

AE 센서를 이용한 스커핑 손상의 감시

김재환 · 김태완* · 조용주**†

부산대학교 정밀기계공학과 대학원, *부산대학교 기계기술연구소, **부산대학교 기계공학부

Detecting of Scuffing Failure using Acoustic Emission

Jae-Hwan Kim, Tae-Wan Kim* and Yong-Joo Cho**†

Graduate School, Pusan National University

*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract – The surfaces of machine components in sliding contact such as bearing, gears and pistons etc. frequently operate under the condition of mixed lubrication due to high load, high speed and slip. These machine components often undergo the inception of scuffing in practical application. The scuffing failure is a critical problem in modern machine components, especially for the requirement of high efficiency and small size. However, it is difficult to find a universal mechanism to explain all scuffing phenomena because there are so many factors affecting the onset of scuffing. In this study, scuffing experiments are conducted using Acoustic Emission(AE) measurement by an indirect sensing approach to detect scuffing failure. Acoustic Emission(AE) signal has been widely utilized to monitor the interaction at the friction interface. Using AE signals we can get an indication about the state of the friction processes, about the quality of solid and liquid layers on the contacting surfaces in real time. The FFT(Fast Fourier Transform) analyses of the AE signal are used to understand the interfacial interaction and the relationship between the AE signal and the state of contact is presented.

Keywords – acoustic emission, AE RMS, scuffing, time domain, frequency domain.

1. 서 론

마찰과 마멸 현상을 평가하는 방법은 광범위하게 변화되어 왔다. 하지만 아직 만족할 만한 평가방법은 없는 것이 현실이다. 마찰, 마멸 현상을 평가하는 방법중 가장 일반적인 방법이 마찰 계수이다. 하지만 마찰계수는 단지 실험장치를 통해서나 쉽게 구할 수 있으며 실제 복잡한 기계시스템의 접촉 요소들의 경우 그 접촉 상태를 이해하기 위해 마찰계수를 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 기계시스템에서 동적인 기계 요소간의 접촉에서 마찰 현상은 필연적으로 발생하게 되며 이러한 마찰 현상은 에너지 손실을 유발하여 효율을 떨어뜨리고, 마멸은 기계 요소의 수명 및 성능에 중요한 영향을 미친다. 마찰과 마멸이 과도하면 기계요소의 접

촉면에 스커핑(scuffing)과 같은 표면손상이 발생하여 기계요소의 수명이 줄어든다. 스커핑 파괴는 기계요소에서 중대한 문제이지만 다양한 인자들이 관계되어 있어 스커핑 발생을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다.

이와 같은 대책의 일환으로서 보다 효과적이고 정확하게 기계요소 접촉부위를 평가할 수 있는 측정법과 동시에 마멸 손상 및 스커핑과 같은 손상상태를 감지할 수 있는 감시 시스템이 요구된다. 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형되거나 파괴가 일어나면 재료 내부에 축적되어 있던 변형에너지(Strain Energy)는 표면형성에너지, 열 에너지, 격자변형에너지, 그리고 탄성파와 같은 여러형태의 에너지로 변환된다. 이 중에서 계측장치에 의해 가시적으로 검출된 탄성파를 AE(Acoustic Emission) 신호라고 하며, 탄성파 그 자체 그리고 탄성파를 검출하는 수단 및 해석을 통틀어 AE 기법이라 한다. 탄성파는 본질적으로는 물체의 구성입자들이

†주저자 · 책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

사방으로 진동하여 가는 현상이며, 이러한 진동이 압전 센서에 의해서 전기적 신호로 변환될 때 비로소 AE 신호로 검출되게 된다.

AE 기법은 측정의 용이함과 아울러 재료의 기계적 변형 및 파손 그리고 조성의 변화에 민감하게 변화하므로 기계시스템의 손상 감시 수단으로 널리 적용되고 있으며, 특히 최근에는 재료의 마찰 접촉시의 거동을 이해하기 위해 AE 모니터링이 점차 활발하게 진행되고 있다.

