

LNG 저장 탱크의 지진방지를 위한 면진베어링(LRB)의 개발

° 유춘화* 김두훈* 이동근** 김남식** 정우정**

(Development of Isolators (Laminated Rubber Bearing) for the Seismic Isolation of LNG Storage Tanks)

(Chun-Hwa Ryu, Doo-Hoon Kim, Dong-Guen Lee, Nam-Sik Kim, Woo-Jung Chung)

1. 서 론

지금까지 대형 구조물에 널리 사용되고 있는 Base Isolator 는 특히, 지진하중에 대하여 상부 구조물의 지반분리(base isolation)을 이용한 지진제어를 목적으로 하기 때문에 Seismic Isolator라 한다. 일반적으로 면진베어링에는 LRB (Laminated Rubber Bearing) 방식 과 R-FBI (resilient-friction base isolator) 방식으로 크게 나눌 수 있다. LRB 방식은 가장 널리 사용되는 면진베어링으로써 방진고무를 주된 재료로 하고 수직강성을 보장하기 위하여 Steel plate를 조합하여 제작하며, 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가시키기 위하여 단면중앙에 납(Lead Plug)를 삽입하기도 한다. R-FBI 방식은 방진고무 적층판 내부에 미끄럼판을 가지고 있으므로 LRB 방식에 비하여 더 큰 수평변위를 발생시킬 수 있다.

이전에 설계 제작한 면진베어링은 LNG 저장탱크의 Seismic Isolation을 목적으로 적용대상의 사양에 맞추어 설계 제작 하고 성능평가 시험을 수행하여 LNG 저장탱크, 원자로, 대형 건축물등 지진으로부터 보호되어야 하는 대형구조물의 방진 재료 적용할 수 있는가를 평가하고자 한다.

본 논문에서는 제작된 면진베어링의 설계를 검증하고 방진 고무(HDR)재료의 물리적 특성시험, 축소모델에 의한 정적, 동적시험을 통하여 시험방법을 소개하고 이러한 시험결과를 기초로하여 면진베어링의 성능을 평가하였으며, 면진베어링의 온도변화, 외부 수직하중의 변화 등에 따른 특성변화와 LNG 저장탱크와 면진베어링의 체결방법에 따른 시험으로 체결방법을 검증하였으며, 대상물의 사양에 적합한가를 고찰하였다.

2. 면진베어링(LRB)의 설계 및 제작

일반적으로, 면진베어링의 수직, 수평강성시험은 그림 1. 과 같이 Hysteresis 곡선을 보이며 유효강성계수 (k_{eff})는 그림 에서와 같이 정의한다. LNG 저장탱크의 제원 및 구조물 형상은 각각 표 1. 과 그림 2. 이다.

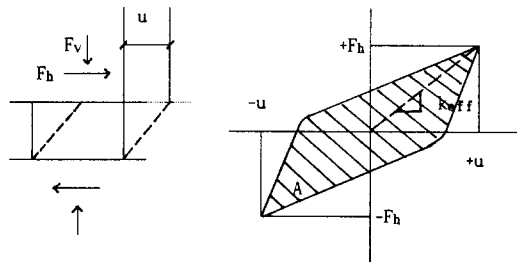


그림 1. Hysteresis 곡선

표 1. LNG 저장탱크의 제원

항 목	제 원
Capacity of the tanks	100000m ³
Diameter of the foundation slab	73.0m
Number of the bearings of the tank	392 pieces
Size of the pedestals (Cross section)	1.0x1.0m

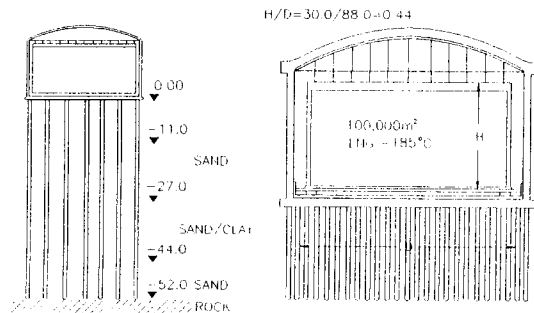


그림 2. LNG 저장탱크 VESSEL SYSTEM (Inner tank : 9% Nickel steel, Outer tank : Prestressed concrete)

면진베어링의 설계시 사용되는 지진의 조건은 표 2.와 같으며, 본 설계에서는 SSE 조건을 적용하였고, 이때 요구되는 면진베어링의 성능은 표 3.에 나타내었다.

