

구조물 안전진단을 위한 초음파능동형광섬유 센서의 개발 Development of Ultrasonic Active Fiber Sensor for Structural Health Monitoring

임승현*·이정률**·오일권†

Seung-Hyun Lim, Jung-Ryul Lee and Il-Kwon Oh

Key Words : Optical Fiber(광섬유), Ultrasonic Wave(초음파), Piezoelectric Patch (압전패치), Cure Monitoring (응고감시)

ABSTRACT

Fiber-guided sensor system using a generator and a receiver can detect the amplitude of load or pressure. However, this type of sensor can show some difficulties in detecting the location of damages and pressure loadings. To overcome this weakness of this type, the ultrasonic active fiber sensor, which has an integrated ultrasonic generator and sensing part, was developed in this study. By using this sensor system, the location of mechanical loads can be exactly detected. Moreover, the ultrasonic active fiber sensor is more cost-effective than an ultrasonic fiber sensor using two piezoelectric transducers which are used as a generator and a receiver, respectively. Two applications of the ultrasonic active fiber sensor are demonstrated: cure monitoring of lead and measurement of liquid level. Present results showed that the active fiber sensor can be applied for various environmental sensing.

기호설명

t = reflection rate of ultrasonic wave

Z = acoustic impedance

ρ = density

c = velocity of sound

1. 서론

현대 사회에서 사용되는 여러 가지 센싱 기술 중에 각광받고 있는 하나로서 광섬유 센서를 들 수 있다. 이는 특히 구조물 안전진단에 기본이 되는 진동[1]이나 그에 대한 결함[2] 또는 화학적 센서[3]로서의 역할 등으로 폭넓게 사용되고 있다. 이를 가능하게 하는 것은 광섬유 자체의 크기가 매우 작아 구조물에 탑재된 형태로 제작 하기가 용의하고 내 부식성, 내 화학성이 뛰어나며 이와 동시에 주변의 전자기적인 노이즈에 대해 자유로운 성질을 가지고 있는 등 기존의 센서에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문이다.

현대의 또 다른 센싱 기술중의 하나인 초음파 탐상 기법은 현재 실제 현장에서 폭넓게 이용되고 있다. 이는 특정 대상체에 대하여 원하는 시점 검사를 실시, 그 대상 자체에 악영향을 끼치지 않으면서 내부를 탐지 할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 장점으로 인하여 의료분야와 같은 바이오 메디컬적인 분야나 건물이나 교량 등과 같이 대규모 구조물에 대한 안전검사 분야 등에서 강력한 효과를 발휘 함으로서 현대 사회에서 널리 이용되고 있다.

최근 연구 동향 중 새로운 분야로서 위에 언급된

두 가지 장점, 즉 광섬유의 센싱 기술과 초음파 탐상의 장점을 통합하여 적용하는 여러 연구가 진행되고 있다. Yuan 등[4,5]은 fiber optic Fabry-Perot sensor(FFP)과 초음파 발진을 이용하여 콘크리트 구조물의 미소 균열을 탐지하는 연구를 수행 하였으며 Fukuma[6] 등은 FBG 센서에 초음파를 유도하는 방식인 long-period fibre grating sensor(U-LPFG)를 개발하였다. 또한 새로운 방법으로서 Oh[7]는 초음파 발진기 역할을 하는 압전패치로 발생된 초음파를 이에 연결된 광섬유를 통하여 발진, 이를 반대편에 설치된 검출용 압전패치를 통하여 감지하는 Fiber guided sensor system 을 개발하였다. 이를 통하여 광섬유 자체에 가해지는 미소 압력을 검출하는 방법과 이상류의 void fraction 을 감지 할 수 있는 방법을 제안 한 바 있다. 이와 같이 광섬유와 초음파가 통합된 감지 시스템은 광섬유가 가지는 구조물에 대한 내삽의 용이함과 전자기적 노이즈의 영향을 받지 않는 등의 장점과 초음파 탐상 기법의 장점을 동시에 취할 수 있다. 또한 이 방법은 기본적으로 초음파의 입력, 출력된 초음파 신호의 분석이 비교적 간편하기 때문에 고가의 광 소스 및 검출, 분석 장치 등을 이용한 기존의 광섬유 센서 방식에 비하여 시스템 구축에 대한 비용적 측면에 대하여 큰 장점이 있다.

