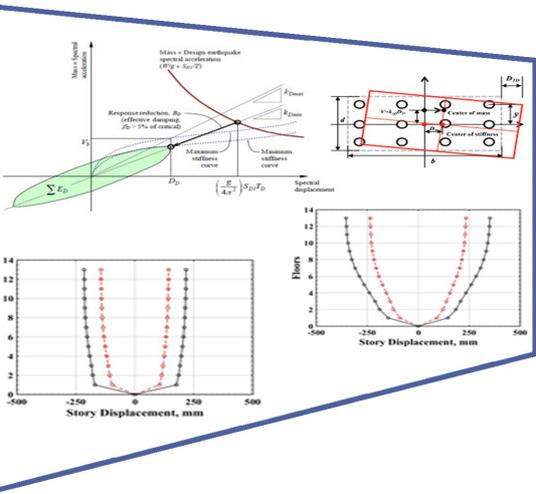


# KBC 2016의 면진구조물 설계기준 소개

## Introduction of Design Requirements for Seismically Isolated Structures in KBC 2016



### 1. 서론

면진구조물은 일반적인 지진력저항시스템(Seismic-force-resisting-system, SFRS)으로 횡력에 저항하는 건축물에 중력방향으로 큰 강성과 강도를 가지는 반면 수평방향으로 매우 유연한 면진장치를 삽입하여 건축물의 주기를 증가시켜 탁월주기가 짧은 일반적인 지진파와의 공진(Resonance)을 회피하고, 지진응답이 면진장치에 집중되도록 하여 상부 건축물의 지진응답을 획기적으로 줄이는 효과가 있다. 지난 30여년 동안 면진장치와 관련된 기술이 급속도로 발전하였고, 내진성능 측면에서 면진구조물의 우수성이 해석적/실험적으로 검증됨에 따라, 일본에서는 일정 규모이상의 건축물에 면진장치를 적용한 사례를 손쉽게 찾아볼 수 있을 정도로 보편화된 실정이다.

2016년에 새로이 개정되어 공표된(국토교통부 고시) 한국건축구조기준 (Korean Building Code - Structural, 이하 KBC2016)에는 면진구조물의 설계요구조건이 최초로 포함되었다. 지진관측 이래 최대 규모의 지진인 경주지진 (2016년 9월 12일, 규모 5.8)으로 인하여 내진성능이 우수한 건축구조물에 대한 요구가 점차적으로 증가하고 있는 실정이다. 아울러 건축물의 흔들림에 민감한 중요한 기계 및 전기 설비를 설치될 데이터 센터나 지진 발생 시 지진피해로 인하여 사회적 파급효과가 막대할 것으로 판단되는 주요 시설물과 위험물질 보관 및 처리시설 등을 중심으로 내진성능을 향상시키기 위하여 면진장치를 사용하려는 시도가 빈번해지고 있다.

면진장치가 설치된 면진구조물 설계에 대한 요구가 점차적으로 증가하고 있는 실정을 고려하여, 본 고에서는 KBC2016에 포함되어 있는 면진구조물의 설계요구조건을 소개하여 건축구조엔지니어의 면진구조물 설계에 도움을 주고자 한다.

### 2. 기준의 구성과 설계 절차

KBC2016에 포함된 면진구조물 설계기준은 미국의 ASCE 7과 유사하다. 다만, ASCE 7에서는 면진구조물의 내진성능을 파악함에 있어 면진장치의 비선형성에 관한 거동을 해석모델에 포함시키지 않은 탄성해석을 허용한다. 반면, KBC2016에서는 면진장치의 비선형거동을 직접적으로 구현할 수 있는 해석모델을 수립하고 지진파를 이용한 비선형시간이력해석을 통하여 구한 지진응답이 허용기준을 만족하는지 확인하여야 한다. KBC2016에서 보다 정밀한 해석모델 수립을



김형준

서울시립대학교 건축학부 부교수

요구하는 이유는 면진구조물 설계에 대한 경험이나 관련 연구가 미국에 비하여 현저히 부족하기 때문으로 판단된다.

