

궤도고무부품의 열해석에 관한 연구

김영수*

A Study of Heat Analysis on Track Rubber Parts

Young-Soo Kim*

ABSTRACT

Track rubber parts has heat built-up as long as dynamic loading is applied from running tracked vehicles.

Durability is required for rubber part to sustain the heat accumulation and heat exchange between rubber-metal assembly and environmental air and ground. For this research, the track assembly was divided into four parts i.e., bottom track shoe, upper track pad, pin bushing and metal structure. Three rubber parts and metal structure were modelled and analyzed with MARC package program to obtain time-temperature data which was induced from mechanical work of tracked vehicles.

Heat accumulation data was obtained from special experiments under the room temperature of 25°C and 35°C to simulate the actual environmental conditions. From this research, it is cleared that the environmental temperature does not affect to the heat accumulation speed in rubber parts. Also, the heat built-up mechanism was clarified from the thermo-mechanical work based on numerical analysis and experiments.

Key Words : Track rubber parts(궤도고무부품), Heat built-up(발열), Heat accumulation(열축적), Heat exchange(열교환), Track shoe(궤도슈), Track pad(궤도패드), Pin bushing(핀부싱), room temperature(분위 기온도), numerical analysis(수치해석)

1. 서론

궤도차량의 궤도내구성향상을 위해 전하중을 받는 궤도부품에 대해 내구수명을 고려한 궤도설계가 절실히 요구되고 있다. 궤도차량 주행시 궤도의 각 부품에 작용하는 동하중 및 열축적에 따른 파손 메카니즘(Fracture Mechanism)에 근접하기 위하여 궤도고무부품의 반복압축에 의한 발열시험과 열전달해석을 수행하여 궤도부품의 열에너지 발생(Heat Generation)에 따른 열분포 결과와 시험적

결과와의 비교·고찰해 보았다. 재료시험연구를 토대로 궤도 부품의 CAE(Computer Added Engineering)를 통한 검증자료가 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고무패드와 부상재료를 세부적으로 나누어서 패드의 주몸체부, 패드바닥부, 주몸체부의 고무부품, 패드바닥의 고무부품, 핀 부상부, 핀부싱고무부품으로 나누어 전처리인 Mentat II에서 모델(부품의 중앙부 단면)을 2차원으로 형상화하고 post-process인 MARC를 통하여 해석적으로 규명, 연구하였다.

* 부경대학교 응용기계공학과군 냉동공조공학과

그리고 퀘도를 구성하는 고무의 압축강도와 Young's Modulus 등의 물리적 특성과 표면온도와 내부온도등의 열적 특성에 대한 데이터를 확보하기 위해 퀘도고무의 시편에 대해 발열시험을 통한 실험적 연구도 수행하였다.

2. 퀘도 형상 및 실험조건

2.1 퀘도의 전체 형상

퀘도 전체 조립체와 전체 퀘도차량에서 퀘도의 몸체부를 측면과 평면에서 본 도면을 Fig. 1에 나타내었다. 몸체부의 윗부분을 퀘도슈우, 지면과 닿는 부분을 퀘도패드, 퀘도몸체의 홀부분을 핀부싱부분으로 하여 크게 3가지로 나누었다. 모델형상은 간단한 2차원 형상으로 각 부품별 요소들을 일정하게 하기위해 요소종류를 solid로 하여 유한요소 해석프로그램인 MARC를 이용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서 해석수행부분을 크게 2부분으로 나누었다. 퀘도 핀부싱을 제외한 나머지 퀘도부품(퀘도 슈우, 퀘도 패드)을 일체형으로 하여 모델하였다.

