	2299.09	3165.66
		Y	1096.58	1879.66	2176.15	
	Case 3(30°)	X	2192.36	911.06	2374.13	3165.65
		Y	911.06	1885.43	2094.01	
	Case 4(45°)	X	2358.54	506.76	2412.37	3165.66
		Y	506.76	1986.22	2049.85	
보정계수의 산정						
R.S.A	Case 1(0°)		S.U 1		S.U 2	
			X	2949.77 / 1964.61 = 1.50		
	Y	2949.77 / 2039.20 = 1.45				
	Case 2(15°)	X	2949.77 / 2020.72 = 1.46			
		Y	2949.77 / 1879.66 = 1.57			
	Case 3(30°)	X	2949.77 / 2192.36 = 1.35			
		Y	2949.77 / 1885.43 = 1.56			
	Case 4(45°)	X	2949.77 / 2358.54 = 1.25			
Y		2949.77 / 1986.22 = 1.49				



(a) 기둥 A의 축력(F_x)



(b) 기둥 A의 모멘트(M_y)



(c) 기둥 A의 모멘트(M_z)

〈그림 17〉 예제구조물의 보정계수를 적용한 설계부재력

서 발생하므로 양방향 비대칭의 구조물이라 판단할 수 있다. 양방향 비대칭 구조물의 경우 구조물의 주축을 좌표축에 어떻게 설정하더라도 X의 이동질량참여율과 Y의 이동질량참여율을 분리시킬 수 없다. 이를 확인하여 보기 위하여 구조물을 시계방향으로 15°씩 회전하여 지진해석을 수행하여 밀면전단력을 표 15에 나타내었다. 이를 이용하여 구한 보정계수 S.U 1과 S.U 2를 보면 S.U 1에 의한 보정계수는 Case 별로 각기 다른 값을 나타냄을 확인할 수 있으며 S.U 2에 의한 보정계수는 Case에 관계없이 모두 같은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. S.U 2에 의한 보정계수에 의하여 설계 부재력 역시 내진설계시 기준으로 하는 등가정적해석의 부재력에 가까운 값을 얻을 수 있으며 모든 경우에 일관된 설계 부재력을 얻을 수 있음을 그림 17을 통하여 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 지진해석시 구조물의 주축과 해석좌표축의 설정에 따라 구조물의 설계력이 달라지는 문제점을 해결하고자 하였다. 구조물을 수평강성의 차이에 따라 크게 세 가지로 분류하여 각각의 동적특성에 대하여 살펴보았으며 각각의 경우에 대하여 지진해석을 수행하여 밀면전단력의 특성을 살펴보았다. 해석좌표축의 설정에 관계없이 어느 경우에도 구조물이 동일한 설계값을 갖게 하기 위하여 새로운 방법의 보정계수 산정법을 제안하였으며 기존의 보정계수 산정법과 본 논문에서 제안한 보정계수의 산정법을 비교하여 보았다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 응답스펙트럼해석에 의한 밀면전단력은 해석좌표축에 구조물이 어떻게 배치되는지에 따라서 응답이 계속 바뀌었다. 이는 응답스펙트럼해석의 값이 모드의 조합에 의한 것이므로 구조물의 모드형상의 방향이 해석좌표축과 일치하지 않으면 해석좌표축의 X와 Y방향으로 응답이 분리되어 나오기 때문이다. 따라서 가진한 방향으로의 최대의 밀면전단력을 얻기 위해서는 구조물의 주축과 해석좌표축을 일치시켜 해석하거나, 구조물의 주축을 결정지을 수 없는 경우에는 분리된 X와 Y의 응답을 SRSS 조합함으로써 최대의 응답과 유사한 응답을 얻을 수 있다.
2. 일반적으로 많이 사용하고 있는 모드조합법은 SRSS법과 CQC법이다. 이 중 SRSS 법은 두 방향 기본진동 모드(구조물의 주축의 방향으로 생기는 각 방향 1차 모드)의 차이가 크지 않을 경우에 양방향의 응답을 준다. 따라서 두 방향의 주기차이가 나지 않는 구조물의 응답스펙트럼 해석시 CQC 모드 조합법을 사용하여 해석을 수행하는 것이 이러한 문제를 해결할 수 있다.
3. 내진설계범주 C나 D에서는 지진하중의 방향성을 고려하기 위하여 SRSS법이나 100/30법에 의하여 설계부재력을 산정하도록 하고 있다. 100/30 법의 경우는 해석좌표축에 구조물이 어떻게 배치되는지에 따라서 값이 조금씩 달라지지만 SRSS법의 경우에는 동일한 부재력을 얻을 수 있으므로 SRSS법을 사용하여 부재력을 산정하는 것이 조금 더 합리적이라 판단된다.
4. 지진하중의 방향성을 SRSS법에 의하여 고려하면 보정계

수를 적용하기 전의 부재력은 해석좌표축에 구조물이 어떻게 배치되는지에 관계없이 모두 동일하다. 그러나 보정계수의 적용 단계에서 문제가 생긴다. 일반적인 보정계수 산정법을 통하여 보정계수를 적용하여 설계부재력을 구하면 해석좌표축에 구조물이 어떻게 배치되는지에 따라 모두 다른 설계부재력이 구해진다. 따라서 하나의 건물을 설계하는데 각기 다른 설계가 되어 기준이 모호해진다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 보정계수의 산정법을 이용하여 설계부재력을 산정하면, 기존의 보정계수 산정법에 의하여 모든 방향의 지진하중을 고려하여 얻을 수 있었던 최적의 설계부재력을 손쉽게 구할 수 있다.

구조물의 설계시 발생하였던 문제점을 해결하기 위하여 수평의 비정형 건물을 위주로 연구하였다. 앞으로는 수직 비정형의 특성을 갖는 건물에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)마이다스아이티의 소프트웨어 지원과 교육 인적자원부의 BK21 “u-City 건설인력양성사업단” 과제의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. W. Smeby, A. Der Kiureghian, Modal Combination Rules for Multicomponent Earthquake Excitation, Earthquake eng. struct. dyn. Vol. 13, 1985. pp. 1-12.
2. E.L. Wilson, M.R.Button, Three-dimensional Dynamic Analysis for Multicomponent Earthquake Spectra, Earthquake eng. struct. dyn., Vol. 10, 1982, pp. 471-476.
3. E.L. Wilson, M.R.Button, Three-dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computer and Structures, Inc.Berkeley, CA, 2002.
4. E.L. Wilson and L.Suharwardy, A Clarification of the Othogonal Effects in a Three-Dimensional Seismic Analysis, Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 4, 1995, pp. 659-666.
5. 대한건축학회, 건축구조설계기준 2005, 대한건축학회 2005.
6. ANIL K. Chopra, Dynamics of Structures, Second Edition
7. 김태호, 이동근, 김대근, “모드의 방향이 불분명한 건축구조물의 지진해석,” 한국전산구조공학회 2002년도 가을 학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, Vol. 15, No. 2, 2002, pp. 513-520.