

변형도 속도효과를 고려한 저온에서의 면진장치 해석모델

Analytical Modeling of Seismic Isolators at Cold Temperature Considering Strain Rate Effects

김 대 곤
Kim, Dae Kon

국문요약

고무제품에 근간을 둔 면진장치는 상당한 저온효과와 약간의 변형도 속도효과를 보여준다. 면진장치의 비탄성거동에 영향을 미치는 이들의 속성은 면진장치의 거동을 정확히 모델링하기 위해 반드시 고려되어야 하기 때문에, 고무와 납 모두에 영향을 미치는 저온효과와 변형도 속도효과를 고려할 수 있는 해석모델을 제시하였다. 열린 면진장치를 일정 수직하중에서 수평방향 반복하중을 가한 실험결과들로부터 시스템 식별(SI : system identification)을 적용하여 해석모델에 필요한 고무와 납의 매개변수들을 구하였다. 제안된 해석모델은 면진장치의 거동을 유사하게 표현할 수 있음을 보여준다.

주요어 : 적층고무베어링, 납-고무베어링, 저온효과, 변형도 속도효과, 해석모델

ABSTRACT

Rubber bearings may exhibit a significant cold temperature effect and some velocity dependency(strain rate effect). Both of these attributes which affect non-linear behavior must be accounted for when accurately modelling the bearings behavior, therefore, an analytical model is proposed to consider the effects of the cold temperature and strain rate on both rubber and lead. From the results of an experimental investigation where the frozen bearings were tested under lateral cyclic loading with constant axial load, a non-linear system identification with least squares procedure was applied to determine the material properties of rubber and lead. It is demonstrated that the proposed analytical model is able to simulate the reversed cyclic loading behavior of elastomeric and lead-rubber bearings.

Key words : laminated rubber bearing, lead-rubber bearing, cold temperature effect, strain rate effect, analytical modeling

1. 서 론

진동으로부터 구조물을 분리(isolation)시키는데 사용되는 적층고무베어링이나 납-고무베어링 면진장치의 설계에 있어서 고무의 동특성은 필히 고려되어야 하며, 구조설계 기술자가 고무의 이력거동이 온도와 변형도 속도(변형률)에 따라 어떻게 변하는지를 반드시 알아야 한다.⁽¹⁾ 면진장치의 내진 성능에 대한 연구가 최근에 활발히 진행되어오고 있지만, 이러한 면진장치의 저온에서의 성능은 별로 연구되어지지 않았다. 저온에서 천연고무나 인조고무(neoprene)의 강성이 증가함에도 불구하고, 구조설계 기술자는 흔히 약 20°C의 상온에서 실시한 실험실 실험결과로부터 측정된 면진장치의 전단강성을 이용하여 면진장치로부터 구조물로 전달되는 수평력을 계산한다. 그러나, 고무제품에 근간을 둔 면진장치의 저온에서의 분자구조 결정화(crystallization) 때문에 증가하는 전단강성을 면진설계 단계에서 고려하여야 한다.⁽²⁾ 이는 교량의 상판으로부터 면진장치를 거쳐 교각이나 교대로 전달되는 수평력이나, 건물의 기초로부터 면진장치를 거쳐 상부구조로 전달되는 수평력은 고무의 전단강성 값에 좌우되며 저온에서의 전단강성 증가량은 면진장치 설계를 위하여 반드시 알아야 하기 때문이다.⁽³⁾

또한, 고무는 점탄성(visco-elastic) 재료이고 carbon black 을 함유하고 있기 때문에 면진장치의 전단계수는 변형도 속도에 종속적이다.⁽⁴⁾ 준정적(quasi-static) 실험결과와 비교하여 동적 실험으로부터 얻은 전단계수 값이 큰 경향이 있으므로, 이 효과를 고려하기 위해 몇몇 시방서에서는 동하중에 의한 응력이나 변형도를 구할 때 전단계수 값을 증가시킬 것을 권한다.⁽²⁾

본 논문에서는 적층고무베어링과 납-고무베어링 면진장치의 저온과 변형도 속도효과를 실험결과를 통하여 고려한 해석모델을 제시하였다. 전단계수, 항복응력, 그리고 몇몇 계수들이 해석모델을 묘사하는데 필요한 매개변수들이다. 본 논문에서 사용한 면진장치의 저온효과와 변형도 속도효과를 조사하기 위하여 열린 면진장치를 일정 수직하중에서 수평방향 반복하중을 가한 실험을 실시하였다. 실험결과에 SI를 적용하여 해석모델에 필요한 고무와 납의 매개변수들을 구하여 제안된 해석모델에 적용하여 해석모델의 타당성을 검증하였다.

2. 해석모델

2.1 면진장치의 이력특성

고무제품에 근간을 둔 면진장치는 상당한 저온효과와 약간의 변형도 속도효과를 보여줄 수 있다. 비탄성거동에 영향을 미치는 이 속성들은 면진장치의 거동을 정확히 모델링하기

* 정희원 · 서울산업대학교 구조공학과 전임강사(대표저자 : dkkim@duck.snut.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 6. 12 / 심사종료일 : 2001. 7. 12)

위해 반드시 고려되어야 한다. 이러한 효과를 고려하기 위하여 여러 가지 수학적 모델이 사용되어질 수 있다.

그림 1은 면진장치 실험에서 가력속도를 정적으로 가한 경우(monotonic static loading)와 가력속도효과가 포함되게 가력속도를 동적으로 가한 경우(dynamic cyclic loading)의 면진장치의 전단력-전단변위 관계를 보여준다. 이 그림에서 Q_d 는 전단변위가 0 일 때의 동적 전단력으로서 정적 전단력 Q_{ds} 에 가력속도효과에 의한 강도증가량 Q_{dv} 를 더한 값과 같으며 식 (1)과 식 (2)로서 나타낼 수 있다.

$$Q_d = Q_{ds} + Q_{dv} \quad (1)$$

$$Q_{ds} = F_y - k_2 x_y = F_y \left(1 - \frac{k_2}{k_1}\right) \quad (2)$$

여기서 F_y = 항복전단력, x_y = 항복전단변위, k_1 = 초기탄성강성, k_2 = 항복 후 전단강성이다.

2.2 적층고무베어링 해석모델

가력속도효과가 포함된 적층고무베어링의 거동을 위해 그림 1에서 정적거동은 bilinear 모델로서, 그리고 동적거동은 비선형 점성모델로서 표현될 수 있다. 즉 정적스프링과 동적 dashpot의 병렬배치인 그림 2(a)의 켈빈모델로서 면진장치의 거동을 나타낼 수 있다. 그림 2(b)는 적층고무베어링의 전체 이력 특성을 보여주는데, 고무의 전체 전단응력 τ_r 은 그림 2(c)에서 보여주는 정적스프링의 전단응력 $(\tau_s)_r$ 과 그림 2(d)에서 보여주는 속도에 종속적인 전단응력 $(\tau_v)_r$ 의 합인 식 (3)으로부터 얻을 수 있다.

$$\tau_r = (\tau_s)_r + (\tau_v)_r \quad (3)$$

여기서 $(\tau_s)_r$ 는 온도와 전단변형도에 종속적이고, $(\tau_v)_r$ 는 온도와 전단변형률에 종속적이다.

