

납 먼진받침을 적용한 건축물의 내진설계 Seismic Design of Building Using LRB(Lead Rubber Bearing)

김두훈* 권형오** 박해동** 정민기** 이동근***
Kim, Doo Hoon Kwon, Hyung Oh Park, Ha Dong Jeong, Min Ki Lee, Dong Guen

Abstract

Seismic isolation has developed to the point where it may be considered as a viable design alternate for a wide range of building structures. However, it needs to consider various aspects to adopt a suitable isolation system for buildings practically. This report presents the basis for the preliminary design procedure which has been developed for the seismic isolation system using the lead rubber bearings. The design procedures have been developed to ensure that the bearings will safely support the maximum gravity load throughout the life of the structure while they provide a period shift and hysteretic damping during the design earthquake.

1. 서 론

지진하중에 대한 국내의 연구는 1988년에 개정된 '건축물의 구조기준 등에 관한 규칙'에서 건축물의 내진설계규정이 제정되면서 관심이 고조되었으며, 1995년 일본 고베지역의 지진피해를 접하게 되면서 한반도 또한 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아니라는 인식아래 국내의 여러관련단체에서 건축물의 내진설계에 관한 다양한 연구를 수행하고 있다.

건축물의 내진설계의 개념은 약진에 대해서는 건축물의 탄성거동으로 건축물의 사용성을 확보하고, 강진에 대해서는 구조물의 연성거동에 의한 지진에너지를 소산시키는 방법으로 건물의 전체적인 안전만 확보하여 인명피해를 최소화하려는 소성설계개념이다. 건축물의 용도에 따라서는 내진성능이 다르므로 소성설계의 개념을 모든 구조물에 적용하기는 어렵다. 특히, 건축물의 기능 및 중요도면에서 강진에 대해서도 건축물이 탄성범위내에서 거동할 뿐만아니라, 건축물내의 중요 시설 및 설비가 피해를 입지않도록 내진설계가 요구되는 건축물도 있다. 또한, 1988년 내진설계규정이 제정되기 이전에 축조된 건축물의 경우 건축물의 강성보강만으로 내진성능을 만족시키지 못하는 건축물도 존재한다. 따라서, 이러한 건축물에 대한 내진성능을 만족시키기 위해 새로운 내진설계 기술이 국내에도 필요하다는 인식이 확산되고 있다. 본 논문에서는 건축물과 기초지반사이에 납 먼진받침(Lead-Rubber Bearing)으로 구성된 지진격리시스템을 설치하여 건축물을 수평지반운동으로부터 분리시키는 방법에 관한 설계절차를 다루고자 한다.