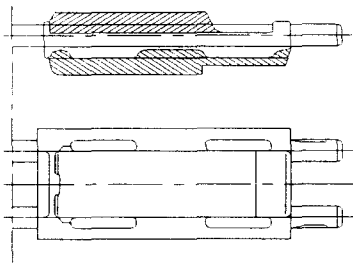


Fig. 1 Track Assembly

2.2 히스테리시스곡선에 대한 열발열량 이론

Hysteresis Loop

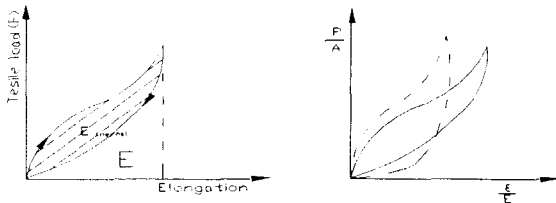


Fig. 2 Hysteresis curve

고무의 히스테리시스 루프곡선을 통하여 따라서 에너지 평형방정식으로 열축적에너지를 유추할 수가 있다.

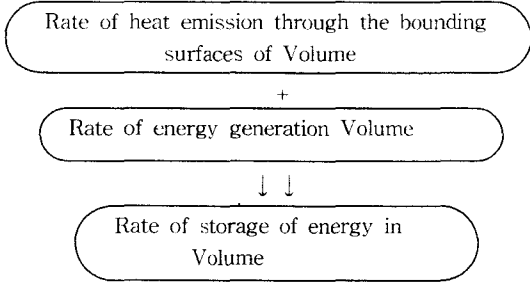


Fig. 3 Energy Equilibrium state

그리고 위 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다. Rate of heat emission through the bounding surfaces of Volume = $\int_A qndA = \int_V \nabla \cdot qdv \dots\dots\dots (1)$

A는 체적요소의 표면 면적이고, n은 표면요소면적 dA를 향한 수직단위 벡터이며, q는 표면요소면적 dA에 대한 열유속이다. 그리고 다음단계로 남아 있는 체적에 대한 열발생에너지를 계산하면,

$$(\text{Rate of energy generation in } V) = \int_V g(r, t)dv \dots (2)$$

$$(\text{Rate of energy storage in } V) = \int_V \rho C_p \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} dv \dots\dots\dots (3)$$

가 된다.

2.3 고무재료 시험 및 시편 물성

고무시편(ASTM D 623규격)에 대해 tip끝이 2mm인 cc(couple constant)를 중앙부에 2개씩 설치하고 분위기온도하에서 동적발열시험기를 가동하였다. Fig. 4은 cc가 부착된 고무시편의 사진을 보여준 것이다. 시험기내의 고무시편 바닥부에는 표면온도센서가 부착되어 있어 시험가동시동간의 표면온도를 측정하였고 고무시편 중앙부는 FULUKE라는 온도계측장비로 cc의 tip끝온도를 정확하게 읽어들었다. 모두 각 시편에 대해 온도-시간에 관한 그래프를 자동생성하였고, 매 10초마다의 온도값을 읽어들었다. 하나의 시편마다 총 20분씩 시험하였고, 각 고무시편에 대해 9개씩 총 27개의 시편을 시험하였다. 본 시험에서의 고정변수는 하중 55pound(약24.9kg), cycle 횟수는

1800cpm으로 하였으며, 분위기온도를 자동변수하여 25℃와 35℃로 나누어 각각의 시편에 대해 반복압축·발열시험하였다.

Table 1 Mixture conditions & Properties

	Track Pad	Track Shoe	Pin bushing
Carbon black[phr]	62	66	44
NR vs SBR rate	9:1	7:3	10:0
Stiffness[kgf/cm ²]	69	63	73
Tensile strength[kgf/cm ²]	260	235	230
Elongation[%]	470	470	460

