

# 고무 면진 베어링 몰딩과정의 열전달 해석 및 실험

강경주\* · 문병영\* · 강범수\*\* · 김계수\*\*\* · 정경수\*\*\*

## An Experimental Study of Heat Transfer Analysis in Molding the Rubber Bearing for Seismic Isolator

Gyung-Ju Kang, Byung-Young Moon, Beom-Soo Kang,  
Kye-Soo Kim and Kung-Soo Jung

Key Words: Heat Transfer(열전달), Seismic Isolator(면진베어링), Laminated Rubber Bearing(LRB), Molding(몰딩), Temperature Distribution(온도분포), Finite Element Analysis(FEA)

### Abstract

Seismic isolator system is one of the most widely used base isolation system in order to control the vibration of structure against earthquake excitation. The evaluation of vulcanization time in molding the rubber bearing is very important for both proper ability of isolator and efficiency of manufacture. This paper deals with experimental measurement of temperature of isolator with sensor inside in it, and compared with the result of FEA in order to evaluate the vulcanization time. Properties of rubber bearing which is used in the FEA are obtained by controlling the specific heat of rubber. With the obtained properties of rubber, the isolator is analysed by FEA. As a result, an appropriate analytical vulcanization time is obtained. This time is regarded as an appropriate temperature, which is used to effective manufacture.

### 1. 서 론

최근 들어 일본 동남아 지진동에서 건물, 교량의 피해가 많이 발생하면서 지진에 대한 일반인들의 관심이 고조되고 있다. 지반이 매우 연약한 곳을 제외한 일반적인 지진의 경우, 지진 에너지는 진동주기가 짧은 영역에 집중되어 있어, 저층건물의 피해가 크게 된다. 이와 같은 건물의 피해를 줄이기 위해서는 건물내의 가속도를 감소시켜야 하는데, 그 방법으로 개발된 것이 base isolation(기초분리)이며, 이에 대한 연구가 계속되고 있다.<sup>(1~4)</sup> Base isolation방법에 가장 많이 사용되는 것은 면진베어링이며, 병원, 공공기관등에 설치되고 있으며 그 수효는 점점 증가하고 있다. 이와 같은 수효의 증가에 대해 면진베어링을 제작 보급에서의 생산성 향상과 효율성은 꼭 필요한 요소가 된다고 할 수 있다.

면진베어링이 제품으로 나오기까지는 여러 가지 공정 즉, 정제공정, 압연공정, 제단공정, 성형공정, 가황공정, 검사공정등을 거치게 된다. 고무는 원재료와 유황 그밖의 약품을 혼합하여 압연공정을 거쳐 평평한 판형태로 만들고, 베어링의 단면형상대로 절단해 둔다. 철판은 세척과 집착을 거쳐 절단해둔 고무판과 적층을 통해 성형을 한다. 성형된 면진베어링은 몰드조립하여 열과 압력을 가하여 가황공정을 거치게 된다. 가황공정에서 고무에 배합된 유황이 고무분자와 화학결합해서 고무 특유의 탄성이 발생한다.<sup>(5)</sup> 면진베어링은 고무와 철판의 적층으로 구성되어 있고, 고무의 비열은 철판의 비열에 비해 현저히 커서 고무층의 물성에 따라 전체 베어링의 열전달 시간은 좌우되게 된다. 적절한 몰딩 시간의 부여는 생산성과 효율성등의 측면에서 아주 중요한 요소가 된다. 따라서 본 논문에서는 베어링의 몰딩시 적정 온도 분포를 나타내는 시간을 예측하였다.

