

미세 이물질이 혼입된 볼베어링의 고장 진단을 위한 정량화 열화상에 관한 비파괴평가 연구

Quantitative NDE Thermography for Fault Diagnosis of Ball Bearings with Micro-Foreign Substances

홍동표*, 김원태**†

Dongpyo Hong* and Wontae Kim**†

초 록 본 고에서는 미세 이물질이 삽입된 볼베어링에 대하여 비파괴평가를 제안하였다. 비파괴평가 연구로서 동적인 하중조건하 회전체의 동작에 따른 고장 진단을 위해 비접촉식 정량화된 적외선 열화상 기법을 적용하였다. 이로부터 볼베어링에 대한 적정 체결조건을 설정하였고 고장 상태감시에 대한 수동형 열화상시험을 수행하였다. 본 연구로부터, 적외선 열화상 시험은 조기의 결함 진단을 평가하기 위해 정상 및 이물질이 삽입된 시편들로부터의 온도 프로파일링을 비교, 분석되었다. 연구의 비파괴검사 평가의 결과로써, 고장에 이르는 이상단계에 따른 볼베어링의 온도 특성이 정량적으로 분석되었다.

주요용어: 비파괴평가, 열화상, 고장 진단, 볼베어링, 토크, 미세 이물질

Abstract In this study, a non-destructive evaluation (NDE) method is proposed for ball bearings contaminated with micro foreign substances, which were inserted into a ball bearing to create a defective specimen. The non-contact quantitative infrared thermographic technique was applied for NDE condition monitoring. Passive thermographic experiments were conducted to perform early fault diagnosis, for bearings operated at optimized torque status under a dynamic load condition. The temperature profiles for normal and defective specimens were quantitatively compared, and the thermographic data analyzed. Based on the NDE results, the temperature characteristics and abnormal fault detection of the ball bearing were quantitatively analyzed according to the rise in temperature.

Keywords: Nondestructive Evaluation(NDE), Thermography, Fault Diagnosis, Ball Bearing, Torque, Micro-Foreign Substances

1. 서 론

최근 산업체 현장에서 결함 검사 시스템은 매우 중요한 부분을 차지하고 있다[1]. 자동화된 생산라인에서 한 대의 기계에 이상이 발생하면, 시스템 전체에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 주기적인 결함 진단을 통해 기계의 파손 부위 및 상태를 조기에 판정하고 대책을 수립해야 한다[2,3]. 이상 진단에 있어 과거와 같이 기계를 정지시킨 상태에서 분해, 검사하는 방법은 운영시간

의 단축과 그에 따른 손실이 따라온다[4]. 하지만 적외선 열화상 기법은 적외선 영상장치를 이용하여 물체 표면의 열화상을 촬영하고 온도분포나 그 변동 상황을 해석하여 물체의 내부 상태를 추정한다[5,6]. 또한 결함 부위의 구체적 진단이 가능하다. 기계 시스템의 온도 분포와 열적 변화에 대한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 이상 온도변화에 따른 상태감시로부터 조기에 고장을 감지하는데 많은 활용도를 보이며 의학·우주·공학 및 제조 분야에서 광범위하게 활용되고 있다[7]. 일반

[접수일: 2014. 6. 30, 수정일: 2014. 7. 23, 게재확정일: 2014. 7. 29] *전북대학교 기계시스템공학부, **공주대학교 기계자동차공학부 †Corresponding Author: Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chungnam 331-717, Korea (E-mail: kwt@kongju.ac.kr)

적으로 볼베어링에는 이물질 차단 플라스틱 케이스가 설치되어 있어 볼베어링 윤활유에 이물질 혼입이 어려우나 극심한 작업환경시 이에 의한 고장 및 과손에 따른 설비 영향은 매우 심각하나 이에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다[8]. 본 연구로부터 이물질 온입을 고려하여 이물질이 삽입된 모의 볼베어링에 따른 고장결함을 고려하였다. 즉 기존의 산업체 현장 문제 중 베어링 이물질의 원인이 본 연구에서는 이물질 차단 플라스틱 케이스를 벗겨내어 미세물질이 삽입된 볼베어링의 조기 결함 진단을 위해 적외선 열화상 장치를 이용하여 정상동작에 대하여 비정상 동작 시의 온도 프로파일러(Profiler) 비교로부터 고장진단을 정량적으로 모니터링하는 연구를 수행되었다.