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소, 정회원

** 한국과학기술원 토목공학과, 정회원

표 2. 지진 조건(Seismic conditions)

구 분	Recurrence interval	Ground acceleration (g)	
		max. hor.	max. ver.
- Operating Base Earthquake (OBE)	475 years	0.1	2/3*0.1
		0.2	2/3*0.2
- Safe Shutdown Earthquake (SSE)	10000 years	0.1	2/3*0.1
		0.2	2/3*0.2

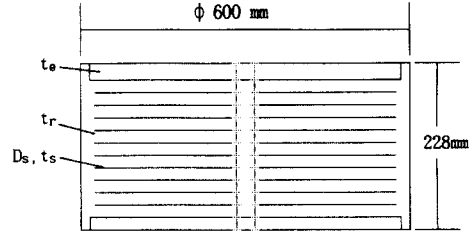


그림 3. 면진베어링 (Laminated Rubber Bearing)

표 3. 면진베어링(LRB)의 성능 조건

항 목	성능 조건	
	Full-size	1/4 scale-size
Vertical stiffness (k _{eff, v})	1100 ~ 1200 MN/m	275 ~ 300 MN/m
Horizontal stiffness (k _{eff, h})	min.	1.2 MN/m
	max.	2.4 MN/m
Damping (ζ)	≥ 8 %	
Roll-Out	≥ 133 %	

표 4. 면진베어링의 제원 (Full-size)

기호	항 목	제원(mm)
φ	Diameter of the bearing	600
h	Overall height of the bearing	228
D _s	Diameter of the steel shim	580
t _r	11 layers of elastomer, 1 layer = 14mm	154
t _s	10 steel shim plates, 1 layer = 3mm	30
t _e	2 end plates, 1 layer = 20 mm	40

2.1 면진베어링의 설계

표 3.의 성능조건에 적합한 설계를 위하여 다음 수식을 이용하였다. 면진베어링의 수직강성은 식(1)과 같고, 탄성계수 E_c는 형상계수 S가 >3 일때 식(2)와 같이 주어진다.

$$k_v = \frac{E_c \cdot A}{T_r} \quad (1)$$

$$E_c = 5.6GS^2 \quad (2)$$

여기서, A : Steel shim area of LRB
E_c : Bearing compression modulus

형상계수 S는 다음식 (3)과 같고, 면진베어링의 수평강성은 식(4)와 같다.

$$S = \frac{D}{4t_r} \quad (3)$$

$$k_h = \frac{G \cdot A_s}{T_r} \quad (4)$$

여기서, G : Shear modulus of rubber
A_s : Shear area of LRB
T_r : Total rubber thickness
t_r : The thickness of one rubber layer

위의 식에 의해 설계된 면진베어링의 형상과 제원은 각각 그림 3.과 표 4.와 같다.

2.2 모델시험용 면진베어링의 설계

설계된 면진베어링의 성능을 검증하기 위해 실물보다 작은 축소베어링을 제작하였다. 표 5.의 상사법칙에 따른 실물과 축소모델 관계에 의해 Scale factor를 Λ=4로 하였으며, 1/4 축소모델 면진베어링의 제원은 표 6.과 같다.

