

영상 처리 기법을 이용한 고속 주축 베어링용 에어-오일 윤활 시스템의 성능 평가 Image Processing Based Performance Evaluation of an Air-Oil Lubrication System for High-Speed Spindle Bearings

*문재흠¹, 김철오¹, 조대욱¹, #김석일²

*J. H. Moon¹, C. O. Kim¹, D. W. Cho¹, #S. I. Kim (sikim@kau.ac.kr)²

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원, ² 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Key words : Air-oil lubrication, Line scan camera, Image processing, High-speed spindle bearing

1. 서론

공작기계의 가공 정밀도와 생산성 향상을 위해서는 주축계의 고속화 구현이 필수적이다. 주축계는 주축, 베어링, 모터, 하우징 등으로 구성되는데, 특히 공작기계의 주축계에 가장 널리 적용되고 있는 구름 베어링의 경우에는 윤활 방법에 따라서 회전 속도의 한계가 결정된다. 최근 미량 급유 방법의 하나인 에어-오일 윤활(air-oil lubrication)이 머시닝센터나 CNC 선반의 고속 주축계에 많이 채용되고 있다. 에어-오일 윤활은 파이프 내부를 통해서 베어링으로 연속 공급되는 압축 공기의 흐름 속에 일정량의 윤활유를 주기적으로 분사함으로써 지속적으로 윤활유를 베어링에 공급하는 방법이다. 따라서 에어-오일 윤활에서는 그 원리 때문에 필연적으로 시시각각 급유량이 변동하게 된다. 이러한 급유량의 변동은 베어링 내부의 유막 두께의 변동을 야기하고, 유막 두께의 변동은 마찰 저항 및 발열량의 변동을 초래하기 때문에 윤활유가 얼마나 일정하게 베어링으로 공급되는가는 에어-오일 윤활 장치의 성능 및 윤활 조건을 평가하는 중요한 척도가 된다. 따라서 본 연구에서는 급유량의 변동을 체계적이고 자동적으로 측정 및 평가할 수 있는 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템을 라인 스캔 카메라(line scan camera)와 영상 처리(image processing) 기법을 이용해서 개발하였으며, 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템의 신뢰성은 다양한 윤활 조건들에 대해서 측정된 급유량의 변동 폭에 대한 오차 정보를 토대로 검증을 하였다.

2. 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템

에어-오일 윤활 장치의 성능 및 윤활 조건에 따라서 달라지는 급유량의 변동 폭을 측정 및 평가하기 위해서 본 연구에서 개발한 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템은 Fig. 1 에 제시하였다. 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템은 에어-오일 윤활 장치, 흡유지 이송 장치, 라인 스캔 카메라 및 영상 처리 소프트웨어로 구성되어 있다. 흡유지 이송

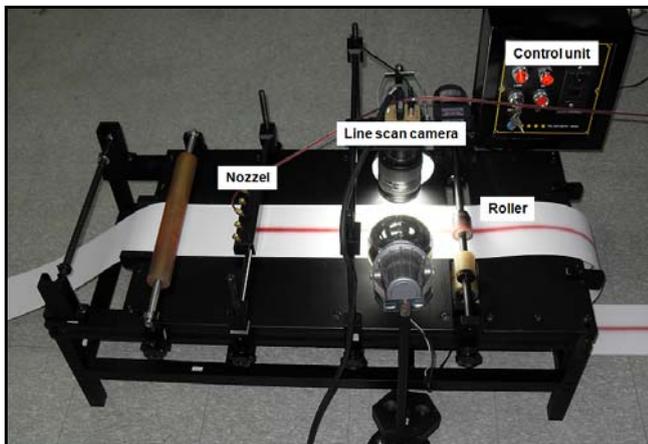


Fig. 1 Performance evaluation system for air oil lubrication

장치는 흡유지의 이송 속도를 제어하기 위해서 DC 서보 모터로 구동하였으며, 윤활유의 시각적 확인이 용이하도록 윤활유에는 점도에 영향을 주지 않는 미량의 적색 염료를 혼합하였다. 에어-오일 윤활 장치로부터 윤활유가 압축 공기와 함께 분사 노즐을 통해서 일정 속도로 이송하는 흡유지에 도출되면, 윤활유는 흡유지에 떠 형태의 흔적을 남기면서 흡착된다. 그리고 이러한 기름 띠의 형상을 라인 스캔 카메라로 촬영하고, 영상 처리 소프트웨어로 분석함으로써 급유량에 따라서 시시각각 변동되는 기름 띠의 폭을 측정하게 된다.

