

중화학플랜트 손상감시를 위한 광섬유 음향방출센서의 개발

남재영, 정재현, 최재봉, 김영진
성균관대학교 기계공학부

Development of a Fiber-optic AE sensor for the Damage Assessment of the Heavy and chemical plants

J.Y. Nam, J.H. Chung, J.B. Choi, Y.J. Kim
Sungkyunkwan University

1. 서론

1970년대부터 건설된 국내 중화학플랜트는 설계 수명의 대부분이 소진되어 현재 설계수명을 연장하여 사용하고 있는 실정으로 파손사고 발생 가능성이 높아지고 있다. 이와 같은 파손사고는 막대한 경제적 손실과 인명피해 외에도 환경오염 등의 사회 문제를 유발하므로 중화학플랜트의 건전성 확보와 신뢰성 있는 진단기술개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 손상감시를 위한 기초적인 진단 방법으로는 변형률, 변위, 온도 측정법 등이 있고 균열의 형태를 측정하는 방법으로 초음파 탐상법과 방사선 투과법 등이 있다. 또한 실시간 손상감시에 필요한 균열 발생 및 성장과 같은 재료 거동은 일반적으로 음향방출법을 이용하여 평가하고 있다. 음향방출법은 재료의 탄소성 변형시 발생하는 탄성파를 측정하는 방법으로 서 주로 고온·고압의 압력용기나 배관을 대상으로 적용되고 있다.

음향방출신호는 주로 $100kHz \sim 1MHz$ 의 주파수 대역에서 검출되며 $10^{10} \sim 10^{13}m$ 의 변위로 방출된다. 음향방출신호를 검출하는 센서[1]의 형태는 전기용량형(capacitive type), 압전형(piezoelectric type) 및 광간섭형(laser interferometric type)이 있다. 이들 중 전기용량형 센서는 최소 $10^{11}m$ 까지 측정되며 압전형 센서는 공진형과 광대역형에 따라 $10^{12} \sim 10^{13}m$ 까지 측정된다. 압전형 센서는 부착방식이 용이하고 작은 진폭에도 민감하게 반응하므로 가장 보편적으로 사용되고 있으나 전기 신호를 이용하므로 신호 전송 중에 잡음 유입 가능성이 크고 고온의 환경에 적용하기 어려운 단점이 있다.

광간섭형 음향방출센서는 최소 $10^{10}m$ 까지 측정이 가능한데, 절대 변위를 측정하고 신호의 왜곡을 최소화할 수 있으므로 센서 보정이나 비교적 큰 변위의 신호 검출에 적용되고 있다. 김 등[2]은 Michelson 간섭계를 이용하여 음향방출 신호를 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 감

쇠를 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 중화학플랜트에 적합하고 원거리 전송이 가능한 광섬유를 이용한 음향방출센서를 개발하였다.

2. 광섬유를 이용한 음향방출센서의 원리

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

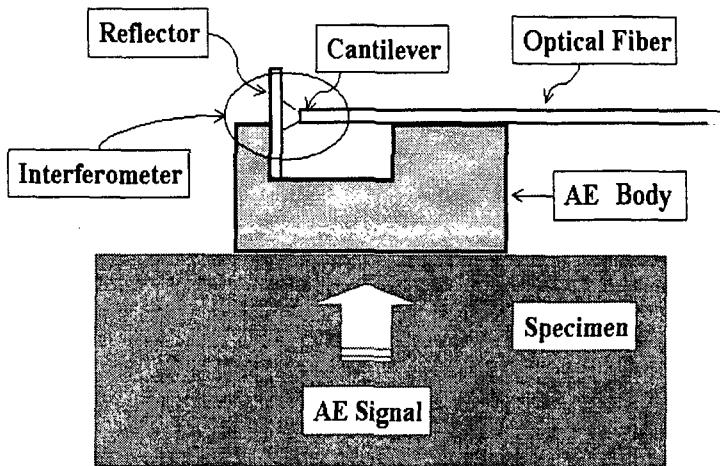


Fig. 1 A schematic diagram of the developed AE sensor.