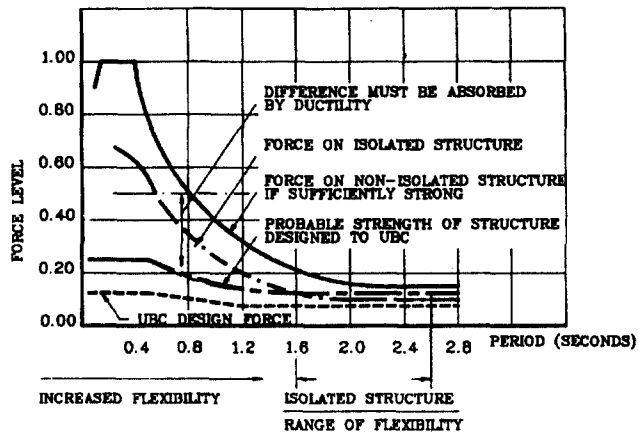
* 유니슨산업(주) 기술연구소 소장

** 유니슨산업(주) 기술연구소 연구원

*** 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 납 면진받침을 이용한 내진설계

납 면진받침은 적층고무받침에 납봉을 삽입하여 만든 지진격리장치로 현재 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있으며, 국내에서도 최근에 LNG 탱크, 교량 및 건축물에 대한 적용사례가 늘고 있다. 납 면진받침은 고무에 의한 수평방향의 유연성으로 납 면진받침과 건축물로 구성되는 계의 주기를 길게 함으로써 지진으로 인한 지반운동의 단주기성분이 건축물에 입사되는 지진력을 감소시키는 기능과 납의 소성이력거동으로 강진이 발생할 때 건축물에 입사되는 지진에너지를 소산시키고 풍하중이나 약진이 발생할 때 납의 초기강성으로 건축물의 지나친 수평운동을 제어하는 기능을 갖는다. 납 면진받침의 이러한 특성을 이용한 내진설계의 원리⁽¹⁾는 일반적으로 UBC에서 제공하는 응답스펙트럼을 이용하면 쉽게 설명될 수 있다. <그림 1>에서 주기가 1.5초 이상에서는 구조물의 실제 강성을 나타내는 응답스펙트럼이 납 면진받침을 적용한 구조물에서 예상되는 탄성지진응답스펙트럼 보다 위에 있으므로, 구조물의 탄성거동이 예상된다. 실제, 고베지역의 지진복구과정에서 납 면진받침을 이용한 내진설계기법이 이러한 이유에서 중요한 건축물이외에 주거건물에서 많이 적용되었다.



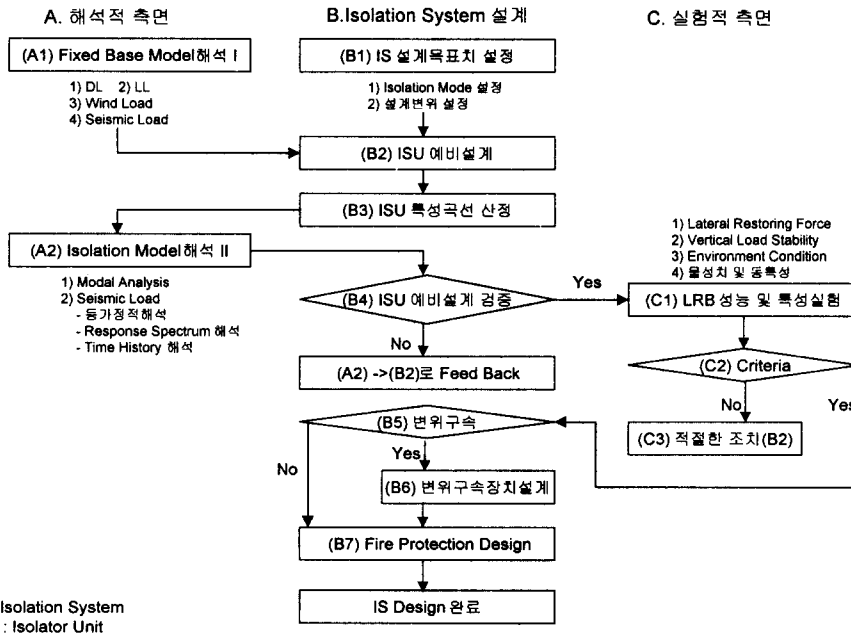
<그림 1> 납 면진받침을 이용한 내진설계의 원리

2.1 납 면진받침을 적용한 구조물의 설계 기준

납 면진받침을 이용한 건축물의 내진설계가 규정되어 있는 국내의 규정집들을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 납 면진받침을 이용한 구조물의 설계기준

제정기관	제목	비고
SEAOC	Recommended Lateral Design Requirement and Commentary	Blue Book
SEAONC	Tentative Seismic Isolation Design Requirements	Yellow Book : Blue Book의 제4판 (1986)
SEAOC	General Requirements for the Design and Construction of Seismic-Isolated Structures	Blue Book 5판의 Appendix(1990) UBC의 Provision(1991)
AASHTO	Guide Specification for Seismic Isolation Design	1992
UBC	Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures	1994
UBC	Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures	1997
AASHTO	Revision to the Guide Specifications for Seismic Isolation Design, June 1991	1997~1998



<그림 2> 납 면진받침의 설계절차

2.2 납 면진받침의 설계절차

<표 1>에 열거된 규정들은 대부분 납 면진받침을 적용한 구조물의 설계방법에 대해서는 상세히 언급하고 있지만, 납 면진받침 자체에 대한 별도의 설계규정을 제시하지 않고 설계자가 검증 가능한 설계방법으로 몇 가지 조건에 대한 규정을 만족하도록 요구하고 있다. 따라서, 여기서는 국내외의 여러 문헌들에 제시된 설계규정을 바탕으로 설계절차를 작성하였다(그림 2 참조). 그림 2에서 납 면진받침 설계는 지진응답해석결과로부터 요구되는 납 면진받침에 대한 설계 단계와 제작 및 특성실험등을 통해 검증하는 단계로 구성된다.

