

적외선열화상을 이용한 베어링의 실시간 유향상태에 따른 상태감시에 관한 연구

Condition Monitoring under In-situ Lubrication Status of Bearing Using Infrared Thermography

김동연*, 홍동표*, 유청환*, 김원태**†

Dongyeon Kim*, Dongpyo Hong*, Chunghwan Yu* and Wontae Kim**†

초 록 회전기기의 결함진단에 있어서 기존의 방법과 달리 적외선열화상기술은 회전기기의 결함진단에 대해 비접촉, 비파괴 및 상태감시 모니터링을 할 수 있다. 본 논문에서는 적외선열화상 상태진단을 기반으로 하는 회전기기의 결함진단에 대한 새로운 접근법을 제안한다. 따라서 회전기에서 가장 많이 사용되어지는 볼베어링을 이용하여 실험을 수행하였고, 진동 스펙트럼 분석과 적외선열화상을 이용하여 실시간 모니터링을 수행하였다. 적외선열화상기법을 이용하여 볼베어링의 유향 불균형에 따른 온도 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 실험을 통한 결과를 분석·검토하여 향후 산업전반의 회전기기의 상태감시연구에 있어서 다양한 분야에 사용되어 질 것으로 예상된다.

주요용어: 적외선열화상, 상태감시, 회전기기, 결함진단, 볼베어링

Abstract The infrared thermography technology rather than traditional nondestructive methods has benefits with non-contact and non-destructive testings in measuring for the fault diagnosis of the rotating machine. In this work, condition monitoring measurements using this advantage of thermography were proposed. From this study, the novel approach for the damage detection of a rotating machine was conducted based on the spectrum analysis. As results, by adopting the ball bearing used in the rotating machine applied extensively, an spectrum analysis with thermal imaging experiment was performed. Also, as analysing the temperature characteristics obtained from the infrared thermography for in-situ rotating ball bearing under the lubrication condition, it was concluded that infrared thermography for condition monitoring in the rotating machine at real time could be utilized in many industrial fields.

Keywords: Infrared Thermography, Condition Monitoring, Rotating Machine, Fault Diagnosis, Ball Bearing

1. 서 론

산업체 현장에서 결함 검사시스템은 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 그 검사 방법에 있어서 비접촉검사 방법 부분은 상당한 발전을 거듭하고 있다[1]. 이러한 산업체의 모든 물체는 절대온도 0 K

이상에서 적외선 복사에너지를 방출한다. 이렇게 방출되어진 적외선 복사에너지는 적외선영상장치를 이용하여 측정되어지며, 이러한 적외선영상장치는 물체 표면의 열화상을 촬영하고 온도 분포나 그 변동 상황을 해석시스템을 이용해 처리하는 방법으로써 물체의 내부 상태를 추정하는 검사 방법이다[2].

적외선영상장치를 사용한 비접촉검사 방법의 하나로 적외선열화상 카메라를 이용한 것이 있는데, 이 검사 방법은 사용이 빠르고 비교적 정확한 데이터를 사용자로 하여금 쉽게 검사를 할 수 있는 환경을 제공하고 있다[3]. 또한 기계 시스템의 온도 분포와 열적 변화에 의한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 이상온도변화로 인한 결함을 판별하는데 많은 활용도를 보이고 있다. 또한, 적외선영상장치를 이용한 적외선열화상 방법은 의학·우주·기상·군사 및 공학 분야와 제조분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 적외선영상장치의 발전과 적외선영상장비를 이용한 검사 방법이 다른 방법들에 비하여 비접촉성으로 인하여 안전하고 고속으로 원거리측정이 가능한 점[4] 등 여러 장점들로 인하여 베어링 결함 감지 방법으로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상되어 적외선영상장치를 이용한 베어링 결함 감지에 대한 연구를 진행하였다. 이 논문에는 적외선열화상 상태진단을 기반으로 하는 회전기기의 결함진단에서 우선적으로 베어링의 윤활상태에 따른 온도특성연구를 통한 회전기기 결함진단에 대한 새로운 접근법을 제안하도록 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 적외선에 의한 온도 측정