Dornfeld[1]는 AE를 이용한 절삭공구마멸을 모니터링한 연구에서 RMS(실효치 전압)전압의 장점 및 센서 신호와 절삭변수사이의 일정한 관계를 연구하였다. Kholodilov and coworkers[2]는 steel과 폴리머의 마찰, 마멸을 AE 측정을 통해 연구하였는데 그들은 총 AE count와 마멸 양에는 선형적인 관계가 있음을 보여주었다. Boness와 Hawthorne[3]은 마모량과 음향방출 에너지가 비례하고, 마찰시간이 증가하면 마찰계수가 상승하다 일정하게 되면, 음향방출 에너지도 비슷한 경향을 나타냄을 밝혔다. Wada[4]는 마찰면에 수직하중이 증가하면 마모가 급증하기 시작하는데 음향방출 에너지가 마찰계수보다 더 민감하게 반응하므로 마찰 및 마모상태를 진단하는데 효율적이라고 밝혔다.

본 연구에서는 마찰, 마멸 실험에서 AE 신호 특성을 파악하고 실시간으로 신호를 검출하여 마찰 거동 및 스퀴핑과 같은 표면손상과 AE 신호가 어떠한 관계가 있는지 연구하고, 손상 미연에 신호를 통해서 이상상태를 감시하고자 한다. 또한 RMS 신호를 이용하여 슬라이딩이 일어나는 metal 표면의 마멸 특징에 대해 논의하고 하중과 슬라이딩 속도를 변화시키면서 RMS 신호를 비교 분석할 것이다.

2. 실험방법 및 조건

2-1. 실험장치

본 실험은 Plint & partners사의 TE67 마멸 시험기를 사용하였다. 하중은 설정값에 따라 PC로 제어되면 공압 실린더로 부과된다. plate는 2.3 kw의 모터에 의해 회전운동을 직선운동으로 바뀌어 왕복 직선운동하는 형태이며, 속도센서에 의해 일정한 미끄럼 속도를 유지하였다. ball과 plate 사이의 수직력과 마찰력은 내장된 로드셀에 의해 측정되며, 로드셀의 측정 신호는 컨트롤러를 통해 PC로 전송되면, 측정된 마찰특성 변수값이 자동 연산되고 저장된다.

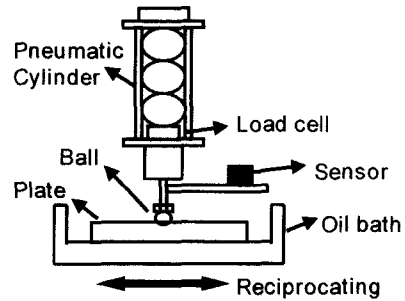


Fig. 1. Pin-on-reciprocator.

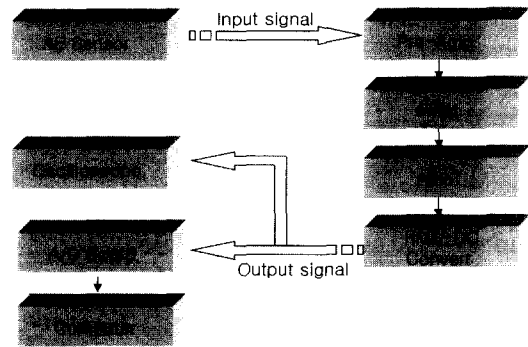


Fig. 2. Block diagram of AE signal.

AE 센서는 NANO 30(PAC)을 사용하였으며 고정지그를 제작하여 마멸 시험기에 부착하였다. 센서로부터 감지된 신호는 미약하므로 프리앰프(Pre-amplifier)와 메인앰프(main-amplitude)를 통하여 60dB 증폭하였다. 또한 외부로부터의 진동 및 잡음에 따른 잡음을 제거하기 위하여 100 KHz~1 MHz Band pass filter를 사용하였다. 이 감시장치에서 출력된 신호는 오실로스코프에 연결하여 실시간으로 감시할 수 있고, 12 비트의 분해능을 갖는 A/D 변환기를 사용하여 데이터를 획득하였다. Fig. 2 검출된 AE 신호처리 과정을 보여준다.