2.3.1 수치해석

건축물을 기초지반에 고정된 모델과 기초지반과 건축물사이에 납 면진받침을 설치한 모델에 대해 시방서에 규정된 하중(사하중, 활하중, 풍하중, 지진하중 등)을 작용시켜 구조물의 응답특성을 구한다. 지반고정 모델에 대한 수치해석결과로부터 납 면진받침을 초기 설계하고, 초기설계된 납 면진받침을 지진격리된 구조물에 적용하여 구조물의 응답특성으로부터 납 면진받침의 내진성능에 대한 검토를 수행한다.

2.3.2 납 면진받침 설계

(B1) 설계목표치 설정

납 면진받침을 이용한 지진격리시스템을 설계할 때 고려해야 할 중요한 사항은 구조물로 전달되는 지진력과 납 면진받침의 변위를 최소화하기 위해 고무의 유연성과 납의 함량을 어떻게 조합할 것인가이다. 납 면진받침의 설정모드와 감쇠비가 밀면전단력과 변위에 상호영향을 주므로, 개념상의 최적치를 수치해석으로 유도하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 따라서, 여기서는 문헌상에서 유사한 구조물의 설계목표치를 조사하여 그 값을 설계목표치로 정하였다.

(B2) 납 면진받침의 예비설계

납 면진받침의 예비설계는 복잡한 비선형 시간이력해석방법이 아닌 시방서에 규정된 간단한 방법으로 납 면진받침을 초기설계하고 이에 대한 구조물의 응답거동특성을 파악하는 과정을 반복 수행함으로써 설계목표치에 근사한 납 면진받침을 선정하는 과정이다.

설계변위산정 납 면진받침을 설계하기 위해 기본적으로 가정해야 하는 설계변위는 설계목표치를 결정하는 단계에서 선정되나, UBC 나 AASHTO 등에서는 설계지진에 대해 납 면진받침이 <표 2>에서 제시하는 변위를 최소한 만족하도록 규정하고 있으므로 납 면진받침의 설계변위를 이 수준치로 가정하였다. DIS⁽⁴⁾나 예비설계관련 논문에서도 같은 방법을 이용하고 있다.

<표 2> 설계변위

규준	UBC ⁽⁵⁾	AASHTO ⁽⁶⁾	비고 ^{(5),(6)}
설계변위	$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} T_D}{B_D}$	$D_D = \frac{250 A S_i T_{eff}}{B}$	B_D, B : 설계변위에서의 감쇠계수 T_D, T_{eff} : 유효주기 A : 가속도계수 S_i : 지반계수 g : 중력가속도 C_{VD} : 지진계수(UBC)

고무물성치가정 고무 물성치는 제조회사에 따라 적용하는 기준이 다르므로 어떤 일정한 값을 제시하기는 어렵다. AASHTO 탄성받침 설계규정에 고무 경도별 물성치의 범위가 제시되어있고, 그외의 규준들은 대부분 전단탄성계수(G)값^{(4),(6)}을 0.7MPa, 0.9 MPa, 1.1MPa 세종류로 나누어 사용하도록 규정하고 있다. 여기서는 전단탄성계수가 0.7 MPa 고무를 사용하였다.

LRB시스템가정 납 면진받침을 적용한 구조물의 첫 번째 모드는 설계목표치를 설정하는 단계에서 결정된 값을 사용한다.

평면산정 : 평면을 결정하는 방법은 AASHTO⁽⁶⁾의 전단변형을 제한치에 대한 규정을 이용한 방법을 적용하였다.

$$0.33\epsilon_u \geq \frac{6SP}{4G(1+2kS^2)A_r} \quad (1)$$

고무의 파괴시 연신율(ϵ_u)은 ASTM D412⁽⁷⁾에 규정된 실험방법에 따라 측정하고, 수직하중(P)은 UBC에서 규정된 1.2DL+1.0LL(DL:사하중, LL:활하중)값을 사용하였다. 형상계수(S)⁽⁶⁾는 하중재하면적에 대한 팽창 가능한 면적의 비, 작용면적(A_r)은 내부보강판의 면적을 나타낸다. 또한 재료상수값(k)은 <표 3>에서 나타낸 AASHTO의 규정값을 사용하였다.

