

# 히스테리시스 손실에 의한 궤도부품의 온도 추정에 관한 연구 A Study on the Estimation of Temperature in Track Components due to Hystresis Loss.

김형제 · 김병탁 · 백운경

H. J. Kim, B. T. Kim, W. K. Baek

**Key Words** : Hysteresis Loss(히스테리시스 손실), Heat Generation Rate(열발생율), Unsteady Thermal Analysis(비정상 열해석), Finite Element Method(유한요소법)

**Abstract** : In many applications, rubber components undergo dynamic stresses or deformations of fairly large magnitude. Since rubbers are not fully elastic, a part of the mechanical energy is converted into heat due to the hysteresis loss. Heat generation without adequate heat dissipation leads to heat build up, i. e. internal temperature rise. The purpose of this paper is to predict temperature rise caused by the hysteresis loss, in a rubber pad subjected to complex dynamic deformation. In this unsteady thermal analysis, the temperature distributions of track components are displayed in contour shapes and the temperature variations of some important nodes are represented graphically with respect to the running time of the tank.

## 1. 서 론

궤도차량에 사용되는 고무부품은 차량의 무게를 지탱하며 복잡한 동하중을 받기 때문에 차량이 운행되는 지형에 따라 제한적이고 변동적인 수명<sup>1)</sup>을 나타낸다. 일반적으로 궤도 고무부품의 파괴 유형은 마모(wear)에서부터 실운전 상태에서 나타나는 절단(cutting), 분리(chunking), 파열(blow-out) 등으로 다양하며, 이러한 여러 가지 파괴 유형에 차량 운전시 발생하는 고무부품의 높은 온도가 중요한 인자로 작용하는 것으로 알려져 있다<sup>2, 4)</sup>.

현재까지 고무 부품의 열해석과 관련된 연구는 초기에 동하중에 의한 열발생 기구(mechanism)에 대한 연구가 주류를 이루었으나, 최근에는 이를 실제 부품에 적용하여 해석한 연구가 다수 발표되고 있다. 대표적인 관련 연구들을 살펴보면 Lesuer 등<sup>5)</sup>은 M60 전차에 부착되어있는 T-142 패드의 열발생율을 실험을 통해 구하고, 이를 열관련 전산 코드에 적용하여 단순한 2차원 유한요소 해석을 수행하였으나, 대류 경계조건만을 사용하였고, 평지를 일정한 속도로 주행하는 경우에 한정되어 있다는

문제가 있다. Sae-oui 등<sup>6)</sup>은 응력과 변형율이 주기 함수이고 고무가 탄성범위에 있는 경우에 대하여, 완전 타원형인 히스테리시스 루프의 면적으로 열발생율을 계산하고 이를 진동억제 마운트에 적용하였다. Sridhar 등<sup>7)</sup>은 고무와 같은 재료에 발생하는 열에너지는 변형율에 의존하므로 쉘(shell) 요소에 대해 변형율장(strain field)을 가정하고 재료와 기하학적 비선형성을 고려하여 열발생율을 추정하는 기법을 제안하였다. Kar 등<sup>8)</sup>은 고무 제품에서 열발생은 히스테리시스 손실에 의존할 뿐만 아니라 재료 물성, 하중상태, 고무조성 등에 의해서도 변화하므로, 여러 변수를 고려한 방정식을 실험으로 유도하여 이를 SBR과 NR의 열발생량 예측에 적용하였다. 그밖에도 고무제품의 열과 관련된 연구<sup>9-11)</sup>가 있으나, 이들은 대부분 시편과 타이어와 같은 단순한 반복 하중조건이나 간단한 모델에 대해서 수행되어 왔으며 복잡한 동적하중을 받고 있는 궤도고무와 같은 부품에 대해서는 연구결과가 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구에서는 궤도 동역학에서 산출된 하중을 근거로 실험을 통하여 궤도고무에 발생하는 열을 추정하고, 이를 입력자료로 하여 궤도부품에 발생하는 온도분포를 유한요소법으로 해석하였다. 해석에는 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으

접수일 : 2001년 4월 9일

김형제 : 부경대학교 정밀기계공학과 대학원

김병탁, 백운경 : 부경대학교 기계공학부

며, 운전시간에 따른 온도변화 특성을 파악하기 위하여 비정상 열전도 해석을 수행하였다.

본 연구에서 적용된 해석 기법과 도출된 결과는 발생 온도가 중요한 인자로 작용하는 캐도의 파괴 유형에 따른 수명 예측 등에 기본적인 자료를 제공해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 열해석 관련이론

### 2.1 캐도고무의 열발생 이론

고무가 동적응력을 받는 경우, 점성효과로 인하여 변형률은 Fig. 1과 같이 응력에 비해 위상각  $\delta$  만큼 지연되므로, 응력-변형률 선도는 Fig. 2와 같이 히스테리시스 루프를 그리게 된다<sup>12)</sup>.