ASCE 7의 탄성해석을 통한 면진구조물 설계는 면진구조물의 상부구조가 면진장치에 비하여 수평강성이 현저히 커 지진응답이 면진장치가 설치된 면진층에 집중된다는 가정을 근간으로 수립된 것이다. 이 가정을 바탕으로 면진장치의 연성도(Ductility)를 가정한 후, 이에 해당하는 면진장치의 강성과 감쇠능력을 유효수평탄성강성(Effective elastic stiffness)과 등가점성감쇠비(Equivalent viscous damping ratio)로 치환하여 요구곡선(Demand curve)과 역량곡선(Capacity curve)을 산정하고, 성능점(Performance point)을 계산한다. 계산한 성능점에서의 연성도와 가정한 연성도의 차이가 허용 값을 만족할 때까지 반복설계를 수행하여 설계지진과 최대지진의 지진응답을 결정한다. ASCE 7에서는 단순화된

면진구조물의 설계절차에는 다양한 가정이 포함되기 때문에 지진응답을 보수적으로 평가하도록 설계식이 제안되어 있다. 비선형시간이력해석을 반드시 수행하여 면진구조물의 해당 지진강도에 대한 응답을 평가하도록 하는 KBC2016에서는 ASCE 7의 보수적인 지진응답 평가를 고려하여 일부 계수를 수정하였다.

면진구조물 설계기준은 KBC2016의 0306.12장에 포함되어 있으며, 일반사항, 설계요구사항, 해석절차, 설계검토, 면진장치시험 등 총 5개 절로 구성되어 있다. 이 중 0306.12.1 절의 일반사항에는 모든 면진구조물과 그 구성요소를 0306.12장에 따라 설계하고 시공하여야 함과 면진구조물의 해석은 구조물의 생애주기에 걸쳐 발생될 면진장치의 재료특성 변화를 고려해야 한다는 점을 명시하고 있다. 0306.12.2.~0306.12.5절에는 면진구조물설계와 시공에 관련된 내용을 담고 있다. 이에 대해서는 다음 절부터 자세하게 설명하도