식 (3)의 정적스프링 전단응력 $(\tau_s)_r$ 는 Menegotto와 Pinto⁽⁵⁾에 의해서 처음으로 제안되었고, Mander⁽⁶⁾에 의하여 발전된

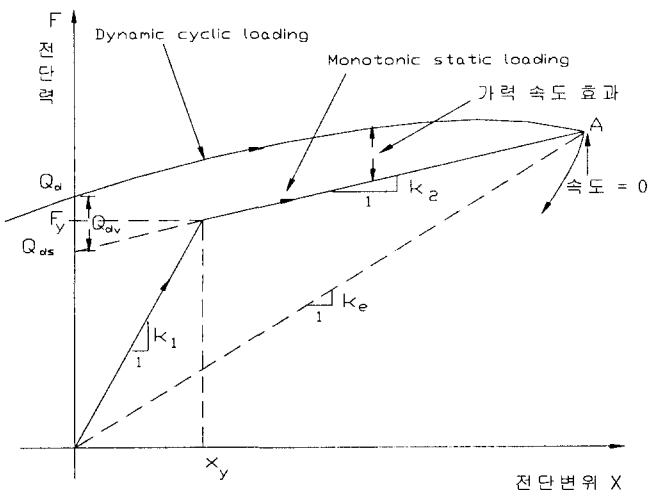


그림 1 면진장치의 전단력-전단변위 관계

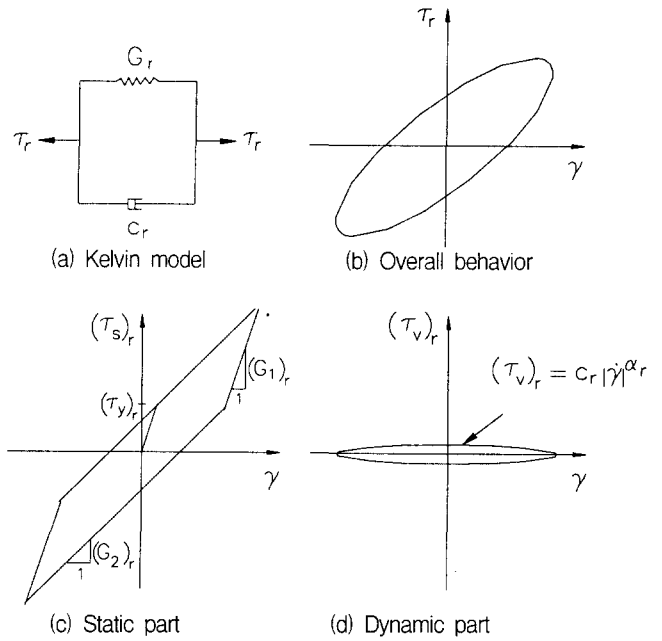


그림 2 적층고무베어링 모델

bilinear 모델인 식 (4)를 사용하여 표현할 수 있다.

$$(\tau_s)_r = (\tau_o)_r + (G_1)_r (\gamma - \gamma_o) \times \left[q + \frac{1-q}{\left\{ 1 + \left| \frac{(G_1)_r (\gamma - \gamma_o)}{(\tau_y)_r - (\tau_o)_r} \right|^{R_r} \right\}^{\frac{1}{R_r}}} \right] \quad (4)$$

여기서 $q = (G_1)_r / (G_2)_r$, γ = 현재의 전단변형도, γ_o = 방향이 바뀌는 순간의 전단변형도, $(G_1)_r$ = 적층고무베어링의 초기 탄성전단계수, $(G_2)_r$ = 항복 후 전단계수, $(\tau_y)_r$ = 적층고무베어링의 항복전단응력, $(\tau_o)_r = \gamma_o$ 에서의 전단응력, 그리고 R_r = 적층고무베어링의 곡률 형상계수이다.

적층고무베어링의 비선형 점성 이력곡선에서, 전단변형도 속도에 종속적인 전단응력 $(\tau_v)_r$ 은 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$(\tau_v)_r = c_r \text{sign}(\dot{\gamma}) |\dot{\gamma}|^{\alpha_r} \quad (5)$$

여기서 c_r = 적층고무베어링의 재료상수, $\dot{\gamma}$ = 전단변형률, 그리고 α_r = 지수(양의 실수)이다. 그러므로 본 논문에서 제안한 적층고무베어링의 응력-변형도 모델은 식 (4)와 식 (5)를 식 (3)에 대입하여 구할 수 있다. 이러한 식들에 포함된 $(G_1)_r$, $(G_2)_r$, $(\tau_y)_r$, c_r , R_r , 그리고 α_r 는 적층고무베어링의 특성치 들로서 실험을 통해서 결정되어질 수 있다.

2.3 납-고무베어링의 해석모델

2.2절에서 적층고무베어링의 온도와 전단변형도 속도에 영향을 받는 전단응력들을 모델링 하였다. 납-고무베어링의 모델링은, 적층된 고무와 얇은 강판으로 구속되어있는 납의 효과를 식 (3)에 더해주면 된다.

그림 3(a)는 구속된 납의 정적스프링과 동적 dashpot의

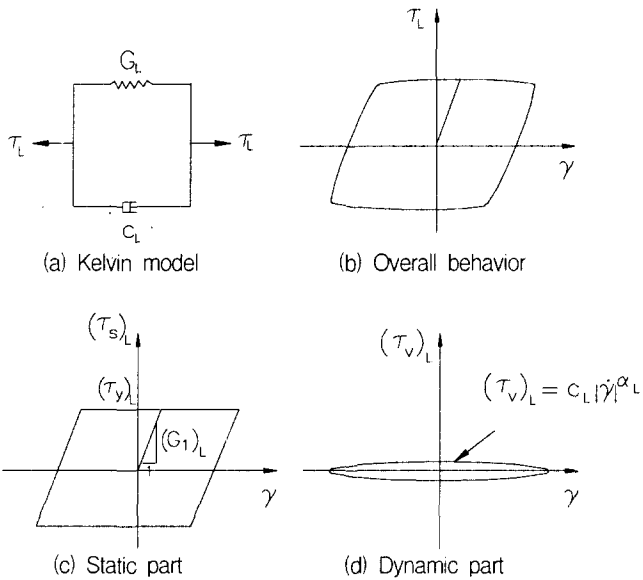


그림 3 구속된 납의 모델

병렬배치인 켈빈 모델을 보여준다. 납-고무베어링에서 구속된 납이 항복한 후의 전단강성은 납이 없는 적층고무베어링의 전단강성과 거의 동일하다는 사실은 여러 연구자에 의해서 잘 알려져 있다. 즉 구속된 납은 탄성-완전소성(elasto-perfectly plastic) 이력거동을 보여준다.⁽⁷⁾ 그림 3(b)는 구속된 납의 전체 이력 특성을 보여주는데 구속된 납의 전체 전단 응력 τ_L 은 그림 3(c)에서 보여주는 정적스프링의 전단응력 $(\tau_s)_L$ 과 그림 3(d)에서 보여주는 속도에 종속적인 전단응력 $(\tau_v)_L$ 의 합으로 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_L = (\tau_s)_L + (\tau_v)_L \quad (6)$$

여기서 $(\tau_s)_L$ 는 온도와 전단변형도의 크기에, 그리고 $(\tau_v)_L$ 는 온도와 속도에 종속적이다.