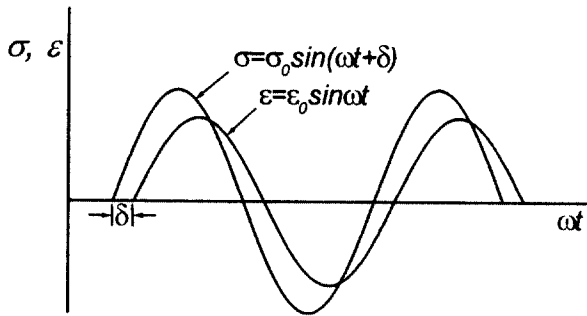


Fig. 1 Diagram to illustrate phase lag of strain behind stress.

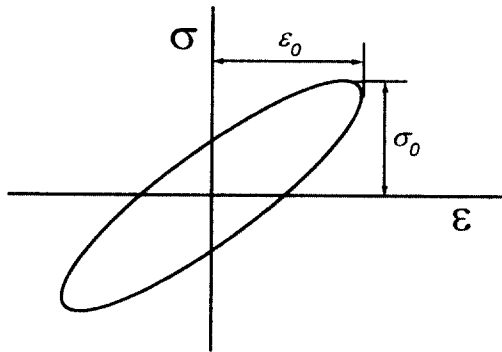


Fig. 2 Hysteresis loop of dynamically loaded elastomers.

Fig. 2에서 히스테리시스 루프의 면적은 한 사이클 동안의 에너지 손실을 나타내며, 이 에너지와 동일한 양의 열이 고무에 발생한다. 따라서 한 사이클 동안의 단위체적당 열발생량은 변형률 에너지 밀도(strain energy density)에 의해 다음과 같은 식으로 나타낼 수가 있다.

$$E_{loss} = \pi \sigma_0 \epsilon_0 \sin \delta \quad (1)$$

유한요소해석에 입력되는 단위체적당 열발생률은 한 사이클 동안의 주기를 고려하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = E_{loss} \cdot f \quad (f : \text{frequency}) \quad (2)$$

### 2.2 열전도 이론

물체 내부의 열원이 있는 경우 비정상열전도 해석에서 지배방정식은 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$k \nabla^2 T + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

식(3)을 유한요소법으로 정식화하면, 다음 식과 같은 행렬 대수방정식으로 표시된다.

$$[C]^e \{\dot{T}\}^e + [K]^e \{T\}^e = \{F\}^e \quad (4)$$

이 식에서  $\{T\}$ 는 절점온도이며, 행렬  $[C]$ ,  $[K]$ 와  $\{F\}$ 의 성분은 각각 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} C_{\alpha\beta} &= \int_{\Omega^e} \rho c_p N_\alpha N_\beta d\Omega \\ K_{\alpha\beta} &= \int_{\Omega^e} k N_{\alpha,i} N_{\beta,i} d\Omega + \int_{\Gamma_3^e} h N_\alpha N_\beta d\Gamma \\ F_\alpha &= \int_{\Gamma_2^e} q_s N_\alpha d\Gamma + \int_{\Omega^e} \dot{Q} N_\alpha d\Omega + \int_{\Gamma_3^e} h T_\infty N_\alpha d\Gamma \end{aligned} \quad (5)$$

이 식의 마지막 열하중(thermal load) 벡터의 첫항은 본 연구의 경우에  $q_s$ 가 주어진 경계가 존재하지 않으므로 최종적으로 다음 식이 된다.

$$F_\alpha = \int_{\Omega^e} \dot{Q} N_\alpha d\Omega + \int_{\Gamma_3^e} h T_\infty N_\alpha d\Gamma \quad (6)$$

## 3. 캐도고무의 열발생량 측정 실험

### 3.1 실험하중

캐도부품의 열해석을 위해서는 먼저 하중변화에 따른 열발생률을 계산할 필요가 있는데, 이는 이론적으로 접근할 수 없기 때문에 본 연구에서는 실제 고무부품에 작용하는 하중을 근거로 동일응력이 발생하도록 시편의 작용하중을 계산하고, 실험을 통하여 열발생량을 측정하였다. 이를 위하여 시편에 주어지는 하중조건의 결정이 선행되어야 하는데, 시편의 작용하중은 캐도고무에 작용하는 하중, 고

무부품의 접촉면적, 시편의 치수 등에 의해 계산할 수 있다.

본 해석에서 주어진 노면조건은 Table 1과 같으며, 노면 1은 평평한 노면이고, 노면 2와 노면 3은 요철을 포함하고 있는 형태이다.

케도고무에 발생하는 열발생량을 추정하기 위하여, 먼저 각 노면조건에 따라 산출된 하중이력을 일정한 진폭과 주기의 함수로 나타내었는데, Fig. 3은 노면 1(평지)의 하중이력을 주기함수로 곡선맞춤하여 대표적으로 도시한 것이다.

