

적외선 열화상을 이용한 베어링의 실시간 고장 모니터링 검출기법에 관한 연구

A Study on Real-Time Fault Monitoring Detection Method of Bearing Using the Infrared Thermography

김호중*, 홍동표*, 김원태**†

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

초 록 결함을 조기에 발견하기 위한 실시간 모니터링 시스템은 적외선 열화상 기술을 중점으로 구성된다. 본 연구의 중점은 비파괴 적외선 열화상 기법을 사용하여 볼베어링의 손상 검출 및 온도 특성 분석이다. 본 논문에서는 신뢰성 평가를 위한 적외선 실험 데이터와 기존의 주파수 데이터를 비교했다. 실험을 통해 베어링의 온도 특성에 따라 다양한 손상 상황을 분석했다. 본 논문의 실험의 결과로부터 적외선 열화상 기법은 실시간으로 동작 상태에 하중을 받는 볼베어링의 손상 탐지를 위한 매우 유용한 기법임이 확인되었다.

주요용어: 실시간 모니터링, 적외선 열화상 기술, 볼 베어링, 손상 검출, 온도 특성 분석

Abstract Since real-time monitoring system like a fault early detection has been very important, infrared thermography technique as a new diagnosis method was proposed. This study is focused on the damage detection and temperature characteristic analysis of ball bearing using the non-destructive infrared thermography method. In this paper, for the reliability assessment, infrared experimental data were compared with the frequency data of the existing. As results, the temperature characteristics of ball bearing were analyzed under various loading conditions. Finally it was confirmed that the infrared technique was useful for real-time detection of the bearing damages.

Keywords: Real-Time Monitoring, Infrared Thermography, Ball Bearing, Damage Detection, Temperature Characteristic Analysis

1. 서 론

산업설비에서 회전기계의 관리 및 진단에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한, 미소손상이 설비의 대형 사고를 유발할 수 있다. 자동화된 생산라인에서 한 대의 기계에 이상이 발생하면, 시스템 전체에 막대한 영향과 손실을 초래하게 된다. 따라서 실시간 감시 및 조기 진단을 통해 기계의 손상 부위는 적기에 교체되어야 한다[1]. 특히 대형 발전설비에서 회전체 부분은 대형 사고의 잠재적 요소를 가지고 있는 대표적인 조기감지 대

상이다. 그러므로 회전체 부분에서 가장 중요한 베어링의 상태감시와 손상 조기검출에 관한 연구가 필요하다[2,3]. 손상 검출에 있어서 과거와 같이 기계를 정지시킨 후 분해, 검사하는 방법은 운영시간의 단축과 그에 따른 경제적 손실을 초래한다[4]. 이러한 단점을 보완할 수 있는 기술로 적외선 열화상 기술이 제안된다. 적외선 열화상 기법은 적외선 영상장치를 이용하여 물체 표면의 열화상을 촬영하고, 온도분포를 분석하여 물체의 내부 상태를 추정한다. 기계 시스템의 온도분포와 열적 변화에 대한 데이터를 얻을 수 있기 때

[접수일: 2013. 6. 14, 수정일: 2013. 7. 25, 게재확정일: 2013. 7. 30] *전북대학교 기계시스템공학부, **공주대학교 기계자동차공학부, †Corresponding Author: School of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 335-761, Korea (E-mail: kwt@kongju.ac.kr)

문에 이상 온도변화로 인한 결함을 판별하는데 많은 활용도를 보이고 있다[5,6].

본 연구에서는 적외선 열화상 카메라를 통하여 베어링의 고장 여부를 진단하고, 각종 결함 형태에 따른 열화상 데이터베이스를 구축하였다.

