

광섬유를 이용한 상시감시 시스템용 음향방출센서의 개발

남재영 · 정재현* · 최재봉 · 김영진**
(2000년 11월 5일 접수)

Development of a Fiber-Optic AE Sensor for On-Line Monitoring System

Jae-Young Nam, Jae-Hyun Chung, Jae-Boong Choi, and Young-Jin Kim

Key Words: On-Line Monitoring System(상시감시 시스템), Acoustic Emission(음향방출법), Optical Fiber(광섬유), Fabry-Perot Interferometer(Fabry-Perot 간섭계), RMS Voltage(rms 전압)

Abstract

The objective of this paper is to develop a fiber-optic acoustic emission(AE) sensor applicable to on-line monitoring systems which is suitable for long-distance signal transmission. An AE sensor was developed by use of a fiber-optic cantilever and an extrinsic Fabry-Perot interferometer(EFPI). The efficiency of signal processing was improved by driving the high frequency AE signals into the low frequency ones. In order to verify the developed sensor, the tensile and the pencil lead fracture(PLF) tests were performed including the experiment showing the Kaiser effect. From tests, AE signals were successfully detected in the elastic-plastic deformation range, especially higher signals at the crack propagation. The developed sensor was expected to be used for an on-line monitoring of crack propagation in mechanical systems.

1. 서 론

산업사회가 다양화되고 급격한 발전을 이루면서 발전설비와 같은 대형산업설비의 파손사고 발생 가능성이 높아지고 있다. 이와 같은 파손사고는 막대한 경제적 손실과 인명피해 외에도 환경오염 등의 사회 문제를 유발할 수 있다. 따라서 대형산업설비의 건전성 확보와 신뢰성 있는 진단 기술개발에 관한 사회적 관심이 집중되고 있다. 특히, 선진 각국에서는 대형산업설비를 진단하기 위한 상시감시 시스템(on-line monitoring system)

을 구축하고 수명평가 및 파손감시를 수행하고 있다. 수명 평가를 위한 기초적인 진단 방법으로는 변형률, 변위, 온도 측정법 등이 있으며 균열의 형태를 측정하는 방법으로 초음파 탐상법과 방사선 투과법 등이 있다. 파손 감시에 필요한 균열발생 및 균열 증가와 같은 재료 거동은 일반적으로 음향방출법을 이용하여 평가하고 있다. 음향방출법은 재료의 탄소성 변형시 발생하는 탄성파를 측정하는 방법으로서 주로 고온·고압의 압력용기나 배관을 대상으로 적용되고 있다.

음향방출신호는 주로 100kHz ~ 1MHz의 주파수 대역에서 검출되며 $10^{-10} \sim 10^{-13}m$ 정도의 변위를 측정할 수 있는 센서를 이용하여 검출한다.⁽¹⁾ 음향방출신호를 검출하는 센서는 전기용량형(capacitive type), 압전형(piezoelectric type) 및 광간섭형(laser interferometric type) 등이 있다.⁽¹⁾ 이 중에서 전기용량형 센서는 최소 $10^{-11}m$ 까지 측정

* 성균관대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

할 수 있으며 압전형 센서는 공진형과 광대역형에 따라 $10^{-12} \sim 10^{-13}m$ 까지 측정할 수 있다. 압전형 센서는 부착방식이 용이하고 작은 진폭에도 민감하게 반응하므로 가장 보편적으로 사용되고 있으나 전기 신호를 이용하므로 잡음 유입 가능성이 큰 것이 단점이다.

광간섭형 음향방출센서는 최소 $10^{-10}m$ 까지 측정할 수 있는데 절대 변위를 측정할 수 있고 신호의 왜곡을 최소화할 수 있으므로 센서 보정이나 비교적 큰 변위의 신호 검출에 적용되고 있다. 김 등⁽²⁾은 Michelson 간섭계를 이용하여 음향방출신호를 측정하였는데 광로차 보상 회로를 장착하여 저주파의 잡음을 감소시킨 신호를 측정하였다. 그러나 실제 산업 현장에서는 주변 잡음이 많고 센서와 통제실이 수 백 미터 이상 분리되어 있어 이와 같은 형태의 측정 장치를 적용하기는 어렵다.