표 5. Similitude Relationships

Parameter	Symbol	Similitude (Full-size/model)
Geometric scale factor	Λ	
Length	L	L _f /L _m = Λ
Displacement	D	D _f /D _m = Λ
Acceleration	a	a _f /a _m = 1
Frequency	f	f _f /f _m = Λ ^{-1/2}
Time	T	T _f /T _m = Λ ^{1/2}
Stress	σ	σ _f /σ _m = 1
Area	A	A _f /A _m = Λ ²
Strain	γ	γ _f /γ _m = 1
Force	F	F _f /F _m = Λ ²
Mass	M	M _f /M _m = Λ ²
Damping	ζ	ζ _f /ζ _m = 1

표 6. 축소모델 면진베어링의 제원 (1/4 Scale-size)

기호	항 목	제원(mm)
φ	Diameter of the bearing	150
D _s	Diameter of the steel shim	145
t _r	11 layers of elastomer, 1 layer=3.5mm	38.5
t _s	10 steel shim plates, 1 layer = 2mm	20
t _e	2 end plates, 1 layer = 12.5mm	25

실물 및 축소모델에 대하여 설계된 LRB의 수직, 수평 강성도는 표 7.과 같다.

표 7. 면진베어링(LRB)의 설계 강성도

항 목	설 계 값	
	Full-size	1/4 Scale-size
Vertical stiffness ($k_{eff, v}$)	1124.4 MN/m	281.1 MN/m
Horizontal stiffness ($k_{eff, h}$)	1.87 MN/m	0.47 MN/m

2.3 강성계수

수직방향의 하중과 조합된 수평방향의 동적, 정적 강성계수(k_{eff})는 Hysteresis 곡선 (그림. 1)에서 식(5)에 의하여 계산된다.

$$k_{eff} = \frac{\Delta F}{\Delta u} \quad (5)$$

여기서, k_{eff} : 면진베어링의 강성계수
 ΔF : 하중
 Δu : 변위량

2.4 동가 점성 감쇠비

동가 점성 감쇠비 (Equivalent viscous damping ratio) 는 다음식 (6)에 의하여 구할 수 있다.

$$\zeta_{eq} = 1/2\pi * A/(k_{eff} * u^2) \quad (6)$$

여기서, u : Displacement under earthquake load
 A : Area of the hysteresis loops
 k_{eff} : Effective stiffness

3. 실물 면진베어링(LRB)의 제작

Damping이 큰 특수 방진고무(High Damping Rubber)를 개발하여 방진 고무의 적층수를 11층, Steel shim plate가 10층으로 적층되게 하고, 상하 끝면에는 Steel End plate를 삽입하여 Keeper bar에 의해 고정시킬 수 있도록 하였다. 그림 4. 및 그림 5.는 제작된 실물 및 축소모델의 면진베어링 사진이며, 그림 6.은 절단된 면진베어링의 단면을 보여주고 있다.

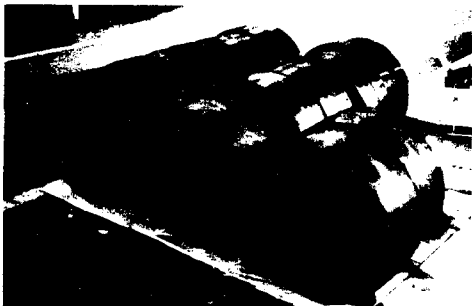


그림 4. 면진베어링 (Full-size)



그림 5. 축소모델의 면진베어링(1/4 Scale-size)



그림 6. 축소모델 면진베어링의 단면

4. 성능시험

면진베어링에 사용된 방진고무의 재료 및 제품의 성능 시험에 사용된 주요 시험장비의 제원은 표 8.과 같다.