정적스프링의 전단응력 $(\tau_s)_L$ 역시 Mander의 식을 이용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$(\tau_s)_L = (\tau_o)_L + \frac{(G_1)_L(\gamma - \gamma_o)}{\left\{ 1 + \left| \frac{(G_1)_L(\gamma - \gamma_o)}{(\tau_y)_L - (\tau_o)_L} \right|^{R_L} \right\}^{\frac{1}{R_L}}} \quad (7)$$

여기서 $(G_1)_L$ = 구속된 납의 초기 탄성전단계수, $(\tau_y)_L$ = 구속된 납의 항복전단응력, 그리고 R_L = 구속된 납의 곡률형상계수이다.

구속된 납의 비선형 점성 이력곡선에서의 속도에 종속적인 전단응력 $(\tau_v)_L$ 은 식 (8)로서 구할 수 있다.

$$(\tau_v)_L = c_L \text{sign}(\dot{\gamma}) |\dot{\gamma}|^{\alpha_L} \quad (8)$$

여기서 c_L = 구속된 납의 재료상수, $\dot{\gamma}$ = 전단변형률, 그리고 α_L = 지수(양의 실수) 이다. 그러므로 구속된 납의 응력-변형도 모델은 식 (7)과 식 (8)을 식 (6)에 대입하여 구할 수 있다.

이러한 식들에 포함된 $(G_1)_L$, $(\tau_y)_L$, c_L , R_L , 그리고 α_L 은 구속된 납의 특성치 들로서 실험을 통해서 결정되어질 수 있다. 최종적으로 본 논문에서 제안한 납-고무베어링의 응력-변형도 모델은 식 (3)에 식 (6)을 더하여 구할 수 있다.

3. 실험방법 및 면진장치

일정 수직하중을 힘제어로 가한 상태에서 수평방향 반복하중을 1100kN 가력기를 사용하여 변위제어로 힘을 가한 실험실 실험을 미국 뉴욕주립대(버팔로) 지진연구센터 실험실에서 실시하였다. 가한 힘은 가력기에 내장되어 있는 load cell로 측정하였으며, 면진장치의 전단변위는 sonic transducer로 측정하였다. 실험에 사용한 면진장치는 그림 4와 같다.

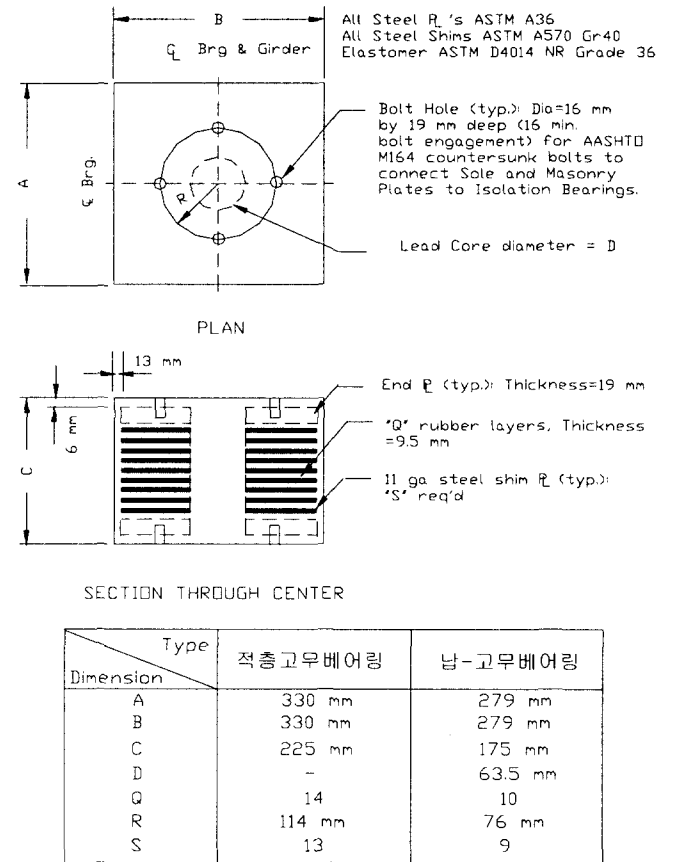


그림 4 실험에 사용된 면진장치

4. 실험결과

4.1 저온 효과

저온이 면진장치의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 면진장치를 냉동고에 넣고 -60°C까지 얼렸다. 면진장치의 속까지 완전히 얼리기 위하여 3일 동안 면진장치를 냉동고 속에 넣어두었다. 면진장치의 온도를 읽기 위하여 thermocouple을 하나는 면진장치의 표면에 붙이고, 또 다른 하나는 면진장치의 속 깊숙이 위치시켰다. 실험을 위하여 언 면진장치를 냉동고 속에서 꺼내어 가능한 빨리 실험장치에 위치시키고 polystyrene으로 단열 시켰다.

4.1.1 적층고무베어링

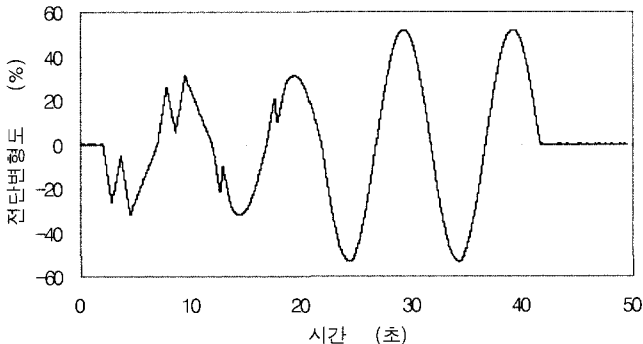
적층고무베어링에 일정수직하중을 356kN을 가한 상태에서 가력 주파수를 0.1Hz로 택하여 그림 5(a)와 같은 전단변형도 진폭이 적층고무베어링 고무층 두께의 합의 최대 50%인 정형-반 비정형파를 가하였다.

적층고무베어링이 얼려졌기 때문에 고무는 'glass-hardens' 상태가 되고, 그 결과 면진장치의 전단강성은 매우 증가함과 동시에 이력곡선의 면적도 상당히 증가하였다. 그림 5(b)와 그림 5(c)는 적층고무베어링의 온도가 +20°C와 -48°C 일 때의 이력곡선을 각각 보여준다.