이와 같은 단점을 보완한 것이 광섬유를 이용한 방법으로서 신호 전송시 감쇠를 줄이고 외부 잡음의 유입 가능성을 배제할 수 있으므로 원거리 전송에 효율적으로 적용될 수 있다. Carolan 등⁽³⁾은 Sagnac-interferometer를 이용하여 비접촉식으로 작동하는 음향방출센서를 구성하였는데 광섬유를 이용하여 원거리 전송과 고온 환경에 적용할 수 있도록 구성하였다. 그러나 측정장치가 매우 복잡하고 고가여서 실제 현장에 적용하기 위해서는 구성이 단순하고 원거리 전송에 적합한 음향방출센서가 절실히 요청되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상시감시 시스템에 적합하고 원거리 전송이 가능한 광섬유를 이용한 음향방출센서를 개발하고자 한다.

2. 음향방출센서의 원리

2.1 음향방출센서

Fig. 1은 음향방출센서의 원리를 나타낸 것으로서 Fabry-Perot 간섭계와 외팔보의 진동 원리를 이용하여 구성하였으며 기본 작동원리는 다음과 같다.

시편에서 발생된 음향방출신호는 센서몸체에 전달되어 광섬유로 구성된 외팔보의 공진을 발생시키고 광섬유로부터 출력되는 빛의 간섭현상을 일으킨다. 광간섭계로부터 출력된 신호는 광섬유를 통해 광검출기(photo-detector)로 전달되어 전기

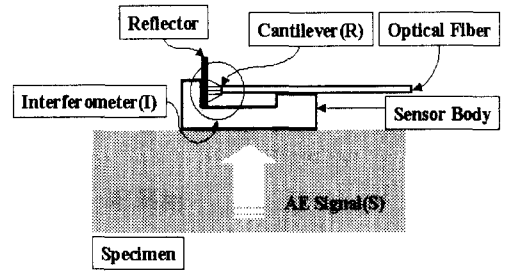


Fig. 1 A schematic illustration of the AE sensor

신호로 변환된다. 이 때 음향방출신호의 출력(A)은 음향방출신호원(S), 외팔보의 공진(R) 및 광검출기를 포함한 광간섭계(I)의 컨볼루션 적분(*)으로 표현할 수 있다.

$$A = S * R * I \quad (1)$$

식 (1)에서 음향방출신호가 센서몸체로 전달될 때 발생하는 감쇠나 시편에서 발생하는 모드는 고려하지 않았다.

2.2 음향방출신호원(S)

2.2.1 음향방출신호원

음향방출신호는 재료의 균열이 진전됨에 따라 균열에 작용하는 하중의 반대 방향으로 반발력이 발생하면서 방출되는데 힘의 평형이 이루어질 때까지 지속적으로 발생된다. 이 과정에서 미세한 균열의 발생은 급작스런 변형 에너지를 유발하고 재료의 기하학적 형상에 따라 다양한 형태의 탄성파를 발생시킨다. 이런 탄성파가 음향방출신호의 발생원이 되고 돌발형 신호를 발생시킨다. 그러나 음향방출신호의 발생에 관한 정확한 메커니즘은 밝혀지지 않았고 재료의 형상이나 탄소성 변형에 따른 초음파로 분류되고 있다.

2.2.2 음향방출신호의 모델

음향방출신호는 연필심 부러뜨림(pencil lead fracture; PLF)시험이나 유리모세관 파괴 시험 등을 통해 실험적으로 모사할 수 있다. 실제 음향방출신호와 PLF 시험의 차이점은 전자는 재료내부에서 방출되고 후자는 재료 표면에서 방출되는 것이다. PLF 시험은 센서를 보정하거나 모의실험을 수행하기에 간편하므로 센서개발단계에서 활

용되고 있다. 이와 같은 PLF 시험의 수학적 모델은 보통 반주기의 정현파 형태나 펄스파로 가정되는데⁽¹⁾ 본 연구에서는 하중 크기 F_0 , 펄스의 간격 t_0 인 펄스파로 가정하였다. 음향방출신호를 펄스파로 가정할 수 있는 것은 실제 재료의 탄소성 변형시 방출되는 첫 번째 파형만 원신호와 관계된 것이고 그 후에 검출되는 신호는 시편의 형상이나 압전센서의 공진 현상과 관련되기 때문이다. Caloran 등⁽³⁾의 실험에서도 광간섭계를 이용하여 음향방출신호를 측정하였는데 압전센서에서 발생하는 공진현상이 배제되어 단순한 돌발형의 파형이 측정되었다.