Table 1 Road conditions used in thermal analysis

Road Profile	Road 1	Road 2	Road 3
Distance(m)	30	30	75
Speed(km/h)	30	20	17
Composition(%)	22	22	56
Running time(sec)	3.6	5.4	15.88

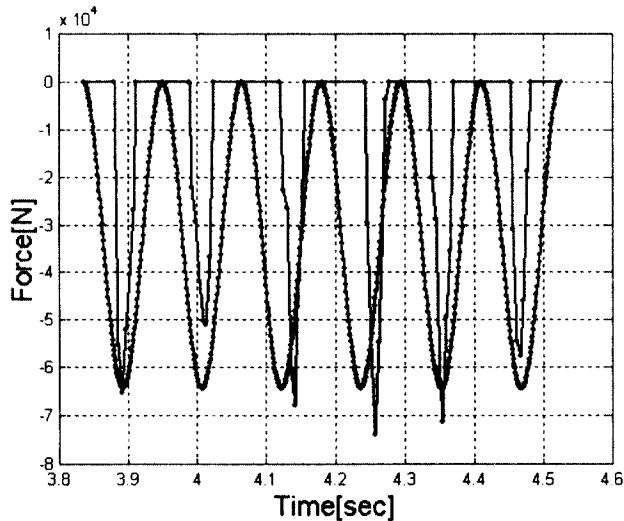


Fig. 3 Load history and sinusoidal curve fitting configuration of the wheel pad.(Road 1)

전술한 바와 같이 각 시편에 가해질 하중크기는 노면조건에 따라 산출된 하중과 고무부품의 치수를 고려하여 일정한 응력진폭의 크기를 계산할 수가 있는데, 두 패드의 경우에는 산출된 하중을 접촉면으로 나누면 일정한 응력진폭을 구할 수가 있으며, 핀 부싱의 경우에는 압축응력과 전단응력을 동시에 받고 있기 때문에 본 연구에서는 이들 응력진폭의 크기를 각각 관련 이론식을 적용하여 계산하였다.

케도고무에 작용하는 응력의 크기와 주기가 결정

되면, 최종적으로 시편의 치수를 고려하여 실험시 압축 시편과 단순 전단 시편에 작용시킬 하중의 크기를 결정할 수 있다.

### 3.2 실험장치 및 방법

시험기는 Fig. 4에서와 같은 Saginomia사의 동특성 시험기로서 하중제어와 변위제어를 둘 다 적용할 수 있으며, 본 실험에서는 하중제어 방식을 적용하였다.

각 시험조건에 따라 두 패드의 압축실험에는 동일 작용하중에 대해 3개의 시편을 사용하였으며, 핀 부싱의 압축실험은 2개, 전단실험은 3개의 시편을 사용하여 각각 산출된 히스테리시스 면적을 평균하여 열발생량을 계산하였다.

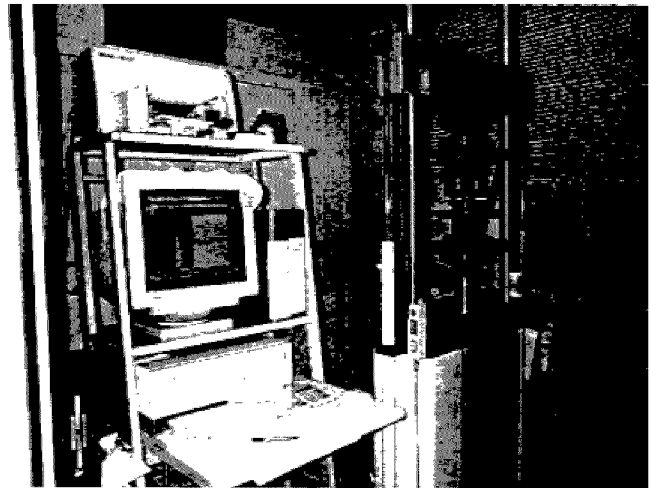


Fig. 4 Dynamic tester

### 3.3 실험결과

각 고무부품에 대한 실험을 통하여 얻은 전형적인 히스테리시스 면적 중에서 휠 패드에 대한 루프 면적을 Fig. 5에서 도시하였다.

Fig. 6은 각 케도 고무부품과 노면조건에 의해 나타낸 히스테리시스 면적의 평균값을 하중의 반복 사이클 수에 따라 도시한 것이다. 하중의 반복 횟수에 따라 히스테리시스 루프의 면적이 감소하다가 일정해지는 경향을 보였기 때문에, 열발생량을 추정하기 위한 최종 히스테리시스 루프의 면적은 2000 사이클의 값을 사용하였다.

Fig. 7은 실험에서 얻은 히스테리시스 루프 면적의 평균값으로부터 계산한 단위체적당 열발생율을 Table 1에 주어진 각 노면별 운행시간을 고려하여 나타낸 것으로, 이 값이 비정상 열전도 해석시의 입력자료가 된다.