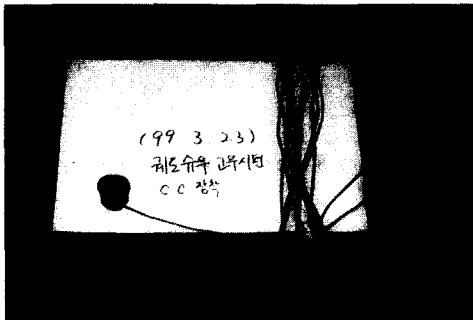


Fig. 4 The schematic of test specimen stick to couple constant

2.4 강 부품의 물성치

본 레도 강부품에 사용된 재질은 고강도강(High Strength Steel)으로 탄소량을 0.2%이하로 하여 용접성이 좋고 Cr, Ni, Mo, V, 등을 약간 첨가함으로써 항장력을 강화한것으로서 일반물성을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 The Specific properties of High Strength steel

Specific gravity (kN/m ²)	77
Yield stress (MPa)	340-1000
Density (kg/m ³)	7850
Thermal conductivity (W/m·K)	43.0
Elongation rate(%)	5-25

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고무시험 결과 및 해석고찰

Fig. 5에서 횡축은 매 10초마다의 시간을 체크한 것이고, 종축은 매 10초마다의 열생성온도를 나타낸 것이다. Fig. 5에서도 보면 알 수 있듯이 시간에 따른 온도의 변화는 Track Pad와 Track Shoe는 거의 비슷한 경향으로 나타났으나 약간의 온도편차는 있었다. 하지만 Pin bushing은 초기온도와 시험시간동안의 온도 편차가 Track Pad와 Track Shoe보다 더 낮게 나타남을 알 수 있었다. 시험온도는 상온 25℃에서 분위기온도오차 ± 1.5도 이내에서 시험하였다. 분위기온도 35℃에서 시험온도는 상온에서 섭씨온도 10℃ 올린 Heating blow로 온도를 상승하여 시험하였다. 분위기온도 25℃와 비교하여 가장 큰 차이는 최대온도편차였다. Fig. 6에서 분위기온도 35℃의 온도 변화는 Track Pad와 Track Shoe가 거의 비슷한 경향으로 나타났으나 약간의 온도편차는 있었다. 하지만 Pin bushing은 초기온도와 시험시간동안의 온도 편차가 Track Pad와 Track Shoe보다 더 낮게 나타남을 알 수 있었다. 초기온도는 약 8℃ 정도이고 시험나중시간까지(steady state)의 온도는 부러 40℃정도까지 차이가 나타났다. 시험온도는 상온 25℃에서 분위기온도 오차 ± 1.5도 이내에서 시험하였다.

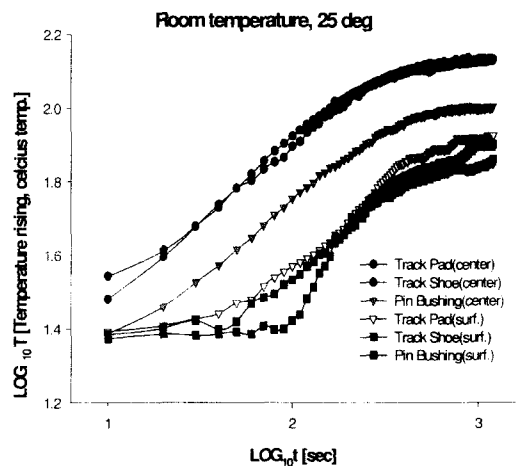


Fig. 5 Temp-Time curve(25℃)

Fig. 7은 Young's Modulus가 시간에 의존함을 잘 보여주고 있으며, Track Pad 부품이 Pin bushing 부품보다 시간함수에 대해 약 2.6배정도 큰 기울기를 나타내 총 시험시간 20분에서의 에너지를 유추할 수 있었다.