2.3 외팔보의 공진(R)

Fig. 1에서 센서 몸체에 전달된 음향방출신호는 광섬유로 구성된 외팔보의 공진과 광간섭을 발생시키는데, 이 때 공진 주파수는 외팔보의 길이와 광섬유의 물리적 성질로 결정된다. 이와 같은 공진 특성은 잡음을 제거하고 특정 주파수만을 여과하는 필터 기능을 포함하는데, 압전형 음향방출센서도 고주파인 음향방출신호에 민감하게 반응하고 저주파 대역의 외부 잡음을 감소시키는 필터 기능을 갖고 있다.

Fig. 2는 음향방출센서의 진동 모델로서 음향방출신호가 센서 본체를 통해 광섬유에 전달되는 과정을 단순화하기 위해 구성하였다. 이 때 등가 질량(M_{eq})과 등가 탄성계수(k_{eq})는 외팔보의 질량(m), 길이(l), 탄성계수(E), 광섬유 단면의 관성 모멘트(I)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(4,5)

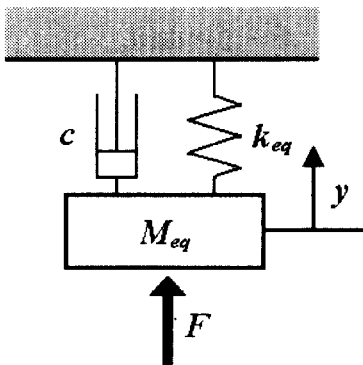


Fig. 2 A simplified vibration model for the optical fiber sensor

$$M_{eq} = 0.23m = 0.18\rho l d^2 \tag{2}$$

$$k_{eq} = \frac{3EI}{l^3} = \frac{0.15\rho d^4 v^2}{l^3}$$

여기서, ρ 는 광섬유의 밀도, d 는 광섬유의 직경, v 는 광섬유에서의 음속(wave velocity)을 나타낸다.

이 때 공진 주파수(ω_n)는 M_{eq} 와 k_{eq} 를 이용하여 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{eq}}} \tag{3}$$

식 (3)에 광섬유의 음속(5200m/s),⁽⁵⁾ 밀도(2340kg/m³), 직경(125 μ m)을 대입하고 외팔보의 길이를 2~10mm까지 증가시키면 공진 주파수는 23.3kHz에서 0.9kHz까지 감소된다. 감쇠계를 고려하더라도 외팔보의 고유 진동수 대역은 크게 변화하지 않으므로 센서는 약 1~10kHz의 공진 주파수를 갖는다.

또한 Fig. 2의 진동 모델에 펄스파형이 입력될 때 변위(y)는 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$y(t) = \frac{F_0 e^{-\xi \omega_n t}}{k_{eq} \sqrt{1 - \xi^2}} [-\cos(\omega_d t - \phi) + e^{\xi \omega_n t_0} \cos\{\omega_d(t - t_0) - \phi\}] \tag{4}$$

여기서, $\phi = \tan^{-1}(\frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}})$

여기서, k_{eq} 는 등가 탄성계수, ω_d 는 감쇠고유진동수, ξ 는 감쇠비, t 는 시간이다.

2.4 외팔보의 응답(S*R)

식 (4)는 음향방출신호에 대한 외팔보의 수직 변위이므로 실제로 광간섭을 발생시키는 수평 변위로 환산해야 한다. Fig. 3은 광섬유로 구성된 외팔보의 끝 부분을 단순화한 것으로 x , y 는 각각 외팔보의 수평 변위와 수직 변위를 나타낸다. 수평 변위와 수직 변위의 관계는 δ 의 값이 미소하면 $\sin\delta \approx \delta$, $\tan\delta \approx \delta$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

