

전산 열해석 및 적외선 열화상을 이용한 볼베어링의 동적 하중에 따른 진단 계측에 관한 연구

On Diagnosis Measurement under Dynamic Loading of Ball Bearing using Numerical Thermal Analysis and Infrared Thermography

홍동표*, 김호종*, 김원태**†

Dong-Pyo Hong*, Ho-Jong Kim* and Won-Tae Kim**†

초 록 본 연구에서는 적외선 열화상 카메라를 통하여 베어링의 온도변화를 분석하고, FEM 수치해석을 통하여 모델러에 대한 정상상태에서의 시뮬레이션을 통해 베어링의 열적분포를 해석하였다. 전산 열해석을 위한 유한요소 해석과 열화상 실험을 서로 비교분석하였고 유한요소 전산해석을 통하여 열화상 실험의 정확도를 확인하였다. 본 연구를 통하여 적외선 열화상 실험은 실시간으로 베어링의 상태를 감시할 수 있어 다른 진단 방식보다 많은 장점을 가지고 있다. 또한 작업 현장에서 베어링 파손 상태 유무 확인과 파손 방지를 위해서 현장 작업조건을 적용한 유한요소 해석 결과를 비롯하여, 하중조건 회전속도조건, 볼 손상조건, 내외륜 손상 조건 등에 따라, 열화상 카메라로 실시간으로 베어링을 감시하면 베어링의 파손을 진단 검출할 수 있다.

주요용어: 유한요소법, 볼베어링, 전산 열해석, 적외선 열화상, 진단계측, 결합검출

Abstract With the modern machinery towards the direction of high-speed development, the thermal issues of mechanical transmission system and its components is increasingly important. Ball bearing is one of the main parts in rotating machinery system, and is a more easily damaged part. In this paper, bearing thermal fault detection is investigated in details Using infrared thermal imaging technology to the operation state of the ball bearing, a preliminary thermal analysis, and the use of numerical simulation technology by finite element method(FEM) under thermal conditions of the bearing temperature field analysis, initially identified through these two technical analysis, bearing a temperature distribution in the normal state and failure state. It also shows the reliability of the infrared thermal imaging technology. with valuable suggestions for the future bearing fault detection.

Keywords: Finite Element Analysis(FEM), Ball Bearing, Numerical Thermal Analysis, Infrared Thermography, Diagnosis Measurement, Fault Detection

1. 서 론

최근 기계시설물에서, 특히 고정체에 지지되어 있는 회전기기 진단분야에 상태감시 및 진단기술(condition monitoring diagnostics) 연구가 광범위하게 요구되고 있다. 또한, 회전체에서의 상태감시를 위한 비접촉 진단기술은 표준화 초기 단계에 있으며 이와 관련된 연구개발이 최근 들어 꾸준

히 수행하고 있다. 국제규격 경쟁력을 높이기 위해서 국내규격 및 진단기술 개발이 시급한 실정이며, 적외선 열화상 진단법을 이용한 회전체 상태감시의 고강검출에 대한 정량적 특성을 구축할 필요가 있다.

장시간 운전되는 기계의 파손부위 및 상태를 조기에 판정하고 대책을 수립함으로써 기계부품과 기계의 손상 빈도수를 줄이고, 수리시기를 생

[접수일: 2013. 7. 3, 수정일: 2013. 8. 17, 게재확정일: 2013. 8. 19] *전북대학교 기계시스템공학부, **공주대학교 기계자동차공학부, †Corresponding Author: School of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 335-761, Korea (E-mail: kwt@kongju.ac.kr)

산에 지장이 제일 적은 적절한 일시를 채택함으로써 기계류의 손상 또는 파괴로 인한 생산손실을 최대한 줄일 수 있다[1]. 산업체 현장에서 결함 검사시스템은 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 그 검사 방법에 있어 비접촉 검사방법 부분은 상당한 발전을 거듭하고 있다. 비접촉 검사 방법의 하나로서 적외선 열화상 카메라를 이용한 것이 있는데, 이 검사 방법은 사용이 빠르고 비교적 정확한 데이터를 사용자로 하여금 쉽게 검사를 할 수 있는 환경을 제공하고 있다. 기계시스템의 온도 분포와 열적 변화에 의한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 이상 온도 변화로 인한 결함을 판별하는데 많은 활용도를 보이고 있다 [2]. 본 연구는 적외선 열화상 기법을 이용해서 베어링의 정상 운전상태와 운전중 하중을 받는 상태를 검출하였고 유한요소법을 이용해서 베어링의 열적상태에 대하여 비교 분석 하였다.

