

LNG 비축 탱크 구조물의 내진 / 면진 설계와 해석

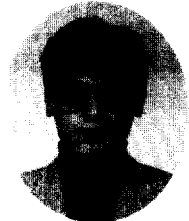
Design and Analysis of Seismically Isolated Structure in LNG Storage Tank



최형진*



양경택*



김두훈**

1. 서론

1.1 일반사항

LNG 저장탱크와 같은 특수구조물은 지진동의 자연재해에 의해 구조물이 손상을 입을 경우 막대한 피해가 예상된다. 따라서 외부의 자연하중에 대해 구조물을 보호하기 위하여 구조물의 동적거동을 해석하고 이를 이용하여 외력에 의한 구조물의 피해를 최소화 하기 위한 설계기법이 절실히 요구되고 있다. 이를 위하여 국내에서도 고층건축물 및 교량구조물에 내진설계 기법이 도입되고 있으나 에너지 비축기지와 관련된 탱크구조물의 경우에는 막대한 기술료를 지불하며 외국의 설계기술에 의존하고 있는 실정이다.

본 고에서는 기존의 자료조사를 통하여 정리된 한반도의 지진특성과 함께 탱크구조물의 동적해석 및 내진설계 기술의 예로서 대림산업(주)에서

현재 시공중인 인천 LNG 인수기지의 내진설계를 기본으로 기술하였으며, 지진에 의한 피해를 줄이기 위한 면진베어링의 필요성능 평가에 관하여 기술하고자 한다.

1.2 한반도 지진의 특성

일반적인 지진이론에 비추어 한반도의 상황을 살펴볼 때, 한반도에서는 20세기 중엽부터 활발한 지진활동을 남부지역과 서부지역에서 관측할 수 있는데, 이러한 현상을 지진에너지의 축적과 방출 관계로 설명하면 200여년의 지진휴지기동안에 축적된 탄성변형 에너지가 최근에 방출되고 있는 것이다.⁽¹⁾

내진설계를 목적으로 각 구역의 진도를 결정할 때 어느 기간동안에 어느정도의 발생확률을 갖는 진도를 설계진도로 하는가가 매우 중요하다. 일반 구조물에서 내진설계를 목적으로 사용되는 진도는 50년 이내에 비초과 확률이 90%인 진도이다. 한반도의 진도-빈도 관계곡선은 그림 1에 나타낸

* 대림산업(주) 기술연구본부
** 유니손산업(주) 기술연구소

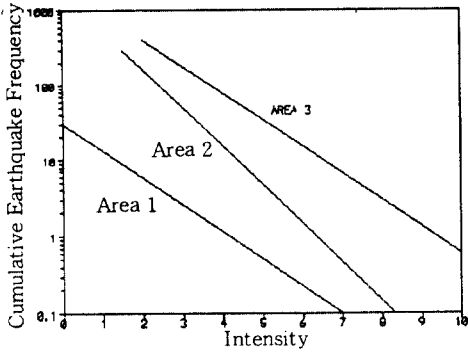


그림 1 한반도 진도-빈도 관계(1905~1985)⁽²⁾

것과 같으며 이는 10,000km²의 면적에 재래기 500년을 적용한 경우이다.

설계진도가 결정되면 이로부터 내진설계에 직접적으로 필요한 최대지반가속도를 진도-최대가속도 관계식으로 산출할 수 있으며 이와같은 방법으로 얻어진 한반도에서의 각 지진 위험 구역에 대한 일반 구조물의 최대 지반가속도는 구역 1에서 0.03g, 구역 2에서 0.10g 그리고 구역 3에서 0.20g가 산정된 바있다.⁽²⁾

1.3 인천 LNG 인수기지

본 고에서는 현재 인천에 건설되고 있는 LNG 인수기지를 모델로 설정하여 내진설계기법을 적용하고 그 타당성을 검토하는 방법에 대하여 기술하였다. 기본적으로 탱크모델 구조물은 횡방향 지진력에 대한 충격완화를 위한 제진재를 포함한 LNG비축탱크의 응답스펙트럼 해석법에 중점을 두었다.

본 고의 대상이 되는 탱크 구조물은 이중벽체형(double wall type)으로 설계되었으며 설계목적 수준의 개요는 표 1과 같다.

표 1 설계목적수준⁽³⁾

ITEM	TARGET	
Net Capacity	100173 m ³	
Maximum Boil Off rate	0.075 wt% / day	
Operating Pressure	maximum	0.250 barg
	minimum	0.050 barg

일반적으로 에너지 비축용의 탱크구조물의 상부는 돔, 벽체, 저판 그리고 기초판으로 구성되어 있으며 본 구조물은 진공벽체형이므로 외측탱크와 내측탱크의 두부분으로 나누어져 있다. 내측탱크는 9%의 니켈을 포함한 강재로 그리고 외측탱크는 프리스트레스트 콘크리트 벽체로 설계 되었으며 돔은 강재를 포함한 콘크리트와 알루미늄 서스펜더로 구성되어 있다.

표 2 구조물의 부분별 개요⁽³⁾

부 분	형 태	높 이	비 고
돔	Dome	-	· 내측: R=70.3m, t=45cm, · 외측: R=∞, t=80~45cm
외측탱크	실린더	32.3m	· 16.10m 이상: t=55cm · 16.10m 이하: t=55~100cm
내측탱크	실린더	31.0m	· 최하부: t=22mm · 최상부: t=10mm
기 저 판	원판	1.00m	· R=31.5m
제 진 재	원주	132mm	· R=500mm, 392개
Pedestal	사각주	1.5m	· 단면: 1.0×1.0m
파일기초	강관군	58m	· 535개

표 3 구성재료의 물성치⁽³⁾

재 료	Modulus (MPa)	포아송비	단위중량 (kNs ² /m ³)	감쇠비 (%)	
콘크리트	벽체	21000 (Young's)	0.2	2.548	7.0
	기타	31000 (Young's)	0.2	2.548	7.0
강 재	210000 (Young's)	0.3	8.002	2.0	
LNG	1.000 (bulk)	-	0.480	0.5	
제 진 재	0.8~1.6 (shear)	2.0 (횡변형율)	-	>8	