### 2. 해석을 위한 유효 물성의 구현

본 연구에서는 베어링의 실제크기에 대하여 열전

\* 부산대학교 대학원 항공우주공학과  
\*\* 부산대학교 항공우주공학과  
\*\*\* 동일고무벨트(주)

달 해석을 수행함으로써 베어링 몰딩시의 적정 가열시간을 결정하고자 한다. 실제 베어링에 사용되는 고무의 열전달을 위한 물성은 몰딩시 고무에 가압·가열에 의한 변화가 일어나며 그로 인해 몰딩하는 동안 물성이 변하게 된다. 따라서 고체상태에서 알려진 물성은 열전달 해석에 있어 유효한 값이 되지 못한다. 베어링의 해석을 위해, 실제 베어링의 열전달 실험을 하였고, 이 실험을 통해 구한 온도 변화와 유한 요소 해석을 통한 온도변화를 비교함을 통해 유한 요소 해석을 위한 유효한 유한요소 물성을 구하였다. Fig. 1은 베어링의 몰딩시스템을 보여준다. 베어링의 몰딩시스템은 상판 중판 하판으로 구성된 몰드속에 면진 고무 베어링을 넣고 상판과 하판에서 일정온도와 압력을 가하게 되어 있다. 면진 고무 베어링 내부의 온도변화는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 센서를 통해서 측정하게 된다. Table 1은 베어링 중앙에서 측정된 시간에 따른 온도분포를 나타내었다. 이 결과를 이용해서 고무재료의 물성을 구할 것이다. 유효물성 구현에 사용된 베어링의 형상은  $600 \times 540 \times 126$  (mm)의 직육면체이다. Table 2는 유한요소해석을 위한 베어링의 구성이며, Fig. 2는 유한요소해석을 위한 베어링의 1/4 모델링된 형상을 보여준다. 면진베어링을 구성하는 것은 철판과 고무이지만, 면진 베어링의 열전달에 지배적인 영향을 주는 것은 고무의 물성이다. 그러므로 유한요소해석을 위한 고무재료의 유효 물성을 구하기 위해서는 고무재료의 비열을 조정하면서 측정치와 비교하여 실험측정치와 유한요소해석의 결과가 같아 지면 그때의 고무 물성을 유한 요소 해석에 사용할 수 있다. 고무의 재질은 고감쇠 면진 고무 베어링에 사용된 고무와 동일하며, 철판과 고무의 두께는 다소 차이가 있다.

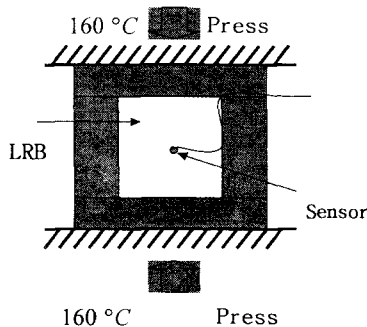


Fig. 1 Bearing Molding System

Table 1 Real temperature distribution at center of bearing

Time(min)	Temperature(°C)
0	37.2
30	43.0
60	59.8
90	79.4
120	96.4
150	110.7
180	123.4

Table 2 Construction of bearing for finding the effective properties

	Thickness and quantity
Top and Bottom Rubber Layer	$8\text{mm} \times 2ea$
Inner Rubber Layer	$16\text{mm} \times 5ea$
Steel Plate	$5\text{mm} \times 6ea$

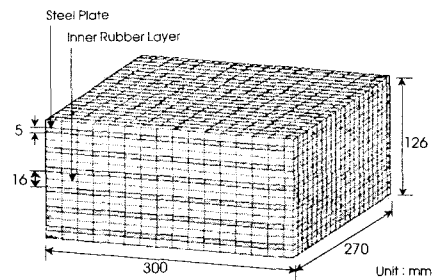


Fig. 2 Finite Element Model of LRB

그러나, 열전달 해석과정에서 철판의 두께 및 종류는 크게 열전달 되는 시간에 영향을 미치지 못하고 고무의 물성이 지배적으로 전체 베어링의 열전달에 영향을 미치는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 고무재료의 비열을 수정하면서 측정치와 비교하여 실제 물성이 변하는 고무 재료에 대하여 유한요소해석을 위한 유효 물성을 구현하였다. Fig. 3은 고체상태에서 고무의 비열로 유한요소 해석한 결과와, 실제 베어링의 열전달 측정결과를 비교한 것이다. 여기서 해석결과는 시간에 따라 유사한 경향성을 나타내기는 하였으나 온도분포는 고체상태의 비열을 적용한 쪽이 낮은 것을 알 수 있다. 따라서, 유효물성을 구하기 위해서는 고무의 비열을 낮게 하여 해석해야 됨을 알 수 있다.