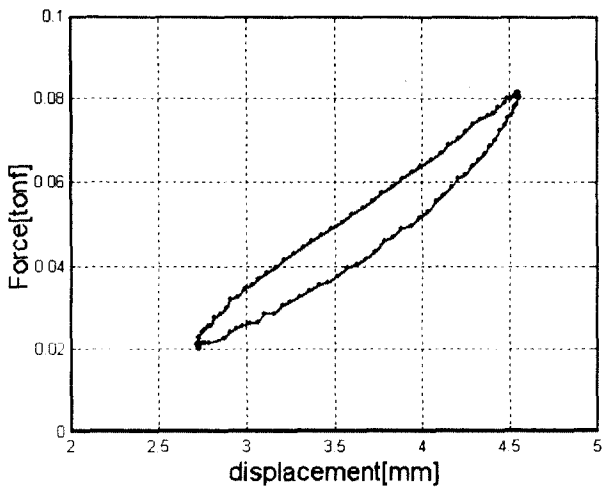


Fig. 5 Typical shape of the hysteresis loop of the wheel pad

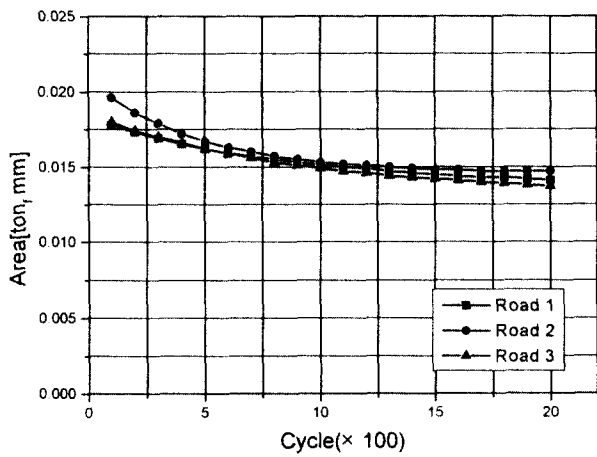
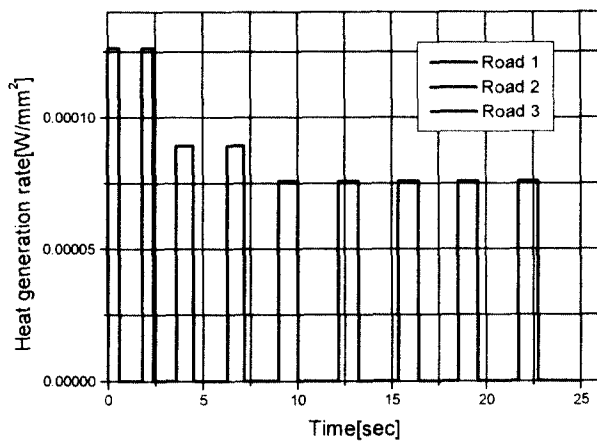
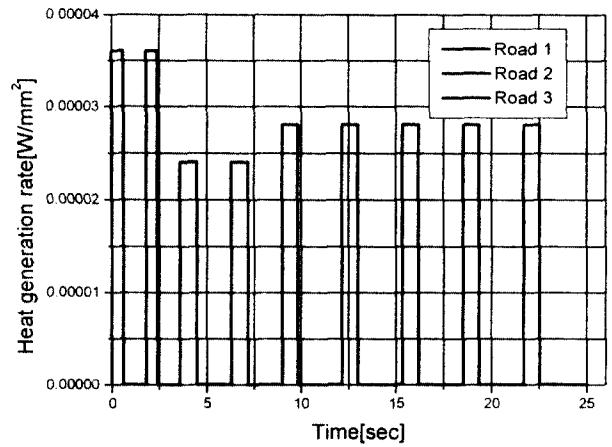


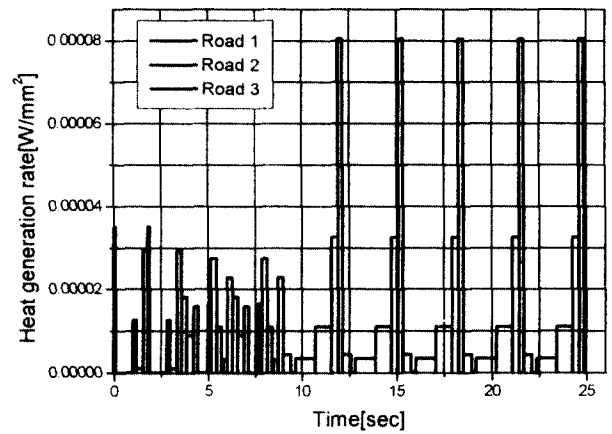
Fig. 6 Variations of the hysteresis loop area of the wheel pad.