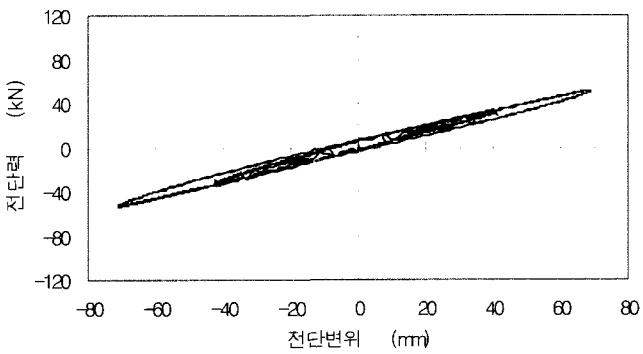
그림 1에서 정의된 유효전단강성 k_e 와 전단강도 Q_d 의 온도 민감도를 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 각각 보여준다. 적층고무베어링은 -48°C에서 전단강성과 전단강도가 상온(+20°C)에서와 비교하여 각각 200%와 600% 증가하였다.

4.1.2 납-고무베어링

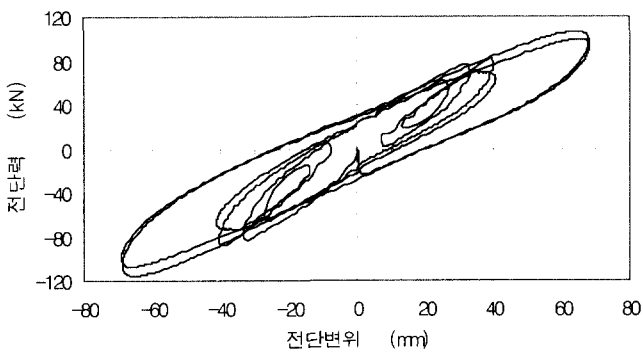
납-고무베어링에 일정수직하중 90kN을 가한 상태에서 가력



(a) 전단변형 제어



(b) 이력곡선(온도 : +20°C)



(c) 이력곡선(온도 : -48°C)

그림 5 적층고무베어링 실험결과

주파수를 0.1Hz로 택하여 그림 7(a)와 같은 전단변형도 진폭이 납-고무베어링 고무층 두께의 합의 25%, 50%, 75%, 그리고 100%인 정형파를 가하였다.

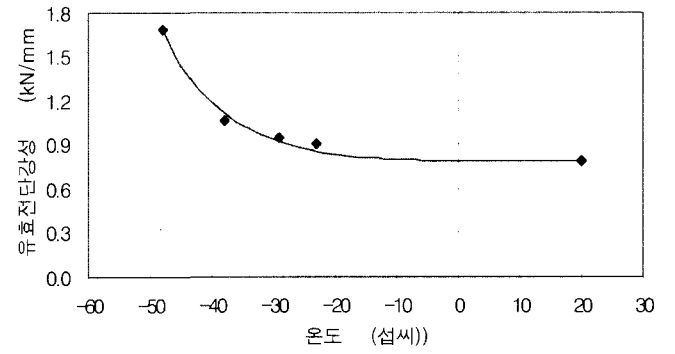
그림 7(b)와 그림 7(c)는 납-고무베어링의 온도가 +20°C와 -32°C 일 때의 이력곡선을 각각 보여준다. 적층고무베어링과 마찬가지로 납-고무베어링이 얼려졌기 때문에 특히 전단강도 Q_d 즉, 이력곡선의 면적이 증가하였다.

그림 1에서 정의된 탄성전단강성 k_1 , 소성전단강성 k_2 , 그리고 전단강도 Q_d 의 온도 민감도를 그림 8(a), 그림 8(b), 그리고 그림 8(c)에서 각각 보여준다. 납-고무베어링은 -32°C에서 탄성전단강성, 소성전단강성, 그리고 전단강도가 상온(+20°C)에서와 비교하여 각각 약 80%, 40%, 그리고 80%가 증가하였다.

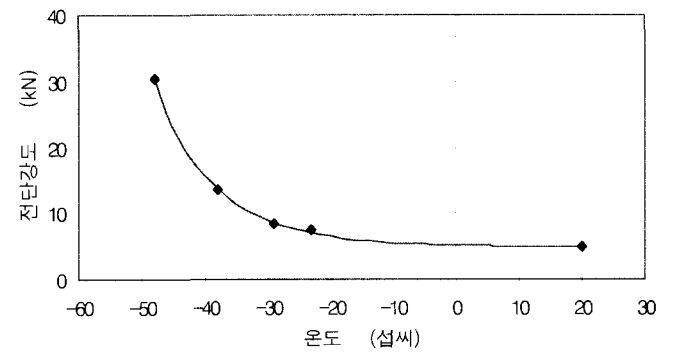
4.2 변형도 속도 효과

4.2.1 적층고무베어링

적층고무베어링의 변형도 속도효과를 조사하기 위하여 일정수직하중을 356kN 가한 상태에서 여러 가력속도별로 전단변형도 진폭이 적층고무베어링 고무층 두께의 합의 50%인 정형파를 0° 방향(적층고무베어링을 실험장치에 정상적으로 위치)과 45° 방향(적층고무베어링을 45° 돌려서 위치)으로 가력하여 실험결과들을 비교하였다. 그림 9는 적층고무베어링의 유효전단강성의 가력속도별 동적 증가(dynamic magnification)를 보여준다. 가력속도가 0.001Hz에서 0.6Hz 범위에서 약간의 가력속도 효과가 관찰되었으며, 가력방향의 효과는 없었다.