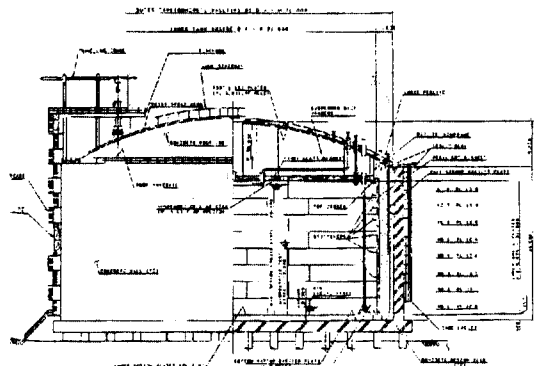


그림 2 LNG 비축탱크 구조물 형상⁽³⁾

내측탱크와 저판은 Pearlite Ring Beam으로 연결되어 있으며 외측탱크와 상부 돔은 프리스트레스트 단부의 Ring Beam으로 연결되어 있다. 구조물의 전체적인 형태는 그림 2에 나타난 것과 같고 내진해석을 위한 LNG 탱크를 구성하는 재료의 물성치는 표 3에 보인 것과 같다.

2. 설계이론

2.1 개요

내진해석은 지진의 동적 하중특성으로 인하여 그 해석의 근간을 동력학에 두고 있다. 일반적인 경우에 구조물의 동력학적 해석은 시간이력하중에 의한 해석과 응답스펙트럼에 의한 해석 그리고 등가정적 하중에 의한 해석으로 크게 나누어 질 수 있다. 시간이력하중에 의한 해석은 해석결과가 정확하고 구조물의 거동을 가장 충실하게 표현하며 여러가지 비선형성을 고려할 수 있다는 장점이 있으나 대부분의 동력학 해석, 특히 지진에 대한 해석을 요구하는 것과 같은 대형 구조물에 대해서는 해석 수행 시간이 길고 결과처리에 과다하게 많은 시간이 소요되는 단점이 있어 매우 정밀한 해석을 요구하는 구조물의 해석시에 국한하여 이용되는 것이 일반적이다. 등가정적하중 해석방법은 동적 특성치가 고려된 정적해석을 수행하는 방법으로, 해석이 간단하고 수치 처리 시간이 짧은 반면 원래 구조물의 거동이나 기타 응답에 충실하지 못하다는 단점이 있으므로 과거 여러 시방서에서 규정하고 있는 등가정적하중을 이용한 해석방법은 주로 설계의 전단계 해석이나 중요도가 다소 낮은 구조물에 대하여 적용된다.

시간가속도이력곡선 해석법과 등가정적 하중해석법을 절충시킨 중간급의 해석방법이 응답스펙트럼 해석법으로 이는 시간에 따른 구조물의 거동을 나타내지는 않으나 실제 시간이력하중 해석의 경우 최대 응답으로 산출되는 응답치를 거의 정확하게 표현할 수 있어 대부분의 건축 구조물과 일반적인 토목 구조물의 내진해석에 주로 이용된다. 이러한 해석방법의 선택에 있어서는 그 정확도 측면과 경제적 측면을 동시에 고려할 필요가 있으

며, 실제로 특정형태의 구조물에 대한 내진설계를 지침하고 있는 대부분의 시방서에서는 위의 세가지 방법에 의한 해석 및 설계 기준을 모두 규정 혹은 언급하고 있다.

2.2 시간-가속도 이력곡선에 의한 해석

시간이력하중에 의한 해석방법은 다른 종류의 구조해석과 마찬가지로 선형 해석과 비선형 해석으로 구분되며 다시 비선형 해석은 재료적 비선형성과 기하학적 비선형성으로 크게 나누어 지는데 재료적 비선형성이 고려된 해석은 해석절차가 복잡하고 컴퓨터를 이용한다 하더라도 해석 수행에 과다한 시간이 소요되며, 결과처리의 난점때문에 제진재와 같이 비교적 큰 비선형성을 가진 구조물의 부분해석 이외에는 거의 이용되지 않는다. 또한 기존에 발표된 문헌에 의하면 사장교와 같이 상당한 기하학적 비선형성을 포함하고 있는 구조물에서도 동적해석에 있어서의 선형해석에 의한 결과와의 차이가 최고 3% 미만인 것을 나타내는 것으로 발표된 바 있으므로⁽²⁾ 본 고에서 다루는 것과 같이 비교적 선형성이 크게 지배되는 구조물에 있어서는 선형해석을 수행하는 것이 바람직 하다.

시간이력하중을 이용한 선형해석에서 가장 효율적이고 널리 이용되는 방법은 모우드 중첩법인데 이는 다자유도 구조물에서 각각의 모우드를 구하고 각 모우드에 대한 응답을 조합하여 구조물 전체의 응답을 구하는 방법이다. 다자유도 구조물이 임의의 축방향 지반운동을 받을때 구조물의 질량 [M], 감쇠 [C] 그리고 강성 [K]에 의한 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{w}\}+[K]\{w\}=\{0\}$$

여기서 $\{u\}$ 는 구조물의 절대변위이고 $\{w\}$ 는 지반운동에 대한 구조물의 상대변위이다. 절대변위 $\{u\}$ 는 상대변위 $\{w\}$ 와 지반변위 $\{w_s\}$ 로 나타낼 수 있다. 지반변위 $\{w_s\}$ 는 지점에 작용하는 각 방향의 단위 지점변위에 의한 의사정적변위(pseudo static displacement)를 나타내는 영향계수벡터(influence coefficient vector) $\{r\}_i$ 를 이용하여 다시 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}_s\} + [K]\{w\} &= \{0\} \\
 [M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}\} + [K]\{w\} & \\
 &= -[M]\{r\}_i \ddot{Z}_i(t)
 \end{aligned}$$

$$W(t) = \int_0^t \ddot{Z}_i(\tau) \exp\{-\xi_r \omega_r(t-\tau)\} \sin\{\omega_r(t-\tau)\} d\tau$$

위의 식으로부터 구조물의 상대 변위 $\{w\}$ 를 구할 수 있는데 이는 구조물의 시간에 따른 거동을 표현한다.

2.3 응답스펙트럼에 의한 해석 방법

단자유도 구조물에 지진하중이 작용할때 구조물의 운동방정식은 구조물의 질량과 감쇠율, 그리고 강성을 고정변수로 하고 구조물의 절대변위와 상대변위 그리고 지반변위를 미지변수로 하여 D'Albert의 법칙이 적용된다.