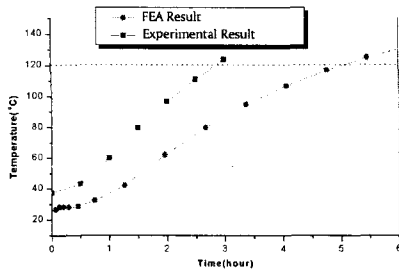


Fig. 3 FEA result - Cr=1890 J/kg · K

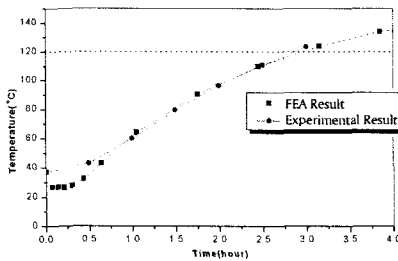


Fig. 4 FEA result - Cr=820 J/kg · K

Fig. 4는 고무의 비열을 낮추어서 유한 요소해석한 결과와 실험치를 비교한 것이다. 고무의 비열이 820 J/kg · K일 때 유한요소해석과 실험치는 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 면진 고무베어링의 열전달 해석을 위한 고무의 유효 비열을 820 J/kg · K로 결정하고 이 물성을 적용하여 면진 고무베어링의 열전달 해석을 수행하였다.

### 3. 유한요소해석

앞서 구한 고무의 물성을 적용하여 고감쇠 면진 고무베어링의 열전달에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

#### 3.1 모델링

Fig. 5는 고무와 철판으로 적층된 재료에 대한 열전달 모델을 나타낸다. 식(1)은 열전달을 계산하는 식이다.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{(L_R/k_R A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_S/k_S A)} \quad (1)$$

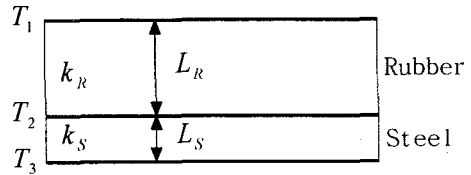


Fig. 5 Heat Transfer Model

Table 3 Material Properties of LRB

	$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	C ( J/kg · K )	k ( W/m · K )
Steel Plate	7850	440	80.2
Rubber	1340	820	0.19

여기서, q는 열전달량, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>는 재료표면 온도, L<sub>R</sub>, L<sub>S</sub>는 각각 열전달 되는 방향으로 고무의 두께, 철판의 두께이다. k<sub>R</sub>, k<sub>S</sub>는 각각 고무와 철판의 열전도율이다. A는 열전달되는 방향과 수직방향의 면적이다. Table 3에서는 해석이 수행되어진 베어링의 열전달에 필요한 물성치를 나타냈다. 여기서, ρ, C, k는 각각 재료의 밀도, 비열, 열전도율이다. Table 4는 해석에 적용된 베어링의 치수를 나타냈다. 원형 베어링은 베어링의 중심으로부터 모든 단면들이 같은 형상을 가지므로 축대칭 문제에 속한다. 따라서 본 연구에서는 베어링의 단면은 이차원으로 모델링하여 해석을 수행하였다. Fig. 6은 모델링한 베어링의 형상을 나타낸다. 모델링된 형상의 요소수는 828개이고, 노드 수는 1236개이다. 해석에서는 이차원 열전도 문제 해석을 위한 Plane55 2-D Thermal Solid 요소를 사용하였다.