3. 라인 스캔 카메라를 이용한 영상 처리 시스템

3.1 영상 측정 장치

본 연구에서는 기름 띠의 영상 측정 정밀도를 높이기 위해서 픽셀(pixel) 수가 4,096 개인 고해상도 라인 스캔 카메라를 사용하였으며, 그에 적합한 프레임 그래버(frame grabber), 렌즈(lens) 및 조명 기구를 선정하였다. 원리적으로 라인 스캔 카메라는 한번에 한 라인에 대한 영상만을 받아들이기 때문에 전체 영상을 보기 위해서는 모든 라인 영상을 조합할 필요가 있다. 특히 흡유지의 이송 속도에 비해서 카메라의 샘플링(sampling) 시간이 느린 경우에는 전체 영상이 간헐적으로 측정되는 문제가 있고, 그 반대의 경우에는 영상이 중첩되는 문제가 있기 때문에 전체 영상을 정확하게 획득하기 위해서는 흡유지의 이송 속도와 카메라의 샘플링 시간에 대한 올바른 설정이 요구된다. 본 연구에서는 하나의 픽셀의 이미지 영역에 대한 크기를 정확하게 측정 후, 그 크기를 흡유지의 이송 속도로 나눔으로써 영상 왜곡을 야기하지 않는 최적의 샘플링 시간을 도출하였다.

3.2 영상 처리 소프트웨어

라인 스캔 카메라로 촬영한 기름 띠의 흑백 영상으로부터 기름 띠의 폭을 산정하기 위해서는 기름 띠의 흔적이라고 판정할 수 있는 명도 임계값(brightness threshold)이 필요하다. 명도 임계값은 히스토그램(histogram)을 이용해서 구할 수 있지만 조명 상태와 주위 환경에 따라서 최적의 명도 임계값이 달라지는 문제가 있다. 본 연구에서는 실시간 영상 처리가 가능해야 하고, 항상 동일한 조건에서 측정이 이루어지기 때문에 측정 전에 히스토그램을 통해서 구한 명도 임계값을 토대로 예비 측정을 하면서 최적의 임계 명도값을 선정하였다.

Fig. 2 는 영상 처리 과정을 보여주고 있는데, 먼저 실시간적으로 프레임 그래버 내에 저장되는 영상을 추출하여 0 부터 255 사이의 명도를 갖는 측정 라인의 영상 정보를 얻는다. 그리고 각 픽셀의 명도와 명도 임계값을 비교해서 명도 임계값보다 작은 픽셀의 명도는 0 으로 처리하고, 명도 임계값보다 큰 픽셀의 명도는 255 로 처리하는 이진화 과정을 수행한 후, 명도가 0 인 픽셀의 수를 구한다. 명도