2. 적외선 실험장치 및 시편 구성

2.1. 적외선 실험장치

Fig. 1은 실험을 수행한 장치 구성의 개략도를 보여주며, 동력부와 측정 대상체인 베어링(B6004) 사이에 단순 지지를 위해서 베어링 하우징을 설치하였다. 동력부는 800 W, 1 HP인 APM-SC08ADK 서보모터를 사용하여 각각 1000, 2000, 3000 rpm에서 실험하였다. 실험에 사용된 적외선 카메라는 스웨덴 FLIR사의 SC655 25D (해상도 640 × 480 픽셀, NETD 50 mK)이다.

Fig. 2(a)와 (b)는 각각 베어링 고장 결함을 위해 플라스틱 케이스를 제거한 상태에서의 베어링 및 이 베어링에 동적 동작시 하중조건을 주기 위해 장착되는 원형추 이다.

2.2. 시편 구성

시험편으로 사용한 베어링(bearing)은 단열 깊은 홈 볼베어링에서 가장 널리 사용하는 B6X04 계열을 선택하였고, 그 중에서 이물질 삽입 등에 민감한 작은 크기의 B6004를 사용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 실험에 사용한 베어링의 규격이다.

고정된 회전체로서 동작상태의 베어링 하중을 받는 조건하에서 일정한 회전수(rpm)를 갖고 정상상태에서 디스크 하중의 체결의 적정성을 확인하기 위하여 베어링에 디스크를 체결함에 따른

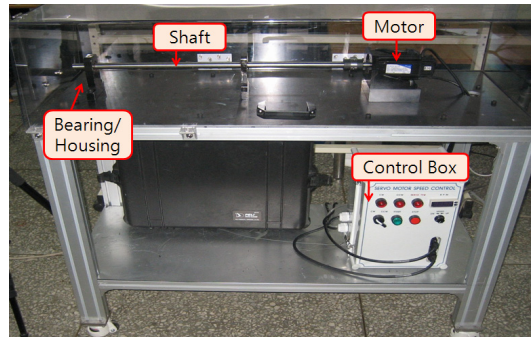


Fig. 1 Set-up for laboratory apparatus



(a) B6004

(b) Weight disc

Fig. 2 Photos of bearing and disc for experiment

Table 1 Standards of B6004 [unit: mm]

Bearing Name	Outer Dia.(D)	Inner Dia.(d)	Ball Dia.	Ball Number
B6004	42	20	5.05	8

디스크를 체결한 하중값은 토크(torque)를 토크렌치(TOHNICHI 450DB3-S, ±3%오차)로 측정하여 최적값을 구하도록 하였다.

Fig. 3은 각 실험 단계에 따른 사용된 측정도구 및 베어링내에 삽입되는 미세 이물질의 형상이다. 이물질 차단 플라스틱 케이스를 벗겨내어 미세물질을 베어링 내에 삽입하였다. Fig. 3(a)는 미세 이물질의 삽입량을 측정하는데 측정가능 범위 0.01 g ~ 200 g에 적용된 전자저울(모델 MH-200, 정확도 ± 1%)로서 이로부터 베어링 내에 삽입되는 이물질의 량을 적정하게 계량하여 삽입하도록 하였다.

Table 2는 실험에 사용한 결함 베어링에 적용된 미세입자의 종류 및 크기이다. 본 실험에서 결함시편의 조건은 작업장에서 주로 삽입되는 것으로 알려진 모래성분의 입자로 고려되었다.