2. 진단 계측기법

2.1. 베어링 열적결함 메커니즘

장시간 운전되는 기계의 부품들 특히, 베어링이나 치차 등에서 보편적으로 가장 많이 사용되는 것은 단일 깊은홈 볼베어링(single row deep groove ball bearing)으로 구조가 간단하고, 베어링의 대표적인 형식이다. 이 베어링은 회전방향으로 주어지는 보통의 경하중(Radial load)을 견딜 수 있으며, 베어링 전동체에 가해지는 하중은 축에 대해 직각방향으로 가해지게 된다. 베어링은 보통의 축하중과 합성하중에도 견딜 수 있으며, 마찰 토크가 적어 고속회전과 저소음, 저진동 구조에 적합하다. 일반적인 베어링 마찰계수는 식 (1)과 같다.

$$\mu = \frac{2M}{Pd} \quad (1)$$

여기서,

μ : 마찰계수

M : 마찰 모멘트 N·mm {kgf·mm}

P : 베어링 하중 N {kgf}

d : 베어링 내경 mm

베어링에 발생하는 열량과 방출되는 열량의 평형에 의해, 베어링의 온도는 결정된다. 이와 같은 온도는 주로 베어링의 회전에 따른 마찰에 의한 영향이 가장 크게 작용하는 것으로 예측되며 이에 대한 실험시편으로서 Fig. 1과 Table 1은 각각 본 연구에서 채택한 실험용 베어링의 외관 구조 및 관련 사양을 나타낸 것이다.

Table 1 Physical specifications of B6304

Specification	Dimension
inner diameter, d (mm)	20
outer diameter, D (mm)	52
B (mm)	15
Ball numbers	7
Ball diameter (mm)	9.5
Max. rotation speed (rpm)	10,000

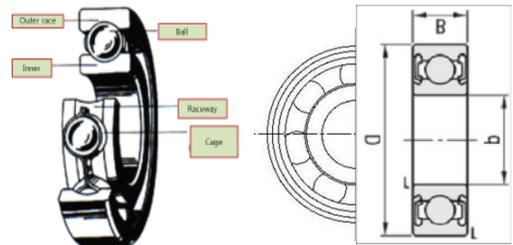


Fig. 1 Layout of the specimen of B6304 for measuring fault detection

시스템이 운용되거나 동작 중에 베어링 온도는 운전 초기에는 급격히 상승하지만, 정상 상태에 달하면 거의 일정해진다. 정상상태에 도달하기까지의 시간은 발생하는 열량과 축 및 하우징의 열용량, 열 방산과 윤활유량. 윤활방법에 따라 다르지만, 시간이 경과해도 정상상태에 달하지 않고 온도가 안정되지 않을 경우는 이상이 있는 것으로 진단된다.

한편, 베어링의 마찰손실은 대부분이 베어링 내부에서 열에너지로 바뀌어, 베어링의 온도 상승을 초래한다. 마찰 모멘트에 의해 발생하는 열량을 식(2)으로 나타냈다.

$$Q = 0.105 \times 10^{-6} M \cdot n \quad N \\ = 1.03 \times 10^{-6} M \cdot n \quad kgf \quad (2)$$

여기서 M 과 n 은 각각 질량 및 회전수이다.

2.2. 적외선 열화상 실험

적외선 열화상 중 수동식 적외선 열화상 기술은 온도의 차(ΔT)를 판단함으로써 대상체의 건전성을 평가하는 비파괴검사 방법이다. 적외선 방사 에너지는 Plank 식에 의거해 주파수에 따른 열에너지를 감지함으로써 목표물의 온도분포를 분석한다.