2. 실험장치 구성 및 시편 조건

2.1. 실험장치 구성

회전체의 구현을 위하여 다음 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 축 중간의 하우징에는 단순 지지를 위해 베어링 B6804를 장착하였고, 동력부는 800W에 1 HP인 APM-SC08ADK 서보모터를 사용하였다. 적외선 열화상 기술을 이용한 볼 베어링의 고장 진단을 위하여 적외선 열화상 장비를 사용하였으며, 실험에 사용된 열화상 카메라의 모델은 FLIR(프랑스 Cedip사)의 SC 5000이다. 열화상 카메라와 노트북 장비를 연결하여 베어링의 구동 시, 실시간 온도 데이터 및 이미지 등을 전송받아 베어링의 고장 진단에 대한 연구를 진행하였다. 또한 적외선 열화상 기법과 더불어 열화상 데이터의 신뢰도 확보 및 결함값의 비교, 분석을 위하여 기존 접촉식 진단법

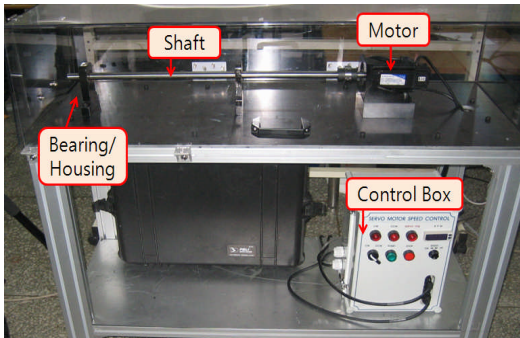


Fig. 1 Experimental configuration

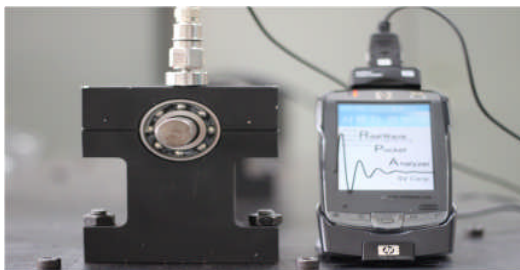


Fig. 2 The frequency diagnostic test

중 하나인 진동 주파수 진단법을 통한 실험을 수행하였다. 베어링의 진동 측정을 위해 하우징에 가속도계를 부착하고, 에스브이사의 진동 주파수 측정 장비인 real wave pocket analyzer를 이용하여 데이터를 확보하였다. 진동 주파수 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다.

2.2. 실험시편 조건

실험 시편으로는 산업현장 및 일반기계에서 가장 널리 사용하는 단일 깊은 홈 볼 베어링 중 B6204와 B6304를 선택하였다. Fig. 3 및 Table 1은 실험에 사용된 베어링 모습 및 규격을 나타낸다.

베어링의 다양한 손상 조건 하에서 온도 특성을 살펴보고, 표준화를 위한 기초 데이터를 확립하기 위하여 정상, 윤활유 손실, 볼 손상, 외륜 손상, 동적 하중, 하중 하 외륜 손상 조건에 따른 실험을 진행하였다. 진동 주파수 진단법을 이용한 실험도 동일한 조건으로 수행하였다. 윤활유 손실을 가정하기 위해 베어링을 분해하고 베어링 내의 그리스(grease)를 제거하였다. 볼 손상을 가정하기 위해 3 mm 직경의 코발트 드릴을 이용하여 볼에 손상을 가했다. 외륜 손상을 가정하기 위해 베어링의 외륜을 0.99 μm 와 1.03 μm 의 거칠기로 마모시켰다. 외륜의 거칠기 값은 Mitutoyo사의 SJ-301 표면 조도 측정기를 통해 측정하였다. 그리고 동적 하중을 가정하기 위해 5 kg의



Fig. 3 Specimen bearings

Table 1 Specification of ball bearings [unit: mm]

Bearing name	B6204	B6304
Outer diameter	47	52
Inner diameter	20	20
Ball diameter	7.9	9.5
Ball number	8	7

원형 추를 제작하고, 이를 구동축에 장착하여 실험을 수행하였다.