(a) Electronic weighter



(b) Several micro particles

Fig. 3 Extra devices and foreign substances

Table 2 Physical specifications of foreign micro substances

Item	Type or Size		
Material	Silicon powder		
Mesh dimension (μm)	40	60	80
Weight for defects (g)	0.1	0.2	0.3

이로부터 베어링 내에 삽입되는 미세 이물질로서 선정된 메시 크기를 측정하여 40 μm , 60 μm , 80 μm 의 대하여 세 단계로 나누어 삽입량을 설정하여 각각에 대해 0.1 g ~ 0.3 g으로 이물질량을 조절하면서 실험을 수행하였다. 이로부터 하중조건하의 베어링 마모 단계에 따른 온도 특성에 대한 실험을 수행했다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 온도 상승에 따른 초기 상태 감시를 고려하기 위해 적외선 열화상 실험으로부터 베어링의 온도 프로파일에 대한 정량적인 값을 평가하는데 주목을 하였다.

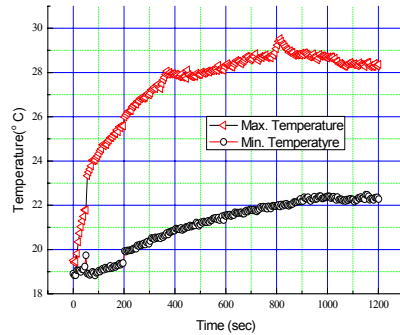


Fig. 4 Minimum and maximum temperature profiles in normal conditions at 3 kg loading

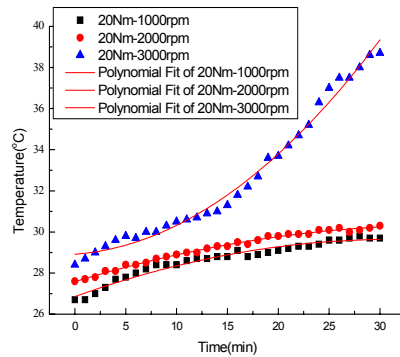


Fig. 5 Temperatures distributions according to each different torque for normal bearing

Fig. 4는 2,000 rpm이고 3 kg의 디스크 하중에서의 베어링내 및 외륜의 온도 분포를 나타낸다. 그림에서 보이는 것처럼 베어링의 최저온도는 완만하게 상승하고 있으나 최고온도는 초기부터 급격하게 상승함을 알 수 있다. 이러한 초기에서부터의 상승은 정상적인 베어링의 동작시 볼의 마찰에 따른 것으로 정상적인 동작임을 보여준다. 최소 및 최고온도 모두에서 정상상태의 베어링에서는 1,000초(약 17분) 이후 온도가 일정함을 알 수 있다.

적용된 볼베어링을 본 실험으로부터 적절하게 고정하였을 때 체결값은 20 N·m이었으나 동적 동작중인 베어링에 따른 적정 토크인지 베어링 rpm에 따라 검토하기 위하여 본 고에서는 적정한 디스크 체결하중(토크)을 살펴보도록 하였다. 특히 베어링이 2,000 rpm으로 회전시에 베어링을

체결하는 토크에 대한 적절한 값을 찾기 위한 실험으로서 Fig. 5는 베어링의 회전에 따른 베어링의 온도 상승을 적외선 정량화된 값을 통해 비교한 그림이다. 이로부터 회전수가 1,000 rpm에서 2,000 rpm까지는 온도 상승이 비교적 완만하게 상승하고 있으나 3,000 rpm에서는 일정시간이 경과한 후 온도가 급격히 상승함을 볼 수 있다. 베어링에 가해지는 하중의 체결상태는 2,000 rpm까지는 일정하나 이후 베어링 회전수가 증가한 3,000 rpm에서는 체결하는 토크에 영향을 받을 수 있다. 한편, 베어링의 여러 부분 중 본 실험에서는 발열이 가장 많이 일어나는 베어링의 볼과 내, 외륜의 접합부에 대한 데이터를 산출하였다[9]. 측정 온도가 일정시간 상승하여 온도의 평형이 이루어질 때 최고온도를 기록하였다. 이로부터 체결 토크와 베어링 회전과는 일정한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