표 8. 주요 시험장비의 제원

장 비 명	성 능	수 량
RUBBER AGING TESTING M/C	400°C	1
OZONE AGING TESTER	60°C	1
TENSILE STRENGTH TESTER	200kg	1
RUBBER HARDNESS TESTER	A TYPE	1
COLD CHAMBER	50~-50°C	1
COMPRESSION LOAD TESTING M/C	300ton, 200mm(Hor.)	1
POT BEARING TEST M/C	3000ton (Vertical) 300ton (Horizontal)	1
HYDRAULIC ACTUATOR	±500KN (±)150mm, ±250KN (±)250mm, ±250KN (±)250mm	3
CONTROL&MEASUREMENTS SYSTEM		1
COMPUTER SYSTEM		1
TEST LAYOUT ROOM (KAIST)	- 3500 x 3000mm (H beam 400 x 400) - REACTION WALL - STRONG FLOOR	1

4.1 방진고무(HDR) 재료의 물리적 특성

시편 제작과 재료의 물리적 특성 시험에 KS M6518-91 규격 및 ASTM D2137, D1229, D2240 규격에 따라 수행하였으며, 시험결과는 표 9.와 같다.

표 9. 면진베어링의 방진고무 재료의 물리적 특성

No.	시 험 항 목	기 준	결 과
1	경도(HS)	65±5	67.8
2	인장강도 (Kg/cm ²)	175이상	245.49
3	신장율 (%)	400이상	495.0
4	노화시험 (70°C x168HR)	경도변화율(HS)	+10이내 +0.2
		인장강도변화율(%)	-25이내 -1.16
		신장율변화율(%)	-25이내 -2.5
5	압축영구줄임율(%) (70°Cx22HR)	40이하	6.24
6	오존균열시험 (농도 50pphm, 온도 40°C, 신장 20%, 시간 100HR)	균열 없을것	균열무
7	금속과의 접촉강도 (kgf/cm)	7.4이상	16.23
8	저온시험	압축영구줄임율 (-10°Cx7DAY)	35%이내 5.97
		경도변화율 (25°Cx22HR)	+15이내 +2.4

4.2 축소모델 면진베어링의 정하중 시험 (Static Test)

4.2.1 수직방향의 정하중 시험

그림. 7과 같이 300ton 압축시험기를 이용하여 1/4 축소 모델 면진베어링의 수직방향으로 하중을 104ton까지 증가 시켜가며 변위를 측정 하였고, 식(6)을 이용하여 수직강성 ($K_{eff,v}$)을 계산 하였다.

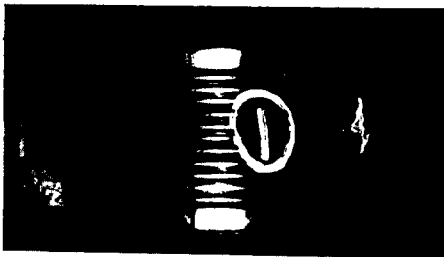


그림. 7 수직방향의 압축 강성시험

4.2.2 수평방향의 정하중 시험

수직하중이 조합된 수평방향의 정하중 시험에서 $\tan\gamma$ 는 일반적으로 면진베어링 전체 두께의 200% 까지 시험을 수행하나, Full size의 면진베어링에 대한 시험조건인 최대 수평 변위 SSE가 236mm로 정하여져 있어, 축소모델 시험에서는 $SSE_{1/4} = 59\text{mm}$ 까지 시험하였다.

시험편을 온도 -20°C, +34°C의 냉장고와 온장고에 각각 24 시간 저장한 후에 표 10.과 같이 수평방향의 정하중 시험을 수행하였다.

표 10. 수평방향의 정하중 시험

온도 (°C)	수평변위 ($\tan\gamma$)	수직하중 (F_v)	비 고
-20	0.5*SSE	Operational+Seismic	SSE = 59 mm Operational Load = 18.5 ton Seismic Load = 6.1 ton
	1.0*SSE	Operational	
	1.5*SSE	Operational+Seismic	
+34	0.5*SSE	Operational+Seismic	
	1.0*SSE	Operational	
	1.5*SSE	Operational+Seismic	

