

가스시설물의 등가정적 해석에 의한 내진성능 평가

고재필, 홍성경, 김준호, 정석영
한국가스공사 연구개발원

The Estimation of earthquake-resistance for gas utility using Equivalent Static Analysis

J. P. Koh, S. K. Hong, J. H. Kim, S. Y. Jeong
Korea Gas Cooperation, Research & Development Div.

1. 서론

근래 국외 대형지진 발생의 빈번화 및 지진피해 정도의 대형화와 함께 한반도 지역도 지진에 대한 안전지대가 아니라는 연구결과가 확산됨에 따라, 이제 우리나라에서도 주요시설에 대한 엄격한 내진안전성 확보의 필요성에 대한 이론의 여지가 없다. 현재 자연재해대책법 제5장, 제34조에는 20개의 시설물을 내진설계 대상 법정시설물로 설정하고 이들 시설에 대하여 내진설계에 의한 내진 안전성 확보를 요구하고 있다. 내진설계기준은 시설물의 사회적, 경제적 중요성과 구조적 특성이 잘 반영될 수 있도록 설정되어야 한다. 즉 우선적으로 시설물별로 중요성과 특성에 따른 내진설계의 기본적인 원칙이 설정되고 이에 따라 적절한 해석 및 설계, 시공방법이 결정되어야 한다. 한국가스공사는 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)를 외국으로부터 수입하여 각 도시가스사로 공급하는 회사이다. 평택과 인천 및 통영에 있는 가스생산설비들 중 LNG 저장탱크는 원자력 발전소 기준의 내진설계가 적용되어 있다. 가스 생산설비 중 저장탱크 다음으로 중요한 시설로는 중앙조정실을 들 수 있다. 중앙조정실에서는 각종 설비의 조작 및 이상유무를 판단하고 조정하는 장비들이 갖추어져 있으므로 지진에 대한 내진설계가 더욱 중요한 곳이다. 그러나 현재 평택 중앙조정실의 경우 건물에 대한 내진설계가 적용되기 전에 설계된 건물로 지진에 대한 건물의 내구성이 어느 정도인지를 확신할 수 없다. 이러한 이유로 평택생산기지 중앙조정실의 내진성능을 점검하였고, 그 방법으로 건축물에 적용되고 있는 등가정적 해석법에 의한 내진성능을 평가하였다.

2. 등가정적 해석법에 의한 내진성능 평가

내진설계의 기본개념은 내진설계에 있어서 가장 근본적인 항목으로 이 기본개념에 따라 구조물에 요구되는 성능수준, 하중선정을 위한 기본적인 고려요소들이 결정되며, 해석 및 설계방법이 결정된다. 내진설계를 하기 위해서는 지반운동에 의해 구조물에 작용하는 지진하중을 산정하는 것이 중요하다. 지진이 자주 발생하는 곳에서는 지진기록이 있으므로 이를 그대로 지진하중으로 이용하면 되지만 우리나라의 경우, 지진기록이 전무하다시피 하므로 다른 방법으로 지진하중을 선택하여야 한다. 지진하중을 산정하는데 있어서 기본이 되는 요소인 지진위험도에 따른 지진구역의 분류와 이에 따른 가속도계수(또는 지역계수)의 구분 및 내진등급의 구분, 주요도의 구분 및 지반의 영향에 대한 고려방법 등에 대하여 각 시설물별 규정을 두고 있다.

2.1 등가정적 해석법의 정의

지진은 건물과 지진간의 접촉 부분인 기초를 전후로 진동하게 하여 건물에 작용한다. 건물의 중량은 구조체를 통해서 관성력을 구성하면서 지진력에 대해 저항한다. 등가정적 해석법(pseudo static analysis)은 지진력을 정적인 횡력으로 환산하여 정적 해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 대한 거동을 예측하는 방법으로 기본 진동 모드에 지배적인 영향을 받는 구조물의 거동이 탄성 범위내에서 일어나는 정형에 가까운 구조물에 적용된다. 여기서 말하는 정형구조물이란 인접한 부재의 강성이 비슷하며, 인접층의 강성과 질량에 급격한 차이가 없고 구조물이 평면 또는 입면상 대칭을 이루는 경우를 말한다. 등가정적 해석법은 구조물의 동적 특성을 고려하여 전체 중량에 비례하는 밀면 전단력을 구하고 이를 바탕으로 전단벽의 설계와 부재 응력 계산에 필요한 층지진 하중을 구한다.