#### 3.2 경계조건

실제 물딩 시의 유한 요소해석을 위해서는 베어링의 모델링 과정과 함께 실제 물딩 상황을 시뮬레이션하기 위한 경계 조건의 적용이 중요하다. 실제 물딩에서는 가압 · 가열의 과정이 동시에 일어나며 고무의 물성이 변화하게 되어 유한요소해석을 수행함에 있어 큰 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 베어링의 형태가 완성된 상태에서 가열에 의한 열전달 해석만을 수행하였다.

Table 4 Dimensions of LRB

	Units	HDRB (Full Scale)
Overall dimensions :		
Height	mm	228
Outer diameter	mm	600
Inner diameter		60
Rubber:		
Number of layer	no.	11
Thickness of each layer	mm	14
Total thickness	mm	154
Steel Shims:		
Number of shims	no.	10
Thickness	mm	3
Outer diameter	mm	580
Inner diameter	mm	62
Steel End Plate:		
Thickness	mm	20
Outer diameter	mm	580
Inner diameter	mm	62
Rubber Covers:		
Top & bottom cover thickness	mm	2
Side cover thickness	mm	10

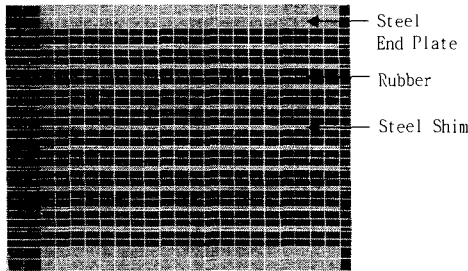


Fig. 6 Finite Element Model

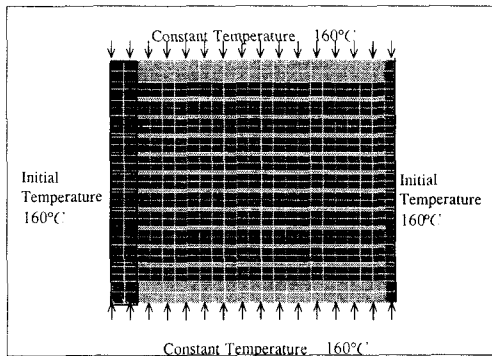


Fig. 7 Boundary Conditions

Fig. 7은 베어링의 유한요소해석에 적용된 경계 조건을 나타낸다. 가압된 상태에서 베어링은 상·하면에서 160 °C의 일정한 온도분포를 가진다. 즉 베어링은 상·하면에서 일정한 열량을 받으며 서서히 가열되게 되며, 베어링의 중공에 삽입되는 강봉은 초기 온도 160 °C를 가지며 베어링에 삽입되며 몰드 역시 초기 온도 160 °C의 상태이므로 베어링의 오른쪽 면에 초기 온도 160 °C를 가정하였다. 그 외 다른 부분들은 상온(20 °C)으로 일정하다고 가정하였다.

#### 4. 유한요소해석 결과 및 고찰

Figure. 8~Fig. 13은 시간에 따른 베어링내의 온도분포를 보여준다. Fig. 8~Fig. 13에서 보듯이 베어링의 온도분포는 중심부위의 바깥쪽에서 가장 낮음을 알 수 있다. 상하철관은 비교적 균일한 온도분포임을 알 수 있고 열전달은 잘 됨을 알 수 있다. 온도 측정기준은 Fig. 8의  $264 \leq x \leq 300$ 범위  $105 \leq y \leq 119$  (mm)에서 노드의 평균온도로 잡았고 유효온도(120 °C)이상이 되면 베어링의 볼딩은 충분히 수행된다. 온도는 Kelvin온도로 나타내었다. Fig. 8은 250(sec)에서의 온도분포를 나타낸다. 상하 철관과 좌측 강봉 부근에서는 다른 쪽보다 열전달이 잘됨을 알 수 있다. Fig. 9는 504(sec)일 때 온도분포를 나타낸 것이다. 철관과 강봉에서의 열전달이 잘되기 때문에 강봉과 철관을 경계로하는 모서리 부근에서 등온 온도 분포를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 10은 1076(sec)일 때의 온도분포를 나타낸다. 열전달이 계속되면서 철관과 강봉에 의한 영향으로 좌측과 상하철관 부근은 온도가 많이 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 11은 959(sec)에서의 온도분포를 나타낸다. Fig. 12는 17151(sec)일 때의 온도분포를 나타낸다. 동일한 경향으로 열전달이 되고 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 25200(sec)일 때의 온도분포를 나타낸다. 중심부 위까지 열전달의 원하는 온도(120 °C)가 되었음을 알 수 있다. Fig. 14는 선택된 노드에서 구해진 시간에 따른 온도분포를 나타낸다. Fig. 14에서 유효온도(120 °C)이상의 온도분포를 나타내는 시간은 3.48시간으로 구하여졌다. 앞서 고무의 유효물성을 구하기 위해 수행 되어진 해석에서 측정치와 해석치의 오차가 작고 온도