2-2. 실험시편 및 방법

본 실험에서 사용된 플레이트는 기계 구조용강으로 많이 사용되어지는 SM45C를, 볼은 1/4 inch의 STB2 볼베어링을 사용하였다. 하중과 속도에 대한 AE 신호의 특성을 알아보기 위해 plate 모든 시편은 Ra=2 μm의 동일한 거칠기로 가공하였다. 모든 시편은 초음파 세척을 하고 아세톤으로 표면을 깨끗이 한 상태에서 실험을 시작하였다. 카이저 효과(Kaiser Effect)를 고려하여 한 plate당 한 조건에 대해 실험을 행했으며, 34

Table 1. Experimental conditions for silding tests

Material	SM45C(plate), Bearing steel(Ball)	
Test condition	normal load (sliding speed:1 Hz)	50,100,200,300,400[N]
	sliding speed (normal load:200 N)	1, 1.5, 2, 2.5, 3[Hz]

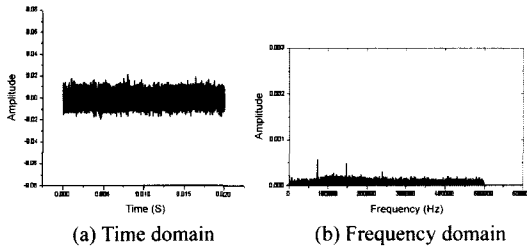


Fig. 3. AE raw signal with steady state.

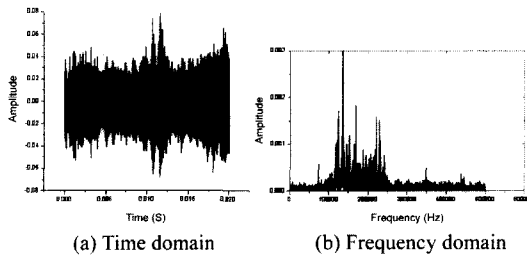


Fig. 4. AE raw signal with scuffing.

cST 점도를 가진 윤활유를 사용하였다.

하중과 속도를 변화시키면서 1 MHz의 샘플링으로 신호를 획득했으며 시간영역(time domain)과 주파수 영역(frequency domain)에서 나타내었다. 또한 RMS 신호를 검출하여 하중과 속도에 대한 영향을 측정하고 평가하였다.

Table 1은 실험조건을 나타내고 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 스키핑손상 감시

Fig. 3과 Fig. 4는 하중 400 N 슬라이딩 속도 1 Hz의 실험조건에서 받은 신호이다. Fig. 3은 안정화 된 상태에서 받은 원신호(raw signal)를 시간 영역과 주파수 영역에서 본 그래프이다. 신호는 진폭의 변화가 크지 않고 연속적인 AE 신호가 나오고 있으며 어떤 특징적인 주파수대역도 검출되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4는 스키핑 발생시의 신호이다. 시간 영역에서

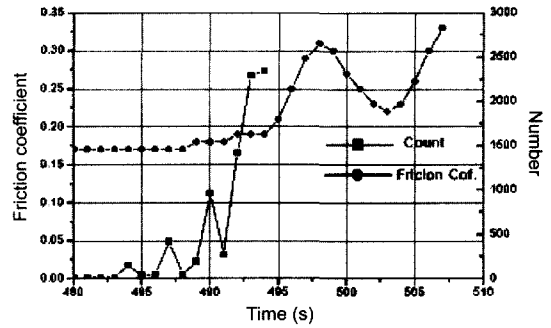


Fig. 5. Relation between friction coefficient & AE count.