2.2 건축 시방서에 의한 등가 정적 해석

(1) 내진 설계 대상 건축물

6층 이상의 건축물

31층 이상이거나 연면적이 10만 제곱미터 이상인 건축물 (단, 공동주택 및 공장 제외)

(2) 밀면 전단력의 산정

밀면 전단력은 지진 하중을 등가의 정적 하중으로 환산하였을 때 건물의 밀면 상부에 작용하는 지진 하중의 총합으로 다음 식에 의해 산정한다.

$$V = \left(\frac{AIC}{R} \right) W \text{ ----- (1)}$$

여기서, V : 밀면 전단력 A : 지역 계수 I : 중요도 계수 C : 동적계수

R : 반응 수정 계수 W : 건축물의 총 중량

여기서 밀면이라 함은 지진의 영향이 구조체에 직접 전달되는 위치로써 다음 그림에서 표시된 바와 같이 정의된다.

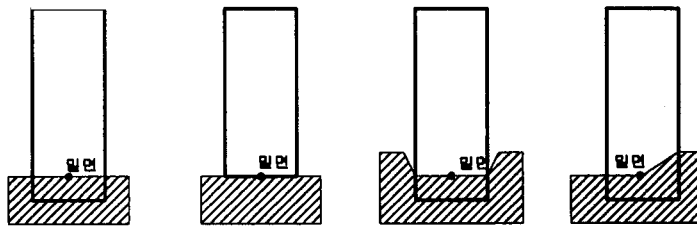


그림 1 밀면의 위치 설정의 예

(3) 지역 계수(A)

표 1 지역계수

구 분	해당 지역		지역 계수(A)
지진 구역1	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시	0.07
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부	
지진 구역2	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.11

강원도 북부 : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

강원도 남부 : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

전라남도 북부 : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양, 나주, 여천, 여수, 순천

전라남도 남부 : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포

(4) 중요도 계수(I)

지진이 발생하였을 때 피해의 복구 및 확대 지방에 필요한 용도의 건축물과 경제적, 사회적으로 피해의 영향이 큰 건축물은 일반 건축물에 비하여 내진 안정성을 높이고 일반 건축물에 대해서는 경제적인 부담을 줄이기 위하여 중요도 계수를 적용하고 있다.

표 2 중요도계수

구분	내 용
특급	지진피해 복구가 필수적인 시설 - 병원, 소방서, 방송국, 발전도, 변전소, 위험물 저장소 등
1급	다수의 사람들이 피해를 입을 시설 관람집회시설(극장, 실내체육관), 대규모 판매시설(백화점, 상가) 대규모 숙박시설(호텔, 모텔) 대규모 주거시설(아파트, 연립주택, 오피스텔)
2급	그 외의 시설물

(5) 반응수정계수(R)

내진 설계의 기본적 원칙은 매우 드물게 발생하는 강한 지진에 대하여 구조물의 각 부에서 구조적 피해가 발생하더라도 건물이 붕괴되지 않을 정도로 하고 가끔 발생하는 지진에 대해서는 구조적인 피해를 억제하여 내진 안정성과 내진 경비의 최적 수준을 유지하도록 하기 위하여 반응 수정 계수를 사용한다. 반응수정 계수는 연성이 클수록 큰 값을 가지게 되는데 이로 인해 지진 하중은 작아진다. 따라서, 연성이 큰 구조물에 대해서는 지진에 대한 저항성이 우수하다고 판명되어 지진 하중을 낮추어 선정한다. 구조 방식에 따른 반응 수정 계수는 다음과 같다.