<표 3> 재료상수 및 크리프영향

경도	50	60	70	비고
재료상수	0.75	0.60	0.55	AASHTO 탄성받침규정
크리프(25년)/단기처짐	25%	35%	45%	

납크기산정 납함량은 고무와 내부보강판에 의한 납의 전단거동 구속효과가 고려된 유효전단항복 응력값을 설계목표치중 감쇠값을 제공하기 위하여 필요한 항복하중값으로 나눈 값으로 결정하였다. 유효전단항복응력값은 납 면진받침의 전단실험을 통하여 일반화되어야 하는 값이나, 여기서는

문헌상에 사용되는 80.854 kgf/cm^2 ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 값을 사용하였다. 항복하중값을 결정하는데 있어서 추가적으로 고려할 조건은 첫째, 풍하중에 대한 변위량을 상부구조물의 층간변위한계치 이하로 구속하며, 둘째 수평복원력을 제공(고무 직경의 1/6~1/3 이내)⁽⁴⁾⁽⁵⁾하는 것이다. 여기서는 두조건이 만족하는 범위내의 0.05W값을 납의 항복하중값으로 가정하였다.

고무두께 산정 고무의 두께는 유효주기 가정을 이용하여 정리한 식(2)⁽³⁾로부터 구할 수 있다.

$$t_r = \frac{(T_D/2\pi)^2 GA_r \Delta}{[(T_D/2\pi)^2 g \alpha - \Delta] \cdot f_b} \quad (2)$$

설계지진 작용시 변위를 이동량(Δ)과 이때의 유효주기(T_D), 중력가속도(g), 건물 중량만 작용할 때의 고무압축응력(f_b), 그리고 납 면진받침의 면적(A_r)을 이용한다.

보강판두께 산정⁽¹⁾⁽⁴⁾ AASHTO 탄성받침 규정에 제시된 식(3)과 수직하중 재하시 납의 변형에 대한 보강판의 구속력을 근거로 작성된 식(4)로부터 내부보강판의 두께(t_s)를 결정하였다. 보강판의 허용응력(σ_s)는 항복강도를 안전율 1.5로 나눈 값을 사용하며, 수직하중에 의한 납의 정수압(p_{\max})은 수직하중을 납면적으로 나눈 값을 사용한다.

$$t_s \geq \frac{2(t_i + t_{i+1}) \cdot P}{A_r \cdot \sigma_s} \quad (3)$$

$$\geq 1/16 \text{ in}(1.5875 \text{ mm})$$

$$t_s \geq \left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2\sigma_s} \right) \cdot p_{\max} \quad (4)$$

$$p_{\max} = P/A_{pb}$$

(B3) 납 면진받침 특성곡선 산정

예비설계단계에서 결정된 납 면진받침의 정확한 이력특성은 제작 및 실험을 거쳐 결정되어야 하나 Bilinear 모델⁽¹⁾을 납 면진받침의 거동모델로 사용하여 정리한 DIS사의 특성곡선 산정 방법⁽⁴⁾을 적용하였다.

납항복하중(Q_d)계산 유효항복전단응력으로부터 납면적(A_{pb})을 곱한 값으로 납 면진받침의 이력거동곡선에서 변위가 0일 때의 하중값을 의미한다.

초기강성(K_u) 고무와 보강판의 납구속 효과를 고려한 수치해석결과로부터 산정될수도 있지만 여기서는 실험식 $6.5K_d(1 + 12A_{pb}/A_r)$ 을 사용하였다.

항복후 강성(K_d) 항복후 강성은 납의 영향이 사라진 납 면진받침의 전단거동영역의 강성을 의미하며 일반적으로 고무의 수평강성(GA_r/t_r)을 사용한다.

초기항복하중(F_y), 항복변위(Δ_y) 납항복하중, 항복후 강성, 그리고 초기강성을 이용하여 연립방정식을 풀면 초기항복변위($Q_d/(K_u - K_d)$)와 항복하중($Q_d + K_d \cdot D_D$)을 구할 수 있다.

최대하중(F_{\max}) : 최대하중은 $Q_d + K_d \cdot D_D$ 로부터 구할 수 있다.

유효강성(K_{eff}) 유효강성은 $(Q_d + K_d \cdot D_D)/D_D$ 식으로 유도된다.

소산에너지(ΔW), 감쇠비(ξ) 소산에너지와 감쇠비는 $4Q_d(D_D - \Delta_y)$ 와 $\Delta W/(2\pi K_{eff} D_D^2)$ 식으로 구할 수 있다.