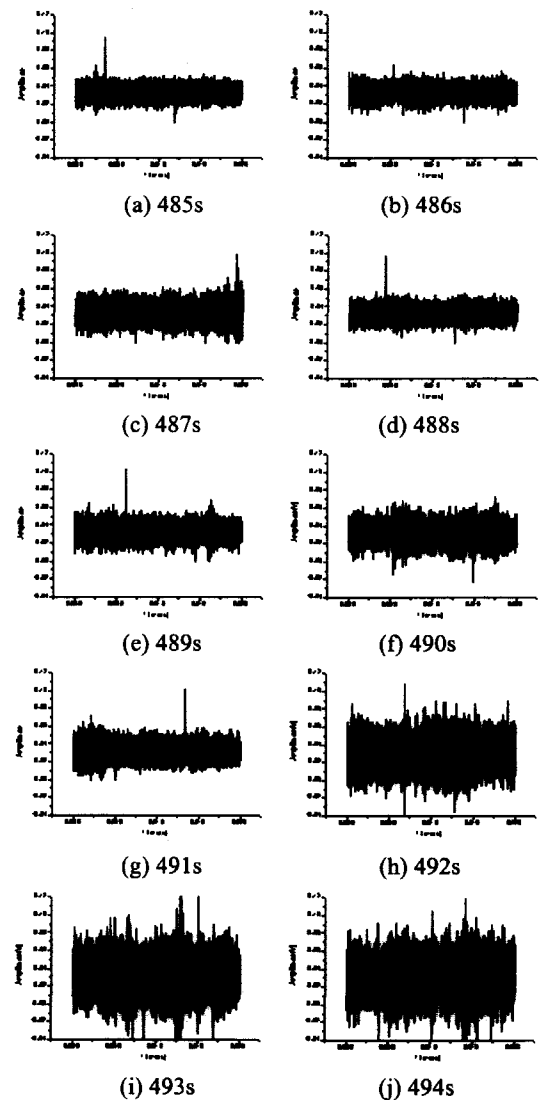


Fig. 6. Variation of raw signal.

진폭의 변화가 불규칙하며 간헐적으로 돌발적인 불연속 AE 신호를 볼 수 있으며 주파수 영역에서는 100~350 kHz 사이에 신호가 나오고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 AE 신호를 통한 스키핑 손상의 감시 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 5의 위쪽 그래프는 스키핑 손상 직전, 후의 마찰계수의 변화를 보인 그래프로서 약 495초를 기준으로 마찰 계수가 급격히 증가해 스키핑 손상을 예상할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 그래프에서 스키핑 발생직전 10초 동안의 AE 원신호를 1초 간격으로 20 ms씩 도시한 그래프이다. 정상적인 작동에서는 연속형 AE 신호를 보이다가 갑자기 정상적인 작동에서 벗어나면서 AE 원신호의 진폭이 커지고 돌발형의 AE 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5의 아래그림은 Fig. 6의 결과 그래프에서 0.05 V의 기준치(threshold)를 정하고 기준치를 넘는 모든 진폭에 대해서 그 횟수를 세었다. 이 그래프에서도 역시 일정한 AE count를 갖는 신호들이 정상적인 작동을 벗어나면서 AE count가 급증하는 것을 볼 수 있다. 이 그래프와 마찰계수 그래프를 비교해본 결과 AE 신호가 마찰신호보다 더 민감하게 반응하며, 손상 미연에 신호가 검출되는 것을 확인할 수 있으며 AE 원신호의 진폭 및 count는 스키핑 손상의 감시에 매우 유용한 파라미터임을 알 수 있다.

3-2. AE RMS

앞절에서 논의한 스키핑 파손과 같은 분석에 있어서는 스키핑 발생시 돌발형 AE 신호가 주가 되고 따라서 AE 진폭이나 count와 같은 파라미터를 통해 파손 감시의 유용성을 보였다. 그러나 파손이전의 마멸과정(wear process)을 살펴보기 위해서는 실효치 전압(RMS)의 분석이 매우 유용할 수 있다.