표 3 반응수정계수

구조 방식		반응수정계수(R)	
내력 방식	전단벽의 모든 수직 하중과 횡력을 부담	3.0	
	모든 수직 하중과 횡력을 받는 전단벽의 양단부를 기둥과 같은 배근법으로 보강한 경우	3.5	
모멘트 연성 골조 방식	철골구조	6.0	
	철근 콘크리트 구조	4.5	
이중 골조 방식	모멘트 연성골 조가 전단벽 또는 가세 골조가 조합되어 수직 하중 및 횡력을 건축물 수직 요소의 강성비에 따라 부담하는 경우	철골 구조	6.0
		철골 콘크리트 구조	5.0
	전단벽 또는 가세가 전 횡단력을 부담하는 경우	4.0	
기타 골조 방식		3.5	
고가 구조 등		2.0	

(6) 동적 계수(C) 및 진동 주기(T)

동적 계수의 값은 다음 식에 의하여 산정한다.

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서, T : 건축물의 기본 진동 주기,

S : 지반계수

등가정적 해석법에서 지진 하중의 산정에 있어서 구조물의 동적 특성을 반영하는 기본 진동 주기를 구하는 방법으로써 구조 방식에 따라 3가지의 경험식을 규정하고 있다.

① 동적계수가 1.75를 초과할 경우 1.75를 적용

② 진동주기 산정식 : UBC-94의 $T = C_t (h_n)^{3/4}$ 에서 C_t 계수 인용

$$T = 0.0853 (h_n)^{3/4} \quad \dots \text{ ① : 모멘트 골조인 경우의 STEEL}$$

$$T = 0.0731 (h_n)^{3/4} \quad \dots \text{ ② : 모멘트 골조인 경우의 RC}$$

$$T = 0.0488 (h_n)^{3/4} \quad \dots \text{ ③ : ①, ②를 제외한 구조}$$

③ 콘크리트 전단벽 구조인 경우

$$T = 0.0743 (h_n)^{3/4} / \sqrt{A_c} \quad , \quad A_c = \sum A_e [0.2 + (D_e/h_n)^2] \quad , \quad D_e/h_n \leq 0.9$$

A_e : 1층에서 지진하중 방향에 평행한 전단벽의 전단 단면적 (m²)

D_e : 1층에서 지진하중 방향에 평행한 전단벽의 길이 (m)

(7) 지반 계수(S)

구조물의 진동수 변화에 큰 영향을 미치는 요소로써 지반의 성질에 따라 결정되며, 이때 지반 상태의

결정은 원칙적으로 지하 기초 저변을 기초로 한다. 지반의 강성이 작을수록 지반 운동의 증폭 효과가 커지게 된다. 즉 연약 지반일수록 지반 가속도가 커진다.

지반 계수의 값은 다음과 같다.

표 4 국내 규준의 일반 계수(지반계수)

지반 종별	지반 1	지반 2	지반 3	지반 4
지반 계수(S)	1.0	1.2	1.5	2.0

지반의 종류는 다음과 같이 정의한다.

표 5 지반종류에 따른 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험(N치)	비배수 전단강도(kPa)
I	경암지반, 보통암 지반	760 이상	-	-
II	매우조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
III	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
IV	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
V	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

(8) 건축물의 유효 중량 (W)

규정에 의한 건축물의 전(全)중량은 밀면 상부 자중의 합계를 사용하되 건축물의 골조 구조에 정착된 건축 설비의 하중을 포함한다. 창고 또는 그와 유사한 용도의 건축물에서 적재 하중의 25%를 가산하는 것으로 한다.

(9) 층 지진 하중의 선정

층 지진 하중은 밀면 전단력을 각 층으로 분배함으로써 구할 수 있으며, 다음 식으로 산정한다.

$$F_x = \frac{h_x^k W_x}{\sum_{i=1}^n h_i^k W_i} V \quad \text{----- (3)}$$

$$T \leq 1 \Rightarrow k = 1.0 \text{sec}, 1.0 < T \leq 2.0 \Rightarrow k = 1.5 \text{sec}, T > 2.0 \Rightarrow k = 2.0 \text{sec}$$

등가 정적 해석법에는 지진에 의한 관성력을 등가의 정적 하중으로 환산하여 이용하게 되는데 이때에 여러 개의 진동 모드의 영향을 고려하게 되면 각 층의 지진 하중은 각 층의 중량에 비례하게 되고 높은 층일수록 지진 하중은 커진다.