응답스펙트럼을 이용하여 해석하기 위하여 시간이력하중 해석법에서 기술한 고유진동수와 그에 따른 고유치 벡터를 구하여 일반 좌표계로 변환하는 과정까지 동일하게 해석하며 이에 따른 임의의 r번째 모드에서의 최대 상대변위는 다음과 같이 스펙트럼 속도 함수로 표현된다.

$$\max |w_r(t)| = |\Phi_r| \left(\frac{|\mu_r|}{M_r \omega_r} \right) S_v(T_r, \xi_r)$$

응답스펙트럼을 이용한 해석시 대부분의 경우 하나의 모드가 최대값에 도달하였을 때 다른 모드들은 각각의 최대값보다 작은 응답을 갖게 되므로 각 모드의 최대응답을 대수적으로 합하는 것은 일반적으로 구조물의 응답을 상당히 과대평가하게 되기때문에 최대 응답의 중첩은 여러가지 합리적인 방법으로 행해지는데 가장 일반적으로 SRSS(Square Root Sum of Squares)법이 가장 많이 이용된다. 응답스펙트럼법에 의한 동적해석은 등가정적하중에 의한 해석에 비해서는 탁월히 결과에 충실한 방법이기도 하나 시간축을 고려하여 응답의 추이를 추적할 수 없다는 단점이 있다.

응답스펙트럼에 의한 해석결과는 그 자체로 동적특성을 고려한 설계 계수로 이용될 수 있으며 피로나 기타의 원인에 의한 강성저하의 해석에는 시간이력하중에 의한 해석법이 이용되어야 한다.

본 고에서는 현재 LNG 비축기지의 설계 및 검토에 이용되는 응답스펙트럼에 의한 해석법에 대하여 검토 및 계산을 수행하였다.

3. 해석에

3.1 입력하중의 산정

일반적으로 응답스펙트럼 해석법을 이용하는 경우 시방서에 제시된 스펙트럼 함수를 이용하는 것이 보통이다. 그러나 탱크구조물은 대부분이 준설섬이나 해안에 시공되기 때문에 지반의 구성이 일반적인 지반과는 상당한 차이를 나타낸다. 따라서 원칙적으로 기초의 종류에 따라 암반에서 기초까지 전달되는 지진하중의 메카니즘을 계산한 후에 변형된 응답스펙트럼 혹은 시간가속도 이력곡선을 이용해야 한다. 그러나 본 구조물의 경우 파일로 구성된 기초가 암반까지 매우 조밀한 간격으로 배치되어 있으므로 암반에 작용하는 지반의 운동이 파일을 통해 구조물에 직접 작용한다고 볼 수 있으므로 본 구조물의 내진해석에서는 시방서에서 제공하는 암반에 작용하는 지반의 운동에 의한 응답스펙트럼을 그대로 이용하였다. 해석에 이용된 응답스펙트럼은 그림 3에 나타난 것과 같다.

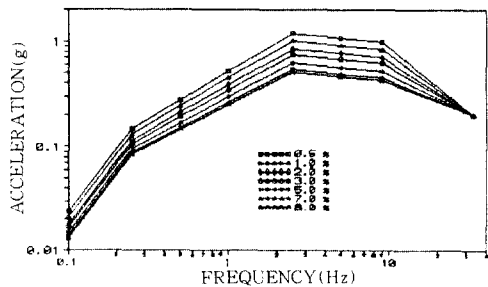


그림 3 설계응답스펙트럼⁽³⁾

3.2 수평방향 지진에 대한 해석 모델

외측탱크의 콘크리트 쉘은 전체단면을 기준으로 하여 보요소로 모델링하였으며 원래구조물의

성질중 물리적 성질을 표현할 수 있도록 단면이차 모멘트에 의한 휨강성과 전단단면적에 의한 전단 강성 그리고 전달요소성 강성에 대하여 환산하였다.

해석을 위한 외측탱크의 유한요소 모델은 그림 4와 같다. 단면의 물성치를 계산하는데 있어 벽체 요소에 한해서는 박막이론에 의하여 별다른 가정 없이 계산될 수 있으나 뚝을 표현하는 요소에 대해서는 두가지 가정이 포함된다. 유한요소 모델에서 볼 수 있듯이 뚝의 중간부까지만 부재가 위치하도록 모델링 하였는데 이에 따라 단면물성을 산정하는데 있어 단면적 및 전단단면적은 실린더형으로 그리고 단면이차모멘트는 원판형의 0.5배를 산정하였다. 뚝의 휨강성은 매우 크기 때문에 단면이차모멘트 및 회전이차모멘트는 슬래브로 가정한 뚝의 50%를 취하는 것을 원칙으로 한다.⁽³⁾

○ element number
□ node number

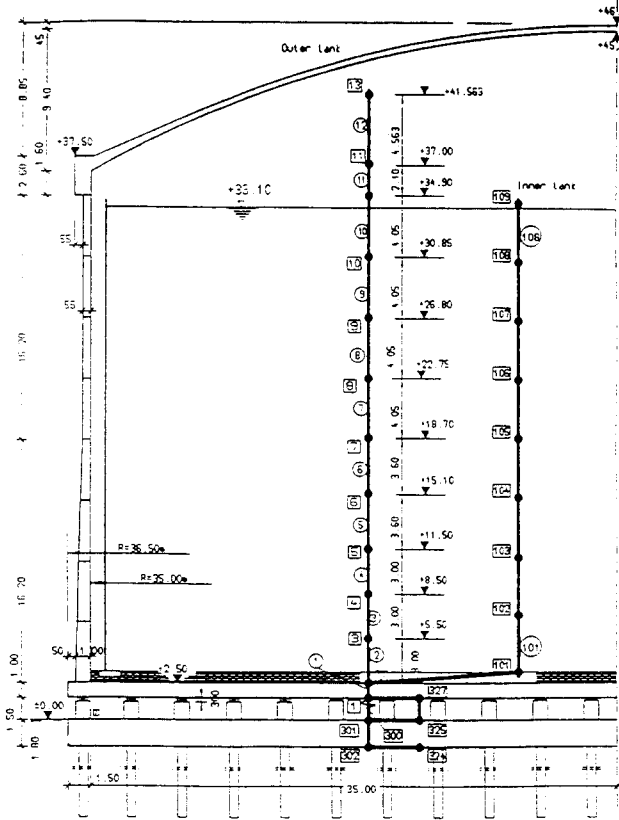


그림 4 외측탱크의 유한요소 모델(3)