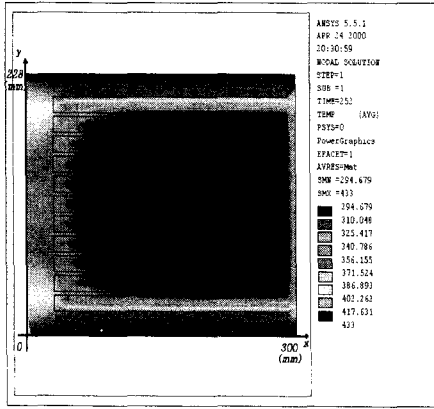


Fig. 8 Temperature distribution at t=250(sec)

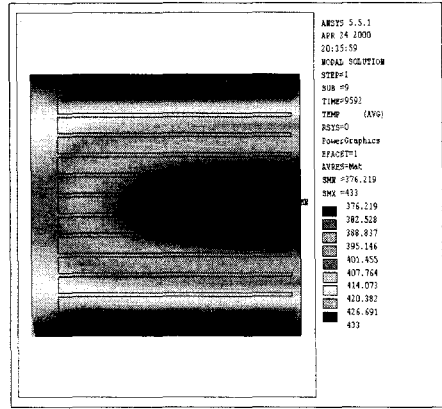


Fig. 11 Temperature distribution at t=9592(sec)

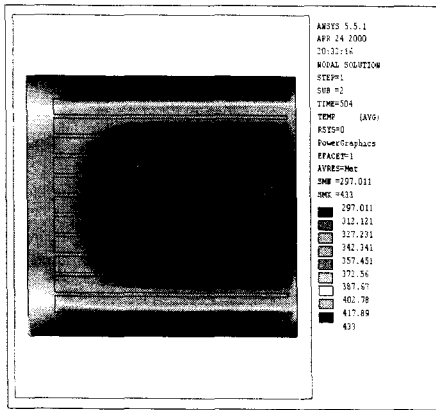


Fig. 9 Temperature distribution at t=504(sec)

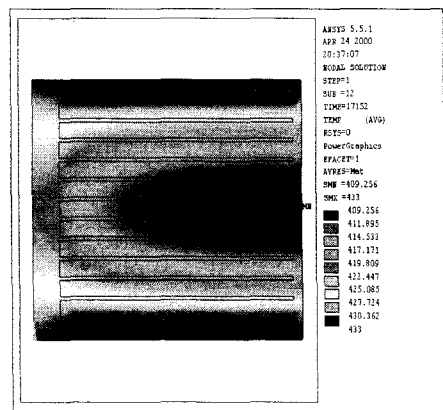


Fig. 12 Temperature distribution at t=17152(sec)

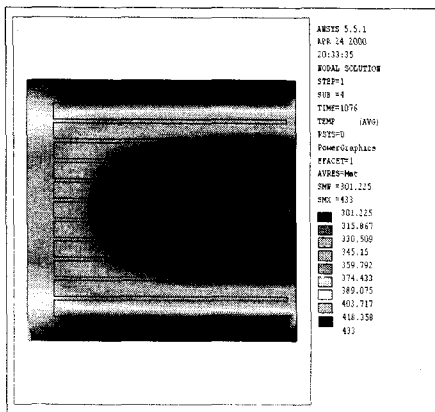


Fig. 10 Temperature distribution at t=1076(sec)