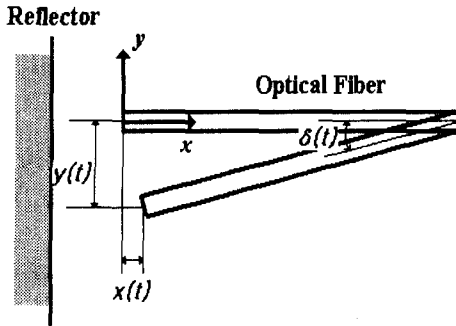


Fig. 3 The horizontal and vertical displacement of cantilever

$$x(t) = \frac{y(t)^2}{l} \tag{5}$$

식 (5)에서 반사판과 광섬유의 내각이 정확히 90° 이면 y의 양방향과 음방향 변위에 대해 모두 같은 변위를 나타낸다. 이와 같은 문제점은 센서를 제작할 때 광섬유 끝단을 y의 음의 방향으로 약간 처지게 함으로서 y의 변위에 대해 x의 변위가 증감하는 결과를 산출할 수 있다. 또한 반사판과 광섬유의 내각이 90° 이면 x의 y에 대한 미분 값이 0이므로 광간섭계의 효과를 산출하기 어려우나 끝단을 y의 음방향으로 처지게 고정함으로써 x의 미분 값을 증가시켜 센서의 민감도를 향상시킬 수 있다. 이 때 y의 변위가 매우 작다고 가정하면 y에 대한 x의 변위를 선형적으로 가정할 수 있으므로 상수 C₁을 이용하여 수직변위 y를 수평변위 x로 환산할 수 있다. 이 때 외팔보의 응답은 다음과 같다.

$$S \cdot R = x(t) = C_1 y(t) \tag{6}$$

2.5 광간섭계(l)

간섭 센서는 고전 광학 이론에서 제안되었던 간섭계를 이용한 것으로서 광섬유 고유의 기계적 특성과 간섭계의 특성을 함께 나타낸다.

일반적으로 광간섭계 센서는 Mach-Zehnder 간섭계, Michelson 간섭계 및 Fabry-Perot 간섭계를 이용하는데, 최근 들어 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 센서의 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. Fabry-Perot 간섭계는 다중광 간섭계로서 코어 부

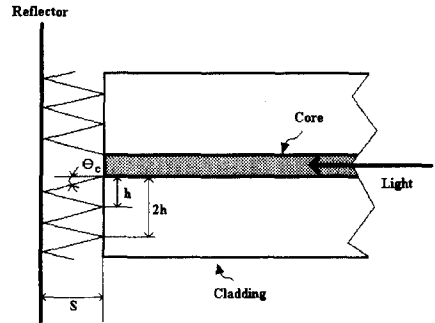


Fig. 4 Fabry-Perot Interferometer of optical fiber

분에 부분반사면(semi-reflective surface)을 형성시켜 반사 또는 투과된 빛의 간섭무늬를 얻게 된다. Fig. 4는 음향방출센서에서 간섭이 발생하는 부분을 확대한 것으로서 광섬유에서 출력된 빛은 광섬유 단면을 투과하여 반사면에서 간섭을 일으킨다. 공기층에서 빛의 손실을 고려하면 반사된 에너지(E_R)는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$E_R = E_0 r_1 + E_0 t^2 a \sum_{\beta=1}^{\infty} r_1^{\beta-1} r_2^{\beta} e^{(2\beta-1)\eta} \frac{a}{a + (2\beta-1)h} \tag{7}$$

(β = 1, 2, 3, ..., ∞)

여기서 E₀는 광원의 에너지, r₁은 광섬유의 반사계수, r₂는 반사면의 반사계수, a는 광섬유 코어의 반경, η는 빛의 위상차, h는 임계각(θ_c)과 갭간극(s)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = 2s \cdot \tan \theta_c \tag{8}$$

이때 광섬유의 길이를 미세조절하여 η를 1/2π 되는 곳에 고정하고 위상차가 충분히 작은 범위에서 움직인다고 가정하면 반사된 에너지는 다음과 같다.

$$\Delta E_r = C_2 \cdot \Delta \eta \tag{9}$$

여기서 C₂는 상수이다.

또한 EFPI 센서의 위상차는 외팔보의 수평 변위에 의해 다음 식과 같이 결정된다.⁽⁵⁾

$$\Delta \eta = \frac{4n\pi}{\lambda_0} \cos \theta_c \Delta x(t) \quad (10)$$

여기서 n 은 공기의 굴절률로 1이고, λ_0 는 광원의 파장이다.