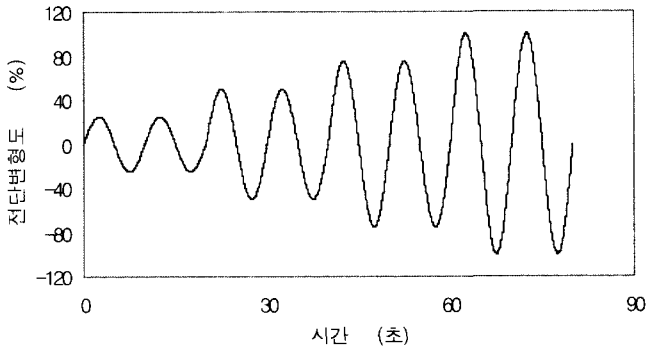


(a) 유효전단강성의 온도 민감도

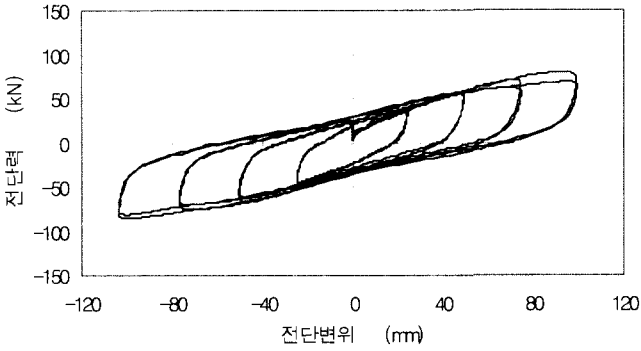


(b) 전단강도의 온도 민감도

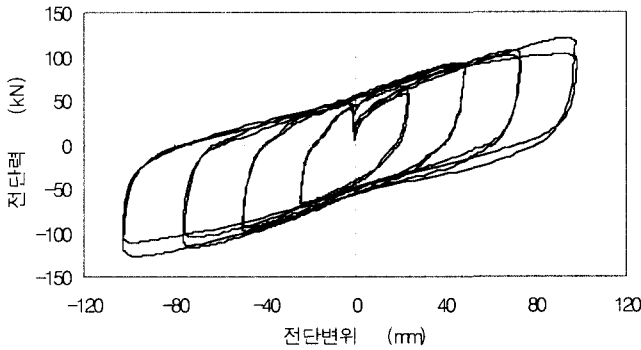
그림 6 적층고무베어링 온도 민감도



(a) 전단변형 제어

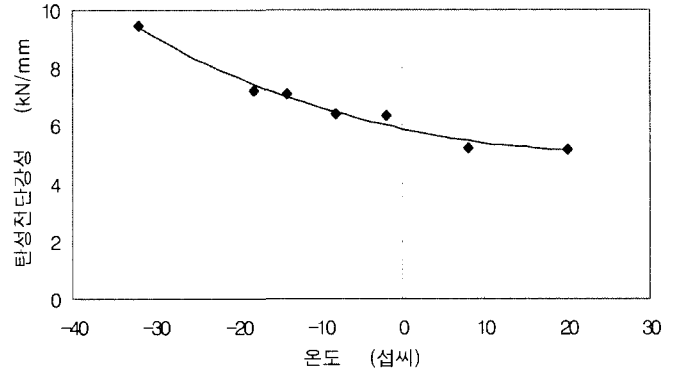


(b) 이력곡선(온도 : +20 °C)

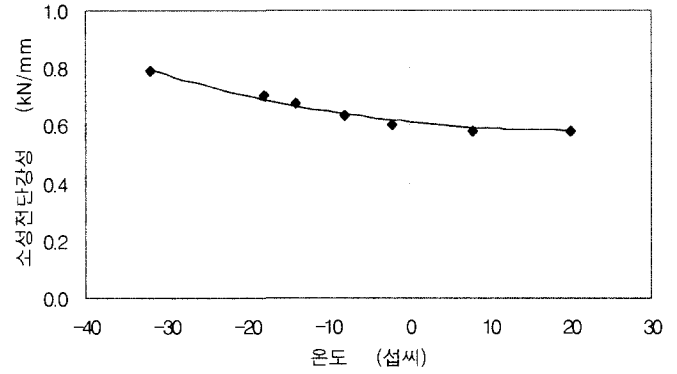


(c) 이력곡선(온도 : -32 °C)

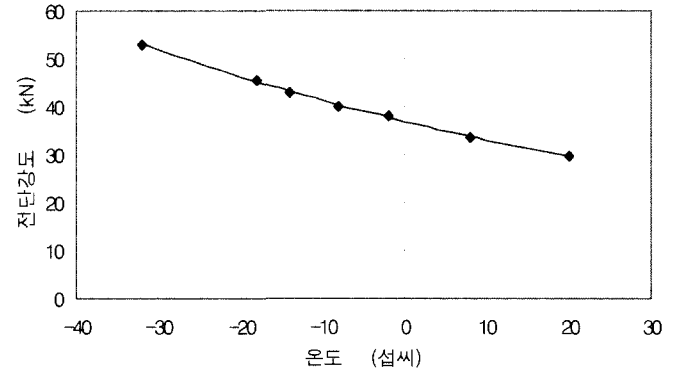
그림 7 납-고무베어링 실험결과



(a) 탄성전단강성의 온도 민감도



(b) 소성전단강성의 온도 민감도



(c) 전단강도의 온도 민감도

그림 8 납-고무베어링 온도 민감도

4.2.2 납-고무베어링

그림 10은 납-고무베어링에 일정수직하중을 90kN 가한 상태에서 여러 가력속도별로 전단변형도 진폭이 납-고무베어링 고무층 두께의 합의 50%인 정형파를 0° 방향과 45° 방향

으로 가력 했을 때의 납-고무베어링의 전단강도의 가력속도 별 동적 증가를 보여준다. 가력속도가 0.001Hz에서 1.0Hz 범위에서 적층고무베어링의 경우보다는 큰 가력속도 효과가

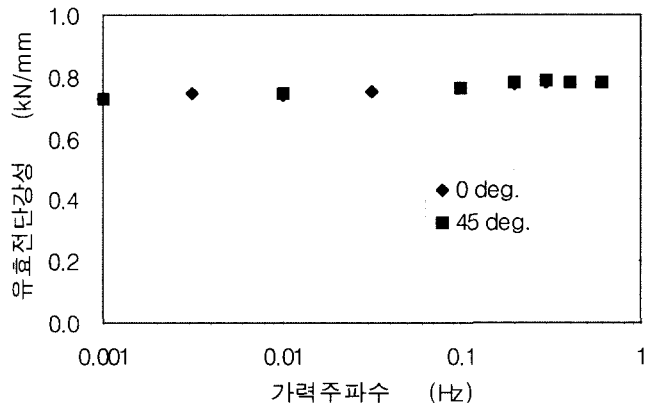


그림 9 유효전단강성의 가력속도 민감도

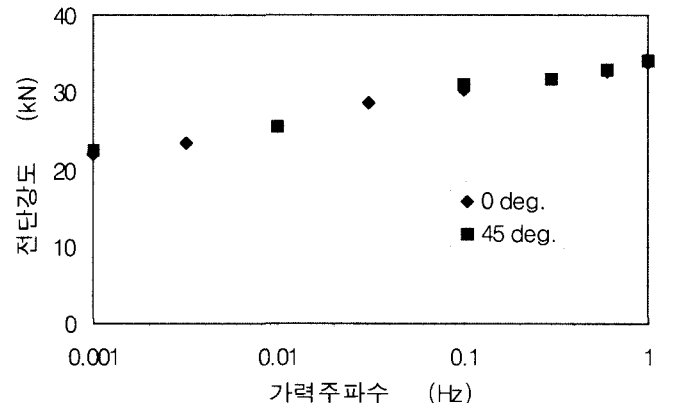


그림 10 전단강도의 가력속도 민감도

관찰되었다. 그러나 가력방향의 효과는 없었다.

5. 해석모델 매개변수

5.1 SI(system identification)

실험결과들로부터 SI를 적용하여 해석모델에 필요한 고무와 구속된 납의 매개변수들을 구하여 제안된 해석모델에 적용하면 면진장치의 거동을 유사하게 표현할 수 있어야 한다. 해석모델에 필요한 매개변수들은 실험결과와 해석모델간의 전단력의 차이의 제곱의 합을 최소화시키는 비선형 최적화를 시행하여 구하였다.