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 전기신호로 변환된다. 이 때 음향방출센서의 출력(A)은 음향방출신호원(S), 외팔보의 공진(R) 및 광검출기를 포함한 광간섭계(I)의 컨볼루션 적분으로 표현할 수 있다.

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

3. 실험

3.1 실험장치

3.1.1 음향방출센서의 구성

본 연구에서 개발된 음향방출센서는 Fabry -Perot 간섭계를 이용하여 EFPI 센서로 구성하였다.

센서 구성에 사용된 광섬유는 800nm에서 사용하는 단일모드 광섬유를 사용하였으며 물성치는 Table 1에 정리하였다. 광섬유로 구성된 외팔보의 길이는 9.4mm로 감쇠고유진동수는 1.06kHz이었다. 반사면과 광섬유 끝단의 간격은 초기 위치가 선형성을 나타내는 구간 중심에 최대한 근접하도록 미세 조정 후 에폭시로 완전히 고정시켰다. 간섭계를 구성하는 반사면은 금박 코팅된 금속판을 이용하여 반사계수를 높였다. 반사면과 광섬유의 각도는 수직이 아니라 90° 에 가까운 각도를 나타내는데 광섬유 외팔보의 처짐을 이용하여 90° 보다 작은 각을 이루도록 조절하였다. 이와 같이 조절함으로써 출력 전압 값이 미소 변위에 대하여 선형적인 값을 갖도록 조절할 수 있다.

또한 음향방출센서의 몸체는 시편과 같은 재질의 재료를 사용하여 임피던스가 같도록 하였으며 가능한 몸체의 크기를 작게 제작(10×1.5×5mm)하여 신호 감쇠를 줄였다.

3.1.2 실험장치의 구성

Fig. 2는 개발한 음향방출신호 측정장치의 개략도로서 센서부와 신호 처리부로 구성된다.

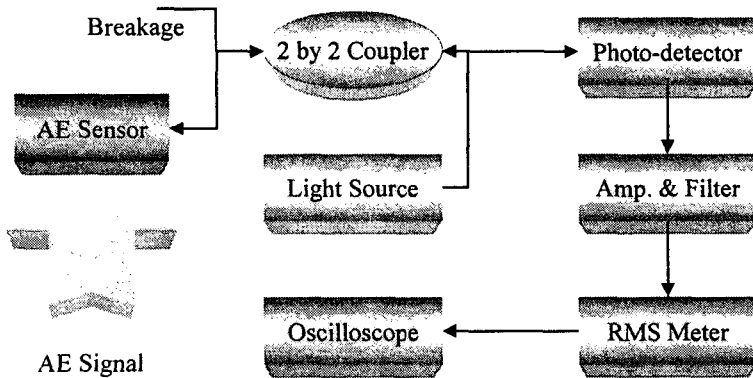


Fig. 2 A schematic diagram of AE measuring system.

음향방출센서부 구성에 사용된 광원은 최대 출력이 1.5 mW, 파장이 635 nm이고 전송 손실을 줄이기 위해 Pigtailed 된 레이저 다이오드를 이용하였다. 입사된 빛은 3 dB의 연결손실을 갖는 양방향 연계기(2×2 Coupler)를 통해 1:1로 분할하였다. 분할된 두 경로 중 한 쪽은 센서와 연결되고 나머지 한 쪽은 파단

(breakage)시켜 재반사되는 빛이 없도록 하였다. 간섭계를 거친 빛은 다시 양방향 연계를 거쳐 통신용 포토디텍터를 통해 전류 신호로 변환된다.

신호 처리부는 포토디텍터를 통해 전류로 인식된 신호를 저항을 통하여 전압으로 변환하고 증폭회로를 통하여 십만 배 증폭시킨 후 광섬유 외팔보의 공진 주파수로 설계된 대역형 여파기(bandpass filter)로 필터링하였다. 이와 같이 신호 처리를 수행한 후 rms 전압계와 오실로스코프를 이용하여 음향방출신호의 rms 전압을 측정하였다.