○ element number
□ node number

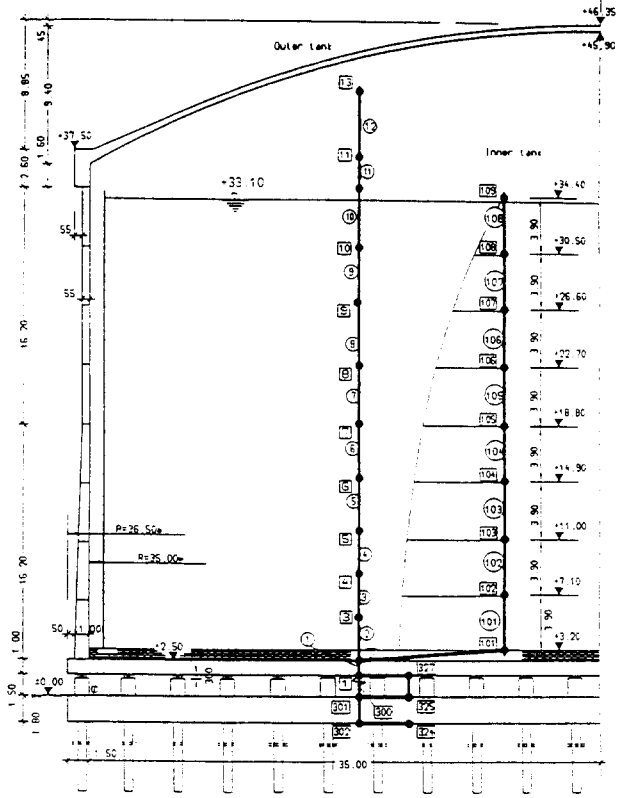


그림 5 내측탱크의 유한요소 모델(3)

내측탱크는 높이에 따라 단면의 성질이 유사하기 때문에 특별한 변화가 없는 구간에서는 외측탱크와 동일한 방법으로 그림 5와 같이 모델화 하였으며 모델링시 유체의 영향을 반영하는 요소가 위치할 수 있도록 하였으며 외측탱크의 경우와는 달리 내측탱크는 유체와 접해있기 때문에 전달요소의 영향에 대한 반영이 다르게 고려되었으며 반경에 비해 벽두께가 상대적으로 매우 작기 때문에 단면강성의 산정에 있어 박막이론을 적용하는 것이 타당하다.

탱크 내부유체의 거동은 크게 지반의 가진에 의해 거동하는 질량부분(impulsive part)과 유체 자체의 모우드를 형성하며 거동하는 부분(sloshing part)으로 나눌 수 있다. 지반의 가진에 의해 거동하는 질량부분은 다시 지반의 가진에 의해 직접

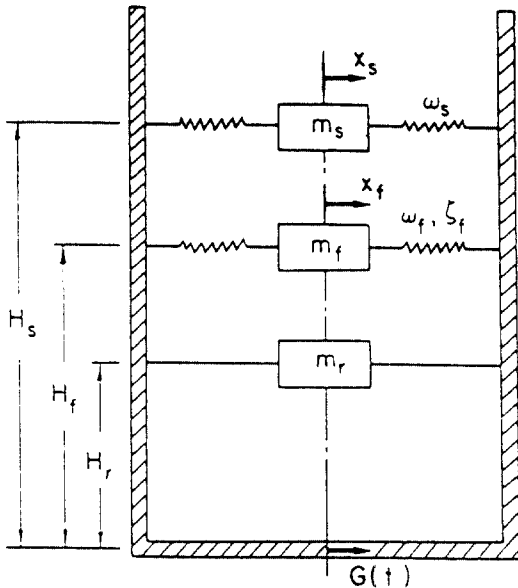


그림 6 탱크 내부유체의 해석 모델

영향을 받는 부분(rigid impulsive part)과 지반의 가진에 의한 구조물의 변형에 영향을 받는 부분(flexible impulsive part)으로 구분된다.

일반적으로 유체 자체가 형성하는 모드와 구조물의 모드 사이의 간섭효과는 매우 약하며 유체 자체의 거동은 구조물의 변형을 무시한 상태에서 계산하더라도 오차가 미소한 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾

구조물과 유체의 거동을 파악하기 위한 유한요소 모델은 다른 해석법에 비하여 해석이 간결하고 비교적 정확한 결과를 보여주고 있으므로 본 해석에서는 설계를 위하여 변형된 유한요소 모델을 이용한다.⁽⁴⁾

하부구조는 파일, Pedestal, 기초판, 제진재 그리고 지반으로 나누어 모델링 할 수 있다. 파일과 Pedestal은 원칙적으로 압축력 및 휨력에 주로 저항하는 부분과 전도 및 휨에 저항하는 부분의 두 가지로 분리되어 형상화하였으며 유한요소해석을 위한 하부구조의 모델은 그림 7에 보인 것과 같다.

제진재는 선형스프링 요소로 모델링 하였으며 전단방향의 자유도에 대해서만 스프링으로 구속되어 있다.

파일군에 있어 최외측 3열은 내측탱크와 외측탱

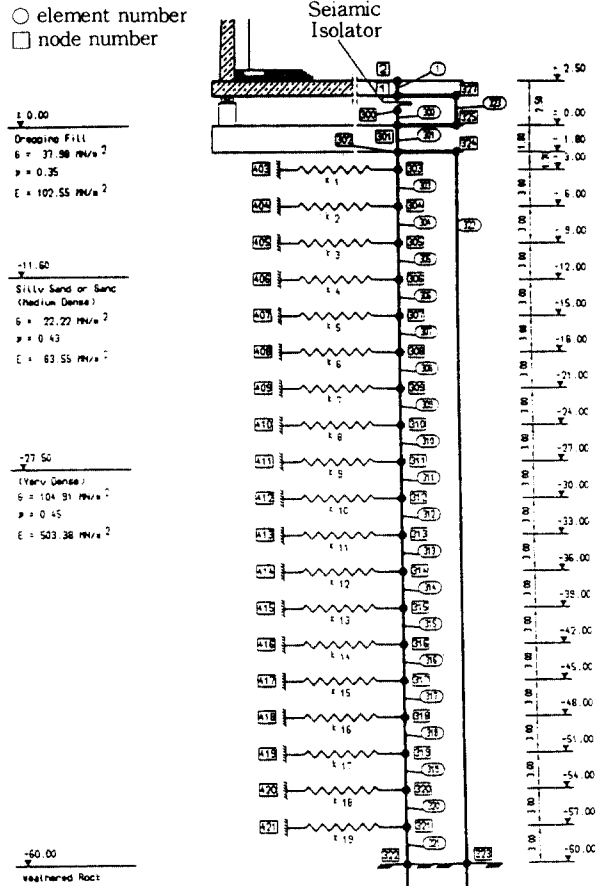


그림 7 하부구조 해석모델

크의 전도에 저항할 수 있도록 설계되었다. 이러한 파일은 모멘트 팔의 길이가 중심축에 존재하는 단면이차 모멘트를 이용하여 유한요소해석용으로 모델링 할 수 있으며 요소의 질량은 순수한 파일의 질량과 항타시 내부에 충전되는 흙의 양으로부터 계산된다.