수직강성(K_v) $E_c A/t_r$ 식을 이용하였다. 고무의 겉보기 탄성계수(E_c)는 $4G(1 + 2kS^2)$ 으로부터 구할 수 있다.

(B4) 예비설계 검증⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

예비설계된 납 면진받침에 대해 수직하중에 의한 전단변형율, 좌굴에 대한 안전성, 지진발생시 건물의 전도모멘트에 대한 안전성, 그리고 풍하중에 대한 안전성을 평가하도록 UBC, AASHTO,

유럽규준등에 규정하고 있다. 그리고, 예비설계된 납 면진받침의 특성곡선을 이용하여 지진격리된 모델에 대한 지진응답해석으로부터 납 면진받침의 내진성능을 평가하였다.

수직하중에 대한 안전성 - 전단변형을 검토⁽⁶⁾ AASHTO의 지진하중조합에 대한 전단변형율의 한계값에 대한 규정을 검토하였다.

$$0.75\epsilon_u \geq \epsilon_{sc} + \epsilon_{eq} + \epsilon_{sr} \quad (5)$$

여기서 ϵ_{sc} 는 압축하중에 의한 전단변형율, ϵ_{eq} 는 최대수평변위(D_{TM})에 의한 전단변형율, ϵ_{sr} 은 지진하중에 의한 납 면진받침의 회전량(θ)에 의한 전단변형율($D^2\theta/2t_r$)를 나타낸다.

수직하중에 대한 안전성 - 좌굴하중 검토⁽¹⁾⁽⁴⁾ 좌굴하중은 식(6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{P_s}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4P_E}{P_s}} - 1 \right), \quad P_s = GA_{eff} \frac{H}{t_r}, \quad P_E = \frac{\pi^2 E_c I}{3Ht_r} \quad (6)$$

여기서 A_{eff} 는 유효면적, I 는 단면 2차모멘트, H 는 납 면진받침의 총높이를 나타낸다.

전도하중에 대한 안전성 UBC와 AASHTO 등에서는 전도모멘트의 제한규정($0.8D - |E|_{max} \geq 0$)을⁽⁵⁾ 사용하고 있다. 전도하중($|E|_{max}$)은 구조물에 발생가능한 최대지진을 근거로 납 면진받침에 발생되는 최대수직하중이다.

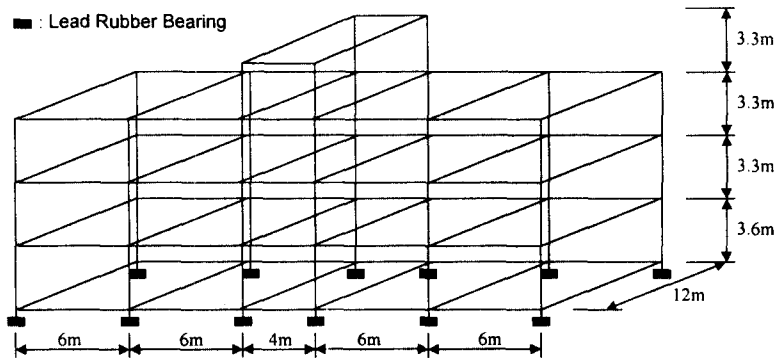
풍하중에 대한 사용성 상부구조물의 층간변위비 제한규정($0.015/R_f$, R_f :반응수정계수)⁽⁵⁾ 이내로 풍하중에 의한 납 면진받침의 수평변위를 제한해야 하는 동시에 탄성영역에서 거동해야 한다.