3.2 실험방법

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

인장 시험의 재료는 폭 3mm, 너비 20mm의 SM45C강이고 초기 균열의 발생 위치를 고정하고 균열의 성장을 확인하기 위해 신타를 이용하여 길이 2mm의 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 250Hz이었다.

인장 시험시 측정된 rms 전압이 음향방출신호인지 확인하기 위해 압전 센서를 부착하여 신호를 비교해 보았으며 카이저 효과(Kaiser effect)가 나타나는지를 확인하였다. 광섬유 센서에서 출력되는 신호는 1.06kHz를 중심으로 대역형 여파기를 통과시킨 후 100,000배 증폭시켰으며, 압전 센서에서 출력된 신호는 100배 증폭하고 100~500kHz 대역폭의 여파기를 사용하여 신호처리를 수행하였다. 카이저 효과는 금속과 같은 균일한 미세구조를 가진 재료에서 발생하며 본 연구에서는 카이저 효과를 확인하기 위해 인장 시험 중 하중을 탄소성 영역인 3.5ton까지 증가시키고 만능 시험기를 하중 제어 방식으로 변환하여 하중을 제거하였다. 하중 제거 후 다시 만능 시험기를 변위 제어로 변환하여 처음과 같은 속도로 하중을 증가시키면서 음향방출신호를 측정하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

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

Fig. 3(a)는 인장 시험시 하중과 광섬유 센서로 측정한 rms 전압 변화를 나타낸 것이다. 인장 시험을 시작하여 탄성 구간을 지날 때 미약한 음향방출신호가 검출되었으며 약 40초 부근에서 약간 높은 진폭의 신호가 검출되기 시작하여 약 110초에 이르렀을 때 노치를 낸 부분이 급격히 늘어나면서 3V 이상의 rms 전압이 검출되었다.

Fig. 3(b)는 광섬유 센서에서 측정된 신호가 음향방출신호인지 확인하기 위해 카이저 효과를 확인한 결과이다. 하중을 제거한 시점부터 음향방출신호는 발생하지 않았으며 하중이 3.5ton으로 다시 복원된 후 음향방출신호가 검출되어 노치의 균열이 증가하는 부분에서 높은 진폭의 신호가 출력되고 있다.

Fig. 3(c)는 인장 시험시 균열이 발생할 때 광섬유 센서와 압전 센서로 측정된 음향방출신호로서 1번 채널은 광섬유 센서로 측정된 결과이고 2번 채널은 압전 센서로 측정된 결과이다. 신호는 압전 센서에서 출력되는 신호를 기준으로 측정하였는데 압전 센서로 측정된 신호는 샘플링 주파수가 너무 낮아 정상적으로 측정되지 않았으나 중앙선을 기준으로 음향방출신호가 측정되었다. 광섬유 센서의 신호도 동시에 측정되었는데 이와 같이 신호가 동시에 측정된 경우도 있었으나 센서의 특성상 동시에 측정되지 않은 경우도 있었다.