또한 식 (10)의 우변에서 $\Delta x(t)$ 를 제외하고는 모두 상수이므로 $\Delta x(t)$ 를 제외한 나머지 상수를 C_3 로 가정하면 식 (9)와 식 (10)에서 다음 식이 성립한다.

$$\Delta E_r = C_2 C_3 \Delta x(t) \quad (11)$$

따라서 식 (1) 광간섭계(I)는 상수 C_2, C_3 로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 실험을 통해 위상차를 조절함으로써 선형적인 특성을 나타내도록 센서를 구성하였다.

2.6 음향방출센서의 응답

음향방출센서의 응답은 음향방출신호와 광섬유 외팔보의 공진 및 광간섭계의 컨볼루션 적분으로 나타나므로, 식 (1), 식 (6) 및 식 (11)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(t) = \frac{C^* F_0 e^{-\xi \omega_n t}}{Lk\sqrt{1-\xi^2}} [-\cos(\omega_d t - \phi) + e^{\xi \omega_n t_0} \cos(\omega_d(t - t_0) - \phi)] \quad (12)$$

여기서, C^* = 상수

2.7 음향방출센서의 개발

본 연구에서 개발된 음향방출센서는 광섬유의 외팔보의 진동 원리와 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 구성하였다.

센서 구성에 사용된 광섬유는 800nm에서 사용하는 단일모드 광섬유를 사용하였으며 물성치는 Table 1에 정리하였다. 광섬유로 구성된 외팔보의 길이는 9.4mm, 감쇠고유진동수 (ω_d)는 1.06kHz 이었다. 반사면과 광섬유 끝단의 간격은 초기 위치가 선형성을 나타내는 구간 중심에 최대한 근접하도록 미세 조정 후 에폭시로 완전히 고정시켰다. 또한 간섭계를 구성하는 반사면은 금박 코팅된 금속판을 이용하여 반사계수를 높였다. 반사면과 광섬유의 각도는 광섬유 외팔보의 처짐을 이용하여 90° 보다 작은 각을 이루도록 조절하였다. 이와 같이 조절하여 출력 진압 값이 미소 변위에 대해 선형적인 값을 갖도록 제작하였다.

또한 음향방출센서의 몸체는 시편과 같은 재질의 재료를 사용하여 임피던스가 같게 하고 몸체의 크기를 작게 구성하여 신호 감쇠를 줄였다.

3. 실험

본 연구에서는 개발된 센서를 검증하기 위해 PLF 시험과 인장시험을 수행하였다.

3.1 실험장치

Fig. 5는 개발된 음향방출신호 측정장치의 개략도로써 센서부와 신호 처리부로 구성된다.

음향방출센서부 구성에 사용된 광원은 최대 출력이 1.5mW, 파장이 635nm이고 입력 손실을 줄이기 위해 피그테일된 레이저 다이오드(pigttailed laser diode)를 이용하였다. 입사된 빛은 3dB의 연결손실을 갖는 양방향 연계기(2x2 커플러)를 통해 1:1로 분할된다. 분할된 두 경로 중 한 쪽은 센서와 연결되고 나머지 한 쪽은 파단(breakage)시켜

Table 1 Specification of the optical fiber

	Property
Mode Type	Single Mode
Density	2340 kg/m ³
N.A. (Numerical Aperture)	0.12
Core Diameter	5 μm
Cladding Diameter	125 μm

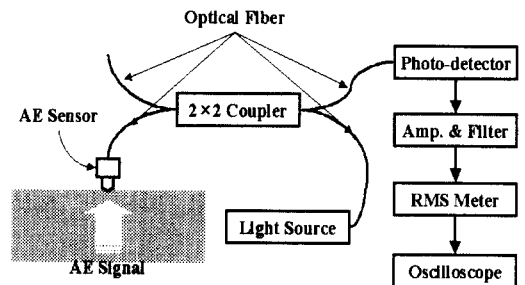


Fig. 5 A schematic diagram of AE measuring system

재반사되는 빛이 없도록 하였다. 간섭계를 거친 빛은 다시 양방향 연계를 거쳐 포토디텍터를 통해 전류신호로 변환된다.

신호 처리부에서는 포토디텍터를 통한 전류 신호를 저항을 통하여 전압으로 변환하고 증폭회로를 통해 100dB 증폭한 후 광섬유 외팔보의 공진 주파수와 일치하도록 설계된 대역형 여파기 (bandpass filter)로 필터링한다. 이 음향방출신호는 rms 전압계를 통하여 저주파의 rms 전압으로 변환되고 오실로스코프에 저장된다.