(10) 층 전단력의 선정

각 층에서의 층 전단력은 그 층의 상부에 작용하는 지진의 합으로 구할 수 있다.

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad \text{----- (4)}$$

V_x = x층의 층전단력, F_i = i층의 층지진하중

(11) 전도 모멘트의 산정

건축물의 각층에 작용하는 층 지진하중은 건축물이 지진에 의해 흔들릴 때 각층에 작용하는 층 전단력의 최대치를 고려하여 다음과 같이 산정한다.

$$M_x = \rho \sum_{i=x}^n F_i (h_i - h_x) \quad \text{----- (5)}$$

M_x : 층의 전도 모멘트, F_i : i 층에서의 층 지진하중

h_i, h_x : 밑면에서 i, x층 까지의 건축물의 높이, ρ : 감소계수

상부의 층수가 적은 건축물 상부의 층에서는 감소 계수를 1.0으로 하여 전도 모멘트를 감소시키지 않는다. 기초의 설계를 위하여 전도 모멘트를 사용할 경우에는 건물의 높이에 관계없이 감소 계수를 0.75로 선택해도 좋다.

(12) 층간 변위의 산정

지진 하중을 산정할 때에는 구조물의 비선형 거동을 고려하여 반응 수정 계수 R을 나눈 값에 사용하기에 실제로 예상되는 층변위, 층간변위를 산정하기 위해서는 반응 수정 계수를 곱해 준다.

층간 변위는 층의 주두와 주각에서 생기는 수평변위량의 차이로써 그 층의 층고의 0.015배를 초과할 수 없으며 변위량은 다음 식에 의해 산정한다.

$$\delta_x = R\delta_{xe} \quad \text{----- (6)}$$

여기서, δ_x : x층의 수평 변위량, δ_{xe} : 탄성해석에 따라 구한 x층의 수평변위량

이 밖에 수평 비틀림 모멘트의 산정에 대하여 살펴보면 수평 비틀림 모멘트는 건축물의 중심과 강심간의 편심에 의한 비틀림 모멘트와 우발 비틀림 모멘트의 합으로 한다고 규정되어 있으며, 비틀림 모멘트는 층단력과 편심과의 곱으로 나타내며, 우발 비틀림 모멘트는 층단력과 해석 방향에 직각인 평면 치수의 5%에 해당하는 우발 편심의 곱으로 나타낸다. 질량의 중심이 건물 평면의 중심과 일치하더라도 구조물의 강성이 대칭이 아니면 건물은 뒤틀림을 받게 된다. 3차원의 해석 모델을 사용할 경우 각 층에 편심을 가진 지진 하중을 작용시키거나 편심과 지진 하중의 곱인 비틀림 모멘트 증가량을 작용시킴으로써 비틀림 효과를 고려한다.