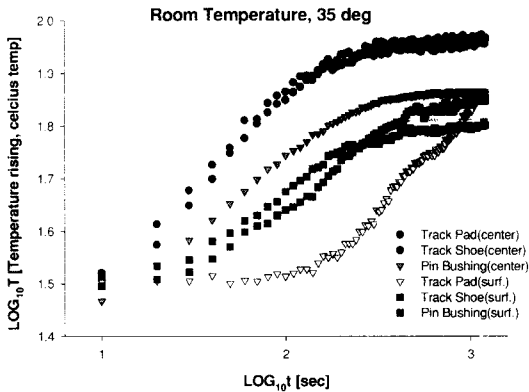


Fig. 6 Temp-Time curve(35°C)

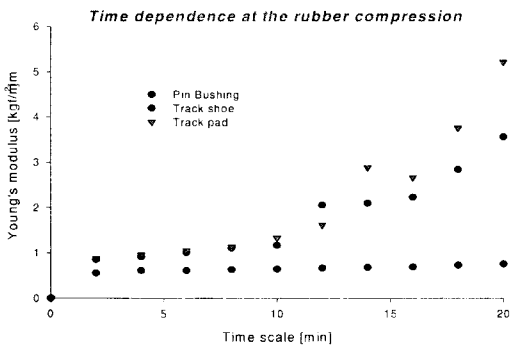


Fig. 7 Young's Modulus-time curve

3.2 시험결과해석을 통한 에너지 평형

분위온도 25°C하에서의 Heat Generation Energy는 열전도방정식에서 유도된 $Q = mc\Delta t$ 에서 계산된 발열량[joule]을 열의 일당량[kgf·m]으로 단위환산한 에너지값을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 경사면의 slope와 정상상태의 slope

와의 만나는 점을 교점으로 잡으면 약 480초 근방부터는 발열에너지가 진전되고 그외 나머지는 더 이상의 발열이 진전되지 않았다고 가정한다. 최소 에너지는 Pin bushing부품에서 1141.01[kgf·m] 값이고 최대에너지는 Track shoe부품에 84254.49[kgf·m]값으로 Pin bushing부품보다 약 2.1배정도 크게 나타났다.

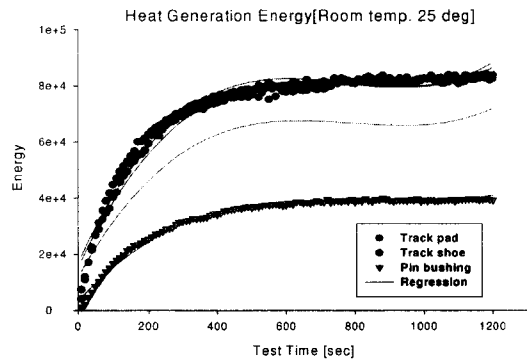


Fig. 8 Heat Generation Energy

3.3 시험 순서

단위고무시편내에서의 시간에 따른 내부발열에너지량이 어떤 시간에 대해 정상상태를 나타내고, 그 비율은 체적에 비례한다. 단, 최종 데이터값의 오차는 복사항을 무시한 대류항에서의 오차이다.

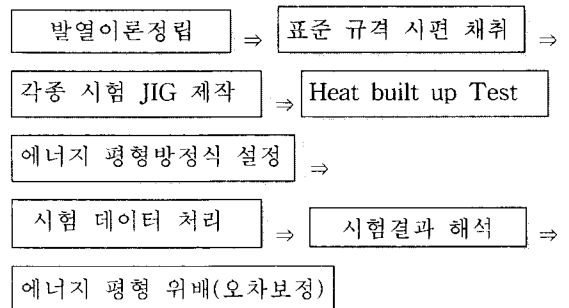


Fig. 9 Flow chart of Heat generation Mechanism

4. 열해석

4.1 경계조건 및 가정

내부에너지가 발생하는 경우의 열전도 방정식은

3차원 열전달장(Heat transfer field)내의 온도가 시간과 공간의 변수로서 식(1)과 같이 편미분 방정식으로 표현된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + w \dots (5)$$

이 열전도 방정식을 풀면 물체내의 시간변화에 따른 온도분포가 구해진다. 온도가 구해지면 Fourier법칙에서 열유속의 크기나 열의 흐름방향을 계산할 수 있다.