Fig. 7은 하중 300 N, 슬라이딩 속도 1 Hz일 때 슬라이딩 시작부터 스키핑 파손에 이르기까지 RMS 신호를 도시한 그래프이다. RMS 신호는 마멸 메카니즘 발생에 대하여 상당한 정보를 가지고 있는데, 우선 정지해있던 두 물체가 슬라이딩 시작할 때 순간적인 피크가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 슬라이딩 시작되면서 최대 정지 마찰력이 운동 마찰력으로 바뀌면서 나타나는 현상으로 사료된다. 220 s에서 발생하는 증가는 본래 표면 돌기들의 초기 제거와 전체적인 소성변형에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 220 s 이후

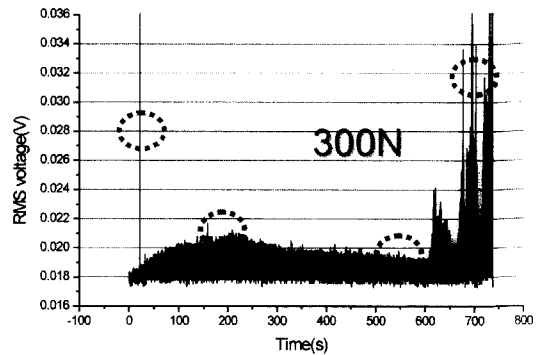


Fig. 7. AE RMS.

RMS 진폭은 계속 감소하다가 스키핑 직전에 다시 피크가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 본 실험에서 스키핑 직전까지는 RMS 진폭이 작아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 초기 돌기의 제거와 전체적인 소성변형을 겪고 난 후 표면이 연삭효과에 의하여 표면은 점점 smooth하게 되므로서 진폭이 작아지는 것으로 사료된다.

이러한 마멸 과정이 진행되다가 표면에 oil pocket 효과가 없어지게 되므로서 마찰열 상승에 의한 윤활막의 파괴로 인해 두 물체가 계속해서 직접 접촉이 일어나면서 스키핑이 발생하는 것으로 사료된다.

다른 하중조건과 속도의 조건에서도 RMS 신호는 스키핑 파괴까지 시간과 RMS 평균값의 차이만 있을 뿐 Fig. 7과 유사한 그래프로 그려지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 Table 1의 실험조건에 따른 AE RMS의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 수직하중과 슬라이딩 속도가 증가할수록 RMS 값은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 하중과 슬라이딩 속도가 증가하게 되면 실접촉면적과 소성변형영역

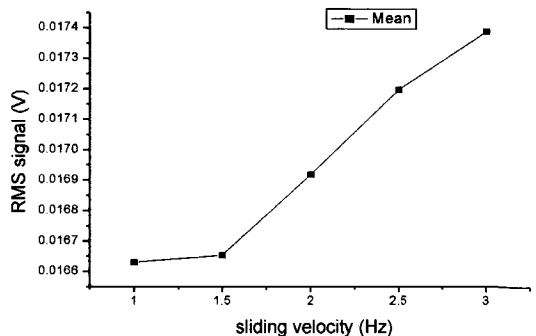


Fig. 8. Relation between speed & AE RMS.

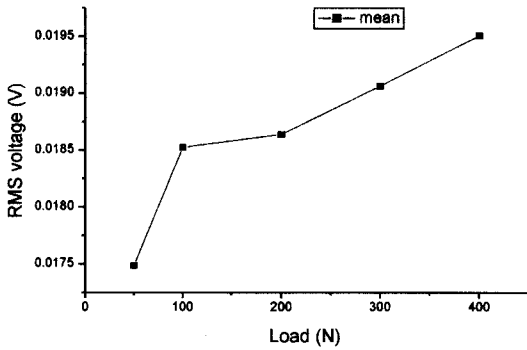


Fig. 9. Relation between load & AE RMS.

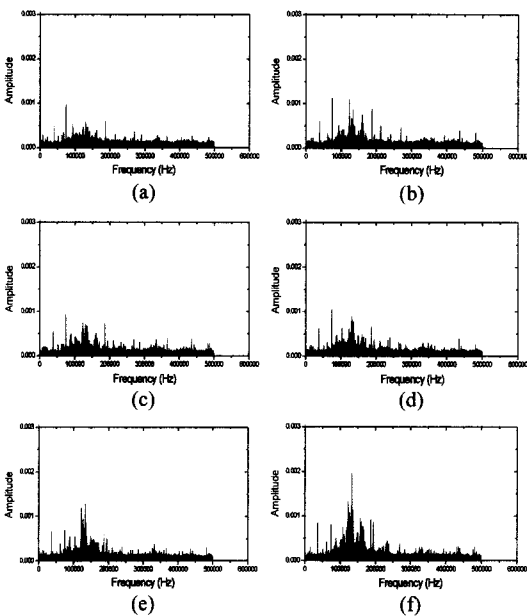


Fig. 10. Frequency domain of AE ((a) load 100 N (b) load 150 N (c) load 200 N (d) load 250 N (e) load 300 N (f) load 400 N).