베어링의 여러 부분 중 본 실험에서는 발열이 가장 많이 일어나는 베어링의 볼과 내, 외륜의 접합부에 대한 데이터를 산출하였다[7,8]. 각 손상 조건에 대하여 1,000 rpm과 3,000 rpm에서 데이터를 얻었으며, 하우징은 방사율이 일정한 방사 페인트로 표면을 도색하여 사용하였다. 적외

선 열화상 기법을 이용한 실험은 초당 20 프레임으로 약 40분간 실시하며, 베어링의 온도 상승이 더 이상 일어나지 않는 최고 온도점에 도달하였을 때의 영상을 비교하고 각 손상 조건에 따른 베어링의 온도 특성을 분석하여 그래프로 나타내었다.

FFT(fast Fourier transform) 진동 주파수 진단법을 이용한 실험은 적외선 실험과 동일한 조건으로 실시하며, 약 2분간 측정하도록 한다. 시간-진폭의 형태는 푸리에 변환을 통하면 진동수-진폭의 영역에서 바라볼 수가 있다. 다시 말해, 대부분의 소리는 몇 개의 특정한 주파수에서 파동이 강하게 나타나는데 이를 피크라고 하고, 사람이 인식하는 음의 높이는 바로 첫 번째 피크의 로그 값에 비례한다[7,8]. 주파수 분석의 기본 가정은 신호가 무한한 주기성을 갖는 것이지만 이와 같이 한정된 버퍼마다 FFT를 계산하게 되면 leakage error가 발생한다. Fig. 4는 이상적인 경우, 즉 신호가 무한한 주기성을 가질 때 FFT 계산 결과는 피크 한 개만 뜨게 되는데, Fig. 5와 같이 한정된 버퍼를 사용할 때 FFT 계산 루틴이 인식하는 주기성은 무한해지지 않는다. 따라서 FFT 계산 결과는 퍼져서 보이게 된다[9]. 그리고, 본 실험은 real wave analyzer와 가속도계를 통해 산출된 진동 주파수 그래프를 비교하여 각 손상 조건에 따른 진동 특성을 분석한다. Fig. 6는 실험에 사용한 각 시편이다.

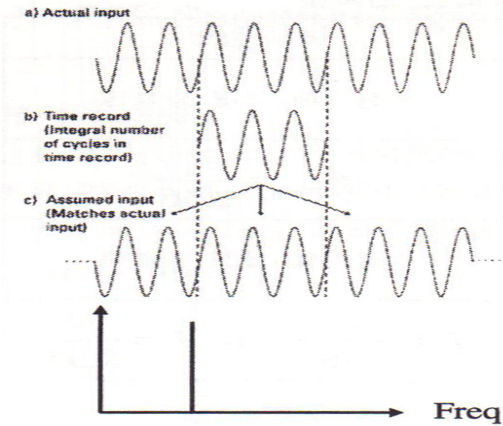


Fig. 4 Ideal FFT

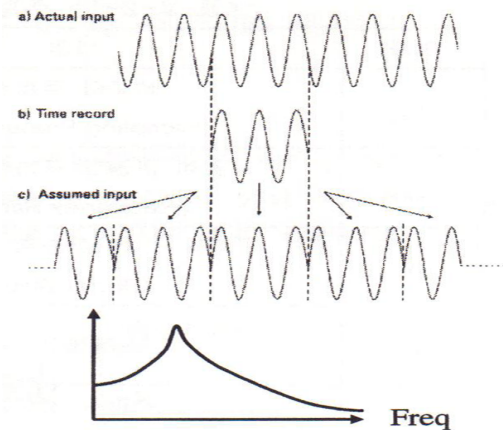
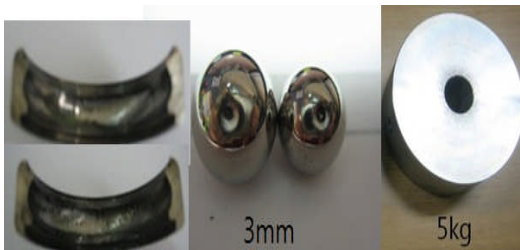