기존에 제안된 두 개의 압전패치를 사용하여 초음파를 광섬유에 발진, 이를 검출 하는 방식의 센서는 위와 같은 장점을 가지고 있음과 동시에 그 한계점이 존재하였다. 이는 Fig. 1(a)과 같이 초음파 발진기와 수신기가 따로 존재 함으로서 수신기에서 검출된 초음파의 변화를 통해 광섬유에 가해진 압력이나 환경적 변화의 유무는 감지 할 수 있으나 변화가 발생한 부분에 대한 정확한 위치 판별이 불가능 하다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 발진기와 수신기가 통합된 형태의 초음파능동형광섬유 센서 시스템을 통하여 환경변화 발생을 감지 할 수 있을 뿐만이 아니라.

† 교신저자; 오일권교수

E-mail : ikoh@chonnam.ac.kr

Tel : (062) 530-1685, Fax : (062) 530-1689

* 전남대학교 기계공학과

** 전북대학교 항공우주공학과

반사되어 되돌아 오를 초음파의 시간계산을 통하여 그 위치까지도 정확히 판별 할 수 있다는 장점이 있다.

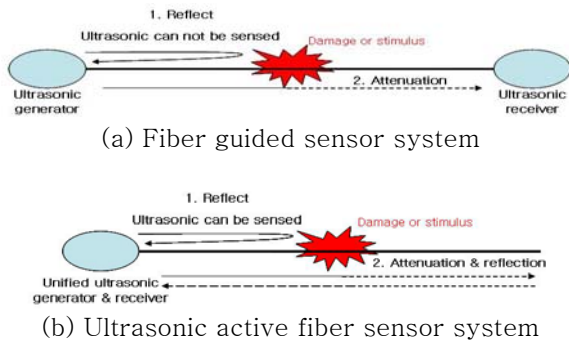


Fig. 1 Comparison about the schematic of the fiber guided sensor and ultrasonic active fiber sensor

본 논문에서는 위에 언급된 초음파능동형광섬유 센서 시스템을 제안 하였으며 이에 대한 기본적인 특징을 설명하고, 기존의 Fiber guided sensor system의 단점인 위치검출을 가능하게 하는 방법을 실험적으로 증명하였다. 또한 이 센서 시스템을 이용한 응용으로서 납땜의 응고 과정을 파악할 수 있는 방법, 그리고 액체의 수위를 감지 할 수 있는 방법 들을 제안하였다.

2. 초음파능동형광섬유 센서

2.1 초음파능동형광섬유 센서의 기본 원리

초음파를 이용한 광섬유센서의 기본 원리는 발진되는 초음파가 광섬유를 통하여 이동하는 동안 외부 환경 요인, 예를 들면 압력이나 유체의 접촉 등에 의하여 받는 신호의 크기가 감쇠되고 그 감쇠 량을 측정하여 압력이나 변화의 정도를 판별하는 원리이다[6]. 초음파능동형광섬유 센서는 발진과 감지를 역할을 동시에 수행하는 형태의 시스템을 구성 함으로서 압력 및 환경변화의 지점에 대한 반사파가 수신 가능함으로 인하여 그 위치를 측정이 가능하다. 이 실험을 위하여 Fig. 2 와 같이 실험을 구성하였다.

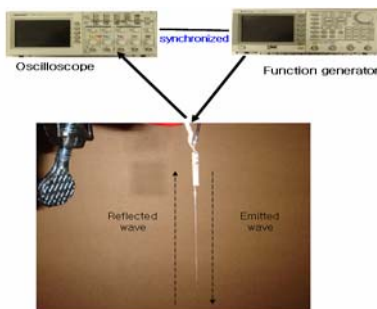


Fig. 2 Basic experimental setup for the ultrasonic active fiber sensor.