파일의 경우와 마찬가지로 최외측의 Pedestal도 휨에 저항하는 부가적인 보요소로 모델링 할 수있으며 구조물의 전도에 저항하는 요소의 유한요소 해석을 위한 단면 물성치에서는 단지 회전에 대한 단면2차모멘트만을 전달하는 요소로 모델링 된다.

3.3 수직방향 지진에 대한 해석 모델

수직방향 지진에 대한 해석을 위해서 전체구조체를 그림 8에 보이는 것과 같은 여섯개의 자유도를 가진 유한요소모델로 형상화 하였다. 모델에서 유체는 강체성 거동을 표현하는 부분과 유연성 거동을 표현하는 두개의 부분으로 나누어 형상화 하였다. 또한 외측탱크 구조물은 크게 프리스트레스트 콘크리트를 이용한 벽체와 기저판과 같이 강체성 거동이 예측되는 부분과 천정부 돔과 같이 유연성 거동이 예측되는 부분등의 두가지로 나누어 모델링하였다. 유연성 거동이 예측되는 천정부 돔에 대하여 3차원 쉘요소를 이용하여 고유치 해석을 수행하였으며 이에따라 산출되는 고유치 및 질량을 이용하여 모델의 강성을 결정하였다.

종방향 지진하중에 의한 응답 해석시 외측 콘크리트 구조물의 높은 전달요소성과 기저판의 높은

표 4 돔의 고유진동수

모우드	주파수(Hz)	주기(sec)	기여도(%)
1	4.992	0.200	99.986
2	5.954	0.168	0.002
3	5.953	0.167	0.002

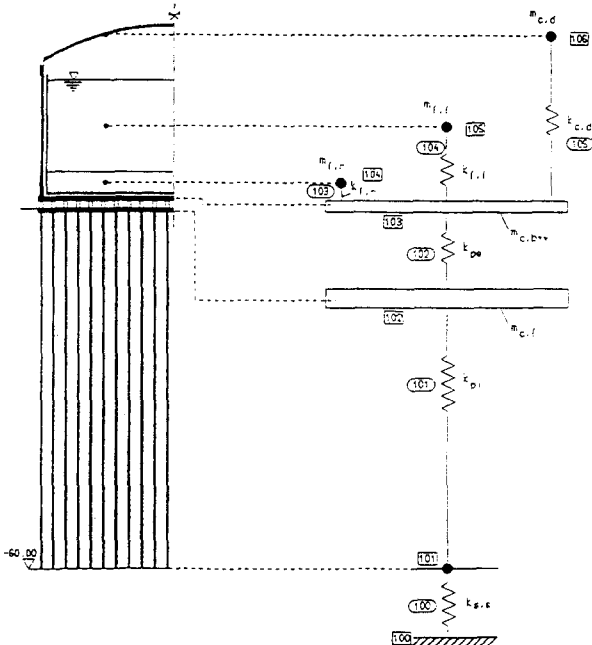


그림 8 수직방향 지진에 대한 해석 모델

휨강성에 의해 프리스트레스트 콘크리트 벽체 부분과 철근 콘크리트 기저판 부분은 거의 강체에 가까운 거동을 보인다. 이에 비하여 천정부의 콘크리트 돔만이 비교적 유연한 거동을 유발하게 되며 따라서 벽체와 기저판보다 세밀한 해석이 필요하다.

따라서 본 해석에서는 돔의 거동 및 주파수를 파악하기 위하여 쉘요소를 이용한 고정지반 가정하의 3차원 해석을 수행하였다. 돔의 거동을 나타

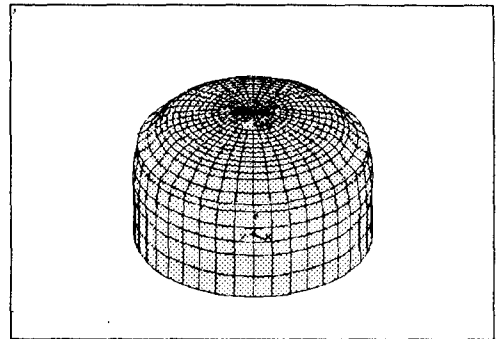


그림 9(a) 돔의 첫번째 모우드 형상

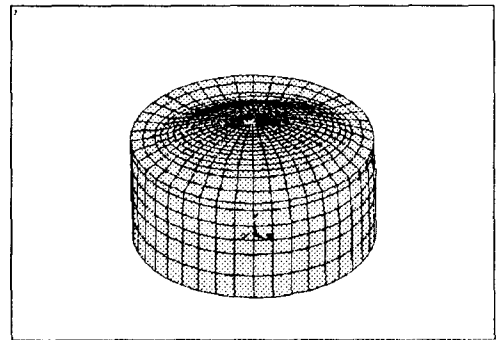


그림 9(b) 돔의 두번째 모우드 형상

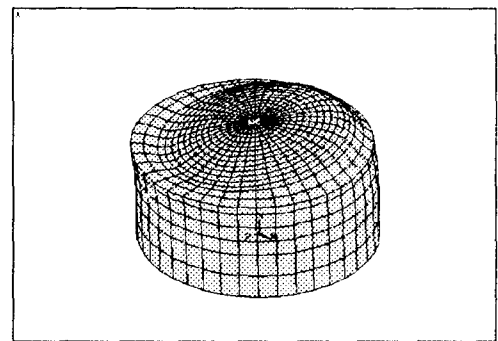


그림 9(c) 돔의 세번째 모우드 형상

내는 3개의 고유진동수 및 기여도는 표 4에 보인 것과 같고 모우드 형상은 그림 9에 나타난 것과 같다.