Fig. 5 Real FFT



(a) Damaged race (b) Damaged ball (c) Disc load

Fig. 6 Experiment samples

3. 실험결과 및 고찰

Table 2은 적외선 열화상 실험을 통한 최고 온도값을 나타낸다. 표의 온도값을 살펴보면 정상상태 베어링의 최고 온도보다 윤활유 손실, 볼 손상, 외륜 손상, 동적 하중, 하중 하 외륜 손상의 조건들의 경우 모두 높은 온도값을 보였다. 또한, 베어링의 손상을 보이는 볼 손상, 외륜 손상, 하중 하 외륜 손상 조건의 실험 결과, 정상상태와 비교하였을 때 확실히 높은 발열을 보이고 있어 베어링의 손상 여부를 최고 온도점 측정을 통해서도 충분히 진단할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 종류의 손상유형과 정상의 베어링에 대해 열영상 실험 등 앞서 연구한 참고문헌[7,8]에 따라 본 논문에서 정량적으로 데이터를 획득하여 고장검출을 탐지하도록 한다. 특히, 표

에서 보는 바와 같이 rpm이 클수록 더욱 확연한 온도 차이를 보여주었다.

Table 3는 진동 주파수 실험의 overall 값을 나타낸다. 실험 데이터를 살펴보면 B6304, B6204 베어링 모두 회전속도가 빨라질수록 높은 음압값을 보인다. 이는 진동수와 rpm의 일반적인 이론관계에 따라 알려진 사실에 대한 검증이라고도 할 수 있다. 표에서 볼 수 있듯이 저속 운행 시에는 정상상태와 손상상태의 판별에 큰 무리가 없었지만, 고속으로 갈수록 큰 소음과 진동이 발생함과 더불어 손상상태의 값과 정상상태의 값이 큰 차이를 나타내고 있지 않아 결합진단에 어려움이 따랐다.

한편, 열전대 또는 1 point 방식 비접촉 온도계를 사용은 장치의 가격적 측면에서 유리하나 비접촉, 스캐닝 방식 및 온도의 실시간 계측을 통해 보다 다양한 온도변화, 에너지 contouring 등

Table 2 The result of infrared experiment

Temperature(°C)	B6304		B6204	
	1000 rpm	3000 rpm	1000 rpm	3000 rpm
Normal condition	23.54	37.54	23.29	32.6
Loss lubrication condition	23.75	38.32	24.68	38.24
Damaged ball condition	29.6	39.9	29.2	39.8
Damaged outer race condition	25.21	41.87	28.48	50.72
Dynamic loading condition	30.75	51.82	25.97	56.88
Damaged loading condition	32.8	66.17	29.5	66.04

Table 3 The result of frequency analysis experiment

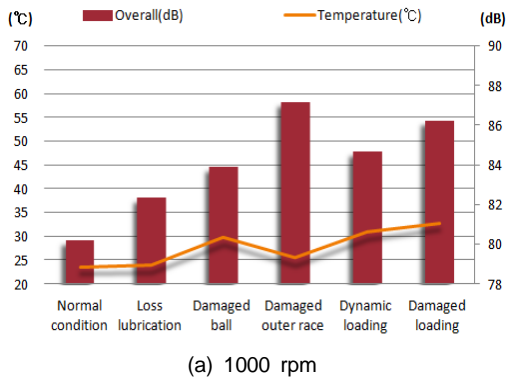
Overall(dB)	B6304		B6204	
	1000 rpm	3000 rpm	1000 rpm	3000 rpm
Normal condition	80.215	87.565	85.133	88.189
Loss lubrication condition	82.362	87.532	82.253	88.111
Damaged ball condition	83.918	87.623	86.597	88.204
Damaged outer race condition	87.203	88.097	84.941	88.074
Dynamic loading condition	84.702	87.428	81.198	87.95
Damaged loading condition	86.267	88.207	85.728	87.479