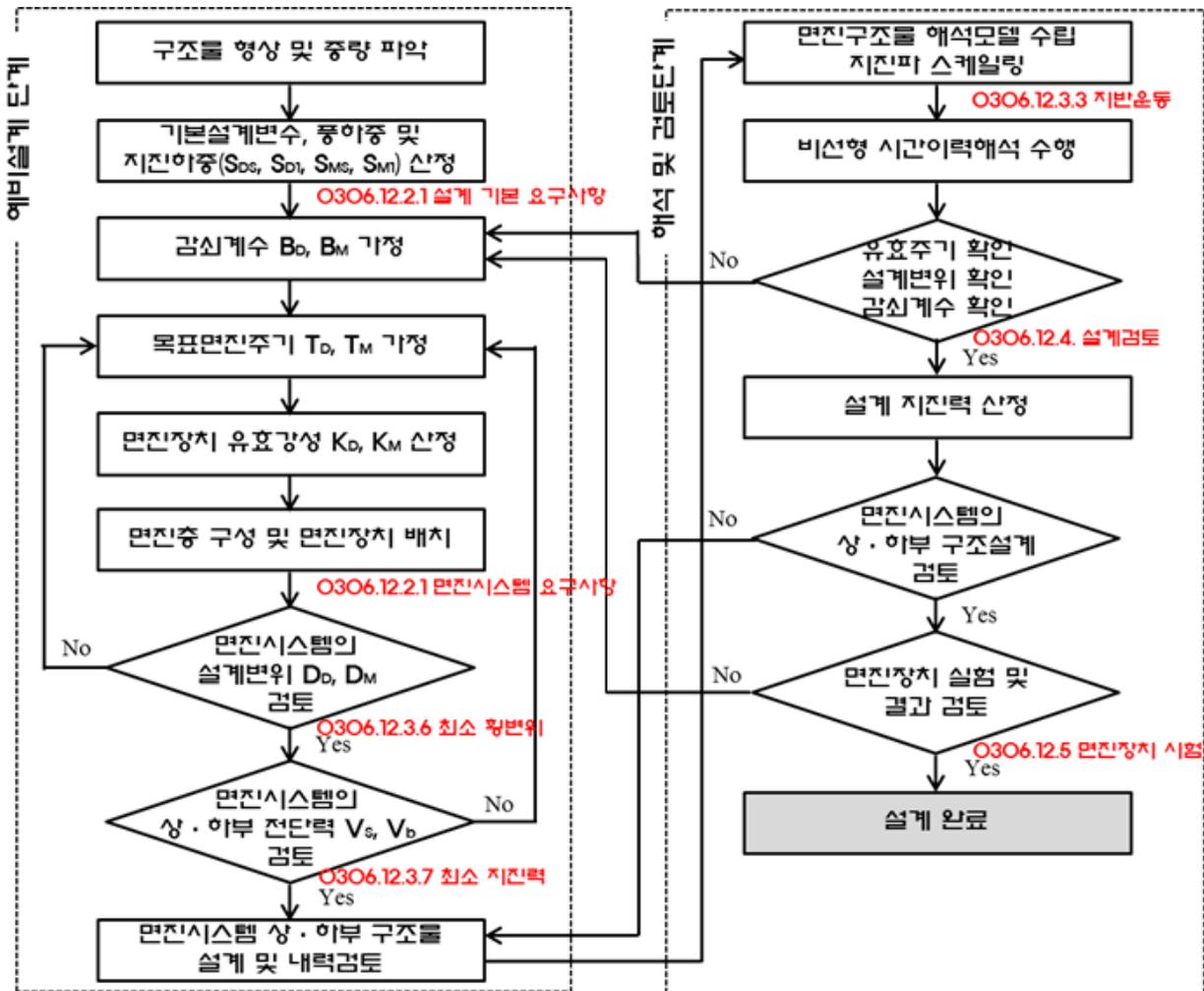


그림 1 KBC 2016 기준에 따른 면진구조물 설계절차

록 한다.

그림 1에 KBC2016에서 제시하고 있는 설계기준과 면진장치 설계절차의 연관성을 도식화하였다. 면진구조물 설계절차는 예비설계 단계와 해석 및 검토단계로 크게 나눌 수 있다. 예비설계 단계에서는 ASCE 7의 설계방식을 활용하여 면진구조물의 상부구조, 면진시스템과 하부구조의 단면가정을 하게 된다. 해석 및 검토단계에서는 면진장치의 비선형성을 고려한 해석모델을 통하여 지진응답을 구하고, 예비설계단계에서 가정한 값과 비교하며, 가정 단면의 적합성 검토를 수행하게 된다. 각 설계절차별 확인하여야 하는 KBC2016의 설계요구조건을 그림에 포함하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 단면 가정을 위하여 ASCE 7의 탄성해석기반의 응답 예측방법을 사용하였는데, 면진설계가 익숙한 구조엔지니어는 각자 익숙한 방법으로 예비설계를 할 수 있다.

### 3. 면진구조물 설계요구조건

0306.12.2절의 설계요구조건은 기본요구사항, 면진시스템 요구사항과 구조시스템 요구사항 등 3개의 세부절로 구성된다.

#### 3.1 기본요구사항

기본요구사항에는 면진구조물의 내진설계범위의 설정방법과 중요도 계수에 대하여 기술하고 있다. 면진구조물은 내진설계범주에 상관없이 중요도 계수를 1.0으로 사용하도록 규정하고 있다. 이는 면진층에서 대부분의 변위가 집중되어 상부구조물은 설계 혹은 최대지진에서도 탄성적으로 거동하므로 1.0보다 큰 중요도 계수를 사용하여 상부구조물의 부재 설계를 할 필요가 없기 때문이다.