즉 베어링내에 이물질이 삽입된 상태에서 동적인 장작시 적외선 열화상에서 수행되어진 실험으로부터, 기준에 비교되어온 회전체 고장 결함을 최적으로 토크를 측정된 데이터를 기준으로 적정하게 베어링 하중이 체결되어야함을 확인하였다. 특히 2,000 rpm까지는 20 Nm 토크가 적정함을 확인하였고 이에 따라 다음과 같이 실험을 설정하였다. 즉 향후의 모든 실험은 적외선 열화상 카메라를 이용하여 30분 주기로 초당 20 frame을 측정하였으며, 시작후 3초 이내에 2,000 rpm에 도달할 수 있도록 설정하여 그에 따른 온도 특성의 변화를 실시간으로 관찰하였다. 베어링 회전수 2,000 rpm이고 20 Nm 토크에서 이물질이 삽입된 결함 베어링에 대한 적외선 열화상 실험으로 측정된 데이터의 정확성을 점검하였다.

동적 하중조건하에서 베어링 이물질 삽입에 의한 결함 베어링은 Fig. 6, 7에서 보이는 것처럼 메시 크기를 달리하여 이물질의 양을 달리하면서 측정하였다. Fig. 6에서는 15 ~ 20초의 일정한 시간이 경과한 후 온도가 급격히 상승하였다. 그러나, 이물질의 메시 크기가 60 μm 로서 보다 큰 Fig. 7에서 보이는 것처럼 Fig. 6의 40 μm 에 비해 초기부터 온도 상승이 크게 발생하며 최대온도 역시 Fig. 6의 결과와 비교해 3 ~ 5 $^{\circ}\text{C}$ 온도차가 더 컸다. 이러한 온도 상승은 삽입된 이물질에 따라 마찰열이 증가함에 따라 발생하는 것으로

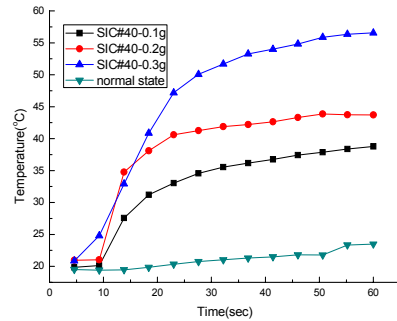


Fig. 6 Temperature distributions for different foreign substance amounts with 40 μm mesh

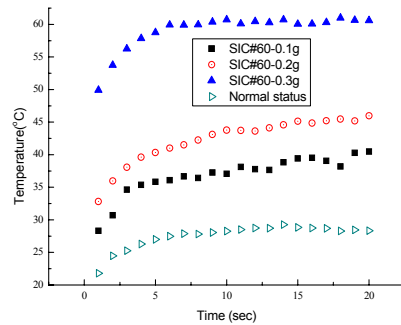


Fig. 7 Temperature distributions for different foreign substance amounts with 60 μm mesh

사료된다. 실험의 결과는 Fig. 6과 같다.

이와 같은 현상은 이물질의 양이 크고 크기가 증가함에 따라 마모조건이 심하고, rpm이 높아질수록 베어링에 마찰력이 증가하고 이로부터 높은 발열이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 베어링에 결함이 있을 경우 하중조건의 제한 없이 온도 상승 패턴을 통해 결함의 유무를 판단할 수 있다.

Fig. 8에서 3 kg의 하중을 걸고 고정된 2,000 rpm에서 이물질 양을 0.3 g으로 유지하였을 때 베어링내 삽입되는 이물질의 각 메시 크기에 따른 베어링의 온도 분포를 나타낸 것이다. 이 경우의 그래프를 보면 특히 메시의 크기가 클수록 온도가 상승하고 그 온도 상승(rising temperature)하는 폭은 메시의 크기 증가에 비례하여 급격하게 온도가 변하여 이물질의 크기가 발열에 큰 영향을 미치는 것으로 보였다. 또한 결함 진단에 대