위의 결과에서 볼 수 있듯이 기여도가 첫번째 고유치 모우드에서 거의 100%에 가까운 발현을 보이므로 외측 콘크리트 덩의 단자유도계로의 축약이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

제진재의 강성은 실험에 의해 결정되었으며 Pedestal의 강성은 트러스 요소의 단위길이당 강성을 구하는 과정과 마찬가지로 계산되며 두가지 부분은 동시에 거동하므로 한개의 스프링 요소로 나타낼 수 있다.

3.4 해석결과

횡방향 지진하중 해석을 위하여 보요소를 이용하여 수립한 유한요소 모델 구조물의 고유진동수 및 모우드 형상은 그림 10에 보인 것과 같다.

본 해석 구조물은 중심축을 기준으로 완전히 대칭인 경우이므로 동적 해석을 3차원으로 수행할 때 각 방향으로 발생하는 응답의 크기가 일정하다. 따라서 해석결과는 특정한 평면내에 작용하는 내력 및 변위를 검토하는 것으로 충분하며 본 해석에서는 XZ평면의 결과를 검토하였다. 해당하는 경우의 변위와 변위방향의 내력에 대한 결과의 최대치를 제진재의 온도에 따라 표 5와 표 6에 나타내었다.

표 7에 보인 종방향 지진하중에 대한 응답은 횡방향 지진하중과 동일한 크기의 지진이 발생한 경우의 해석이다. 본 해석은 선형 시스템으로 가정되어 있으므로 표에 보인 값에 66%를 취하여 종방향 지진하중에 대한 응답으로 볼 수 있다.

표 5 횡방향 지진에 대한 응답(T=-20℃)

요소	절점	u _x (mm)	F _x (MN)	M _y (MNm)
외측탱크	2	116.58	32.995	839.24
내측탱크	101	117.13	50.467	701.15
기저판	1	116.45	96.726	1568.5
	2	116.58	96.726	1472.4
제진재	202	300	5.02	104.96
	300	301	4.60	105.61
Pedestal	301	301	4.60	105.61
	302	302	4.37	105.61
기초판	301	301	4.60	105.61
	302	302	4.37	106.34
파일	302	302	4.37	106.34

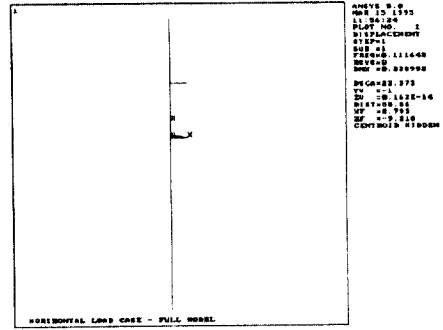


그림 10(a) 첫번째 모우드 형상

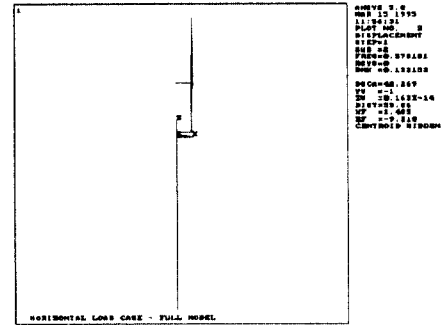


그림 10(b) 두번째 모우드 형상

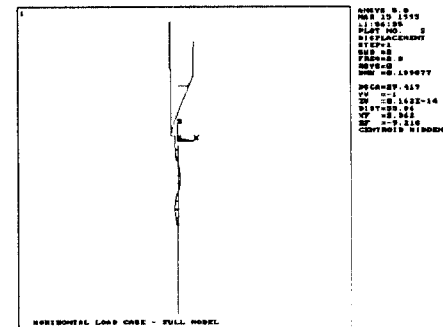


그림 10(c) 세번째 모우드 형상

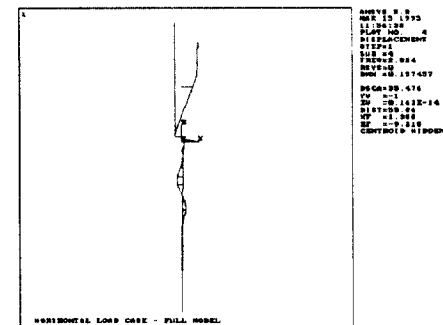


그림 10(d) 네번째 모우드 형상

본 해역에서는 제진재의 필요성능을 결정하기 위하여 제진재의 성능의 차이에 의한 응답변화를 계산하여 그 추이를 파악하였다.

각개의 품질에 의한 차이 그리고 온도를 포함한 주변환경요인에 의한 전단계수의 차이가 대략 1.2~2.4 MN/m²으로 알려져 있으므로 이 범위에 대한 최대응답을 검토하고 양상을 도출하여 설계의 안전성에 기여할 수 있도록 하였으며 제진재의 성능에 따른 구조물의 부분별 최대변위응답은 그림 11에 도시하였다.

표 6 횡방향 지진에 대한 응답(T=34℃)

	요소	절점	u _x (mm)	F _x (MN)	M _y (MNm)
외측탱크	2	2	172.83	24.824	634.04
내측탱크	101	101	173.25	36.500	491.31
기저판	1	1	172.74	73.127	1177.5
		2	172.83	73.127	1105.4
제진재	202	300	83.36 3.87	79.537	-
Pedestal	300	301	3.56	79.537	119.61
기초판	301	301	3.56	79.865	1305.1
		302	3.39	79.865	1447.2
과일	302	302	3.39	80.393	145.88

표 7 종방향 지진하중에 대한 응답

	요소	절점	u _x (mm)
과일	101	102	4.48
Pedestal	102	103	5.53
강재성 유체	103	104	5.53
유연성 유체	104	105	42.60
천정부 돔	105	106	10.92

4. 면진설계 기술

지진에 대한 안전성을 확보하기 위하여 흔히 지진력에 대한 구조물의 강도를 증가시키는 내진설계와 더불어 진동원과 구조물사이에 면진장치를 설치하여 구조물에 입사하는 지진력을 저감시키는 면진설계 방법이 많이 사용되고 있다. 면진설계방식은 적층고무 등의 특수한 기초 분리장치(isolator)를 사용하여 구조물을 지지하여 구조물의 수평방향으로 고유 진동주기를 길게하여 지반진동에 의한 반응력(response force)을 줄이는 개념이며 지진시에 기초 분리장치에 생기는 과대한