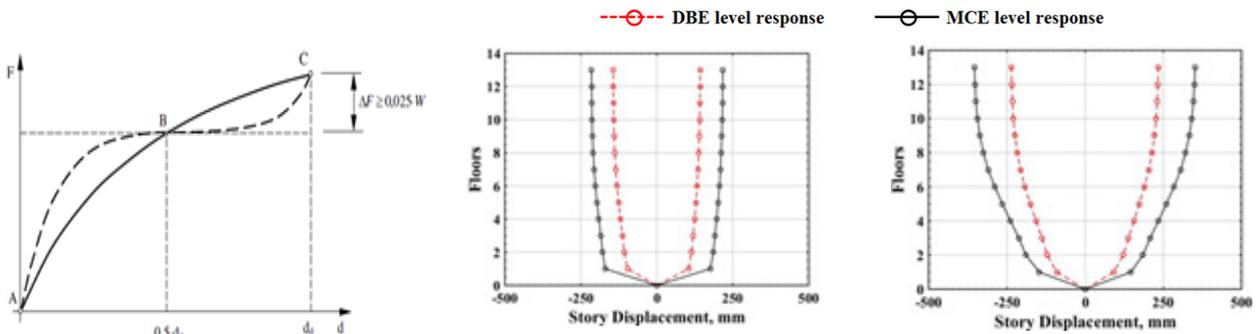
#### 3.2 면진시스템 요구사항

면진시스템 요구사항에는 환경조건에 따른 성능저하에 대한 제한사항, 면진층의 풍하중에 의한 횡변위 제한사항, 면진시스템의 용도구분에 따른 내화구조 요구사항, 복원력 특성에 대한 제한사항, 최대지진변위 구속에 대한 제한사항, 면진시스템 구성요소의 요구강도 산정, 구조물 전도 방지를 위한 제한사항이 포함되어 있다.

면진시스템은 생애주기 동안의 온도, 습기 이외에도 크리프 및 피로와 같은 면진장치의 성능을 저하시킬 개연성이 있는 다양한 환경조건에 대하여 충분한 저항력과 구조적 성능이 유지되어야 하며, 풍하중에 대하여 과도한 변형이 발생하지 않도록 충분한 강성 및 강도를 확보하여야 한다. 또한 면진시스템은 수평방향 하중뿐만 아니라 중력방향 하중에 대해서도 저항하여야 하는 주요 구조요소이므로 화재에 대한 성능이 유지될 수 있도록 내화기준을 만족시켜야 한다.

그림 2의 좌측 그림은 면진시스템의 복원력특성에 대한 제한사항을 도식화한 것이다. 면진시스템의 총설계변위에서의 수평력은 총설계변위의 50%에서 수평력보다 고정하중과 50%의 활하중의 합인 2.5% 이상 커야 한다. 이 제한사항은 그림에서 보는 바와 같이 면진시스템의 항복 후 강성비가 충분하게 커야 함을 의미하며, 이는 강진 후 남게 되는 잔류변형을 최소화하여 여진에 대한 충분한 안전율을 확보하기 위한 제한사항이다. 하지만, 이와 같은 설계요구조건을 총설계변위가 비교적 크지 않고 중력하중에 지배적인 중앙진 지역에 적용할 경우에는 항복 후 강성이 커져, 그림 2의 우측 그래프에서 보는 바와 같이 면진효과가 감소될 수 있다. 항 후 이에 대한 심도깊은 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

최대지진변위 구속에 제한사항으로 예기치 않은 면진층



항복 후 강성이 작은 경우

항복 후 강성이 큰 경우

그림 2 복원력 특성에 관한 요구사항

의 변위를 제한하기 위해 설치되는 구조요소는 최대지진시 면진층에서 발생하는 변위보다 큰 이격거리를 확보해야 함을 명시한 것이다. 다만, 해석적/실험적으로 면진층의 최대지진응답이 이격거리보다 작음을 확인할 수 있는 경우에는 예외로 할 수 있다. 다만, 이 예외의 경우에도 이격거리는 총 설계변위의 0.75배보다 작지 않아야 된다는 최소조건을 만족하여야 한다.

면진시스템의 구성요소는 설계 수직하중과 관련된 하중 조합에서 지진하중효과를 1.5배한 요구강도에 대해 탄성거동을 할 수 있도록 설계되어야 한다. 면진층에서 대변위가 발생하였을 때 전도방지를 위하여, 최대지진에 의한 변동 축력과 중력방향으로 작용하는 고정하중과 50%의 활하중의 합에 의한 축력의 조합에 의한 전도모멘트에 대하여 면진시스템이 충분한 저항력을 가지도록 설계되어야 한다. 또한, 면진시스템의 개별 요소는 다른 구조요소에 과응력이나 불안정을 발생시킬 수 있는 국부적인 들림(uplift)이 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

### 3.3 구조시스템 요구사항

면진구조물의 상부구조는 비면진 구조시스템과 같이 면진시스템을 통하여 전달되 수평방향의 힘과 중력방향의 하중 등에 대하여 단절없이 힘이 전달될 수 있는 구조적 형상과 적절한 강도 및 연성능력을 보유하고 있어야 한다.