3. 한국가스공사 평택생산기지 중앙조정실의 내진성능 평가

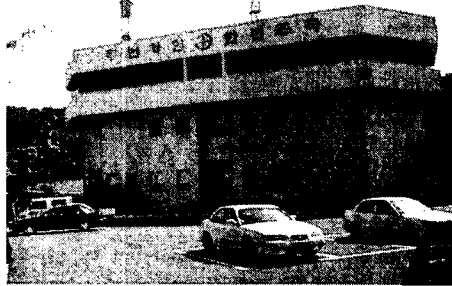


그림 2 평택 중앙조정실 건물 정면

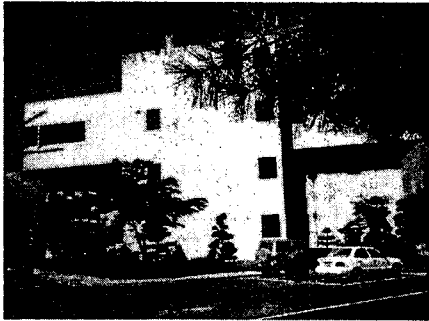


그림 3 평택 중앙조정실 건물 후면

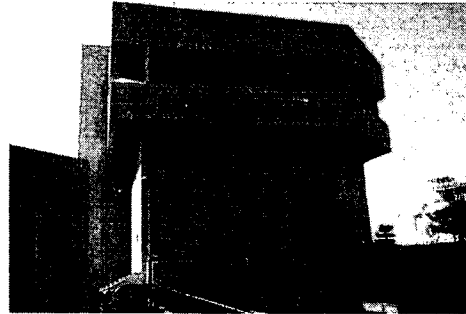


그림 4 평택 중앙조정실 건물 측면

3.1 구조물의 내진성능 평가조건

- 가. 형식 : 철근 콘크리트 슬래브 라멘 구조
- 나. 규모 : 지하 2층, 지상 3층
- 다. 지역계수 : 지진구역 1 ($A=0.11$)
- 라. 중요도계수 (I) : 1
- 마. 지반 계수 (S) : 지반Ⅲ 1.5
- 바. 반응수정계수 : $R=4.5$
- 사. 해석 방법 : 등가 정적 해석법

3.2 각 층별 유효중량 산정

표 6 각 층별 유효 중량

	2층	3층	옥상(옥탑포함)
슬래브	153	153	189
기둥	49.5	49.5	10.6
보	149.6	171.6	191.5
상재하중(장비)	10.7	7.3	1.0
조적벽	118	50.9	18
판넬	5.6	12.4	
계	486.4	444.7	410.1

- 건물의 전체 유효중량

$$W = 1341.2 \text{ tf}$$

3.3 밀면 전단력의 산정

- $V = \left(\frac{AIC}{R} \right) W$

- 주기 산정

$$T = 0.0731(h_n)^{3/4} = 0.0731 \times (14.4)^{3/4} = 0.54037$$

- 동적 계수 산정

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} = 1.70 \leq 1.75 \quad \dots \quad C = 1.7$$

$$\therefore V = \left(\frac{0.11 \times 1.0 \times 1.7}{4.5} \right) \times 1341.2 = 55.73 \text{ tf}$$

- 건물 높이에 따른 밀면 전단력의 분배

$$F_x = \frac{h_x^k W_x}{\sum_{i=1}^n h_i^k W_i} V$$

그러므로 층 지진하중은 다음과 같다.

$$F_1 = 7.00 \text{ tf}$$

$$F_2 = 18.09 \text{ tf}$$

$$F_3 = 30.64 \text{ tf}$$

표 7 A값의 변화에 따른 각층의 밀면 전단력 및 층 지진하중 (단위 : tf)

A	밀면 전단력	F1	F2	F3
0.10	50.67	6.36	16.45	27.86
0.11	55.73	7.00	18.09	30.64
0.12	60.80	7.63	19.73	33.43
0.13	65.78	8.27	21.38	36.22

4. 구조해석

평택 중앙조정실의 내진성능 평가를 위하여 등가정적해석 방법을 이용하였고 구조해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 Nastran을 이용하여 구조해석을 수행하였다.

4.1 건물의 모델링

아래 그림에서 보는 바와 같이 평택 중앙조정실은 보와 기둥을 Beam 요소로, 슬래브는 Shell 요소로 모델링하였다.

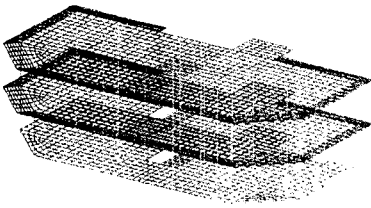


그림 5 평택 중앙조정실 model(1)

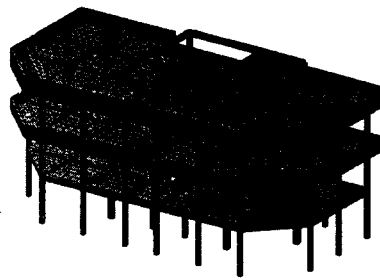


그림 6 평택 중앙조정실 모델(2)