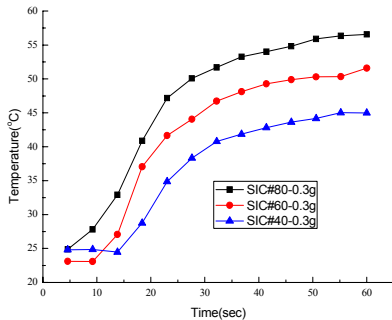


Fig. 8 Temperature distributions for different mesh sizes at 0.3 g silicon amounts

한 비교로, 내부 이물질의 크기가 더 크고 더 많은 프레임이 아닌 열화상 카메라에서의 낮은 해상도에서도 결함 검출이 가능함을 알 수 있다.

일반적인 주파수 측정으로부터는 동적 하중조건하에서 정상상태 베어링의 값에 비해 결함 베어링의 특징 주파수 변화가 미세하여 베어링의 상태 판단이 쉽지 않다[10]. 반면에, 적외선 열화상 기법을 통해 동적 하중조건하 베어링의 마모 조건에 따른 이상 진단이 가능했다. 또한 베어링 내에 이물질이 삽입되었을 시에는 정량적으로 온도 상승을 추적하여 고장 결함을 조기에 탐지하는데 적외선 비파괴평가 방법이 적절함을 분석하였다. 이와 같이 신뢰성을 높이고, 기존의 진단법에서 진단하기 어려운 부분까지 적외선 열화상 기법을 통해 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서 베어링의 하중을 토크 체결 분석을 통해 베어링의 동적 하중상태에 따른 적정 토크를 일정 회전수(rpm)에 따라 분석하여 설정하였고 이에 따른 베어링내 미세한 이물질인 실리콘 분말을 삽입함으로써 베어링의 결함 검출을 위한 조기 열적평가와 이상 진단이 가능하였다.

결론적으로, 적외선 열화상 기법을 이용한 결함진단법은 비접촉, 비파괴진단 방법으로써 향후 동적 하중을 받는 고속 회전체에서의 기계류 고장 메커니즘 평가를 포함한 동적 상태감시(dynamic condition monitoring), 기계류의 동작 상태에서의 이상 진단(abnormal diagnosis)을 실시간으로 모니터링하는 분야에 적용하는데 적절할 것

으로 사료된다.

후 기

"이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0023353)."

참고문헌

- [1] J. Kim and D. Yang, "Thermo-analysis of machining center main-axis thermo-displacement for infrared rays thermo-image camera," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference*, pp. 125-130 (2001)
- [2] R. A. Collacott, "Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring," Chapman and Hall, London (1977)
- [3] A. E. Elsayed, "Knowledge based systems for machinery fault diagnosis," 6th IMAC, pp. 123-128 (1988)
- [4] J. Woon, S. Kim, J. Yoo and J. Lee, "A study on the automatic diagnosis system of ball bearings for rotating machinery," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 8, pp. 1787-1798 (1995)
- [5] D. Kim, H. Yun, S. Yang, W. Kim and D. Hong, "Fault diagnosis of ball bearing within rotational machines using the infrared thermography method," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 6, pp. 570-575 (2010)
- [6] J. Seo, H. Yun, D. Kim, D. Hong and W. 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)
- [7] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer." 7th Ed., John Wiley & Sons, pp. 46-67 (2008)
- [8] D. Yoon, O. Kwon and I. Jeong, "Monitoring of lubrication conditions in journal bearing

- by acoustic emission," *Proceedings of the Korean Society for Nondestructive Testing Fall Conference*, Nov. 25, pp. 91-98 (1993)
- [9] W. Kim, J. Seo and D. Hong, "Infrared thermographic inspection of ball bearing; condition monitoring for defects under dynamic loading stages," 18th WCNDT, Durban, South Africa (2012)
- [10] H. Kim, D. Hong and W. Kim, "A study on real-time fault monitoring detection method of bearing using the infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, Vol. 33, No. 4, pp. 111-117 (2013)