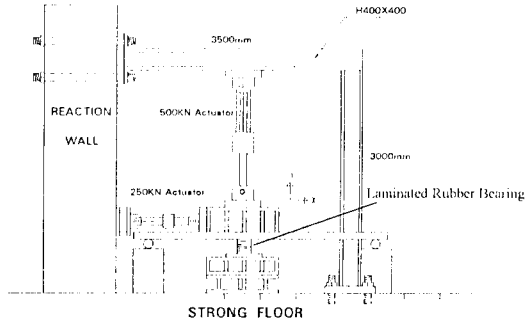


그림 8. 축소모델 면진베어링의 성능시험을 위한 가력장치

4.3 축소모델 면진베어링의 동하중 시험 (Dynamic Test)

동하중 시험은 시험베어링을 그림 9. 와 같이 Jig에 장착 장착하여 수직 압축력을 가한 상태에서 표 11.에 주어진 조건에 따라 수평방향으로 가진시킨다.

표 11. 수평방향의 동하중 시험

온도 (°C)	수평변위 ($\tan\gamma$)	수직하중 (F_v)	비 고
-20	0.5*SSE	Operational	SSE = 59 mm Operational Load = 18.5 ton
	1.0*SSE		
+34	0.5*SSE		진동수 = 0.3Hz ~ 0.5Hz
	1.0*SSE		

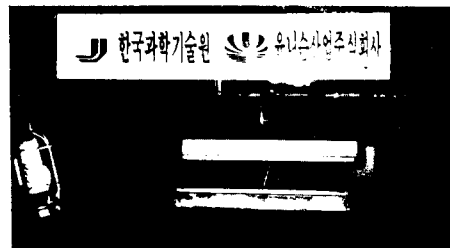


그림 9. 수평방향의 동하중 시험

4.4 Roll-Out Test

Roll-Out 시험 (그림 10.)은 면진베어링과 Mounting plate 를 bolts로 체결하지 않고 base plate 와 Keeper bar로 설치 하였기 때문에 면진베어링이 Keeper bar에서 이탈되기 시작 할 때까지 수평변위를 발생시켜 그 과정을 관찰 하였다.

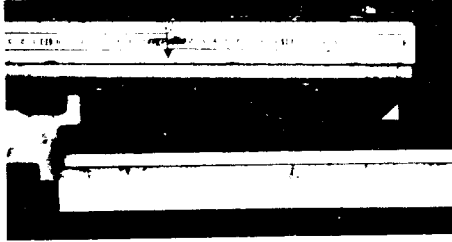


그림 10. Roll-Out 시험

5. 시험결과 및 고찰

5.1 정적시험 결과

수직 방향의 압축시험 결과, 수직강성은 표 12.와 같고 하중-변위 선도는 그림 11.에 표시하였다.

표 12. 수직강성 (1/4 Scale-Size) (ton/cm)

온도(°C)	기준	허용오차	시험결과	비고
-20	300	±10%	303	설계치 k _v = 281.1
+34	275		256.4	

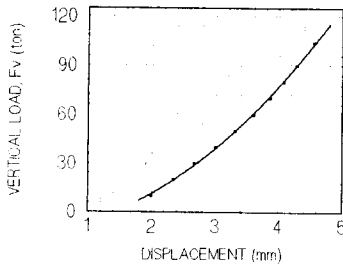


그림 11. 수직강성시험 하중-변위 선도(+34°C)

수평 방향의 정적시험 결과, 수평강성은 표 13.과 같고, 각각의 경우 Hysteresis곡선은 그림 12.와 그림 13.과 같이 얻어졌다.