한 개의 10mm x 3mm x 0.4mm 크기의 압전패치 (C-82, Fuji Ceramics)에 광섬유(길이 1m, 지름 150um)를 부착 하였으며 오실로스코프와 함수발생기를 동기화 하여 압전패치에 연결하였다. 함수발생기에서 발생한 신호는 10Vpp 크기의 5cycle sine toneburst 형태로서, 135kHz 주파수로 압전패치를 통하여 광섬유를 따라 진행하게 된다. 이 신호는 광섬유의 끝 단에 도달했을 때 반사된다. 초음파의 반사율은 식(1)과 같이 정의된다.

$$t_{1 \rightarrow 2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad Z = \rho \cdot c \quad (1)$$

여기서 t, Z, ρ 그리고 c 는 각각 초음파의 반사율, 음향 임피던스, 밀도 그리고 음속을 뜻한다. 공기의 음향 임피던스는 $415 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이고, 광섬유의 재질인 silica glass 96% ($c=5583 \text{ m/s}$, $\rho=2181.17 \text{ kg/m}^3$) 라고 가정하였을 경우 음향 임피던스는 $1.217 \times 10^7 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이므로 초음파는 광섬유 끝 단에서 완벽히 반사된다. 반사된 초음파는 압전패치에 다시 감지되게 된다.

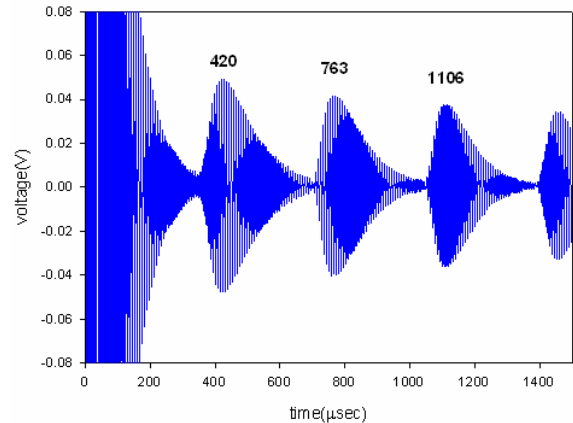


Fig. 3 Reflected waveforms in UAFS

Fig. 3 은 위 과정을 통하여 감지된 신호를 보여주고 있다. 이를 살펴보면 최초 반사되어 감지되는 신호와 2 번째, 3 번째 에 반사된 신호의 시간 간격이 동일함을 알 수 있다.

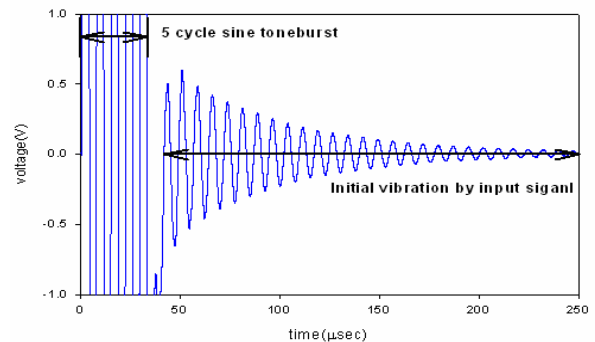


Fig. 4 Extended waveform until the 250μsec

Fig. 4 는 Fig. 3 의 0~ 250usec 구간을 확대하여 나타낸 그래프이다. 압전패치가 발진기와 센서의 역할을 동시에 수행하므로 감지되는 5cycle 의 신호를 제외하고 초기에 감지되는 신호는 입력된 신호에 의하여 압전패치 자체가 초기에 진동하는 크기를 나타낸 것이다. 이는 압전패치가 발생시킬 수 있는 신호의 크기를 대변한다고 할 수 있는데 초음파-광섬유 센서의 특성상 초음파가 이동하는 거리가 길어지면 길어 질수록 파의 크기는 줄어가므로 초기 신호의 크기는 광섬유 센서가 적용될 수 있는 최대 거리와 직결된다고 할 수 있다. 따라서 같은 입력 신호에서 최대 효율을 내기 위해서 공진 주파수를 검토하여 사용하는 방법은 필수 사항이라고 할 수 있다.