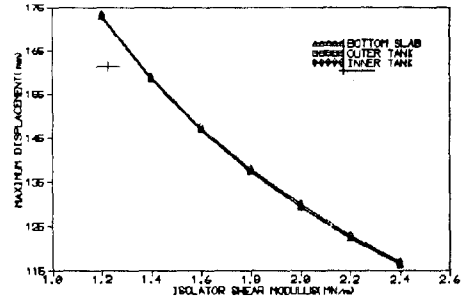


그림 11(a) 상부구조의 최대변위

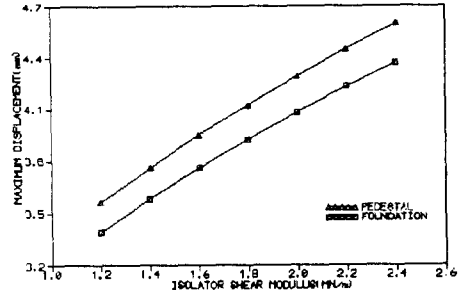


그림 11(b) 하부구조의 최대변위

변형량을 제어하기 위하여 에너지 흡수장치를 보조적으로 사용하기도 한다.

4.1 면진베어링의 종류

일반적으로 면진 구조설계에 사용되고 있는 면진베어링은 고무판과 얇은 금속판을 적층하여 제작하는 적층 고무받침(laminated rubber bearing) 방식과 R-FBI (Resilient-Friction Base Isolator) 방식으로 크게 나눌 수 있다. 적층 고무



그림 12 LRB의 구조 및 설치사진

받침은 가장 널리 쓰이는 기초분리 장치로써 초기 강성 및 에너지 소산능력을 증가시키기 위해서 단면 중앙에 납(lead plug)을 삽입하기도 한다. 그림 12는 현재 인천에 건설되고있는 LNG 비축탱크용으로 제작된 LRB의 구조와 설치사진을 보여주고있다.

R-FBI 방식은 고무판 내부에 PTFE(Polytetra Fluoro Ethylene)라는 미끄럼판을 가지고 있으므로 적층 고무받침에 비하여 더큰 수평 변위를 허용한다. 이 이외에 주로 정밀 기계의 기초 분리장치로 사용되는 BB Isolator(Ball Bearing Isolator) 등이 있다.

4.2 면진베어링(LRB)의 설계

일반적으로 구조물의 기초 분리용으로 사용되는 LRB는 설계 개념상 수평방향으로 커다란 유연성을 가지며 수직방향으로는 매우 큰 강성을 갖도록 설계한다. LRB의 특성치는 구조물이 건설될 지역의 지진특성을 고려한 지진설계 조건으로부터 구조물의 응답해석을 한다. 이로부터 구조물의 운전 조건에 적합한 LRB의 성능요구치가 구해진다. LRB설계시 사용되는 고무의 물성치로는 전단 탄성계수(shear modulus) G, 체적 탄성계수(bulk compression modulus) E_0 , 겹보기 압축 탄성계수(apparent compression modulus) E_c , 포아송비(poisson ratio) ν 가 있으며 이로부터 고무의 형상과 화학적인 성분에 따라 변화하는 휨(bending)에 대한 겹보기 압축탄성계수(apparent compression modulus for bending) E_b 를 구하면 다음과 같다.

$$E_b = E_c(1 + \beta S^2)$$

여기서 β 는 고무의 화학적 성분에 의해 결정되는 상수이며 S는 형상계수(shape factor)로 하중을 받는 고무의 단면적을 각 고무층에서 팽창이 일어날 수 있는 측면의 전체 면적으로 나눈 값이다. 또한 E_b , E_c 는 고무의 체적압축(bulk compressibility)이 고려되지 않은 계수로서 이것을 고려하면 다음과 같다.

$$E'_b = \frac{E_b E_0}{(E_b + E_0)}$$

$$E'_c = \frac{E_c E_0}{(E_c + E_0)}$$

이로부터 LRB의 수평 강성(K_H) 및 수직강성(K_V)을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_H = \frac{P^2}{\{2qS_b \tan(ql/2) - Pl\}}$$

$$K_V = \frac{A_{eff} E'_c}{nt_R}$$

여기서, $q = \sqrt{P/S_b}(1 + P/S_s)$

$$S_b = E'_b I (t_R + t_S) / t_R$$

$$S_s = GA_R (t_R + t_S) / t_R$$

P는 수직하중, l은 LRB의 전체높이, A_{eff} 는 유효단면적, I는 단면 2차 모멘트(second moment of area), n은 고무층 수 그리고 t_R , t_S 는 각층의 고무 및 철심의 두께를 나타낸다.

또한 좌굴 하중(buckling load) P_{cr} 을 계산하므로써 LRB가 지지할 수 있는 허용하중을 계산할 수 있다.

$$P_{cr} = (P_S 2) [\sqrt{1 + 4P_E / P_S} - 1]$$

여기서, $P_S = GA_R$, $P_E = \pi^2 E_c I / 3l^3$

따라서, 구조물의 동적 해석에서 구해진 건물 기초부 경계조건으로 최적의 수평, 수직 강성 및 댐핑값이 결정되면 상기식 들을 이용하여 LRB에 대한 기본적인 고무의 종류, LRB 형상을 설계할 수 있다.

4.3 LRB의 특성시험

LRB의 특성 시험은 정적시험과 동적시험으로 이루어지는데 좌굴하중 및 수직 강성은 압축 재하 실험을 통해서 구하며 수평방향 특성치는 LRB에 일정한 수직하중을 가한 상태에서 수평방향으로

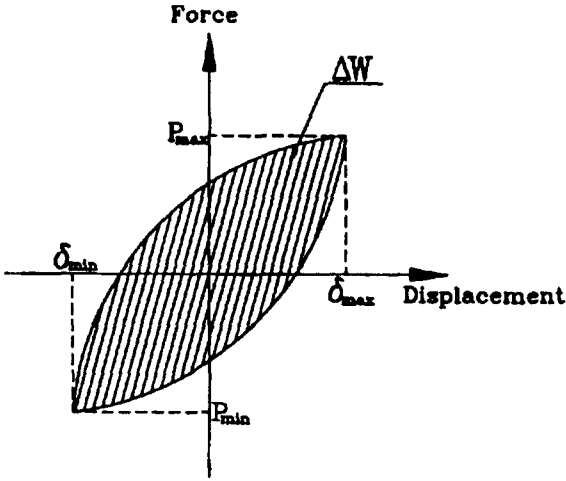


그림 13 일반적인 힘-변위 이력곡선

정적, 동적하중을 가하여 구한다. 여기서 얻어지는 힘-변위 관계는 고무의 재료적인 특성이 지배적이며 대개 그림 13과 같은 이력곡선(hysteresis loop)을 나타낸다.