본 연구에서 제안하는 적외선은 파장이 약 0.72-1000 μm 에서의 전자파로 가시광선의 장파장에서 마이크로파의 단파장까지의 총칭이다. 이 적외선은 물질의 온도와 밀접한 관계가 있어, 절대온도 영도 K (-273 $^{\circ}\text{C}$)이상의 모든 물체는 연속적으로 적외선을 방사하고 있다. 플랑크(Planck)법칙에 의하면 흑체(black body)의 방사강도(단색 방사 발산도)는 다음의 식(1)에 의해 얻어질 수 있다[5].

$$w_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} (W/cm^2 \cdot m \cdot \mu\text{m}) \quad (1)$$

여기서, λ : 파장(μm)

T : 흑체의 절대온도 (K)

C_1 : $3.7402 \times 10^{12} (W \cdot \text{cm})$

C_2 : $1.4388 (\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C})$

여기에서 흑체는 입사한 적외선을 완전히 흡수하는

물체로, 바꾸어 말하면 어느 온도에 있어서 다른 어떤 물체보다 방사하는 에너지가 큰 물체라고 말할 수 있다[6,7].

2.2. 방사율 보정

방사율은 흑체에 대한 방사(흡수)의 효율이라고 정의되므로 구형의 완전흑체(black body)의 방사율은 1이 된다. 일반적인 물체는 방사율이 1보다 작으며, 측정체에 대해 그 방사율 보정을 해야만 한다. 방사율에 의한 방사율 보정은 이를 의미하고 있다. 또한, 식(1)을 전파장으로 적산하면 전방사 발산도가 얻어지고 식(2)와 같이 온도의 4제곱에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W_{\lambda} d\lambda = \epsilon \sigma T^4 (W/cm^2) \quad (2)$$

여기서, σ : Stefan-Boltzmann의 정수

$(5.673 \times 10^{-12} (W/cm^2 \cdot ^{\circ}\text{C}))$

ϵ : emissivity

여기서, 식(2)로부터 복사력에 대한 전파장을 검지할 수 있는 검출기가 있다고 한다면 온도의 4제곱에 비례하는 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 방사율(ϵ)은 완전한 흑체에서는 1이나 회체를 고려한 복사력으로부터는 상기에서 언급된 바와같이 보상을 하여야 하므로, 본 연구의 실험에서는 흑색 무광택 페인트를 입혀 방사율(ϵ)을 보상하였다.

3. 시험편 및 장치 구성

시험편으로 사용한 베어링은 표준 베어링인 단열 깊은 홈 볼 베어링 중에서 가장 널리 사용되어지는 B60XX 계열 중에서 B6304를 사용하여 실험을 수행하였으며, Table 1에서 베어링의 규격을 나타내고 Fig. 1은 볼베어링의 형상을 도시한 것이다. 실험에 사용되어진 실험장치의 간략적인 구성은 Fig. 2와 같다. 동력부와 측정 대상체인 베어링 사이에 지지의 역할을 수행할 베어링과 그에 맞는 하우징을 설치하였다. 통상적인 회전기기에서의 베어링이 사용되어지는 형상에서 통상 회전 상태에서 윤활제의 유·무에 따라 정상상태와 이상상태의 베어링을

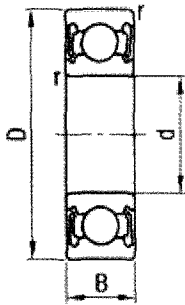


Fig. 1 Schematic of deep groove ball bearing

Table 1 Standards of B6304

Out Dia. (D)	In Dia. (d)	Width (B)	Allowable Revolution (rpm)	Mass (g)
52mm	20mm	15mm	10,000	145