2.2 초음파동형광섬유 센서를 이용한 압력의 위치감지

실험과정은 클립을 사용하여 광섬유의 특정위치에 대한 국소 압력을 가하였을 경우 나타나는 반사파의 신호를 해석하여 위치를 계산하는 방법으로 진행되었다. 광섬유에 국소압력이 가해질 경우 진행하는 초음파는 압력의 부위에서 더 이상 진행하지 못하고 반사되게 된다.

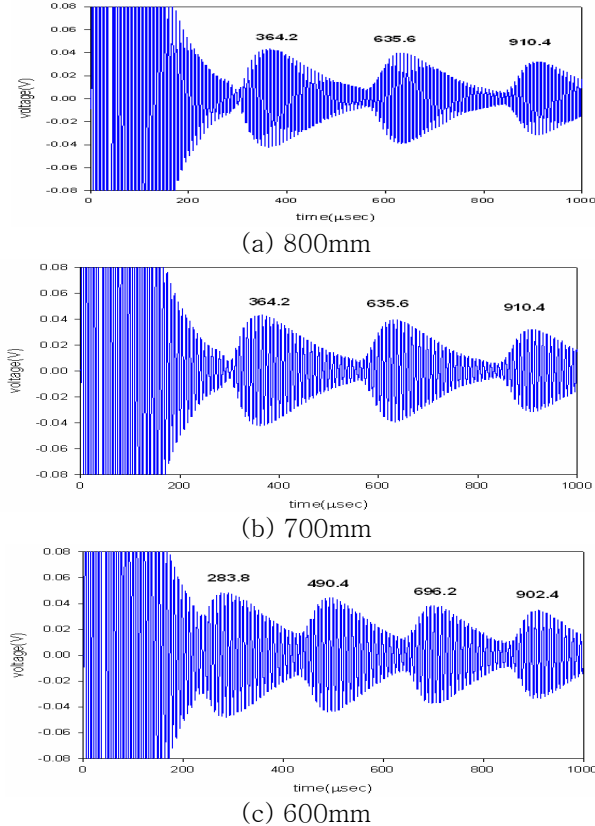


Fig. 5 Transverse deflection at the center of the shell for increasing transverse pressure
 국소압력은 각각 압전패치로부터 800mm, 700mm, 600mm 의 부분에 대하여 가하였다. 광섬유에서의 초음파가 진행하는 속도는 이전 실험을 통하여 측정된 바와 같이 2m 의 거리를 이동하는데 343usec 가

소요되었다. 이 자료를 바탕으로 추정된 위의 3 가지 경우에 대한 시간간격과 실험에서 측정한 시간간격을 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 압력을 가한 위치에 따른 시간간격 예상치와 실험치의 비교

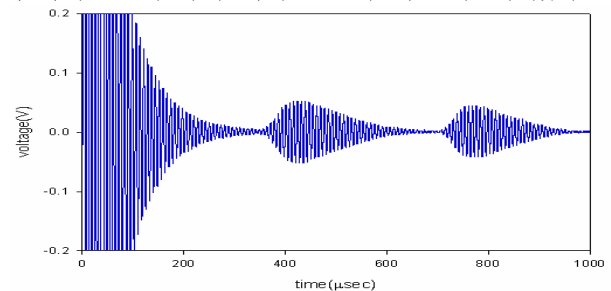
Location of pressure(mm)	800	700	600
Time interval (expectation, μ sec)	274.4	240.1	205.8
Time interval (experiment, μ sec)	273.1	246.2	206.2
Error(μ sec)	1.1	6.1	0.4