5.2 적층고무베어링 매개변수 SI

SI를 수행한 결과, 식 (3)으로 표현되는 적층고무베어링의 해석모델에서 곡률형상계수 $R_r=2$, 그리고 $\alpha_r=0.5$ 가 최적의 값이고, 나머지 변수들은 임의의 온도 T(섭씨)에 대하여 다음과 같이 지수함수의 식들로 나타낼 수 있었다.

$$\frac{(G_1)_r}{(G_1)_{r20}} = \exp\left[\frac{20-T}{66.44}\right]^5 \quad \text{MPa} \quad (9)$$

$$\frac{(G_2)_r}{(G_2)_{r20}} = \exp\left[\frac{20-T}{76.68}\right]^5 \quad \text{MPa} \quad (10)$$

$$\frac{(\tau_y)_r}{(\tau_y)_{r20}} = \exp\left[\frac{20-T}{79.19}\right]^5 \quad \text{MPa} \quad (11)$$

$$\frac{c_r}{c_{r20}} = \exp\left[\frac{20-T}{52.67}\right]^3 \quad \text{MPa} \quad (12)$$

여기서 상온(+20°C)에서의 매개변수의 최적 값들은 $(G_1)_{r20} = 1.326\text{MPa}$, $(G_2)_{r20} = 0.997\text{MPa}$, $(\tau_y)_{r20} = 0.215\text{MPa}$, 그리고 $c_{r20} = 0.04\text{MPa}$ 이었다.

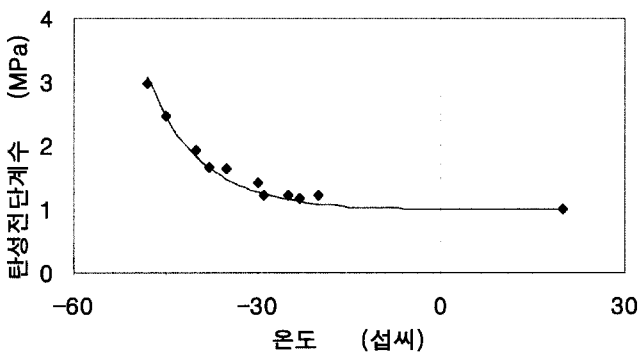
그림 11은 저온에 대한 매개변수들의 효과를 보여 준다. 여기서 검은 점은 각 저온실험결과로부터 SI를 통해 얻은 값들이며 실선은 식 (9)에서 식 (12)를 그린 것이다. 모든 매개변수들은 온도가 약 -40°C 이하일 때 효과(thermal stiffening)가 현저함을 관찰할 수 있다.

5.3 납-고무베어링 매개변수 SI

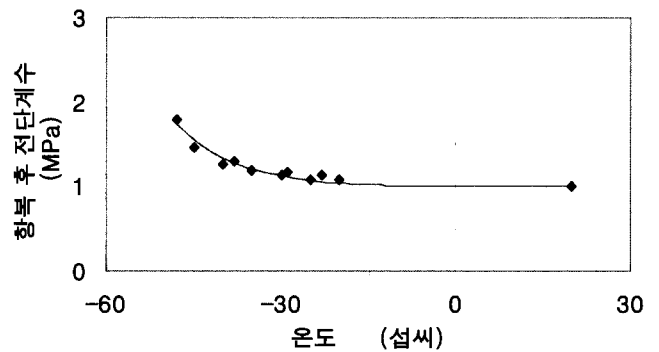
식 (3)과 식 (6)의 합으로 표현되는 납-고무베어링 해석모델에서, 식 (3)은 앞에서 구한 적층고무베어링의 매개변수들을 대입하고, 식 (6)으로 표현되는 구속된 납의 매개변수들을 SI를 수행하여 구하였다. 구속된 납의 매개변수인 $R_L=2$, 그리고 $\alpha_L=0.25$ 가 최적의 값이고, 나머지 변수들은 임의의 온도 T에 대하여 다음과 같이 지수함수의 식들로 나타낼 수 있었다.

$$\frac{(G_1)_L}{(G_1)_{L20}} = \exp\left[\frac{20-T}{161.24}\right] \quad \text{MPa} \quad (13)$$

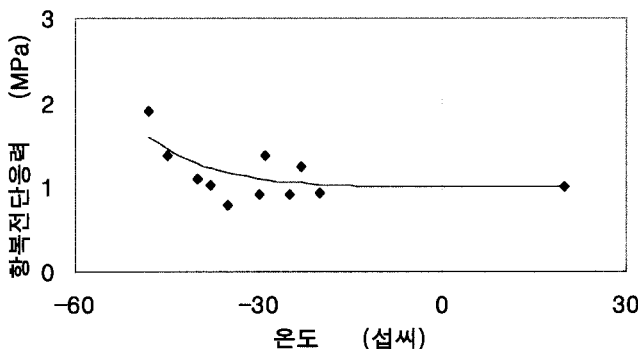
$$\frac{(\tau_y)_L}{(\tau_y)_{L20}} = \exp\left[\frac{20-T}{71.25}\right] \quad \text{MPa} \quad (14)$$



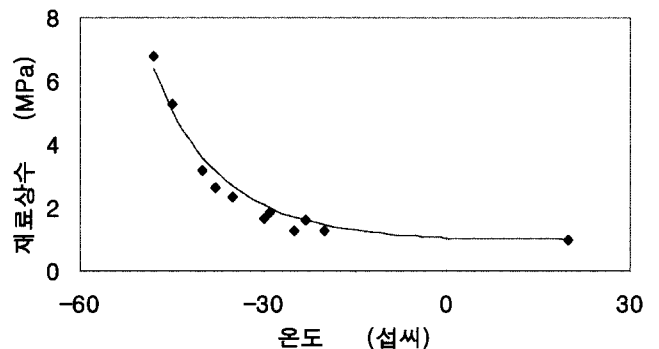
(a) 각 온도에 대한 탄성전단계수



(b) 각 온도에 대한 항복 후 전단계수



(c) 각 온도에 대한 항복전단응력



(d) 각 온도에 대한 재료상수

그림 11 적층고무베어링 매개변수 온도 민감도

$$\frac{c_L}{c_{L20}} = 1 \quad \text{MPa} \quad (15)$$

여기서 상온(+20°C)에서의 납의 매개변수의 최적 값들은 $(G_1)_{L20} = 335.5\text{MPa}$, $(\tau_y)_{L20} = 6.157\text{MPa}$, 그리고 $c_{L20} = 2.464\text{MPa}$ 이었다.

그림 12는 각 온도에서의 매개변수들의 값을 보여 준다. 재료상수 c_L 을 제외한 모든 매개변수들은 저온도 효과가 있음을 관찰할 수 있다.