주변응력을 포함한 다른 고정장애물과 면진구조물사이의 최대지진하중에 의해 계산된 총최대변위이상의 이격거리를 확보하여, 면진시스템에서 대변위가 발생하였을 때 상부구조물과 주변의 고정 구조물과의 충돌을 방지할 수 있어야 한다.

면진구조물 내에 위치한 공작물은 설계변위와 힘을 사용

하여 탈락이나 이탈 등이 발생하지 않도록 하여야 하고, 공작물 내진설계 기준의 조항에 부합하도록 설계되어야 한다.

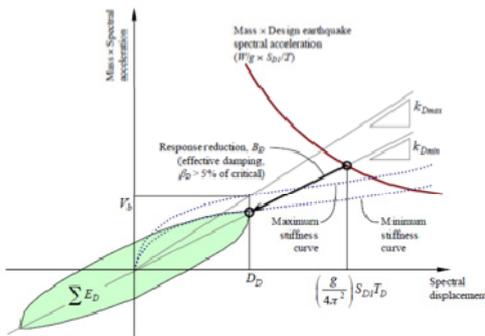
## 4. 면진구조물 해석절차

0306.12.3.절의 해석절차는 일반사항, 모델링, 지반운동, 설계값의 산정, 횡변위 제한, 최소 횡변위, 최소 지진력 등 7 개의 세부절로 구성된다.

일반사항에는 앞서 언급한 3차원 시간이력해석을 수행하여야 한다는 점이 명시되어 있고, 모델링에는 시험을 통하여 결정된 면진시스템의 비선형성을 고려하여 해석모델을 수립하여야 한다고 기술하고 있다. 해석에 사용할 지반운동의 선택과 지진파의 보정 방법은 일반 지진력저항시스템과 동일하다. 다만,  $0.5 T_D$ (설계지진 시 주기의 0.5배)부터  $1.25 T_{1A}$ (최대지진 시 주기의 1.25배) 사이에서 지진파의 스펙트럼 평균값과 설계스펙트럼의 비교를 통하여 지진파를 보정한다. 이는 비면진 구조물에 비하여 1차 모드가 지배적인 면진구조물의 지진응답을 고려한 설계요구사항이다. 비선형해석은 면진구조물의 부재력을 과도하게 작게 평가될 수 있다. 설계값의 산정에서는 부재력에 대한 보정계수  $C_m$ 을 통하여 부재력의 하한치를 확보할 수 있도록 하였다. 횡변위 제한에서는 면진장치의 층간변위 제한으로 비면진구조물의 층간변위 제한과 동일하다.

### 4.1 최소 횡변위

면진시스템은 해석에 의하여 요구변위가 작게 평가되더라도, 충분한 변형능력을 확보하여야 하므로, 최소 횡변위가 제시될 필요가 있다. 그림 3의 좌측그림은 설계지진에 대한 면진시스템의 비선형정적해석 결과에 의한 성능점 산



면진장치의 성능점 산정

그림 3 면진구조물의 성능점과 설계하한치(ASCE 7 Commentary 참조)

| Design Parameter  | ELF Procedure                             | Dynamic Procedure |                  |
|---|---|-------------------|------------------|
|   |   | Response Spectrum | Response History |
| Design displacement - $D_D$                             | $D_D = (g/4\pi^2)(S_{D1} T_D^2 / B_D)$    | =                 | =                |
| Total design displacement - $D_T$                       | $D_T \geq 1.1D_D$                         | $\geq 0.9D_T$     | $\geq 0.9D_T$    |
| Maximum displacement - $D_U$                            | $D_U = (g/4\pi^2)(S_{D1} T_D^2 / B_{Ud})$ | =                 | =                |
| Total maximum displacement - $D_{TU}$                   | $D_{TU} \geq 1.1D_U$                      | $\geq 0.8D_{TU}$  | $\geq 0.8D_{TU}$ |
| Design shear - $V_3$ (at or below the isolation system) | $V_3 = k_{Dmax} D_D$                      | $\geq 0.9V_3$     | $\geq 0.9V_3$    |
| Design shear - $V_1$ ("regular" superstructure)         | $V_1 = k_{Dmax} D_D R_1$                  | $\geq 0.8V_1$     | $\geq 0.6V_1$    |
| Design shear - $V_1$ ("irregular" superstructure)       | $V_1 = k_{Dmax} D_D R_1$                  | $\geq 1.0V_1$     | $\geq 0.8V_1$    |
| Drift (calculated using $R_1$ for $C_d$ )               | $0.015h_{sx}$                             | $0.015h_{sx}$     | $0.020h_{sx}$    |