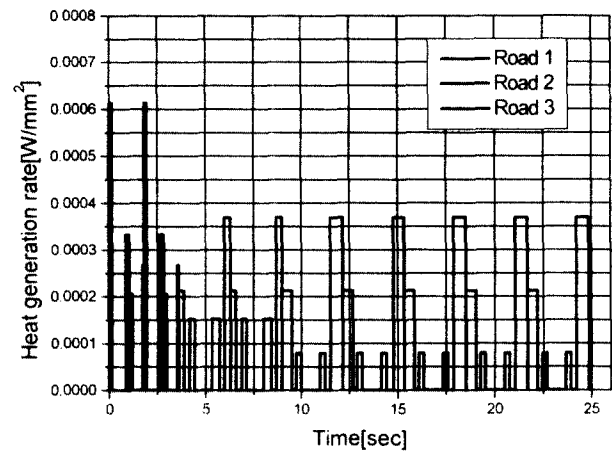
(a) Wheel pad



(b) Ground pad



(c) Pin bushing(due to compressive stress)



(d) Pin bushing(due to shear stress)

Fig. 7 Heat generation rates of the rubber components according to the running time.

### 4. 유한요소 해석

#### 4.1 해석 모델

Fig. 8은 본 연구에 사용한 궤도차량의 궤도부품에 대한 유한요소 모델을 도시한 것으로, 모델의 기하학적 형상과 열전달 경계조건의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4를 해석대상으로 선정하였다.

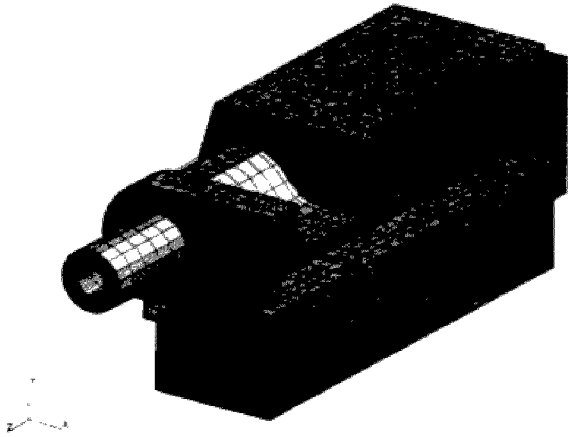


Fig. 8 Finite element model of the track shoe.

해석에 사용한 절점수는 9234개이고 요소의 수는 7049개였으며, 요소의 종류는 3차원 열전달 요소로서 대부분이 8절점 선형 6면체 요소(DC3D8)이나 모서리나 형상 변화가 심한 부분에는 6절점 선형 프리즘 요소(DC3D6)를 사용하였다. 그림 상에는 나타나지 않으나 모델을 구성하고 있는 내부 경계는 접촉 유체의 유동이나 온도가 외부와 달라 열전달 관련 조건이 상이하기 때문에 가능한 원형을 살려 모델링하였다.

#### 4.2 입력상수 및 주행조건

Table 2는 열전도 해석에 사용된 재료의 물성치를 나타낸 것이며, 고무는 휠 패드와 그라운드 패드, 부싱으로 구분되었지만 물성치의 차이가 없기 때문에 전체 고무에 대하여 동일한 값으로 입력하였다.

열전달 경계 조건과 관련된 상수로는 접촉 유체의 온도와 표면에서의 열전달계수가 있으며, 접촉 공기의 온도는 여름철 기후 조건을 고려하여 35℃로 결정하였다. 열전달 계수는 실제 접촉유체의 종류나 유동상태, 접촉표면의 길이 등에 따라 다른 값을 갖게 되는데, 본 연구에서는 평판 위에 흐르는 공기와의 강제대류 조건식<sup>14)</sup>을 사용하여 계산된

Table 2 Material properties of the track components

Components	Thermal Conductivity (W/m · °C)	Specific Heat (J/kg · °C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Rubber (SBR+NR)	0.317	1453.5	1160
Pin & Pad Plate (AISI 8650H)	46.6	475	7850
Body (KS SCM440)	42.7	477	7850

8.07 W/m<sup>2</sup>°C의 값을 사용하였다. 해석 모델에 포함된 여러 대칭면의 열전달 관련 경계조건은 이 면이 유체와 접촉하고 있지 않을 뿐 아니라, 이 면을 통해 유동하는 열이 없기 때문에 단열 조건을 적용하였다.

궤도 고무의 온도가 상온에서 정상상태에 이르기까지 시간에 따른 온도 변화를 살펴보기 위하여, 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 주어진 노면조건을 연속적으로 연장하고 충분히 정상상태에 도달할 것으로 예상되는 20000초의 시간에 대하여 비정상 열전도 해석을 수행하였다.