2.3.3 납 면진받침의 실험

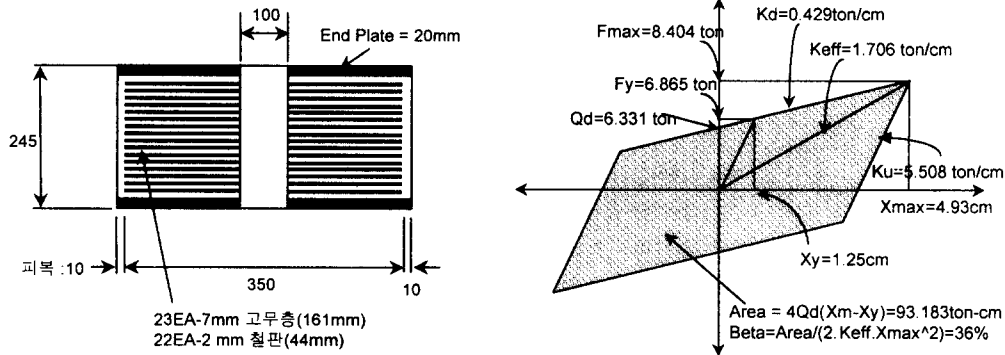
해석결과를 이용한 납 면진받침의 예비설계안이 최종적으로 검증되면, 받침의 물성치와 성능을 확인하기 위하여 완제품에 대한 실험을 수행해야 한다. UBC와 AASHTO에서 제시하는 납 면진받침의 성능 및 특성실험 규정에는 반복하중실험, 하중작용변화를 의존성 실험, Bilateral하중 의존성 실험, 최대·최소 수직하중에 대한 안정성 실험, 그리고 풍하중 구속장치의 극한능력실험 등이 있다. 실험항목은 관련자와의 협의나 요구단 사양에 따라 실험항목이 추가 및 삭제될 수 있으며, 평가기준 또한 달라질 수 있다.

3. 납 면진받침 설계과정 적용예(3층 구조물)

지금까지 설명한 방법들을 이용하여 유니슨산업(주) 연구동 건물을 대상으로 납 면진받침을 설계하였다. 3층 철골라멘구조로 설계되었으며 건물형태는 <그림 3>에 나타내었다.



<그림 3> 건물골조의 윤곽



<그림 4> 납 면진받침의 모양과 특성곡선

3.1 납 면진받침 예비설계

예비설계 단계에서는 지반고정모델에 대한 해석결과를 이용하였다(표 4참조).

<표 4> 지반고정모델에 대한 해석결과

하중종류	수직하중				수평하중		비고
	DL	LL	W(DL+0.3LL)	1.2DL+LL	풍하중	지진하중	
해석결과 (ton)	109.3	29.5	118.1	160.7	1.9	10.9	지진가속도계수(A)= 0.12 지반계수(S) = 1.2

설계변위산정 유효주기(T_D) 1.67초, 감쇠비(ξ) 30%, 지진가속도 0.12g, 지반조건(국내규정:S2, UBC: S_c)을 적용하여 <표 2>의 UBC규정으로부터 구하면 4.93cm가 된다.

평면산정 연신율(ϵ_u) 600%, 전단탄성계수(G) 0.7MPa인 고무를 적용했을 때, 고무직경(D) 35cm, 고무 한 층두께(t_i) 0.7cm, 그리고 형상계수(S) 12.5로 가정하였을 때 식(1)을 만족한다.

납크기결정 납의 항복하중을 0.03~0.05W 사이값을 일반적으로 많이 사용하므로 0.05W(=0.05×118.1=5.91ton)로 결정하였다. 따라서 납크기는 단순히 납면적($5.91 \times 1000/80.854=73.10 \text{ cm}^2$)으로부터 10cm로 결정하였다.

고무두께 산정 식(2)를 이용하면 고무두께가 16.03cm가 요구되므로 고무층수는 23층으로 하고 전체고무두께는 16.1cm로 정하였다.

철판두께 식(3)으로 최소 철판 두께가 0.19cm이므로 0.2cm로 결정하였다.

예비설계 단계에서 결정된 납 면진받침의 모양과 특성곡선을 <그림 4>에서 도시하였다.

3.2 예비설계치의 지진성능 및 안전성 검토⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

납 면진받침의 예비설계안에 대한 특성곡선 <그림 4>을 이용하여 지진가속도(0.12g~0.3g)별로 예상되는 구조물의 내진성능과 받침의 안전성을 <표 5>에 비교해 나타내었으며, 지진력은 건물자중으로 나눈 값으로 나타내었다. 국내 건축시방서의 내진설계방법 중 등가정적해석으로 수직전도하중을 구했을 때 납 면진받침 각각에 6.65ton이 작용하므로, 최종적으로 납 면진받침에 작용하는 최대수직하중은 167.3ton(1.2DL+LL+지진하중)이다.

먼저, 지진력을 살펴보면, 국내규준에서는 정하는 0.12g 지진가속도에서 0.3g까지 범위에서 지반에서 구조물로 전달되는 지진하중은 2~4배까지 줄어든다. 그리고, 실지 구조물설계에 사용되는