Table 1 에 나타난 바와 같이 실험에서 측정된 초음파 도달 시간 간격의 최대 오차는 6.1usec 이다. 이 오차를 거리정보로 환산하였을 경우 최대 17.7mm 의 오차를 보인다고 할 수 있다. 대부분의 구조물 안전진단의 경우에서 적용하는 그 대상체는 매우 크고 실험에서 가정한 바와 같이 미소범위의 국부 압력이 아닌 비교적 넓은 범위에 걸쳐 변화가 일어나므로 실험에서 나타난 수준의 오차는 크게 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 결론적으로 UAFS 를 이용한 변화범위 예측 결과를 통하여 구조물 안전진단에 적용할 경우 정확한 결함위치 정보를 제공 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

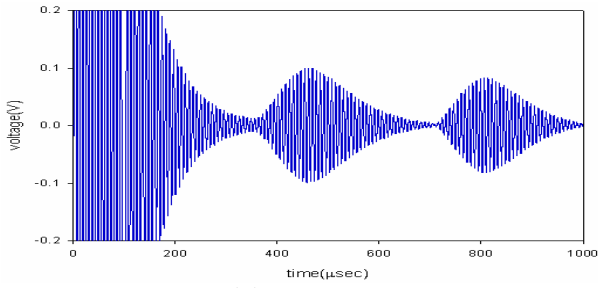
2.3 초음파동형광섬유 센서의 탐지거리 향상을 위한 방법

센서의 신호 크기는 실제적인 적용 상황에서 매우 중요하다. 특히 초음파-광섬유 센서의 경우 초음파의 진행 거리가 길수록 반사되어 감지되는 신호가 약해지므로 절대적인 신호 크기를 향상하는 것은 매우 중요하다. 기본적인 방법으로서 2.1 절에서 언급한 공진주파수에 맞추는 설정이 필요하지만 이와 더불어 다른 방법을 제안하고자 한다.

실험에서 사용하는 burst 파형은 그 발진 시간이 매우 짧다. 반면에 전기가 인가되어 정적 상태(steady state)적인 응답의 초음파가 압전패치에서 발생하기에는 일정 시간이 소요된다. 이와 더불어 압전패치에 가해지는 전기의 용량이 크면 클수록 초음파의 크기는 커지는 것은 자명하다. 따라서 burst 의 횟수를 증가 시킴으로써 발진되는, 그리고 그로 인하여 감지되는 초음파의 세기를 증가 시킬 수 가 있다.



(a) 5 cycles



(b) 13 cycles

Fig. 6 Reflected waveforms for various cycles of sine tone-bursts

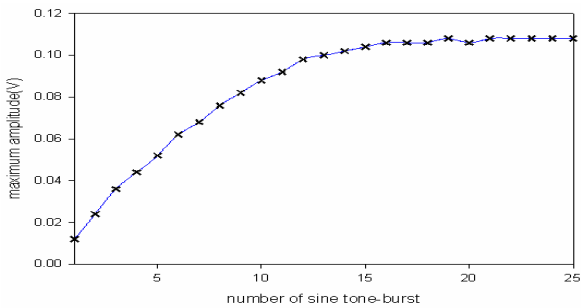


Fig. 7 Change of maximum amplitude according to the cycles of sine tone-burst

Fig. 6 은 8 과 13 cycle 의 burst 파형을 인가 하였을 경우에 대한 감지되는 파형의 크기이다. 그래프에서 확인 할 수 있듯이 cycle 수가 증가 함으로서 신호의 절대적인 크기가 증가 됨을 알 수 있다. 따라서 각 사이클 별로 나타나는 첫 번째 반사파형의 최대값을 측정하여 Fig. 8 에 나타내었다.