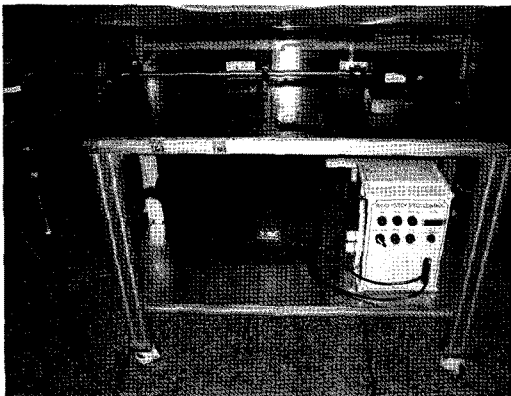


Fig. 2 Photograph of bearing test rig applied

가정하고 그에 따른 온도 특성에 대해 실험을 수행하였다. 동력부는 800 W에 1 HP인 APM-SC08ADK 서보 모터를 사용하여 각각 1,000 rpm, 2,000 rpm, 3,000 rpm에서 실험을 실시하였으며, 모터와 축, 베어링으로 연결되어지는 부분의 안정성을 고려하여 방탄유리를 사용하였다. 그리고 적외선 카메라의 모델은 프랑스 Cedip社의 Silver 450M을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 스펙트럼에 의한 결함 분석

본 연구에서는 적외선열화상 카메라를 사용한 측정 방법에 앞서 이의 신뢰성 평가와 기존의 방법과의 차이 및 실용성을 고찰하고자 스펙트럼 분석법을 실시하였다. 기존의 방법에는 여러 가지가 있으며 이 방법은 베어링에 간접적으로 가속도계를 부착하여 실시간으로 데이터를 전송받아 스펙트럼 분석을 실시한 후 주파수-크기선도에서 특정주파수에 따른 크기에 대한 결과 값으로 이상 유무를 판단하는 방법이다. 하지만 상기의 실험은 접촉식이라는 단점과 이에 따른 부수적인 설비를 기기에 장착하여야 하며 이로 인해 불필요한 요소가 생겨나며 재설계를 해야 한다는 단점과 실시간 측정에 다소 무리한 단점이 있다.

실험은 01Db(주파수 분석기), Impact Hammer와 가속도계를 사용하여 실험을 실시하였으며, 실험의 결과는 Fig. 3과 같다. 여기서 X축은 주파수(Hz), Y

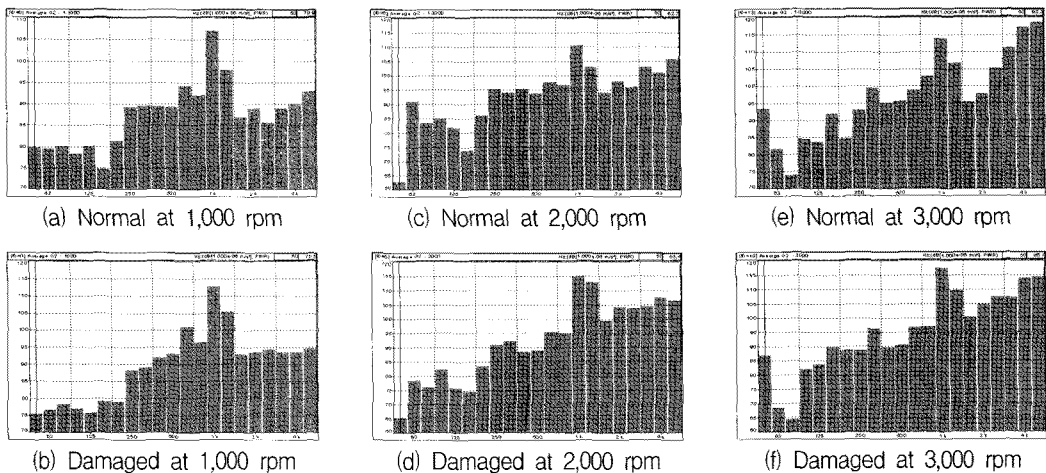


Fig. 3 Ball bearing fault diagnosis by spectrum method

축은 dB의 크기를 나타내었다. Fig. 3의 그래프를 보면 특정 주파수에서 이상이 없을 때와 이상이 있을 때 진동수 레벨의 크기 값에서 확연한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

4.2. 정상상태 베어링 진단

실험은 10분을 주기로 실시하였으며, 시작후 3초 이내에 목표치인 1000 rpm, 2000 rpm과 3000 rpm에 도달할 수 있도록 셋업을 하여 실험하였고 그에 따라서 10분간 온도 특성의 변화를 관찰하였다. 관찰한 부위는 베어링의 모든 곳의 데이터를 볼 수