을 감지 가능한 적외선 열화상 기술을 이용함으로써 장치의 동작 및 운용 시 동시적으로 데이터 획득이 가능하다. 또한, 가속도계 진동분석에 의한 검출방식과 달리 본 논문은 온도검출에 따른 고장검출기법을 통한 실시간 고장검출에 대한 적외선 기술의 적용에 따른 데이터 획득을 고려하였다. 그리고 고장 판별 시점에서 측정된 온도는 외부환경 (대기온도, 풍속 등) 조건에 영향을 받으므로 고장 판별의 조건을 측정 초기 온도로부터 온도 상승율과 비교한 연관성의 관점에서 정상부 온도에 대한 비정상부의 온도상승 관측을 통해 고장을 판별하였다. 그 이유는 초기온도의 실험적 조건이 외란에 따라 유동적이나, 상대적으로 이에 비해 정상부와 비정상부간 온도차이는 일정한 상호 유기성을 갖는 온도 프로파일러를 제공하기 때문이다.

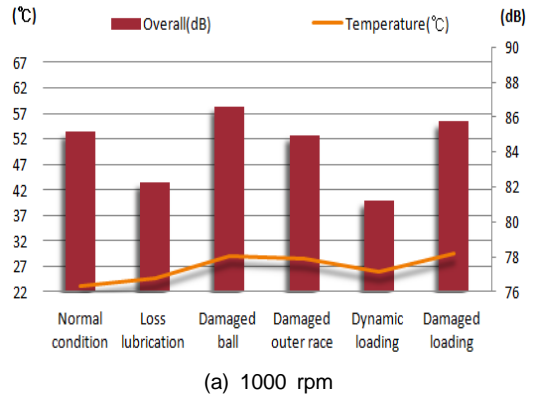
Fig. 7과 Fig. 8는 각각 B6304와 B6204 볼베어링의 적외선 열화상 데이터와 진동 주파수 데이터를 도시한 것으로 동적 거동상태에서의 결합에 따른 열적 및 진동특성을 나타낸 것이다. 여기서, 막대그래프는 진동 주파수 실험의 총체적인(overall) 값을 나타내고, 동그란 점은 적외선 실험의 온도 값을 나타내고 있다.

Fig. 7의 (a)와 (b)에서 손상된 볼 외곽부의 온도와 주파수 계측 데이터로부터 (a)의 손상된 볼 외곽부(damaged outer race)에서 온도가 떨어지나 (b)에서는 오히려 손상된 볼 외곽부(damaged outer race)에서 급격하게 상승을 하는 것은 저회전 rpm에서는 영향에 비해 마찰력이 크지 않아 온도상승에 크게 영향을 미치지 않는으나 회전수가 증가함에 따라 고회전의 rpm에서는 마찰력이 저 rpm에 비해 크게 증가하는 것에 의한 영향으로 보인다.

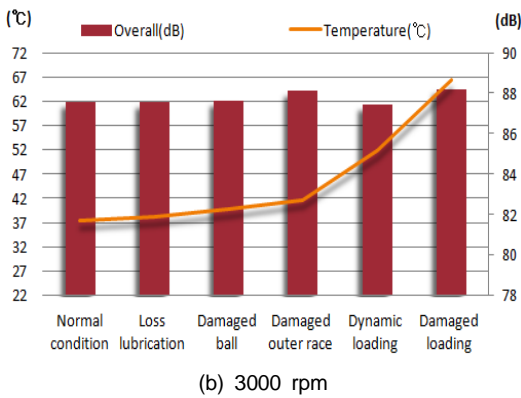
Fig. 7(a) 와 Fig. 8(a)를 살펴보면 1000 rpm에서 정상상태 베어링과 비교하였을 때, 손상상태 베어링의 경우 높은 온도점을 기록하였다. 또한 손상된 외부 부위(damaged outer race) 및 동적 하중 상태에서 B6304가 B6204에 비해 온도가 더 높게 나타나는 것은 각각 볼의 지름이 큼에 따라 마찰에 따른 마찰력의 증가 차이 및 베어링의 볼의 개수가 B6304가 B6204에 비해 한 개가 적음에 따른 회전수 차에 따른 것으로 사료된다. 그리고 진동 실험의 경우에도 overall 값이 각각 큰 차이를 보여 손상상태의 고장 진단이 가능하였다.