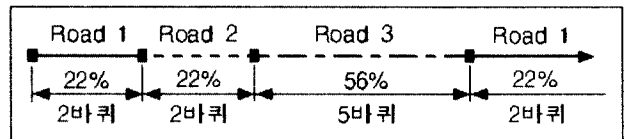
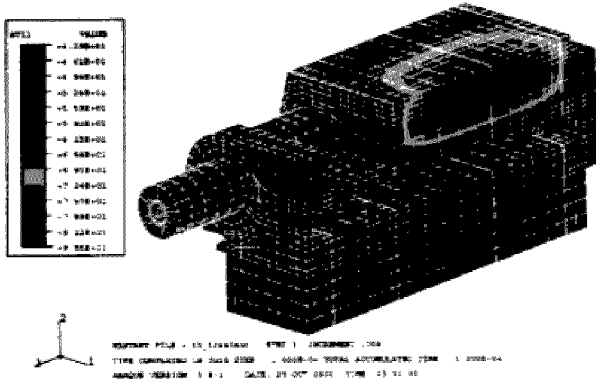


Fig. 9 Road conditions used in unsteady thermal analysis.

### 5. 해석결과

Fig. 10은 궤도부품에 발생하는 온도분포를 도시한 것으로 (a)는 해석의 중간시점인 10000초일 때 온도분포이며, (b)는 해석 종료시점인 20000초에서 발생하는 온도분포를 나타낸 것이다.

이 두 시점에서 각 부품에 나타나는 온도장의 형상은 거의 동일하므로, 궤도부품의 온도는 시간이 경과함에 따라 그 분포 형태는 일정하게 유지되면서 온도값만 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 두 시점에서 발생하는 궤도부품의 최고온도는 휠 패드의 중앙부에서 발생하였으며, 온도차가 1.2℃에 불과하므로 궤도 차량의 운전시간이 약 3시간을 경과하게 되면 궤도부품의 온도는 거의 정상상태에 도달한다고 볼 수 있다.



(a)  $t = 10000$  s

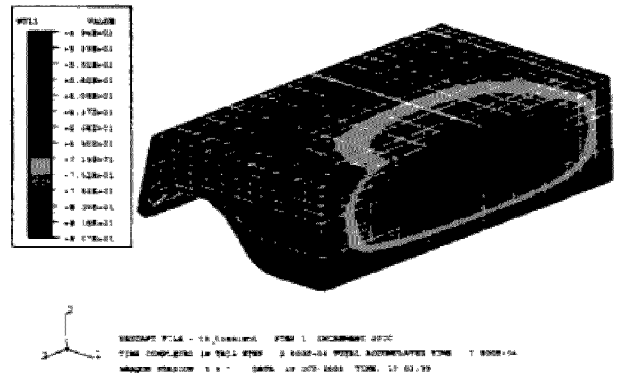
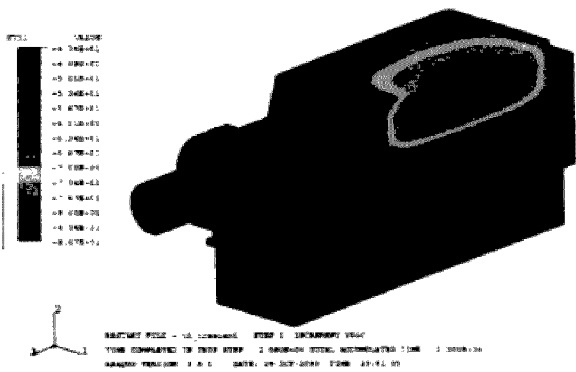


Fig. 11 Temperature distribution of the wheel pad( $t = 20000$  s)



(b)  $t = 20000$  s

Fig. 10 Temperature distribution of the track components

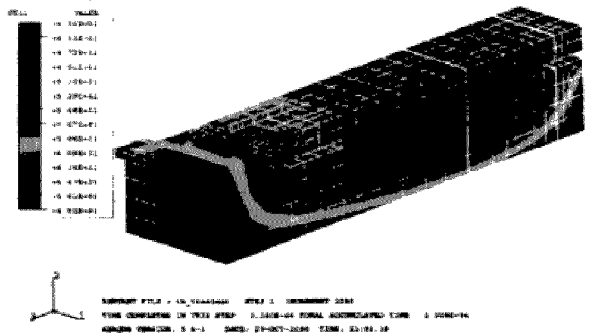


Fig. 12 Temperature distribution of the ground pad( $t = 20000$  s)

Fig. 11은 최종 해석 시점에서 휠 패드에 발생하는 온도분포를 도시한 것으로, 패드의 중앙보다 약간 상부에서  $86.7^{\circ}\text{C}$ 의 최고온도가 발생하였으며, 10000초의 최고온도는  $85.5^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 수직단면에서 최고온도가 중앙에서 발생하지 않고 상부쪽으로 편위된 이유는 반복하중으로 발생하는 열이 상부보다는 열전도도가 높고 경계면이 많은 하부쪽으로 용이하게 전달되기 때문으로 풀이된다.