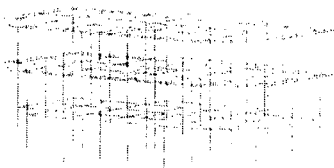


그림 7 beam model

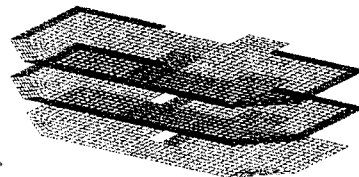


그림 8 shell model

4.2 장비 하중 모델링 및 등가정적 지진하중

평택 중앙조정실 내에는 각종 장비들이 설치되어 있고, 중량이 비교적 무거운 것들이므로 이러한 무게를 고려하기 위해서 각층에 있는 장비들을 조사하고 분포하중으로 모델링하였다. 각 층의 하중은 표 6에서와 같이 장비 및 건물의 중량을 분포하중으로 모델링 하였다. 등가정적 지진하중은 3.3절의 계산을 통한 각층의 지진하중을 표 7에서와 같이 각 층별로 하중을 모델링하였다.

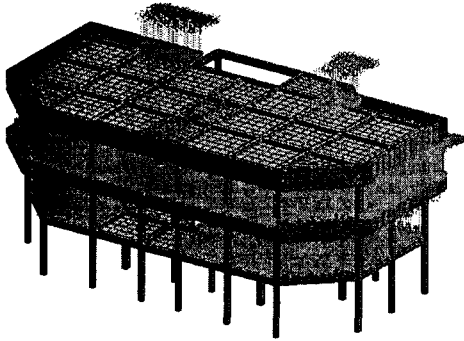


그림 9 분포하중 모델링

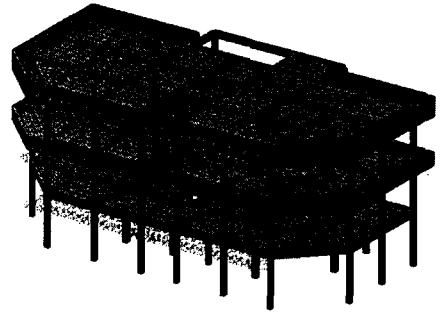


그림 10 정적지진하중 모델링

4.3 건물의 응력 및 변위

구조해석 시 지진하중을 등가정적 해석법으로 산정하여 정적 하중으로 재하하여 실시하였는데 응력과 변위는 다음과 같다. 실제지진에 대한 지지는 기둥들이 대부분 담당하기 때문에 그림 11에서는 Beam으로 모델링된 기둥에 대한 응력과 변위만을 나타내었다. 그림 12에서는 지진하중에 의한 건물의 전후 변위를 나타내었고 이 수치도 내진성능을 평가하기 위한 자료로 이용된다.