전기·전력설비의 상태감시에는 비교열화상법을 적용하며 정량적 혹은 정성적 비교를 위한 비교 열화상법과 정확한 온도 측정을 위한 비접촉 온도 측정법으로 구분하여 적용한다[3].

Fig. 2는 본 연구에서의 실험장치 구성도이다. 시편으로는 산업현장 및 일반기계에서 가장 널리 사용하는 단일 깊은 홈 볼 베어링 중 B6304를 선택하였고 Table 1은 관련 베어링 규격을 나타낸다. 적외선 열화상 기술을 이용한 볼 베어링의 결함 진단을 위하여 적외선 열화상 장비를 사용하였으며, 모델은 프랑스 Cedip사의 SC 5000 (640×480 해상도)이다. 시편의 표면은 방사율을 1에 가깝게 유지하기 위하여 흑색 방사 페인트(방사율: 0.95)로 도포하였다[4].

베어링의 온도변화 특성을 살펴보기 위하여 베어링에 하중조건을 1 ~ 3 kg 주어 실험을 하였다. 실험은 열화상 카메라와 노트북 장비를 연결하여 베어링의 구동 시, 실시간 온도 데이터 및 이미지 등을 전송받아 베어링의 고장진단을 수행하였다.

2.3. 전산수치해석 기법

CATIA 프로그램을 이용하여 볼베어링 B6304를 Fig. 3(a)와 같이 모델링 하였다. 이것을 ANSYS Workbench에 Fig. 3(b)와 같이 interface gate를 통해 도입하였다. 유한요소 해석을 위한 전용 프로그램인 ANSYS Workbench는 복잡한 유한요소 해석 작업을 자동화하여 쉽고 빠르게 활용할 수 있도록 개발한 환경이다. 이를 이용하여 베어링의 운전안정온도 상태를 해석하였다. 이로부터 Fig. 4에 대한 수치해석을 수행하였다.

이 경우에 고려해야 할 대표적인 경계조건으로 내·부 압력, 온도에 의한 열하중, 노즐하중 등, 다른 기기에 의한 하중이 있으며 상기 식(2)로부터 계산된 마찰동력손실은 Table 2와 같이 실험

에서의 입력하중에 따라 대입하였다[5].

적용된 모델러의 사양은 B6304 베어링 강체로서 재질은 SUJ2으로 설정하였고 열전도율은 45.6 w/m·K 이다. 주변의 온도는 실온 상태로 21 °C로 설정되었다. 베어링의 열적 해석방법은 ANSYS Workbench 모델러로부터 생성된 Fig. 4의 모델(Node수: 109,270 및 Elements수: 47,902)에 대하여 정상상태 하에서 열적 해석이론을 이용하여 분석하였다[6].

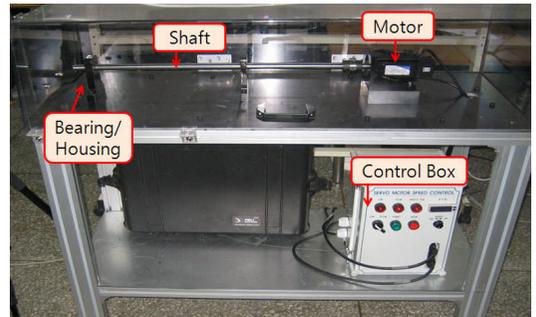
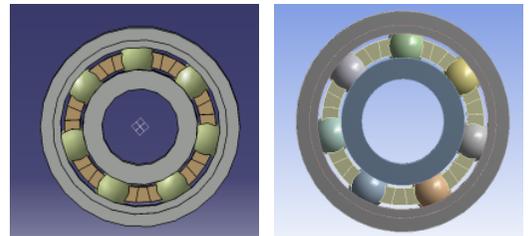


Fig. 2 Experimental configuration of ball bearing monitoring for infrared yhermography