3.2 실험방법

3.2.1 PLF 시험

개발된 광섬유 센서의 성능을 검증하기 위하여 PLF 시험을 수행하였다. PLF 시험은 지름이 0.5mm인 샤프심을 이용하여 수행하였는데, 센서를 길이 200mm, 폭 200mm, 두께 10mm의 철판 위에 커플런트로 고정하였다. 광섬유 센서의 신호는 압전센서의 신호와 비교했는데, 광섬유 센서의 신호는 40dB 증폭하여 AC성분만을 측정하였으며 압전센서의 신호는 센서에서 출력된 신호를 증폭시키지 않고 측정하였다. 시험에 사용된 압전센서(BI025, Digital Wave사)는 사용 주파수 범위가 1kHz~1.5MHz인 광대역형을 사용하였다.

3.2.2 인장 시험

본 연구에서는 재료의 탄소성 변형시 발생하는 음향방출신호를 측정하기 위해 인장 시험을 수행하였다.

인장 시험은 두께 3mm, 폭 20mm, 길이 65mm의 SM45C강이었고 초기 균열의 발생위치를 고정하고 균열의 성장을 확인하기 위해 실패를 이용하여 2mm 깊이의 노치를 만들었다. 광섬유 센서는 노치에서 30mm 떨어진 곳에 커플런트와 클립을 이용하여 부착하였고 시험기를 정지시킨 상태에서 주변 잡음을 측정하였다. 인장 시험시 인장 하중과 음향방출신호의 rms 전압을 오실로스코프로 측정하였다. 인장 시험의 속도는 4mm/min이었고 rms 전압을 측정하는 샘플링 주파수는 250Hz 이었다.

인장 시험시 측정된 신호가 음향방출신호인지 확인하기 위해 압전센서를 부착하여 신호를 비교해 보았으며 카이저 효과(Kaiser effect)가 발생하

는지 확인하였다. 카이저 효과는 금속과 같은 균일한 미세구조를 가진 재료에서 발생하며 본 연구에서는 카이저 효과를 확인하기 위해 인장 시험 중 하중을 탄소성 영역인 3.5톤까지 증가시키고 만능 시험기를 하중제어 방식으로 변환하여 하중을 제거하였다. 하중 제거 후 다시 만능 시험기를 변위 제어로 변환하여 처음과 같은 속도로 하중을 증가시키면서 음향방출신호를 측정하였다. 광섬유 센서에서 출력되는 신호는 1.06kHz를 중심으로 대역형 여파기를 통과시킨 후 100dB 증폭하고 100~500kHz 대역폭의 여파기를 사용하여 신호처리를 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 PLF 시험

Fig. 6(a), (b), (c)는 각각 광섬유 센서, 압전센서 및 이론해의 주파수 분석 결과로서, Fig. 6(a)에서 광섬유 센서의 기본 진동수인 1.06kHz에서 첨두치가 검출되었으며, 광섬유로 구성된 외팔보의 특성상 기본 진동수의 3배인 3.1kHz에서 첨두치가 검출되었다. 또한 740Hz의 판파가 발생되었는데 이것은 Fig. 6(b)에서 압전센서로 측정된 결과와 일치한다. 또한 Fig. 6(c)에 제시한 이론해의 주파수는 1.06kHz로서 광섬유 외팔보의 기본 모드

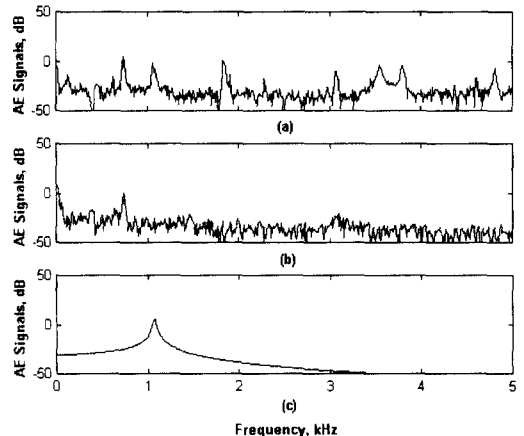


Fig. 6 The FFT results of PLF test

- (a) The FFT result of fiber-optic sensor signal
- (b) The FFT result of PZT sensor signal
- (c) The FFT result of the theoretical AE signal

를 나타낸다.