Fig. 7 을 통하여 알 수 있듯이 burst 의 수가 증가 하면 증가할수록 신호의 절대적 크기는 증가함을 알 수 있으며 이 값은 무한히 증가하는 것은 일정한 크기에 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 따라서 절대적 신호 크기의 증가를 위해 burst 의 횟수를 무한정 늘릴 필요는 없다. 또한 burst 의 횟수가 너무 증가하여 초음파의 발진 시간이 길어지면 반사되는 파가 되돌아오는 과정 중에도 발진을 계속하여 두 파가 중첩 됨으로써 신호 분석의 어려움이 발생할 수 있다. 결론적으로 센서가 적용되는 거리에 맞게 burst 횟수의 튜닝을 통하여 센서의 탐지거리 향상시킬 수 있다.

3. 초음파능동형광섬유 센서의 응용

3.1 응고감시로의 응용

응고과정은 현대의 공업과정, 예를 들면 복합재 적층을 위한 응고과정이나 전가 기판의 납땜, 혹은 건축물의 콘크리트 응고 등 빈번하게 발생되며 또한 이용되는 현상이다. 특히 대형의 적층 구조의 제작에서 온도와 압력의 조절을 통해 응고 과정을 자동

적으로 제어하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 응고 과정 중에는 미시적인 그리고 거시적 관점에서 물질상의 상당한 변화가 발생하므로[8] 최종 생산품의 균일한 품질을 위해서는 응고 과정에 대한 정확한 감시 과정이 필요하다. 광섬유 센서는 그 특징상 내삽에 의한 대상물의 변화가 극미하므로 이런 과정의 응용에 적합하다고 할 수 있다. 따라서 개발된 초음파능동형광섬유 센서의 응고과정 감시를 위한 방법으로 적용해 보았다.

이미 알고 있는 바와 같이 초음파-광섬유 센서는 광섬유에 접촉된 환경의 변화를 받는다. 그 중에서도 가장 민감한 것이 바로 주변 물질의 감쇠계수인데 이 값이 크면 클 수록 광섬유를 진행하는 도중에 손실되는 초음파 에너지의 값이 크다. 또한 주변 물질이 액상일 경우 고상일 경우에 비하여 연성(coupling)정도가 크기 때문에 에너지의 손실은 더욱 크다고 하겠다. 따라서 초음파 광섬유 응고의 과정을 감지하기에 아주 적합하다고 할 수 있다.

실험 과정은 Fig. 8 과 같이 소량의 땀납을 200°C의 전열 관 위에 올려 액화시킨 후 1m 길이의 UAFS 광섬유를 그 중앙이 되는 500mm 의 지점에 접촉하였다. 그 후 온도를 낮춰가며 응고 과정 중 신호의 변화를 관찰하였다. 이 과정 중 땀납의 열에 의하여 초음파의 음속에 변화가 예상 되나, 접촉 부분이 매우 작고 광섬유의 재료인 silica glass 는 열전도율이 매우 낮으므로 그 영향은 무시하였다.