(a) CATIA modeler (b) Workbench modeler of ANSYS

Fig. 3 Design modeler of ball bearing for numerical simulation

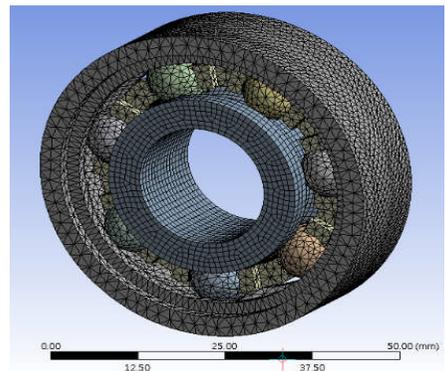


Fig. 4 Mesh modeler of B6304 in numerical analysis

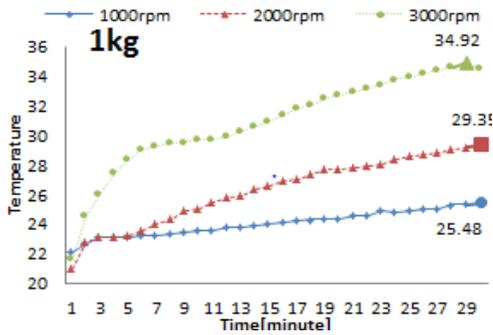
Table 2 Heat flow conditions of bearing

rpm \ Load	1,000	2,000	3,000
Normal	0.0315	0.063	0.0945
1 kg	0.04725	0.0945	0.14175
3 kg	0.077805	0.15435	0.231525
5 kg	0.108675	0.21735	0.326025

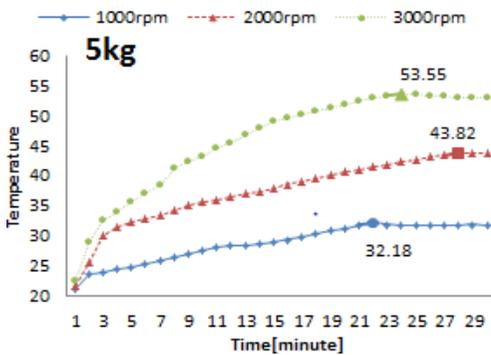
3. 결과 및 고찰

3.1. 적외선 열화상 결함 계측

적외선 열화상 카메라를 이용하여 베어링에 1,000 rpm, 2,000 rpm, 3,000 rpm의 회전속도로 정상상태와 동적하중 있는 상태로 실험을 실시하였다. Fig. 5는 베어링의 정상상태와 하중조건 상태의 적외선 열화상 실험에 의한 베어링의 온도 분포이다. 그림으로부터 하중조건이 증가함에 따



(a) Temperature distribution at normal condition with 1 kg loading disc

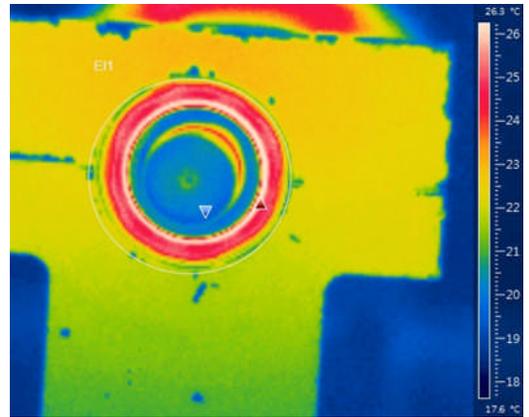


(b) Temperature distribution at normal condition with 5 kg loading disc

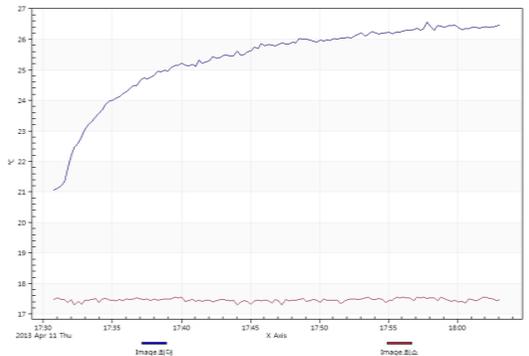
Fig. 5 Temperature distributions of ball bearing from thermographic experiment

라 온도의 상승이 더욱 증가함을 알 수 있다. 내륜에 마찰저항이 증가하고 있기 때문에 볼과 내륜에 접촉 면적이 증가하여 마찰력이 증가하고 온도도 높아진다.