6. 해석모델 검증

6.1 적층고무베어링

적층고무베어링의 전단강성 k_r 는 기본 재료역학 이론인 식 (16)으로부터 구할 수 있다.⁽⁸⁾

$$k_r = \frac{G_r A_r}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{G_r A_r}{h_r} \quad (16)$$

여기서 G_r =적층고무베어링의 전단계수, A_r =적층고무베어링의 단면적, t =고무층 한개의 두께, n =총 고무층의 개수, 그리고 h_r =총 고무층의 두께이다. 따라서 식 (3), 식 (4), 그리고 식 (5)의 전단응력-전단변형도 관계로부터 본 논문에서 제안한 적층고무베어링의 전단력 F_r 과 전단변위 x 의 관계는 식 (17)로 구할 수 있다.

$$F_r = (F_o)_r + (k_1)_r(x - x_o) \times \left[q + \frac{1 - q}{\left\{ 1 + \left| \frac{(k_1)_r(x - x_o)}{(F_y)_r - (F_o)_r} \right|^{R_r} \right\}^{\frac{1}{R_r}}} \right] + \frac{c_r A_r}{h_r^{a_r}} \text{sign}(\dot{x}) |\dot{x}|^{a_r} \quad (17)$$

여기서 $q = (k_1)_r / (k_2)_r$, x = 현재의 전단변위, x_o = 방향이 바뀌는 순간의 전단변위, $(k_1)_r$ = 초기 탄성전단강성, $(k_2)_r$ = 항복 후 전단강성, $(F_y)_r$ = 항복전단력, 그리고 $(F_o)_r = x_o$ 에서의 전단력이다.

x , $(k_1)_r$, $(k_2)_r$, 그리고 $(F_y)_r$ 은 식 (18), 식 (19), 식 (20), 그리고 식 (21)로 각각 구할 수 있다.

$$x = \gamma h_r \quad (18)$$

$$(k_1)_r = \frac{(G_1)_r A_r}{h_r} \quad (19)$$

$$(k_2)_r = \frac{(G_2)_r A_r}{h_r} \quad (20)$$

$$(F_y)_r = (\tau_y)_r A_r \quad (21)$$

적층고무베어링 해석모델의 타당성을 조사하기 위하여 현재의 온도 T 와 그림 4로부터 A_r 과 h_r 만을 구하여 input data로 입력하고, 앞에서 SI로부터 구한 $R_r=2$, 그리고 $a_r=0.5$ 및 식 (9)에서 식 (12)까지를 이용하여 식 (17)로부터 적층고무베어링의 전단력-전단변위 관계를 얻을 수 있다. 그림 13(a)와 그림 13(b)는 그림 4에서 보여준 적층고무베어링의 온도가 -45°C 일때의 실험 및 해석 결과이며, 본 논문에서 제안한 해석 모델은 적층고무베어링의 거동을 유사하게 표현할 수 있음을 보여준다.

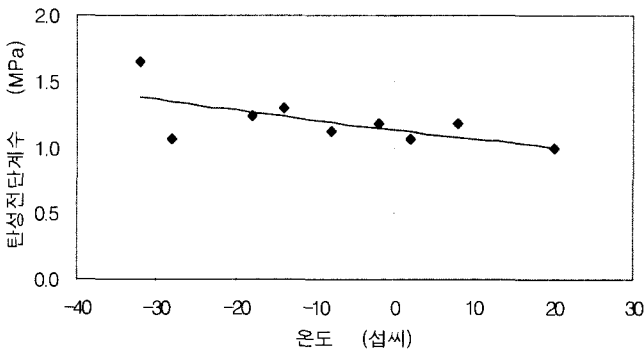
6.2 납-고무베어링

구속된 납의 전단강성 k_L 도 식 (16)과 유사하게 식 (22)로 구할 수 있다.

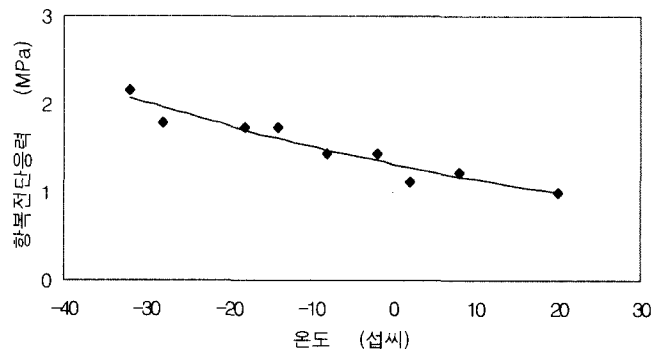
$$k_L = \frac{G_L A_L}{h_L} \quad (22)$$

여기서 G_L =구속된 납의 전단계수, A_L =구속된 납의 단면적, 그리고 h_L =구속된 납의 길이이다. 따라서 식 (6), 식 (7), 그리고 식 (8)의 전단응력-전단변형도 관계로부터 본 논문에서 제안한 구속된 납의 전단력 F_L 과 전단변위 x 의 관계는 식 (23)으로 구할 수 있다.

$$F_L = (F_o)_L + \frac{(k_1)_L(x - x_o)}{\left\{ 1 + \left| \frac{(k_1)_L(x - x_o)}{(F_y)_L - (F_o)_L} \right|^{R_L} \right\}^{\frac{1}{R_L}}} + \frac{c_L A_L}{h_L^{a_L}} \text{sign}(\dot{x}) |\dot{x}|^{a_L} \quad (23)$$



(a) 각 온도에 대한 탄성전단계수



(b) 각 온도에 대한 항복전단응력

그림 12 납-고무베어링 매개변수 온도 민감도

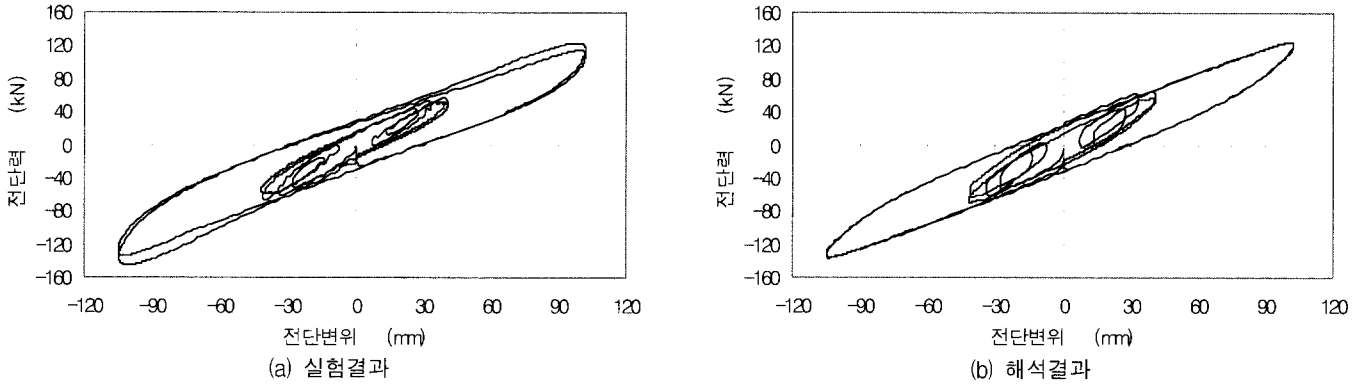


그림 13 적층고무베어링 해석모델 검증

여기서 $(k_1)_L$ = 구속된 납의 초기 탄성전단강성, $(F_y)_L$ = 구속된 납의 항복전단력, 그리고 $(F_o)_L = x_o$ 에서의 전단력이다. $(k_1)_L$, 그리고 $(F_y)_L$ 은 식 (24), 그리고 식 (25)로 각각 구할 수 있다.

$$(k_1)_L = \frac{(G_1)_L A_L}{h_L} \quad (24)$$

$$(F_y)_L = (\tau_y)_L A_L \quad (25)$$

최종적으로 납-고무베어링의 전단력-전단변위 거동은 식 (17)과 식 (23)의 합으로 구한다.