한편, 해석내 경계조건에서 퀘도 부품 전체 요소들의 종류를 같은 요소로 나누고 퀘도 조립체와 접촉하는 부위는 잘게 나누어 해석하였다. 여기서는 어떤 한 고부 bush의 최외각 node에 대해 열적 반응을 얻으려고 하였다. 그래서 경계조건을 pin bushing부분에 따른 node들에 대해 접촉표면 온도 T_s 를 80℃로 가정하였으며, 대기온도 T_∞ 를 25℃로 가정하여 값을 주었다. 그리고 모든 부품은 등방성 물질로 가정하여, 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 경계조건을 넣기전에 먼저 초기조건을 인식시켜 요소종류를 solid로 설정하여 해석하였고, 참고적으로 지면과 닿는 몸체의 밀고 부분의 열전도계수값을 포장도로라 가정하여 계수값을 1.12W/m²로 주었으며, 나머지 공기와 닿는 모든 경계조건에 대해서 열복사 계수값을 750W/m²로 주었다.

5. 열해석 결과

퀘도부품중의 편부싱부분과 퀘도 슈우부분이 마찰되는 측면은 온도를 같도록 주어 전체적인 퀘도부품의 온도분포를 알아보았다. 퀘도패드끝부분에서 퀘도슈우끝부분까지 대기온도 25℃와 같도록 하여 각 Time inc에 따라 선형적으로 온도가 증가함을 알 수 있었다. 최대온도는 108℃로 접촉표면(Pin 과 슈 몸체)부분에 발생하였으며 퀘도 슈우 끝단온도는 26℃로 나타났다. 단위시편에 대한 발열량이 체적에 비례한다면, 실험값보다 해석값이 약간 낮게 나왔으며, 오히려 편부싱부품의 온도가 조금 더 크게 나타났다. 이는 고부시편에서의 대기와 열대류에 의한 실험적 오차값이라 사료된다.