광섬유로 측정된 신호는 압전센서로 측정된 결과와 일치하였으며 수 kHz의 진동을 잘 나타내었다. 또한 압전센서는 일반적인 AE 신호측정 대역인 수 백 kHz에서 수 MHz의 고주파 신호에 민감하게 반응하여 80kHz 고주파 부근에서 침두치가 검출되었다. 광섬유 센서로 측정된 신호의 740Hz의 진폭이 4.9dB이고 압전센서로 측정된 신호의 740Hz의 진폭이 0.6dB로 나타났는데 광섬유 센서로 측정된 신호가 40dB 증폭되었음을 감안하면 약 35dB 정도 민감도가 떨어졌다. 이와 같이 민감도가 떨어지는 것은 증폭률을 높임으로서 보완할 수 있는데 압전센서로 측정된 신호가 잡음을 고려하면 최대 60dB까지 증폭할 수 있는 반면 광섬유 센서로 측정된 신호는 기본 모드의 주파수만 통과시키는 공진형 필터를 사용하므로 최대 100dB까지 증폭할 수 있다. 따라서 이와 같은 공진 특성을 이용하면 압전센서에 비해 낮은 민감도를 보완할 수 있다.

4.2 인장 시험

인장 시험을 수행하기 전에 인장 시험기의 유압 장치나 기타 소음으로 인한 잡음은 rms 전압계를 이용하여 측정된 결과 400mV이었다.

Fig. 7은 인장 시험시 하중과 광섬유 센서로 측정된 rms 전압 변화를 나타낸 것이다. 인장 시험을 시작하여 탄성 구간을 지날 때 미약한 음향방출신호가 검출되었으며 약 40초 부근에서 약간

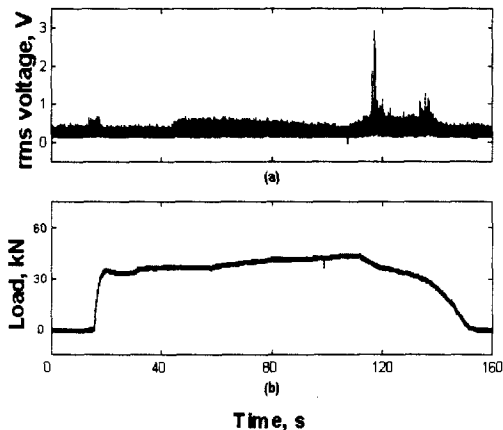


Fig. 7 The variation of rms voltage and applied load for tensile test

높은 진폭의 신호가 검출되기 시작하여 약 110초에 이르렀을 때 노치를 낸 부분이 급격히 늘어나면서 3V 이상의 rms 전압이 검출되었다.

Fig. 8은 광섬유 센서에서 측정된 신호가 음향방출신호인지 확인하기 위해 카이저 효과를 확인한 결과이다. 하중이 3.5ton에서 감소된 시점부터 음향방출신호는 발생하지 않았으며 하중이 3.5ton으로 다시 복원된 후부터 음향방출신호가 검출되어 노치의 균열이 증가하는 부분에서 높은 진폭의 신호가 출력되었다.

4.3 실험결과와 고찰

본 연구에서 개발한 음향방출센서는 광섬유 외팔보의 공진원리를 이용함으로써 수 kHz의 저주파 대역의 음향방출신호를 검출하였다. 이와 같은 저주파 신호는 시편의 기하학적 형상에 따라 결정되며 이러한 저주파 신호를 처리함으로써 고주파의 전기 잡음을 감소시킬 수 있고 증폭기와 여파기의 사용이 용이하며 신호를 저장할 때 샘플링 주파수를 낮출 수 있다는 장점이 있다. 또한 저주파인 기계잡음은 공진형 필터를 사용함으로써 감소시킬 수 있으며 기계 잡음이 광섬유 외팔보의 공진 주파수와 일치할 경우 광섬유 외팔보의 길이를 조절하여 설치환경에 적합한 센서를 구성할 수 있다.