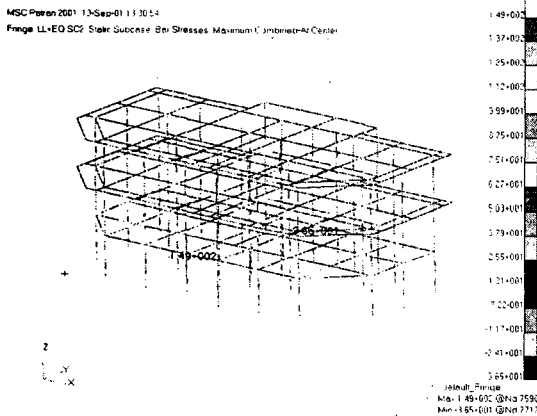


그림 11 기둥 및 보의 응력분포

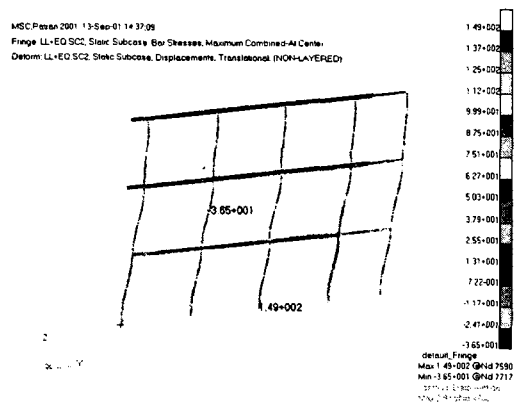


그림 12 건물의 전후 변형

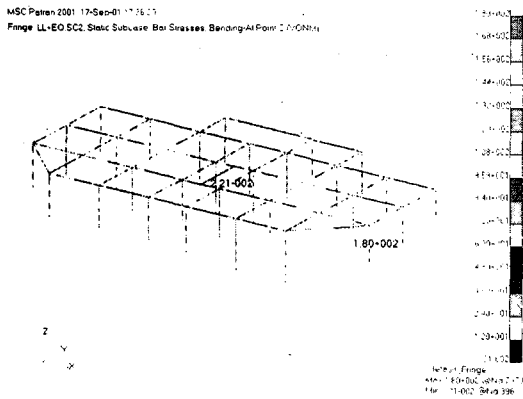


그림 13 1층에서의 기둥 보의 응력

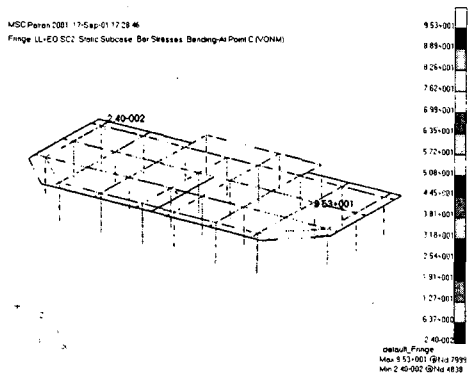


그림 14 2층에서의 기둥 및 보의 응력

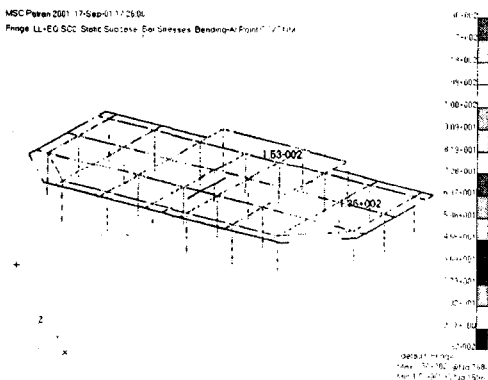


그림 15 3층에서의 기둥 및 보의 응력

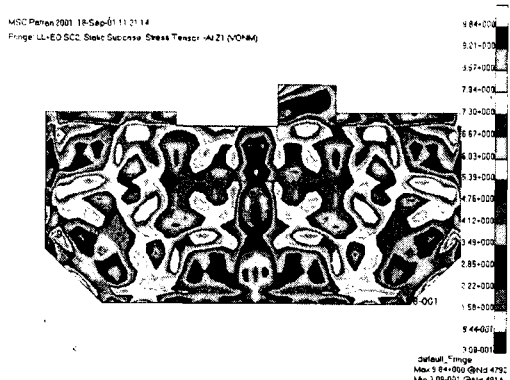


그림 16 1층 슬래브의 응력

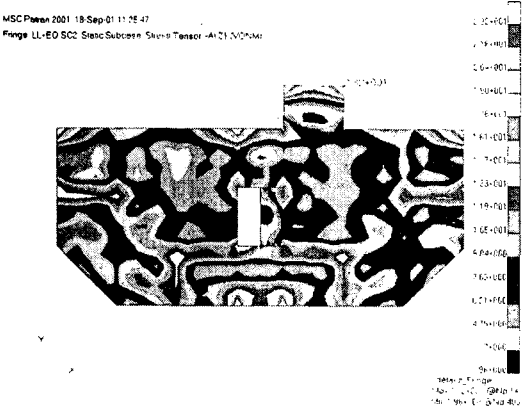


그림 17 2층 슬래브 응력

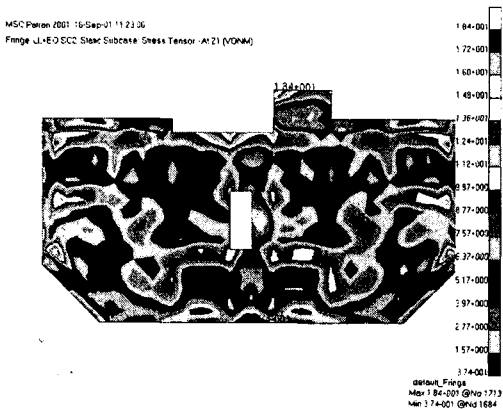


그림 18 3층 슬래브 응력

4.4 단면력 검토 및 안전성 평가

등가정적해석을 통해 구한 층 지진하중을 대상 구조물에 재하하여 구조해석을 수행한다. 이때 내하력, 처짐, 그리고 층간 변위를 비교하여 가장 먼저 허용치를 초과하는 것에 대한 지역계수를 구조물의 내진 성능으로 한다. 본 연구에서는 구조해석 및 구조물의 안전성을 평가하기 위하여 현장실측을 통해 콘크리트의 압축강도, 실제 구조물의 치수, 철근의 간격 등을 실측하여 사용하였다. 실측한 그 외의 치수들은 설계도면에 준하여 평가하였다.

(1) 휨 강도 검토

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0.85 \times f_{ck} \times b}$$

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Frame N.	구조해석 결과 (t · m)	휨강도(ϕM_n)	판정	비고
237	5.80	20.40	만족	
732	7.09	35.46	만족	
795	6.96	17.34	만족	
1141	5.50	22.84	만족	

(2) 전단강도 검토

$$S_n = 0.53\sqrt{f_{ck}}bd$$

Frame N.	구조해석 결과 (t)	전단강도(ϕS_n)	판정	비고
822	10.56	15.30	만족	
1163	5.43	9.00	만족	
1165	6.12	15.30	만족	

(3) 허용 휨 압축응력 검토

$$f_a = 0.4f_{ck} = 0.4 \times 216.6 = 86.64 \text{ kg/cm}^2 \quad (\phi S_n)$$