해석의 종류에 따른 설계 값

정방법에 대한 설명으로, 이를 통해 면진시스템의 최소 횡 변위 결정과정을 설명할 수 있다. 그림에서 빨간 색 실선은 감쇠비가 5%일 때 탄성응답스펙트럼으로부터 구한 요구곡 선이며, 두 개의 파란 색 점선은 각 각 면진시스템의 최대 강성  $k_{Dmax}$  과 최소강성  $k_{Dmin}$  을 가질 때 역랑곡선이다. 면 진시스템의 설계에 사용되는 변위는 설계지진과 최대지진 에 대해서는 각 각 다음에서 계산되는  $D_D$ 과  $D_M$ 보다 작아 서는 안된다.

$$D_D = 0.9 \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{D1} T_D}{B_D}$$

$$D_M = 0.8 \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{M1} T_M}{B_M}$$

여기서, 아래 첨자로 사용되는  $D$ 와  $M$ 은 설계지진과 최 대지진을 의미하며,  $S_{D1}$ 는 1초 주기 설계스펙트럼 가속도 이고,  $B$ 는 그림에서 면진시스템의 에너지소산면적  $\Sigma E_D$ 로 부터 구한 등가점성감쇠비에 의한 요구곡선저감 계수이며,  $T$ 는 면진구조물의 유효주기로 다음 두 식으로 구한다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin}g}}$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin}g}}$$

여기서,  $W$ 는 면진구조물의 지진중량이다.  $D_D$ 과  $D_M$  식 의 0.9와 0.8의 계수는 그림 3의 우측 표에서 제시하고 있 는 동적해석과 등가정적해석 결과의 차이를 보정하기 위하 여 사용된 계수이다.

또한 면진시스템은 비틀림을 고려한 그림 4의 총설계변 위에 대해 설계를 위한 최소값  $D_{TD}$ 와  $D_{TM}$ 을 다음 식으로 제한하고 있다.

$$D_{TD} = D_D \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

$$D_{TM} = D_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

여기서, 기호의 의미는 그림에 표시하였으며,  $e$ 는 면진 상부구조의 질량 중심과 면진시스템의 강성중심 사이의 실 제 편심거리와 우발편심거리를 합한 값이다.

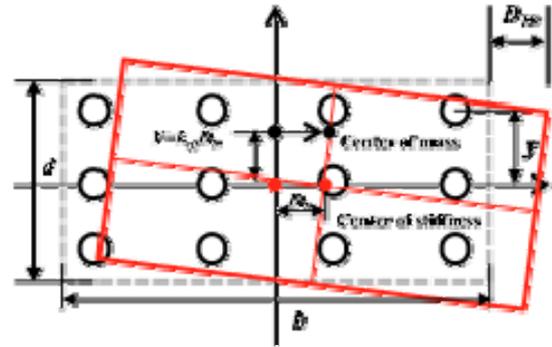


그림 4 면진구조물의 총설계변위

#### 4.2 최소 지진력

최소 횡변위와 유사하게 해석으로 구한 면진시스템 상부 구조와 하부구조의 요구지진력이 작게 평가될 수 있으므로 구조부재 설계를 위한 최소 지진력을 제시할 필요가 있다. 면진시스템과 하부구조의 밀면 전단력  $V_b$ 는 다음 식으로 구한 값보다 작아서는 안 된다.

$$V_b = 0.9k_{Dmax}D_D$$

면진 상부구조의 최소전단력  $V_s$ 는 다음 식으로 구한 값 보다 작아서는 안 된다.