의 증가와 아울러 제거된 돌기들의 영향에 따라 RMS 값이 증가하는 것으로 사료된다.

3-3. Frequency domain

Fig. 10은 주파수 영역에서 하중변화에 따른 분석 결과를 보여준다. AE 신호는 각각의 테스트동안 1 MHz 크기로 샘플링 되었다. 각각의 주파수 피크의 개수는 마찰, 마멸 신호의 복잡한 특징을 반영하고 있다. 주요 주파수들이 100~350 KHz 사이에서 나타남을 볼 수 있다. 이러한 결과는 이전의 연구들과 비슷한 대역으

로 나타나고 있다. 또한 하중이 증가할수록 100~350 KHz 사이의 진폭이 점점 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰, 마멸 실험에서 AE 신호를 시간영역과 주파수 영역에서 살펴보았으며 RMS 신호를 이용하여 wear process 중 마멸 발생 메커니즘에 대해 논의하였다. 또한 하중과 슬라이딩 속도를 변화시키면서 RMS 신호에 대한 변화를 비교, 분석하였다.

(1) AE 센서를 이용하여 마찰, 마멸 테스트에서 이상상태를 감시할 수 있음을 확인하였다.

(2) 이상상태 원신호 검출하여 시간 영역에서 본 결과 간헐적이고 폭발적인 돌발형 AE 신호가 발생하며 스키핑 발생직전 카운트율이 급격히 증가하는 것을 관찰하였다.

(3) 본 실험에서 RMS 신호가 220s의 증가이후 RMS 진폭이 감소하는 것으로 보아 스키핑 직전까지 표면은 smooth해지는 것으로 사료된다.

(4) 하중과 속도가 증가할수록 RMS 평균값은 증가하고, 이것은 실 접촉면적의 증가, 소성 변형영역의 확대, 제거되는 돌기들의 증가 때문으로 사료된다.

(5) 본 실험에서 신호를 주파수 영역에서 본 결과 대부분의 신호가 100~350 K 주파수 대역에서 신호가 나옴을 확인하였고, 하중과 속도변화에 따라 100~350 KHz 사이의 진폭이 증가하는 것을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30400-005-3) 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. E. Kannatey-Asibu and D. A. Dornfeld, A study of tool wear using statistical analyse of metal-cutting acoustic emission, *Wear* 76, pp.247-261, 1982.
2. A. I. Sviridenok, T. F. Kalmikova and O. V. Kholodilov, An acoustic emission study of the real polymer-metal frictional contact area, *Sov. J. Frict. Wear* 2, pp.91-94, 1981.
3. Boness, R. J. and Hawthorne, H. M., Acoustic Emission from the Unlubricated Sliding Wear of Steel and

- Silicon Nitride, Tribology Transaction 38, pp.293-298, 1995.
4. Wada, M., Observation of Friction and Wear Phenomena by Acoustic Emission, Japanese journal of Tribology. 35, pp.403-410, 1990.
 5. J. Hanchi and B. E. Klamecki., Wear process description based on acoustic emission, Journal of tribology 112, pp.468-476, 1990.
 6. R. J. Boness, S. L. McBride and M. Sobczyk, Wear studies using acoustic emission techniques, Tribology Internatinal 23, pp.291-295, 1990.
 7. S. Lingard and K. K. NG, An investigation of acoustic emission in sliding friction and wear of metals, Wear 130, pp.367-379, 1989.
 8. G. A. Sarychev and V. M. Shchavelin, Acoustic emission method for research and control of friction pairs, Tribology International 24, pp.11-16, 1991