있고, 베어링에서 발열이 일어나는 부분인 볼과 내·외륜의 적합부에 대한 데이터를 산출하였다. 초기 온도는 28~29 ℃에 맞추어서 실시하였다. Fig. 4는 볼베어링의 정상상태에서 초기 온도와 10분이 경과한 후 베어링의 열화상 및 온도분포를 정중앙을 중심으로 가로축에 관해서 온도 특성의 변화를 측정한 각각 나타낸 그래프로써, Fig. 4의 (a)-(c)는 적외선열화상 및 Fig. 4 (d)-(e)는 스펙트럼 분석에 의한 온도이다. 또한, Fig. 4 (d)-(e) 그래프의 X축은 지정한 가로축의 왼쪽의 위치를 0으로 하여 오른쪽으로 위치를 나타내는 축이고, Y축은 온도를 표기하였다.

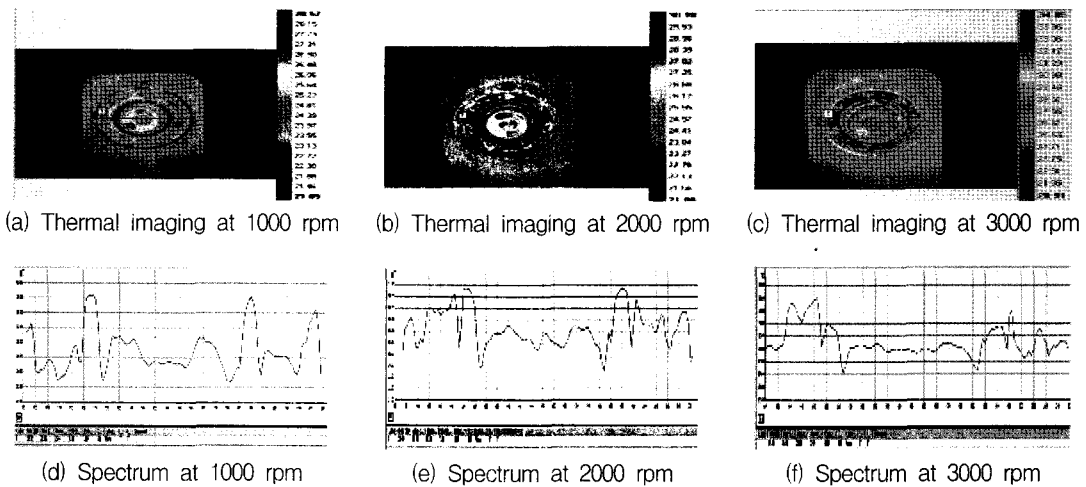


Fig. 4 Temperature characteristics from infrared thermal imaging and spectrum analysis at different bearing speeds with normal state, (°C)

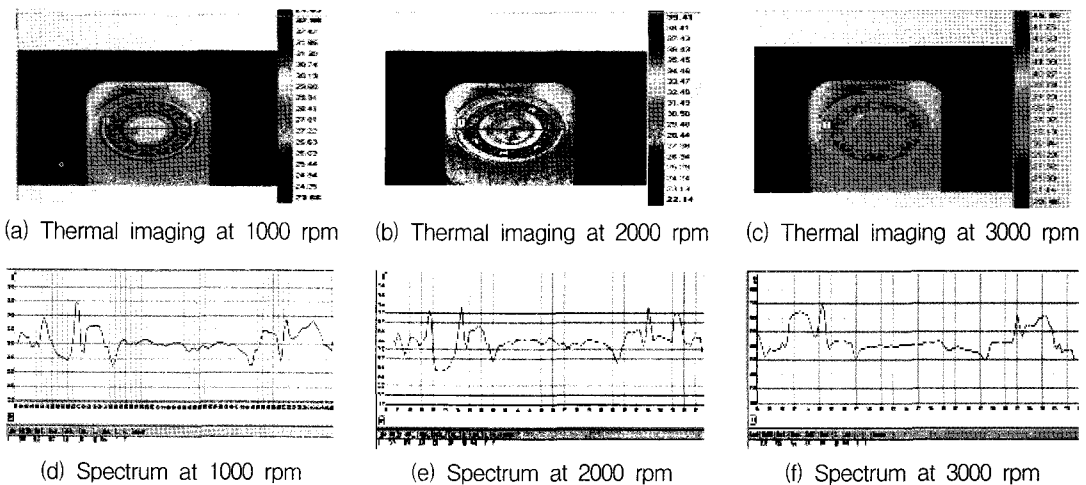


Fig. 5 Temperature characteristic from infrared thermal imaging and spectrum analysis at different bearing speeds with damaged state, (°C)