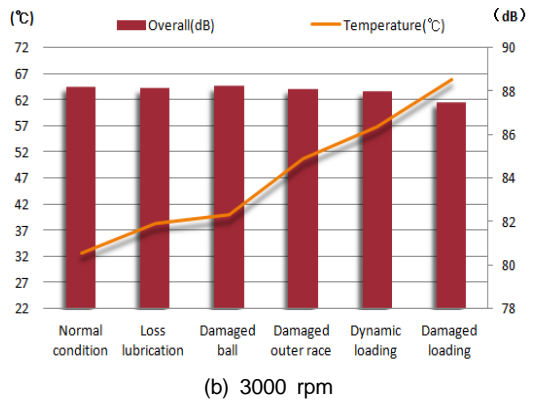
(a) 1000 rpm



(a) 1000 rpm



(b) 3000 rpm



(b) 3000 rpm

Fig. 7 Temperature and overall data of B6304

Fig. 8 Temperature and overall data of B6204

Fig. 7(b) 와 Fig. 8(b)의 3,000 rpm에서 적외선 열화상 실험 결과, 전반적으로 온도가 상승한 것은 Fig. 7(a)과 Fig. 8(a)의 1,000 rpm 저속에서보다 마찰력의 증가에 따른 것으로 이로부터, 더욱 극심한 온도 차이를 보여 최고 온도점 확인으로도 간단히 베어링의 상태를 진단할 수 있었다. 하지만 진동 주파수 실험 결과, 구분하기 어려울 정도의 미세한 총체적인(overall) 값의 차이를 보여 베어링의 정상상태와 손상상태의 판별이 어려웠다.

을 통한 적외선 열화상 실험을 수행하여 보다 더 정량적이고, 정성적인 데이터가 확보된다면 기존의 고장진단법과 같이 전문가만이 측정할 수 있는 판별법이 아닌 비전문가도 회전체에 대한 표준 데이터를 바탕으로 정확한 상태감시 및 고장 진단이 가능한 유용한 판별법이 될 것으로 사료된다.

4. 결론

후 기

본 연구에서 적외선 카메라를 이용한 회전체 베어링의 고장진단은 실시간 영상 및 최고 온도 점을 확인함으로써 충분히 유용함을 알 수 있었다. 또한, 기존의 진동 주파수 진단법은 저속에서는 유용했으나 고속에서 고장 판별이 어려운 단점을 보인 반면, 적외선 열화상 진단법은 고속에서 더욱 확연한 온도 차이를 보여 매우 유리함을 확인하였다. 앞으로 더욱 다양한 조건들의 시편

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. 2010-0023353).

참고문헌

[1] I. Lee and S. Jang, "Early detection of bearing failure by frequency analysis," *Journal of the*

- Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 164-169 (2006)
- [2] H. L. Balderston, "The detection of incipient failure of bearings," *Materials Evaluation*, Vol. 27, pp. 121-128 (1969)
- [3] D. R. Harting, "Demodulated resonance analysis - A powerful incipient detection technique," *ISA Transactions*, Vol. 17, pp. 35-40 (1978)
- [4] J. Yoon, S. Kim, J. 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*, pp. 1787-1798 (1995)
- [5] M. Y. Choi and W. T. Kim, "The utilization of nondestructive testing and defects diagnosis using infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531 (2004)
- [6] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 7th Ed., John Wiley & Sons (2008)
- [7] 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)
- [8] J. Seo, D. Hong and W. Kim, "Study on NDT Fault Diagnosis of the Ball Bearing under Stage of Abrasion by Infrared Thermography", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 7-12, (2012)
- [9] S. V. (Corp.), "Real Wave Pocket Analyzer (Real-Time Based Measurement System) Hangul Manual," First Edition (Ver. 1.7)