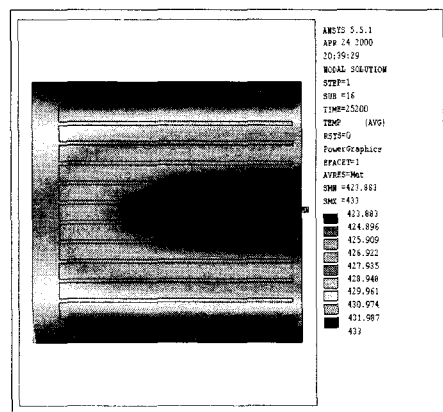


Fig. 13 Temperature distribution at t=25200(sec)

## 후기

본 연구는 Brain Korea 21 Program의 지원으로  
행해졌으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Koo, G. H., Lee, J. H., Lee, H. Y. and Bong, Y., 1999, "Stability of Laminated Rubber Bearing and Its Application to Seismic Isolation," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 8, pp. 595~604.
- (2) 이동근, 이정석, 1990, "Base Isolation System 이 있는 건물의 지진하중에 대한 동적해석," *전산구조공학*, 제3권, 1호, pp. 71~81.
- (3) Kelly, J. M., 1986, "Progress and Prospects in Seismic Isolation," *Proceeding of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation*, Berkeley, California.
- (4) Kawamura, S., Kitazawa, K., Hisano, M. and Nagashima, I., 1998 "Study on a Sliding Type Base Isolation System," *Proceedings of 9-th World Conference on Earthquake Engineering*, Taisei Corp., Totsuka-ku, Yokohama, Japan.
- (5) 日本免震構造協會, 1995, *免震構造入門*, オーム社, pp. 60~64.

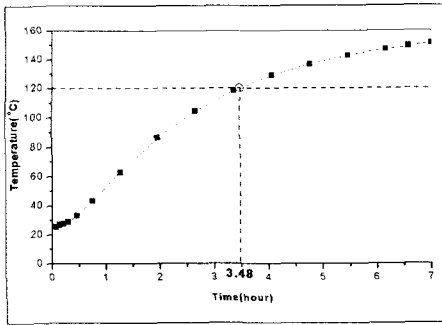


Fig. 14 Temperature distribution at center of bearing

분포의 경향성 또한 유사함을 확인하였기에 여기에서 구해진 고감쇠 면진 베어링의 물딩 시간 예측은 적절한 결과임을 확인할 수 있다.

## 5 결론

본 연구에서는 유한 요소법을 사용한 면진 베어링의 열전달을 해석하기 위해 우선 해석에 사용할 면진 베어링의 고무 물성치를 구할 때, 실제 베어링의 열전달 해석과 유한요소해석에 의한 열전달을 비교함을 통해 구하였고, 구한 고무의 물성치를 통해 열전달 해석을 수행하였으며 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실제 면진베어링의 열전달 실험과 유한 요소 해석을 통해 열전달 해석을 위해 비열을 조정하여 유한요소 해석을 할 수 있는 고무의 유효물성을 구하는 기법을 제시하였다.

(2) 제시한 기법으로 구한 고무의 물성치로 수행한 유한요소해석결과와 면진 베어링의 열전달 실험결과를 거의 일치했다. 그래서 기법의 유효성을 보였다.

(3) 면진 베어링의 열전달 해석에서 온도분포는 철판과 강봉에서의 열전달이 잘되기 때문에 강봉과 철판을 경계로하는 모서리 부근에서 등근 분포를 나타낸다.

(4) 면진 베어링의 물딩을 위한 적정온도에 이르기까지는 3시간 48분이 소요됨을 알 수 있었고 실험을 거치지 않고 해석을 통해 적정 가황시간을 얻었다.