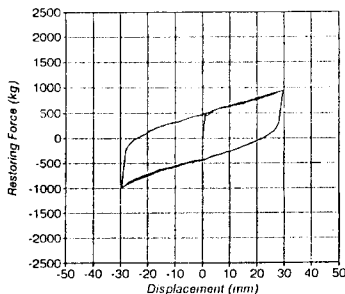


그림 12. 0.5*SSE에 대한 수평강성 Hysteresis 곡선 (+34°C)

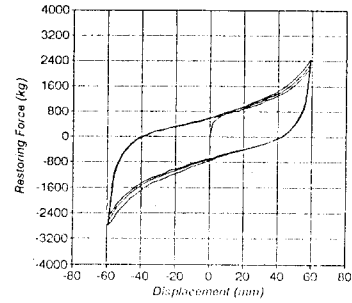


그림 13. 1.0*SSE에 대한 수평강성 Hysteresis 곡선 (-20°C)

표 13. 수평강성 (1/4 Scale-Size) (kg/cm)

온도 (°C)	수평변위 (tany)	수직하중			비고
		Ope-Se	Ope	Ope+Se	
-20	0.5*SSE	362.7	440.5	484.3	SSE = 59 mm Operational Load = 18.5 ton
	1.0*SSE	545.0	445.1	385.6	
	1.5*SSE	634.2	476.8	379.4	
+34	0.5*SSE	328.4	327.8	347.5	Seismic Load = 6.1 ton
	1.0*SSE	316.8	274.6	272.8	
	1.5*SSE	302.7	240.7	218.9	

5.2 동적시험 결과

수평 방향의 동적시험 결과, 수평강성은 표 14.와 같고 이때의 Hysteresis 곡선은 그림 14.에 나타내었다.

표 14. 수평강성 (1/4 Scale-Size) (kg/cm)

수직 하중	온도 (°C)	수평변위 (tany)	진동수 (Hz)			비고
			0.3	0.4	0.5	
Ope.	-20	0.5*SSE	747.5	686.7	666.0	SSE = 59 mm Ope. Load = 18.5 ton
		1.0*SSE	613.9	463.0	436.5	
	+34	0.5*SSE	344.1	346.2	364.3	
		1.0*SSE	244.9	233.1	250.1	

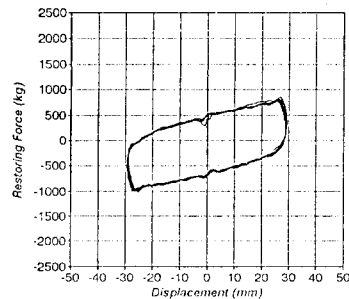


그림 14. 0.5*SSE에 대한 수평강성 Hysteresis 곡선 (+34°C, 0.5Hz)

5.3 등가 점성 감쇠비

등가 점성 감쇠비(ζ_{eq})는 앞에서 얻어진 Hysteresis곡선으로 부터 식(6)을 사용하여 계산하였으며, 그 결과는 표 15, 표 16.에 나타내었다.

표 15. 정하중 시험결과의 등가 점성 감쇠비 (%)

온도 (°C)		수평변위 (tan γ)			수직하중 (F _v)		
-20	+34	0.5*SSE	1.0*SSE	1.5*SSE	Ope-Se	Ope.	Ope+Se
19.7	22.6	26.4	18.9	18.1	14.1	21.1	28.3

표 16. 등하중 시험결과의 등가 점성 감쇠비 (%)

온도 (°C)		수평변위 (tan γ)		진동수 (Hz)		
-20	+34	0.5*SSE	1.0*SSE	0.3	0.4	0.5
24.6	38.6	33.0	30.2	29.5	31.7	33.5

5.4 Roll-Out Test 결과

면진베어링이 Keeper bar에서 수평변위 107.5mm 이후부터 이탈되기 시작함을 알 수 있으며 tan γ = 1.82*SSE (182.2%) 측정되었으며, Roll-out 시험선도는 그림 15.에 나타내었다.