인장시험시 압전형 센서로 음향방출신호를 측정하면 항복강도를 기준으로 높은 그 이상의 응력 하에서 rms 전압이 검출되는데⁽⁷⁾ 본 연구의

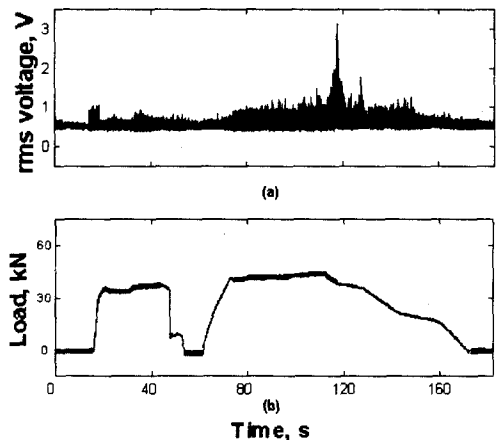


Fig. 8 The variation of rms voltage showing the Kaiser effect

실험결과에서는 인장강도 부근에서 가장 높은 rms 전압이 검출되었다. 인장시험시 음향방출신호는 탄소성 구간에서는 거의 검출되지 않으며 주로 탄소성 영역에서 발생한다. 탄소성 변형 초기에는 전위의 이동에 따른 연속형 신호가 발생하고 가공 경화가 시작되면서 돌발형의 신호가 발생한다. 본 연구에서 개발한 광섬유센서는 공진형 센서로서 돌발형 신호에 민감하게 반응하므로 압전 센서로 측정된 음향방출신호와 달리 인장강도 부근에서 가장 높은 민감도를 나타낸 것으로 판단된다.

압전형 센서는 고주파 대역의 신호를 민감하게 검출할 수 있으므로 재료의 특성 연구에 적용하기 용이하다. 그러나 현장에서 사용하기에는 잡음 제거나 신호 전송의 효율성이 낮다는 단점이 있다. 본 연구에서 개발한 광섬유 센서는 공진형 센서로서 재료의 변형과 관련된 주파수 대역별 특성을 분석하기는 어려우나 균열의 성장을 감시하기 용이하고 재료의 전반적인 특성 변화를 검출할 수 있다. 따라서 재료 연구나 현장 적용시 압전센서와 광섬유 센서를 상호적으로 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 신호의 원거리 전송에 효율적이고 상시감시 시스템에 적합한 음향방출센서를 구성하였다. 음향방출센서는 광섬유 외팔보의 공진과 광간섭계를 이용하여 구성하였다.

개발된 센서는 광섬유 외팔보의 공진을 이용하여 수백 kHz의 음향방출신호를 수 kHz의 저주파 신호로 변환하였으며, 광섬유를 이용하여 신호의 장거리 전송을 가능하도록 설계하였다.

PLF 시험 결과 공진형 압전센서 보다 약 35dB 정도 낮은 민감도를 나타냈으나, 공진형 센서의 특성상 100dB 이상 신호를 증폭하여 압전센서와 비슷한 민감도를 유지했다. 인장 시험 결과 개발된 음향방출센서는 탄소성 변형 구간보다 균열

증가시 민감하게 반응하였으며 카이저 효과도 잘 나타내었다. 향후 센서의 민감도와 내구성을 향상시키기 위한 연구가 필요하며 센서 부착 방식을 개선하기 위한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원과 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Scout, I. G., 1991, *Basic Acoustic Emission*, Gordon and Breach Science Approach, pp 137~139, pp. 22~27.
- (2) 김영환, 소철호, 권오양, 1993. "광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성과 신호검출," 비파괴검사학회지, Vol. 13 No. 4, pp. 32~40.
- (3) Caloran, T. A., Reuben, R. L., Barton, J. S. and Jones, J. D. C., 1997, "Fiber-Optic Sagnac Interferometer for Noncontact Structural Monitoring in Power Plant Applications," *Applied Optics*, Vol. 36 No. 1, pp. 380~385.
- (4) Rao, S. S., 1990, *Mechanical Vibration*, Addison Wesley, pp. 182~192.
- (5) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 1980, *Fundamental of Acoustics*, John Wiley & Sons, pp. 58~60.
- (6) 진병선, 김경진, 박현철, 황운봉, 박위상, 1996, "광섬유 센서를 이용한 복합적층보의 진동제어," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A), pp. 321~324.
- (7) Crocker, M. J., 1998, *Handbook of Acoustics*, John Wiley & Sons, pp. 644~648.