이 곡선으로부터 유효강성(effective stiffness) K_{eff} 및 등가감쇠비(equivalent damping ratio) ξ_{eq} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})}$$

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eff} \delta_{max}^2}$$

여기서, P_{max} , P_{min} , δ_{max} 및 δ_{min} 은 실험결과로부터 얻어진 힘-변위 이력곡선의 최대, 최소값 들을 나타내며 ΔW 는 이곡선의 면적을 의미한다. 그림 14와 표 8은 LRB의 동적시험 사진과 시험결과예를 보여주고 있다.

표 8 LRB의 성능시험 결과

TEST ITEM	CRITERIA		TEST RESULT
	Quarter Scale	Quarter Scale	Quarter Scale
Vertical Stiffness ($k_{eff,v}$)	275~300 (MN/m)		285 (MN/m)
Horizontal Stiffness ($k_{eff,h}$)	min.	0.3 (MN/m)	0.45 (MN/m)
	max	0.6 (MN/m)	
Equivalent Damping(ζ)	$\geq 8\%$		12.1%
Roll-out	$\geq 133\%$		180~316%

이 이외에도 저온, 고온실험, EB(Elongation at break), Distortion 시험 및 Roll-out 시험 등 각 사용환경에 따른 다양한 시험이 이루어진다.

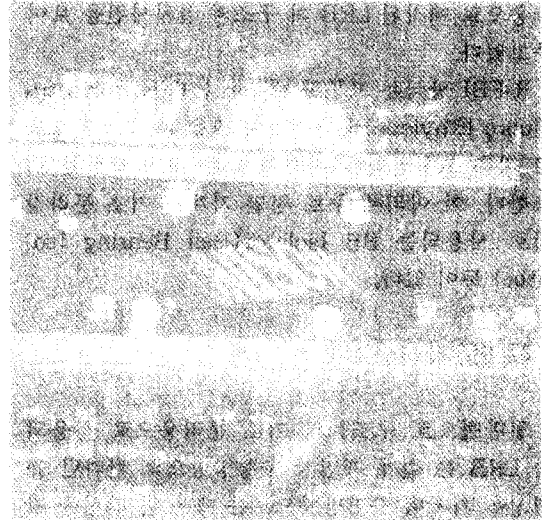


그림 14 LRB의 동적시험 사진

5. 연구결과 및 향후 추진방향

1) 구조물의 모델링

지진에 대한 구조물의 거동을 묘사할 수 있는 효율적인 해석적 모델링 방법으로 하부의 파일과 상부의 탱크구조를 동시에 표현할 수 있어야 하며 토질의 물성치를 고려해야 한다.

2) 지진입력파의 산정

기반암(bed rock)에서 인공지진파를 발생시킨 뒤, 토질의 물성치와 파일의 배열을 고려하여 지표면상에서의 변위, 속도, 가속도를 계산할 수 있어야 한다.

3) Sloshing 해석기술

지진이 발생시 탱크 내부의 유체가 흔들려 탱크에 하중이 가해지게 되는데 이의 영향을 고려하여 탱크의 두께를 결정해야 하고 전체구조의 동적안정성(dynamic stability)을 평가할 수 있어야 한다.

4) 시간이력해석 및 주파수영역해석

지진이 발생한 상황에서 각부재의 응력 및 동적 변위를 시간 영역 및 주파수영역에서 구하여 설계에 반영할 수 있어야 한다.

참 고 문 헌

1. 김원배, 유철수, "구조물의 동적해석을 위한 한반도의 인공 지진과 작성", 공학박사 학위논문, 고려대학교, 1987
2. Yu, C. S. and Lee, C. S., "Comparison of Seismic Forces in Korea, U.S.A. and Japan", Proc. of U.S.-Asia Conference on Engineering for Mitigating Natural Hazards Damage, Bangkok, Thailand, pp. 14-18 Dec. 1987
3. DYWIDAG, "INCHON LNG-RECEIVING TERMINAL FOR CONSTRUCTION RE-

PORT", 1994

4. TID-7024, U.S., Atlantic Energy Commission Publication "Nuclear Reactors and Earthquakes", Chapter 7, Dynamic Pressure on Fluid Containers
5. Housner, G. W., HHaroun, M. A., "Seismic Design of Liquid Storage Tanks", Journal of the Technical Council of ASCE, April 1981.
6. Kelly, J. M. and Quiroz E., 1992, "Mechanical Characteristics of Neoprene Isolation Bearing," Report No. UCB/EERC-92/11, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
7. Shimoda, I. and Ikenaga, M., 1989, "Study on Characteristics and Effects of Seismic Isolation of Laminated Rubber Bearing with Lead Plug," Seismic, Shock and Vibration Isolation, pp. 49-57. □

1995년도 정기총회 및 가을학술발표회 개최 안내

- 개최일 : 1995년 11월 4일(토)
- 장 소 : 서울(추후 통지)
- 발표논문 계획서 및 초록 제출마감일 : 1995년 8월 16일(수)까지
- 발표논문 제출 마감일 : 1995년 9월 15일(금)까지
- 논문작성양식 : 학회양식에 따라 A4 용지 5매 이내
- 논문작성시 유의사항 : 발표논문은 독창성, 실용성, 학술성, 신공법개발 및 적용등 의의를 갖도록 하고 유사논문은 통합하여 하나의 논문으로 묶어 제출하여 주시기 바랍니다.
- 논문계획서 및 양식을 추후 발송해 드리오니 회원 여러분의 많은 논문 및 시공사례 발표를 바라며 마감일 및 논문양식을 엄격히 지켜주시기 바랍니다.
- 문의처·제출처 : 학회사무국(7월 초순 사무국 이전으로 연락처 추후 통지할 것임, 이전안내 참조)