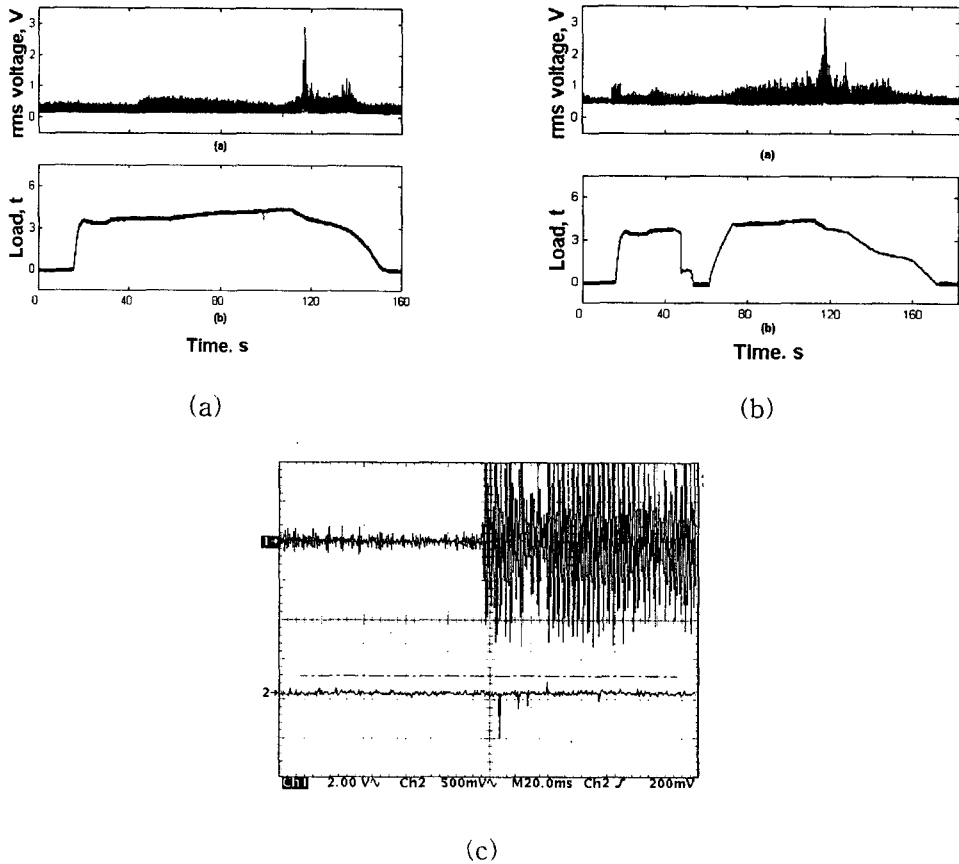


Fig. 3 (a) The variation of rms voltage and applied load for tensile test.
 (b) The variation of rms voltage showing the Kaiser effect.
 (c) The AE signals from the fiber-optic sensor and the PZT sensor.

본 연구에서 개발된 음향방출센서는 고주파의 음향방출신호를 광섬유 외팔보의 공진 원리를 이용하여 수 kHz 저주파수로 변환함으로써 신호처리의 효율성을 증대시켰다. 저주파 대역의 신호를 처리함으로써 증폭기와 여파기의 활용이

용이하고, 전기 잡음이 개입할 가능성이 적으며, 신호 측정시 샘플링 주파수를 낮출 수 있다. 또한 레이저의 출력을 수십 mW 에서 $1.5mW$ 로 낮출 수 있으며 관련 측정장비들의 경제성도 향상시킬 수 있었다. 신호대 잡음비를 높이기 위해 광섬유의 신호 전송시 손실이 적은 $1330nm$, 혹은 $1550nm$ 의 광원을 사용할 필요가 있으며, 센서의 민감도를 향상시키기 위해 센서 본체를 경량화하고 부착방식을 개선해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 중화학플랜트 손상감시를 위하여 신호의 원거리 전송에 효율적이고 고온에서 적용할 수 있는 음향방출센서를 구성하였다. 음향방출센서는 광섬유에서 발생하는 기계적인 공진과 공간섭계를 이용하여 구성하였으며 인장 시험을 이용하여 검증하였다.

인장 시험 결과 개발된 음향방출센서는 탄소성 구간보다 균열 증가시 민감하게 반응하였으며 Kaiser effect도 잘 나타내었다. 향후 센서의 민감도와 내구성을 향상시키고 고온 환경에 적용하기 위한 연구가 필요하며 센서 부착 방식을 개선하기 위한 연구가 필요하다.

5. 후기

본 연구는 KRISS의 “인위재해 방재기술 개발사업”중 “중화학플랜트 고온설비의 상시 안전수명 감시시스템 개발”과제의 연구결과 중 일부로서 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. I.G. Scout, "Basic Acoustic Emission", Gordon and Breach Science Approach, pp.137-139, pp.163-166
2. 김영환, 소철호, 권오양, "광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성과 신호검출", 비파괴검사학회지, Vol.13 No.4, pp.32-40(1993).
3. T.A. Caloran, R.L. Reuben, J.S. Barton, and J.D.C. Jones, "Fiber-optic Sagnac interferometer for noncontact structural monitoring in power plant applications", Applied Optics, Vol.36 No.1, pp.380-385(1997).