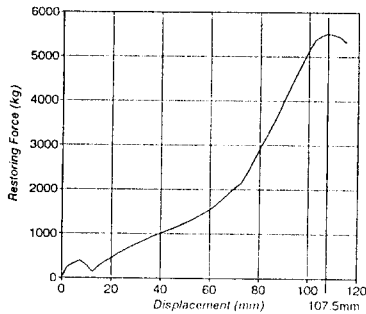


그림 15. Roll-Out 시험 선도

6. 결론

축소모델 면진베어링의 제조과정 및 성능시험 결과를 고찰한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 방진고무(HDR)의 물리적 특성은 제조과정의 입력, 시간, 온도 등의 영향을 받으며, 적합하게 조합되지 않았을때, 수직하중을 가하면 면진베어링이 제 역할을 하지 못하여, 수직하중을 제거하여도 복원력을 상실하게 된다.
- 2) 정하중 시험에서, 수평강성과 전단변위 (Shear Strain)의 관계는 온도가 +34°C 경우에는 수평변위가 커질수록 수평강성은 작아진다. 수평강성은 조합된 수직하중이 작아질수록 그리고 온도가 낮아질수록 커진다.
- 3) 등하중 시험에서의 수평강성은 온도가 낮을수록 그리고 최대 수평변위가 작을수록 커진다.

4) 등가점성 감쇠비(Equivalent viscous damping ratio)는 온도, 가진 진동수가 및 수직하중에 비례하며, 최대 수평변위에는 반비례하는 경향을 보인다.

5) 수평강성과 등가 점성 감쇠비는 등하중 시험의 경우가 정하중 시험 경우보다 크게 나타난다.

6) Roll-Out 시험은 시험중에 안전 관계로 Rupture 될때까지 시험을 수행하지 못하였으나, 면진베어링이 Keeper bar에서 수평변위가 107.5mm 에서 부터 이탈되기 시작 함을 알 수 있었고, 이는 tan γ 가 SSE의 182.2% 부터 Roll-Out이 시작됨을 알 수 있다.

7) 면진베어링의 축소모델 성능시험 결과, 설계된 면진베어링은 사양의 요구성능을 만족하는 것으로 평가된다.

7. 후 기

본 연구는 현재, 대림산업(주)에서 시공중인 인천 LNG 인수기지 현장의 LNG 저장탱크 지진 저항용 면진베어링(LRB) 개발 성능시험의 일부를 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. Aiken, I.D., Kelly, J.M., Jajirian, F., "Mechanics of Low Shape Factor Elastomeric Seismic Isolation Bearings", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-89/13, University of California, Berkeley, 1989.
2. J.M.Kelly, "MECHANICAL AND FAILURE CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING, NATURAL RUBBER ISOLATION BEARINGS FROM FOUR DIFFERENT TEST PROGRAMS", EERC, UC-Berkeley, 11th SMIRT Post Conference Seminar on Seismic Isolation of Nuclear and Non-nuclear Structures, Nara, Japan, August 26-27, 1991.
3. 김남식, 이동근, "적층고무받침(Laminated Rubber Bearing)의 정적 및 동적 특성실험", 대한토목학회 논문집, 제13권, 제2호, 1993.
4. 김남식, 유춘화, 이동근, "Base Isolator의 제작 및 특성 시험", 한국전산 구조 공학회지, 제5권, 제4호, 1992, pp41~45.
5. Nam-Sik Kim and Dong-Guen Lee, "Pseudo-Dynamic Test of Base-Isolated Liquid Storage Tanks with a Substructuring Technique", The Forth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Seoul, Korea, 1993.
6. Chun-Hwa Ryu, Gyu-Seop Lee, Hyeong-Oh Kweon and Sang-Kyu Park, "Estimation Dynamic Properties of Rubber Materials and Their Applications to Vibration Isolator", Damp'ng'93 Conference, San-Francisco, CA, USA, February 24-26, 1993.
7. H. Bomhard, L. Stempniewski, Dyckerhoff & Windmann AG, Munich, "LNG STORAGE TANKS FOR SEISMICALLY HIGHLY AFFECTED SITES", DYWIDAG, International Post-SMIRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and control of Vibration of Structures, capri(Napoli), Italy, August 23 to 25, 1993.