Fig. 12는 그라운드 패드의 온도분포를 도시한 것으로 최고온도는 패드의 중앙부에서 발생하였으며, 그 값은 두 시점에서 각각  $64.4^{\circ}\text{C}$ 와  $68.1^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 수직단면에서 볼 때 기하학적 차이로 인하여 비대칭적인 온도분포가 나타나고 있으며, 작용 응력의 진폭과 열전달 경계면의 차이로 인하여 휠 패드보다 약  $18.6^{\circ}\text{C}$  정도 낮은 온도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 부싱에서 발생하는 온도분포를 도시한 것으로서 최고온도는 휠 패드 부분과 인접한 곳에서 나타나고 있으며, 그 값은 두 해석 시점에서

$62.4^{\circ}\text{C}$ 와  $65.6^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 상대적으로 두 패드보다 낮은 온도가 나타나는 이유는, 큰 열발생물이 있지만 그 발생시간이 짧아서 전 운행시간에 대한 평균 열발생율은 두 패드보다 작기 나타나기 때문으로 풀이된다.

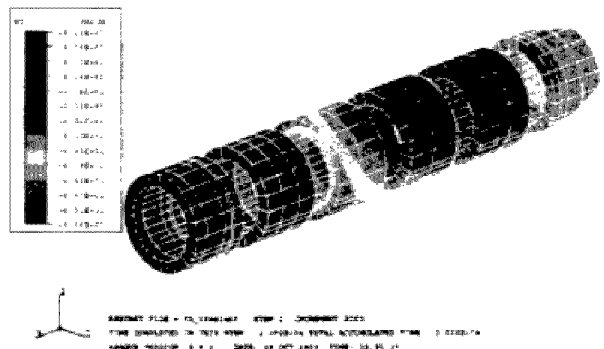
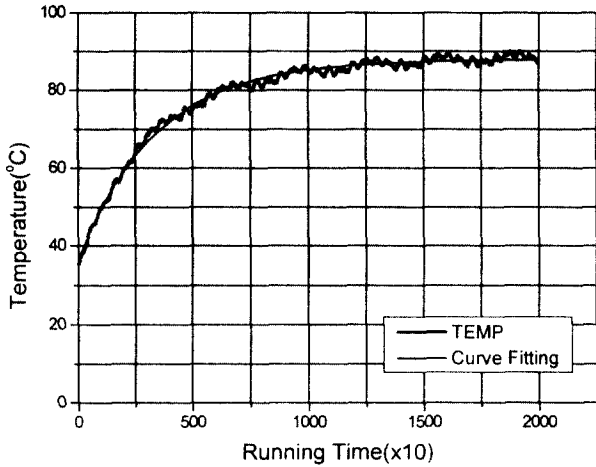
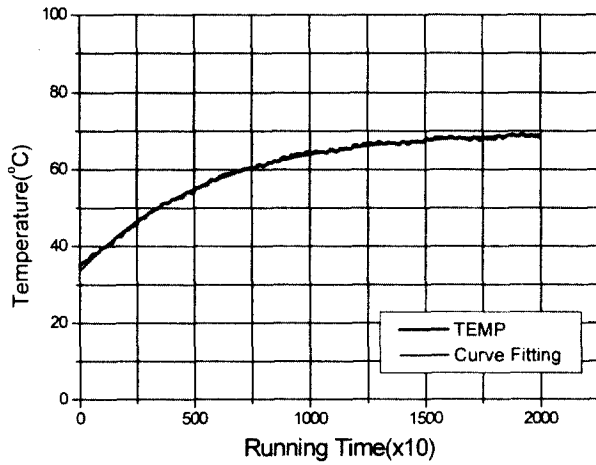


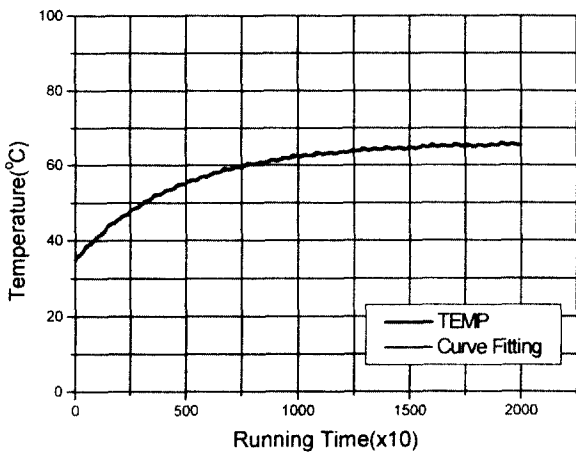
Fig. 13 Temperature distribution of the bushing ( $t = 20000$  s)



(a) wheel pad (node : 3658)



(b) ground pad (node : 7740)



(c) pin bushing (node : 2280)

Fig. 14 Temperature variation of the track components with respect to the running time.