4.3. 비정상상태 상태감시 분석

Fig. 5는 윤활유가 존재하지 않는 정상적인 상태가 아닌 결함이 있는 상태에서 베어링의 구동후 10분이 경과한 시점에서의 온도특성에 대한 그림이다. 여기에서도, Fig. 5 (d)-(e) 그래프의 X축은 지정한 가로축의 왼쪽의 위치를 0으로 하여 오른쪽으로 위치를 나타내는 축이고, Y축은 온도를 표기하였다.

스펙트럼 분석에 의해 얻어진 Fig. 5의 (d)-(f)로부터 Y축의 온도의 정점은 온도가 어느 정도까지 상승할지 모르는 상황이므로 일정한 범위를 정하지 않고 측정된 온도에서 5~10 °C정도 높은 값을 정점으로 정하였다. 그래프에서도 보이듯이 가장 발열이 심한 부위는 내륜과 외륜, 그리고 볼에서였다.

Table 2는 내륜과 외륜, 그리고 볼에서 윤활유의 유·무에 따른 최고치의 온도 변화에 대한 표이다. 적외선열화상측정법으로 측정된 데이터를 고려하면 Table 2와 Fig. 4와 Fig. 5 비교에서 보듯이 윤활유가 포함이 되어있지 않은 상태의 베어링에서는 윤활유의 보호막이 없어서 그에 따른 내·외륜과 볼 사이에 고체 마찰이 발생하여 급격한 온도의 상승이 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 Max. temperature(°C) characteristics of the bearing by 1000, 2000 and 3000 rpm, respectively

Lubricant	rpm		
	1000	2000	3000
Contain	28.57	30.10	34.85
No-contain	32.98	39.41	45.88

5. 결론

본 연구에서는 진동 스펙트럼의 방법으로 측정된 데이터를 기준으로 적외선열화상으로 측정한 데이터를 분석하였다. 연구 결과로 적외선열화상 카메라와의 결함부위에 대한 정확성을 확인할 수 있었다. 그리고 진동 스펙트럼 분석의 방법보다 더 정교한 정량적인 데이터 뿐만 아니라 실시간으로 온도 이미징 및 영상으로 디스플레이 되는 열화상을 정성적으로도 식별할 수 있었다.

결론적으로, 실험을 통하여 적외선열화상 기법으로 회전기에서의 온도분포 특성을 측정해 본 결과 윤활유의 이상 유·무에 따른 시설체의 감시 및

진단측정이 상당히 용이하며 실시간으로 확인이 가능하여 비접촉, 비파괴측정 방법으로서 향후 시설/회전체에서의 기계류 상태감시(condition monitoring) 및 이상진단(abnormal diagnosis) 실시간 모니터링의 적용에 용이할 것이다.

참고문헌

- [1] J. Y. Kim, "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] 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)
- [3] Y. G. Kim, "A study on the non-destructive test of concrete tunnel lining using infrared thermography technique," J. of Korean Society for Rock Mech., Vol. 7, pp. 75-83 (1997)
- [4] K. S. Kang, M. Y. Choi, J. H. Park and W. T. Kim, "Analysis of thermoelastic stress in the cantilever beam by lock-in thermography," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 24, No. 3, pp. 273-278 (2008)
- [5] G. Busse, "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed.), X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 318-328 (2001)
- [6] M. B. Saintey and D. Almond "An artificial neural network interpreter for transient thermography image data," NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 291-295 (1997)
- [7] M. Taburdagitan and M. Akkok, "Determination of surface temperature rise with thermoelastic analysis of spur gears," Wear, Vol. 261, pp. 656-665 (2006)