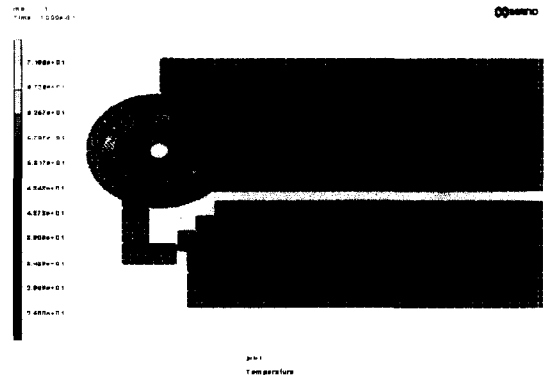


Fig 10 Temperature distribution at time step=1

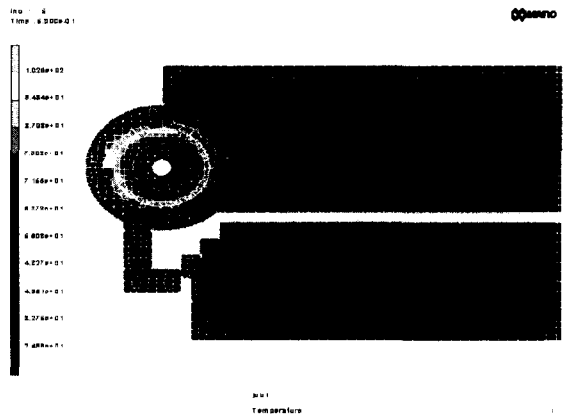


Fig. 11 Temperature distribution at time step=6

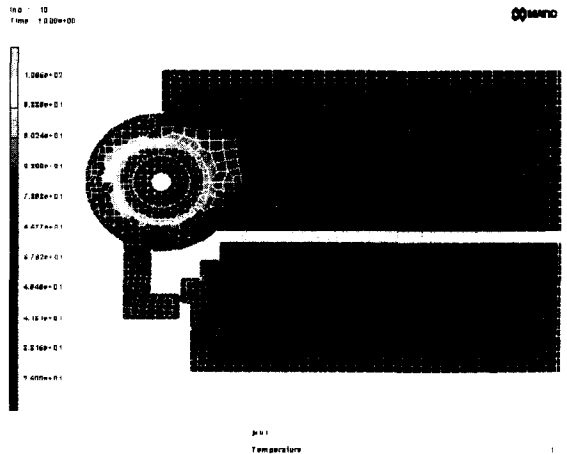


Fig. 12 Temperature distribution at time step = 10

6. 결 론

레도 부품의 각 물성값과 열해석이론식을 바탕으로 MARC를 이용한 레도부품의 열해석과 고무시편 실험결과를 다음과 같다.

레도전부품은 각 Time inc에 따라 선형적으로 온도가 증가함을 알 수 있었다. 단위시편에 대한 발열량이 채적에 비례한다면, 실험값보다 해석값이 약간 낮게 나왔으며, 오히려 권부성부품의 온도가 조금 더 크게 나타났다. 고무실험에 있어서 동일 조건하 레도고무부품은 분위기온도 35℃일 때보다 오히려 분위기온도 25℃일때의 온도가 약 1.5배정도 더 낮게 나타났다. 이것은 고무의 강성이 클 때 분자의 발열운동이 더 활발이 일어나 발열에너지상승에 따른 온도편차라고 사료된다. 다른 부품보다 레도 패드부품이 시간에 대해 빠른 반응을 보였고, 에너지발산이 시편고무분자 내외부에 cross-linking이 깨져 차후의 에너지 진전이 나타나지 않음을 유추할 수 있었다.

참고문헌

1. 신종계, 이용신, 조성욱 공역, "제2판 Logan의 유한요소법 첫걸음," Daryl L. Logan 원저, Σ 시그마프레스, pp. 471-517, 1997.
2. Suhas V. Patank 원 저, 이재현 통역, "열전달 및 유체유동 수치해법", 대한교과서주식회사, pp. 68-75, 1982.
3. John D. Ferry Professor of Chemistry University of Wisconsin, "VISCOELASTIC PROPERTIES OF POLYMERS," Third Edition, pp. 321-342, 1980.
4. 신수정, 이태수, 오수익, "고무패드 성형 공정의 유한요소 모델링," 한국정밀공학회지 제15권 제9호 1998.
5. 이병해 편지, "유한요소법의 기초," pp. 6-79 1983.
6. 임재규, 조규종, 김영석, 김영수 공역, "컴퓨터 원용 고체역학," Σ 시그마프레스, pp. 563-570, 1996.
7. L.H. Sperling, "INTRODUCTION TO PHYSICAL POLYMER SCIENCE", Lehigh University Bethlehem Pennsylvania, pp. 127-131, 1985.
8. 토픽별 세미나 Contact ver. K6 MARC KOREA

9. Necati Ozisik by John Wiley & Sons, "HEAT CONDUCTION", Second Edition, pp. 356-432, 1993.
10. 이태수, "고무의 기계적 특성과 시험법," 대한기계학회, Vol. 38, No. 12, pp. 59-64, 1998.
11. R.P. Campion, M.D. Ellul, R.H.Finney, A. N.Gent, G.R.Hamed, D.L.Hertz, Jr., F.O.James, G.J.Lake, T.S. Miller, K.W.Scott, P.M.Sheridan, J.G.Sommer, A.Stevenson, T.Sueyasu, A.G.Thomas, C.Wang, O.H.Yeoh, "Engineering with Rubber," Hanser, pp. 84, pp.328, 1996.
12. STEPHEN L. ROSEN Professor and Department of Chemical Engineering Engineering The University of Toledo, "FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF POLYMERIC MATERIALS," Ohio, pp. 324-328, 1981.