구 분	구조해석 결과 (kg/cm ²)	휨 압축 응력(f_a)	판정	비고
1층 슬래브	17.58	86.64	만족	
2층 슬래브	32.52	86.64	만족	
3층 슬래브	27.93	86.64	만족	

5. 결론

평택생산기지 중앙조정실에 대한 내진 성능을 평가하는데 있어서 내하력과 처짐을 비교하여 가장 먼저 항복하는 것을 구조물에 대한 내진성능으로 평가하였다. 이 결과 A값이 0.13 이상일 때부터는 보부재에서 지진하중의 단면력이 내하력보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이상과 같은 내용으로 볼 때 내진설계 되어있지 않은 중앙조정실은 현재의 시방서 규정의 내진 1등급에 충분히 만족하며 지역계수 0.13까지는 안전하다고 볼 수 있다.

- (1) 구조물에 지진하중(지역계수(0.13), 중요도계수(1), 지반계수(1.5), 반응수정계수(4.5))을 고려했을 경우, 건물에 발생하는 최대응력은 32.52kg/cm²이었는데 이 응력값은 직접 측정된 콘크리트 평균 추정 허용강도 86.64kg/cm² 보다 작게 산출되었다. 따라서 지진하중을 고려하더라도 구조적인 안전성은 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- (2) 해석에서도 알 수 있듯이 1층 기둥에서 최대 응력(32.52kg/cm²)이 발생하고 있다.
- (3) 각 층의 슬래브 굽힘응력은 모두 안전한 값을 나타내고 있고 2층 슬래브에서 최대 굽힘응력이 발생하는 것은 무거운 장비가 2층에 설치되어 있기 때문으로 판단된다.
- (4) 향후 연구로는 시간이력해석을 통하여 보다 정확한 구조물의 내진성능 평가방법을 수립할 계획이다.

참고문헌

1. "Dynamic of Structures", Clough & Penzien, McGraw Hill, 1993
2. "Dynamic of Structures - Theory and Application to Earthquake Engineering" Chopra, prentice Hall 1995.
3. "Structural Dynamics - Theory and Computation", Paz, VNR, 1991
4. "지중구조물의 내진설계" 한국지진공학회 제3회 기술강습회 교재 1999
5. "철근콘크리트구조물의 내진해석 및 설계" 한국전산구조공학회 2000
6. "MSC/NASTRAN v7.0 user manual" MacNeal-Schwendler 2000
7. "구조물의 내진설계" 한국전산구조공학회 2000