$$V_s = 0.6 \frac{k_{Dmax}D_D}{R_I}$$

여기서, 정형의 상부구조물의 경우  $R_I$ 는 상부구조의 반 응수정계수에 3/8를 곱한 값으로 2보다 클 수 없으며, 비정 형의 상부구조물에서는 이를 1.33배 한다. 상기 두 식에 포 함되어 있는 0.9와 0.6의 계수는 동적해석과 등가정적해석 결과의 차이를 보정하기 위하여 사용된 값이다. 또한 두 식 에서는  $k_{Dmin}$  대신  $k_{Dmax}$ 를 사용하여 보수적으로 최소 지진 력을 평가함을 알 수 있다. 상부구조물 설계에 사용하는 최 소 밀면전단력인  $V_s$  값은 계수붕하중에 상응하는 밀면 전 단력보다 커야 한다. 또한  $V_s$ 는 ① 내진 중량  $W$ (고정하중 +0.5\*활하중)와 면진주기  $T_D$ 를 갖는 비면진 구조물로 가정 하여 구한 밀면전단력, ② 면진시스템의 탄성한계에 상응 하는 수평지진력의 1.5배 중 큰 값의 60%보다 작아서는 안 되고, 상부구조가 비정형구조물인 경우에는 80%보다 작아 서는 안 된다.

## 5. 면진구조물 설계검토와 장치시험

면진구조물의 해석, 설계, 장치시험 등은 아직 많은 구조 엔지니어에게 생소할 수 있다는 점에서 설계의 검토는 반드시 필요하다. 기준에서는 지진해석법과 면진시스템의 이론과 실무에 경험이 있는 등록된 전문가로 구성된 독립된 집단에 의해 설계검토가 수행되어야 한다. 주요 검토 내용은 설계에 사용된 모든 변위량 및 전단력의 결정과정과 최종설계 및 해석결과이며, 설계검토자는 각종 시험에 참고하고 시험과정과 결과를 검토하여야 한다.

면진구조물의 내진성능은 면진장치의 구조특성에 의존하므로 해석모델 수립에 사용한 면진장치의 성능이 장치원형시험을 통하여 검증되어야 하며, 구조물에 설치될 모든 면진장치는 반드시 제품시험을 통하여 성능이 입증되어야 한다.

면진장치의 장치원형시험과 제품시험의 방법에 대해서는 기준에 자세히 기술되어 있으므로 본고에서 언급하지 않는 대신, 설계 시 반드시 검토하여야 하는 장치원형시험에 의한 면진장치의 적합성 판정에 대하여 간단히 소개한다.

장치원형시험을 통하여 1) 각 시험체에 있어서 3회 반복 시험시의 각 유효강성 값과 3회 평균 유효강성 값의 차이가 15%이하이며, 2) 그림 5와 같이 각 시험 사이클에서 면진장치 시험체 2개의 유효강성과 평균 유효강성의 평균값 차이가 15%이하이고, 3) 각 시험체에 있어서 사이클별 강성변화가 초기 값의 20%이내이며, 4) 각 시험체에 있어 사

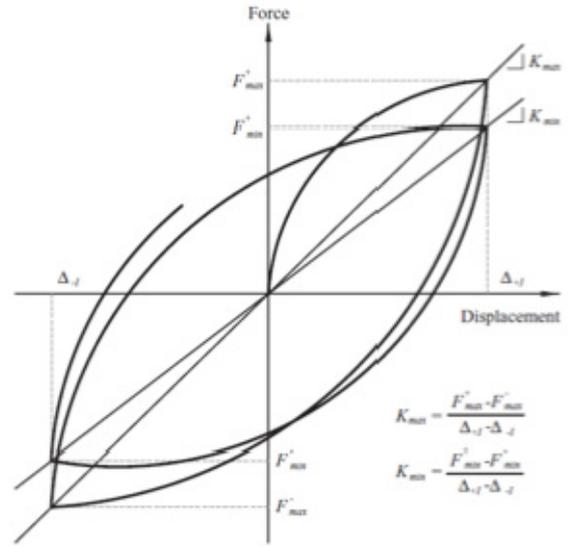


그림 5 면진장치의 설계특성치의 허용기준

이클별 유효강성 저하가 초기 값의 20%이내 이면, 면진장치의 성능이 적절한 것으로 판단할 수 있다.

제품시험은 제품의 손상을 방지하기 위하여 설계변위에 대하여 활하중의 1/2과 고정하중의 합을 수직 하중으로 가력한 상태에서 각 각 3회 반복가력하고, 1) 설계변위에 대한 3회 반복시험시의 각 유효강성 값과 3회 평균 유효강성 값의 차이가 15%이하이고, 2) 설계변위에 대한 면진시스템의 평균 유효강성값과 설계값의 차이가 10%이하이면, 제품 시험에 따른 성능은 적절한 것으로 판정한다. 