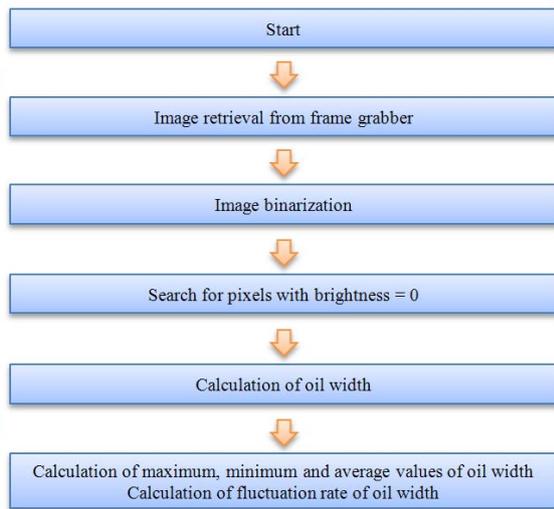


Fig. 2 Flow of image processing

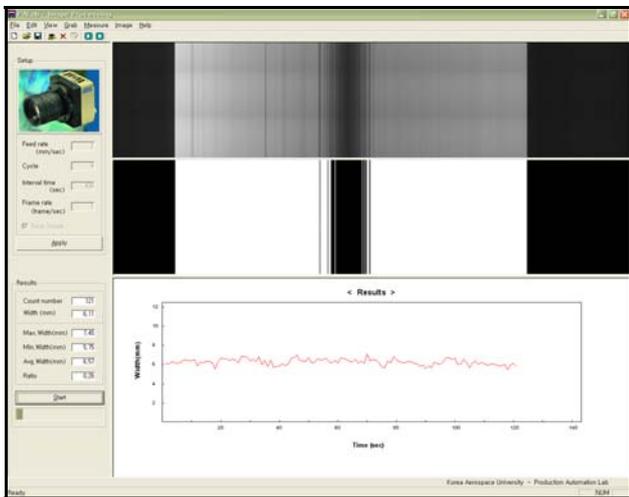


Fig. 3 Image processing software

가 0 인 픽셀의 수에 예비 측정 과정에서 파악한 픽셀의 폭을 곱하면 측정 라인에 대한 기름 띠의 폭을 산정할 수 있다. 이러한 과정을 전체 측정 싸이클에 대해서 적용하면 기름 띠의 전체 영상에 대한 폭의 정보를 구할 수 있으며, 그 결과를 토대로 기름 띠의 폭의 최대값, 최소값, 평균값, 변동 비율 등을 산정할 수 있다. 이러한 개념에 토대를 두고 개발한 영상 처리 소프트웨어의 화면은 Fig. 3에 나타내었는데, 화면 상단에는 실시간 측정되는 기름 띠의 영상, 중간에는 이진화 처리된 기름 띠의 영상, 그리고 하단에는 기름 띠의 폭에 대한 실시간 그래프를 각각 보여주고 있다. 화면에 제시된 경우에 영상 이진화 과정을 위해서 설정한 명도 임계값은 80 이며, 기름 띠에 대한 측정 영상과 이진화 영상 사이의 왜곡 현상이 거의 없다는 사실로부터 본 연구에 제안한 방법으로 선정된 명도 임계값에 대한 타당성을 확인할 수 있다.

4. 성능 평가 시스템의 신뢰성 실험

본 연구에서는 영상 처리 기법에 기반을 두고 개발한 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템에 대한 신뢰성을 검토하기 위해서 다양한 윤활 조건들에 대한 기름 띠의 폭을 측정 및 분석하였다. Table 1에 제시한 바와 같이 에어-오일 윤활 특성에 대한 영향 인자들인 윤활유의 1회 토출량, 토출 간격, 점도, 그리고 압축 공기의 유량을 변경시켜가면서 각 실험 조건마다 40회씩의 실험을 반복하였으며, 동일한

Table 1 Reliability test of the performance evaluation system

	Oil discharge quantity (cc)	Discharge interval (min)	Oil viscosity (cSt)	Air flow rate (ℓ/min)	Fluctuation rate of oil width	Max. error of fluctuation rate (%)
1	0.03	3.5	10	12	0.45	1.2
2	0.03	7.5	32	16	0.76	2.1
3	0.03	10.5	10	20	0.73	1.8
4	0.06	3.5	32	20	0.48	1.1
5	0.06	7.5	10	12	0.69	1.2
6	0.06	10.5	10	16	0.80	1.4
7	0.10	3.5	10	16	0.42	2.2
8	0.10	7.5	10	20	0.54	2.2
9	0.10	10.5	32	12	0.10	1.8

윤활 조건 하에서 측정된 40개의 기름 띠의 폭 정보로부터 기름 띠의 폭 변동 비율의 평균값과 최대 오차를 산정하였다. 윤활 조건에 따라서 기름 띠의 폭 변동 비율은 0.10~0.80 정도로 매우 큰 차이를 보이고 있지만, 기름 띠의 폭 변동 비율의 최대 오차는 1.1~2.2% 정도로 매우 작게 나타났다. 특히 이와 같이 기름 띠의 폭 변동 비율의 최대 오차가 매우 작다는 사실은 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템이 다양한 윤활 조건에 대해서도 매우 안정적으로 기름 띠의 폭을 측정할 수 있음을 보여주는 것이며, 결과적으로 본 연구에서 개발한 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템에 대한 신뢰성은 높다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 에어-오일 윤활에서의 급유량의 변동을 체계적이고 자동적으로 측정 및 평가할 수 있는 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템을 개발하였다. 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템은 에어-오일 윤활 장치, 흡유지 이송 장치, 라인 스캔 카메라 및 영상 처리 소프트웨어로 구성되어 있다. 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템에 대한 신뢰성을 검토하기 위해서 에어-오일 윤활 특성의 영향 인자들인 윤활유의 1회 토출량, 토출 간격, 점도, 그리고 압축 공기의 유량을 변경시켜가면서 각 실험 조건마다 40회씩의 실험을 반복하였으며, 측정된 기름 띠의 폭 정보로부터 기름 띠의 폭 변동 비율의 평균값과 최대 오차를 산정하였다. 윤활 조건에 따라서 기름 띠의 폭 변동 비율은 매우 큰 차이를 보였지만, 기름 띠의 폭 변동 비율의 최대 오차는 2.2% 이내로 매우 작게 나타났다. 특히 이와 같이 기름 띠의 폭 변동 비율의 최대 오차가 매우 작다는 사실로부터 에어-오일 윤활의 성능 평가 시스템은 다양한 윤활 조건에 대해서도 매우 안정적이고 신뢰성이 높게 기름 띠의 폭을 측정할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 주관하는 "에어-오일 윤활 공급 장치 설계 기술 개발" 과제의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kim, S. I., et al., "Advanced Machine Tool Design Technology," 1995.
2. Sonka, M., "Image Processing, Analysis, and Machine Vision," 1999.
3. Wu, C. H. and Kung, Y. T., "A Parametric Study on Oil/Air Lubrication of a High-Speed Spindle," Precision Engineering 29, pp.162~167, 2005.