또한 Fig. 6의 (a)-(b)에서 보이는 것처럼, 실험 시작 3분 후 온도의 기울기는 3,000 rpm, 2,000 rpm, 1,000 rpm 순으로 높았다. 이는 회전속도가 베어링 온도에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 하중조건이 5배됨에 따라 3,000 rpm에 있을 때 정상상태에서 마찰에 의한 온도상태는 34.92 °C에서 53.55 °C로 매우 상승함을 알 수 있다. Fig. 6(a)와 (b)는 정상상태의 2,000 rpm에서 각각 열화상 및 실시간 측정온도를 나타낸 영상과 그래프로 베어링의 마찰등가로 내외륜간에서 온도가 매우 높아짐을 정성 및 정량적으로 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) Thermal imaging at normal condition of 2,000 rpm



(b) Temperature distribution at normal condition of 2,000 rpm

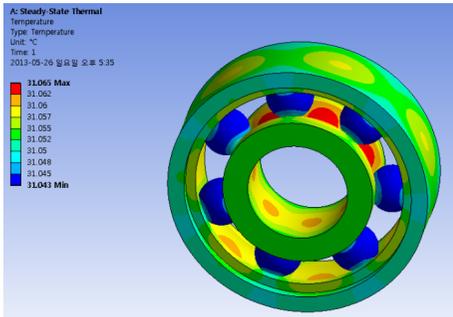
Fig. 6 Thermal distribution of ball bearing monitored from thermographic experiment

3.2. 전산수치 열해석

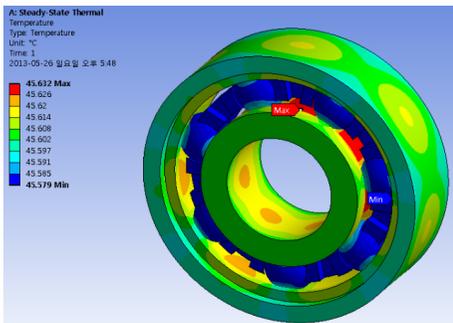
ANSYS 시뮬레이션을 위해 생성된 mesh generation 모델러인 Fig. 3으로부터 열해석을 수행하여 정상상태 및 하중조건에 대해 분석하였다.

Fig. 4의 설정된 전산수치해석 모델로부터 경계조건 및 생성된 모델의 대류열유동을 고려한 열적해석을 통해 정상상태 회전 중의 베어링에 대한 열적해석 수행 결과가 Fig. 7의 (a), (b)에서 처럼 각각 하중조건을 적외선 열화상 실험에서의 조건과 동일하게 1~5 kg을 입력하여 분석하였다.

Fig. 7(b)에서 나타난 열적분포로부터 그림에서 보는 바와 같이 베어링의 회전 중 베어링 내부의 최고 온도는 볼과 내륜의 접촉면에서 주로 나타났고, 다음으로 높은 온도는 볼과 외륜 접촉에서 나타났다. 그리고 열대류계수가 변화하지 않는 일직선으로 유지한다고 가정한 상황 하에서 베어링의 회전 속도와 하중이 베어링의 온도에 영향을 주는 것으로 사료되어진다.