Fig. 14는 각 궤도부품에서 최고온도가 발생하는 절점의 온도변화를 도시한 것으로 일정시간 후에는 더 이상의 온도변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 온도가 정상상태에 도달하였다 하더라도 시간에 따라 약간의 변동(fluctuation)이 발생함을 관찰할 수 있는데, 이는 궤도 고무부품의 열 발생 구간과 비발생 구간의 영향뿐만 아니라, 조건이 다른 세 개 노면을 번갈아 가면서 운행되기 때문에 나타나는 현상으로 파악된다. 즉 패드가 지면과 접촉하는 시간구간에서는 열발생과 동시에 소산이 일어나지만 지면과 비접촉 구간에서는 열발생없이 소산열만 존재하게 되며, 세 노면에서 열발생률이 각기 다르기 때문에 계속 일정한 주기와 진폭으로 온도가 변동을 하게 되는 것이다. 정상 상태 도달 후의 각 부품별 온도의 등락폭은 휠 패드가 1°C로서 가장 크고, 그라운드 패드가 0.4°C, 핀 부싱이 0.6°C 등으로 1°C 미만의 안정적인 값을 나타냄으로써 온도가 정상적으로 하나의 값에 수렴함을 알 수 있었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 동적 하중을 받고 있는 궤도고무의 열발생율을 실험으로 측정하고, 이를 입력자료로 하여 각 궤도부품에 온도분포를 유한요소법으로 해석하였으며, 그 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

1. 궤도부품에서 가장 높은 온도가 발생하는 곳은 휠 패드의 중앙으로 86.7°C의 값을 나타내었다.
2. 그라운드 패드는 휠 패드보다 18.6°C 정도 낮은 68.1°C로서 휠 패드와 마찬가지로 중앙부분에서 발생하였으며, 핀 부싱의 최고온도는 65.6°C로서 휠 패드와 인접한 부분에서 발생하였다.
3. 과도 상태의 각 궤도부품의 온도는 시간에 따라 온도값의 차이는 있지만 분포형태는 거의 동일하게 나타났다.
4. 각 고무부품이 정상온도에 도달했다 하더라도 노면 변화에 따라 온도가 일정진폭으로 변동하며, 그 등락폭은 1°C 이내로 안정적으로 일정 온도에 수렴함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 백운경, 배대성, 김병탁, “궤도 내구성 향상을 위한 해석 및 내구수명 평가기법 연구”, 국방과학연구소, 연구보고서(TECD-401-001028), 2000
2. A. I. Medalia, “Heat Generation in Elastomer Compounds: Cause and Effects”, Rubber

- Chemistry and Technology, Vol. 63, pp. 481 ~ 492, 1990
3. K. K. Kar and A. K. Bhowmick, "Hysteresis Loss in Filled Rubber Vulcanizates and Its Relationship with Heat Generation", J. Applied Polymer Science, Vol. 64, 1541 ~ 1555, 1997
  4. A. N. Gent and M. Hindi, "Heat Build-up and Blowout of Rubber Blocks", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 61, pp. 89 2~905, 1988
  5. D. R. Lesure, M. Zaslowsky, S. V. Kulkarni, R. H. Cornell and D. M. Hoffman, "Investigation into the Failure of Tank Track Pad", Technical Report for FY-79 and FY-80, Technical Report No.12583, U.S. Army Tank-Automotive Command Research and Development Center, Warren, Michigan 48090, October 29, 1980
  6. P. Sae-oui, P. K. Freakley and P. S. Oubridge, "Prediction of Hysteretic Temperature Increase in Rubber Components by Finite Element Analysis", Plastic Rubber and Composites, Vol. 28, No. 2, pp. 65~73, 1999
  7. S. Sridhar, N. S. Prasad, K. N. Seetharamu, "Estimation of Temperature in Rubber-like Materials using Non-linear Finite Element Analysis Based on Strain History", Finite Element Analysis and Design, Vol. 31, pp. 8 5~98, 1998
  8. K. K. Kar and A. K. Bhowmick, "Medium Strain Hysteresis Loss of Natural Rubber and Styrene-Butadiene rubber vulcanizates: a predictive model", Polymer, Vol. 40, 683~694, 1999
  9. D. W. Nicholson and B. Lin, "Finite Element Method for Thermomechanical Response of Near-Incompressible Elastomers", Acta Mechanica, Vo. 124, pp. 181~198, 1997
  10. D. J. Charlton and K. K. Teh, "A Thermo-Mechanical FEA for Rubber Components", Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, Vol. 23, No. 3, pp. 185~192, 1995
  11. T. S. Song, J. W. Lee and H. J. Yu, "Rolling Resistance of Tires - An Analysis of Heat Generation", SAE Technical Paper Series, No. 980255, pp. 1~5, Feb. 1998
  12. T. F. Reed, "Heat Buildup of Dynamically Loaded Engineering Elastomeric Components - I", Elasmomers, Vol. 22, pp. 22~28, Nov., 1989
  13. N.Kikuchi, "Finite Element Methods in Mechanics", Cambridge University Press, pp. 25~37, 1986
  14. 최인규, 조성환, 노승탁, "열전달", 보성문화사, pp. 216~217, 1986