납-고무베어링 해석모델의 타당성을 조사하기 위하여 현재의 온도 T 에서 고무부분의 전단력은 본 논문의 6.1절과 동일한 절차를 밟고(단 A , 은 납-고무베어링의 전체 단면적에서 납의 단면적을 뺀 면적), 여기에 그림 4로부터 A_L 과 h_L 을 구하여 input data로 입력하고, 앞에서 SI로부터 구한 $R_L=2$, 그리고 $\alpha_L=0.25$ 및 식 (13)에서 식 (15)까지를 이용하여 식 (23)에서 식 (25)로부터 구속된 납의 해석모델 결과를 얻은 후 식 (17)에 더하면 납-고무베어링의 해석 결과를 얻을 수 있다. 그림 14(a)와 그림 14(b)는 납-고무베어링의 온도가 -14°C 일때의 실험 및 해석 결과이며, 본 논문에서 제안한 해석 모델은 납-고무베어링의 거동을 유사하게 표현할 수 있음을 보여준다.

7. 결 론

- (1) 극저온에서 적층고무베어링은 현저한 비선형 이력 거동을 보인다. 온도가 $+20^\circ\text{C}$ 에서 -48°C 로 떨어질 때 유효전단강성 k_e 와 전단강도 Q_d 는 각각 200%와 600%가 증가하였다.
- (2) 저온은 납-고무베어링의 거동에 영향을 미친다. 온도가 $+20^\circ\text{C}$ 에서 -32°C 로 떨어질 때 탄성전단강성 k_1 , 소성전단강성 k_2 , 그리고 전단강도 Q_d 는 각각 약 80%, 40%, 그리고 80%가 증가하였다.
- (3) 적층고무베어링은 가력속도가 0.001Hz에서 0.6Hz 범위에서 유효전단강성 k_e 와 전단강도 Q_d 가 약간 증가됨이 관찰되었다. 유사한 결과가 납-고무베어링에서도 관찰되었다. 즉 탄성전단강성 k_1 와 소성전단강성 k_2 는 가력속도가 0.001Hz에서 1.0Hz 범위에서 변화가 약간 관찰되었다. 그러나 전단강도 Q_d 는 가력속도가 빠르면 증가한다.
- (4) 적층고무베어링의 이력거동은 온도에 종속적인 비선형 켈빈모델로 특징 지을 수 있다. 즉 정적 bilinear 이력모델과 동적 비선형 점성모델의 조합으로 표현될 수 있다.
- (5) 납-고무베어링의 이력거동은 온도에 종속적인 구속된 납의 효과를 적층고무베어링의 모델에 더함으로써 특징 지을 수 있다. 구속된 납의 효과는 완전 탄-소성 정적 bilinear 이력모델과 또 다른 동적 비선형 점성모델의 조합으로 표현될 수 있다.
- (6) 면진장치에 가해지는 횡력의 가력방향의 효과는 없다.

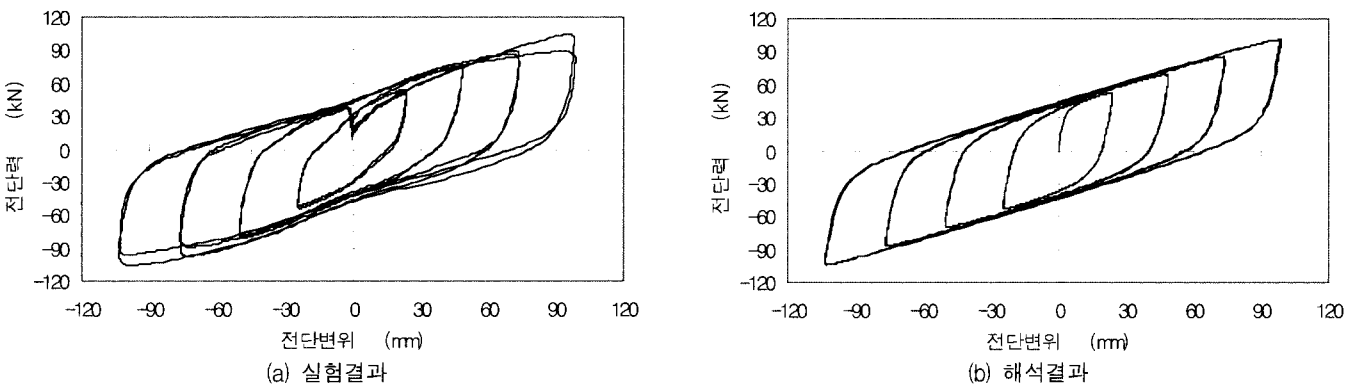


그림 14 납-고무베어링 해석모델 검증

감사의 글

본 연구를 수행하는데 도움을 준 University of Canterbury (New Zealand) 토목공학과 Dr. John B. Mander의 조언에 감사 드린다.

참고 문헌

1. Kadir, A., "Rubber properties important in the design of bearings," *Proceedings International Conference, Natural Rubber for Earthquake Protection Isolation*, Kuala Lumpur, Malaysia, Feb., 1982, pp. 22-25.
2. Stanton, J. F. and Roeder, C. W., "Elastomeric bearings design, construction, and materials," *National Cooperative Highway Research Program, Report 248*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1982.
3. Stanton, J. F., Purkiss, C., and Roeder, C. W., "Development of bridge bearing provisions for recommended AASHTO LRFD bridge specification," *3rd World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures*, Vol. 2, Toronto, Canada, 1991, pp. 736-762.
4. Lindley, P. B., "Natural rubber structural bearings," *1st World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures*, Vol. 1, Niagara Falls, New York, September 28-October 2, 1981.
5. Menegotto, M. and Pinto, P. E., "Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal forces and bearing;" *IABSE Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well defined Repeated Loads*, Lisbon.
6. Mander, J. B., "Seismic Design of Bridge Piers," Ph D. Thesis, University of Canterbury, 442 pp.
7. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and McVerry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, 354 pp.
8. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박칠립, "면진 장치 적용 전, 후의 철골조의 내진 성능 평가", 한국지진공학회논문집, 제2권, 제1호(통권 제5호), 1998. 3, pp. 47-62.