(a) Thermal distribution at normal condition with 1 kg loading disc

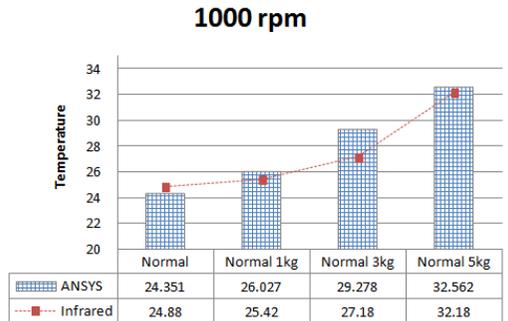


(b) Thermal distribution at normal condition with 5 kg loading disc

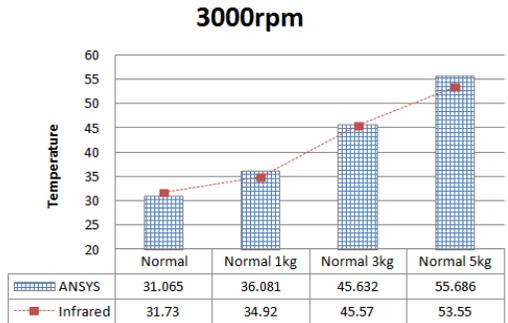
Fig. 7 Thermal profiles of ball bearing with 3,000 rpm from numerical simulation

3.3. 실험 및 전산수치해석 비교

Fig. 8은 베어링의 회전속도를 1,000~3,000 rpm에서 정상상태 조건으로 적외선 열화상 시험 및 전산 수치해석에 의해 얻어진 베어링의 최고온도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림으로부터 정상상태 베어링의 적외선 열화상 장비로 관찰한 결과와 수치해석적으로 유한요소 해석 결과를 통해 나타난 온도는 하중조건이 증가함에 따라 약간의 차이가 발생은 하나 거의 유사한 경향으로 나타났다. 특히 실제 실험의 조건을 적용하여 유한요소 해석한 결과와 적외선 열화상 기술을 이용한 실험결과를 비교 분석한 Fig. 8의 (a)와 (b)의 서로 다른 회전조건에서의 결과가 서로 유사함을 알 수 있었다. 이로부터, 적외선 열화상 실험 결과에 비해 유한요소 해석결과가 전반적으로 1 °C 이하의 차이를 나타내는 결과를 토대로 유한요소 해석결과가 신뢰성이 있게 수행되었음을 알 수 있다.



(a) Max. temperature at steady st 1,000 rpm



(b) Max. temperature at steady st 3,000 rpm

Fig. 8 Comparisons between experiments and numerical works; Max. temperatures of ball bearing for different loading disc conditions of each rpm

4. 결 론

본 연구에서는 볼베어링의 이상상태 진단감시에 있어서 적외선 열화상에 의한 비교온도차 진단법과 유한요소법을 이용한 전산수치해석을 수행하였다. 유한요소 결과와 열화상 결과의 비교 분석으로부터 열화상 실험은 정성적으로 온도분포 변화 상태를 가지적으로 보여줄 수 있을 뿐 아니라 정량적으로 베어링의 온도에 따른 결함진단에 대한 상태변화를 보여주고 있다. 또한, 이에 대한 열적해석을 수치해석 모델을 생성하여 온도값을 분석한 결과, 적외선 열화상 실험 결과에 비해 유한요소 해석결과가 전반적으로 1 °C 이하의 차이를 나타내는 결과를 토대로 유한요소 해석결과가 결함진단에 대한 연구로서 매우 신뢰성 있게 얻어짐을 알 수 있었다.

후 기

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2011-0015969) and by the Human Resources Development program(No. 20134030200230) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy.

참고문헌

- [1] C. Meola, G. M. Carlomagno and L. Giorleo, "The use of infrared thermography for numerical characterization," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155, pp. 155-166 (2004)
- [2] W. T. Kim, M. Y. Choi, *Infrared Thermography Testing*, Node Media, Seoul, Korea, pp. 167-185 (2012)
- [3] J. J. Seo, N. R. Choi, W. T. Kim and D. P. Hong, "Infrared thermography quantitative diagnosis in vibration mode of rotational mechanics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 3, pp. 291-295 (2012)
- [4] J. J. Seo, H. Yun, D. Kim, D. P. Hong and W. T. Kim, "Infrared thermographic diagnosis mechanism for fault detection of the ball bearing under dynamic loading conditions," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 2, pp. 134-138 (2011)
- [5] F. P. Incroperal and D. P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," John Wiley & Sons, 8th Ed., NY, U.S.A., pp. 87-140 (2011)
- [6] ANSYS Tutorial, Ver R13, Ed. 1, Anflux Corp. Publishing, Seoul, pp. 35-187 (2012)