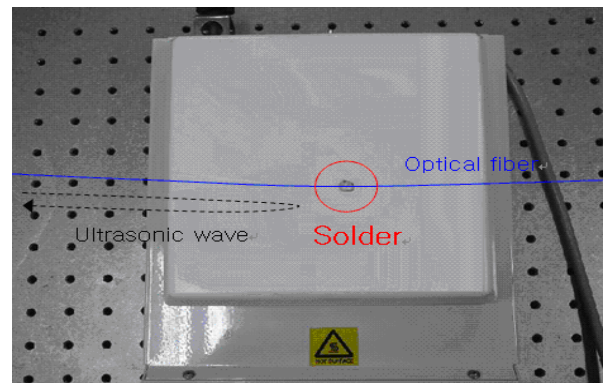
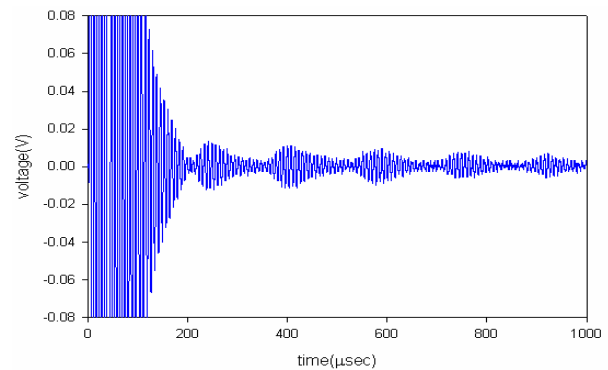
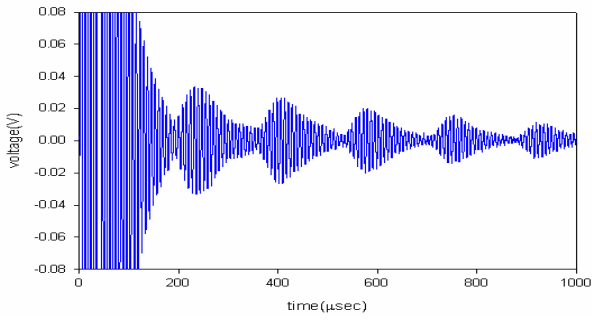


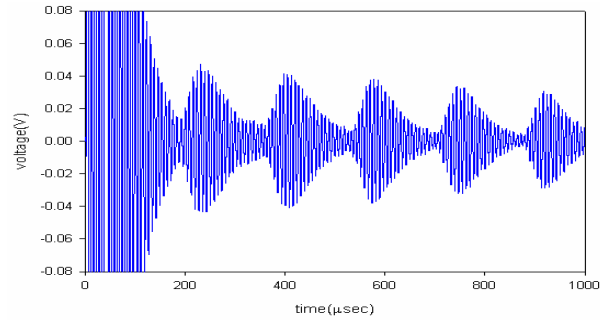
Fig. 8 Experimental setup for cure monitoring



(a) melted state



(b) curing state



(c) fully cured state

Fig. 9 Reflected waveforms from the solder under various states

Fig. 9 는 응고과정 중에 나타난 초음파 신호의 변화를 보이고 있다. (a)의 그림은 액상의 뿔납에서의 신호 반응으로서 감쇠계수가 크기 때문에 500mm 지점에서 반사되면서 이와 동시에 매우 낮은 크기의 신호를 보인다. 하지만 응고과정이 진행 될수록 그 크기는 점점 증가하여 완전 응고가 되었을 경우 그 크기는 최고치를 보인다. 이전 실험의 Fig.5 와 비교해도 알 수 있듯이 반사되는 각 신호의 시간 간격은 500mm 지점일 경우를 보이며 완전 응고 시 그 신호의 크기 또한 국소압력을 가하였을 경우와 같은 결과를 보인다. 결론적으로 응고지점의 위치는 각 반사신호의 시간간격 계산을 통하여 알 수 있으며 응고의 진행 상태는 초음파가 도중에 완벽히 차단되어 반사되었을 경우에 대비하여 그 진행 상태를 알 수 있다. 따라서 초음파능동형광섬유 센서는 응고 과정을 감시 하는 데에 매우 적합한 방법이라고 할 수 있다.

3.2 액체 수위의 측정

일반적으로 액화가스가 저장되어 있는 탱크의 경우 압력 게이지를 통하여 그 양이 측정된다. 그러나 고압의 탱크의 경우에 게이지 시스템에 큰 부하가 걸리게 되고 이는 시스템의 안정성에 문제를 가져온다. 즉 게이지 방식이 아닌 액화가스의 수위를 직접적으로 측정이 쉽게 가능하다면 안전한 특정시스템을 구성할 수 있는데 고압의 탱크 상황에서 이를 단순하게 구현하기란 쉽지 않은 문제이다. 따라서 이와 같은 대처 방법으로 초음파능동형광섬유 센서를 적용하여 액체의 수위를 측정하는 실험을 수행 하였다.

광섬유 주변 환경의 차이에 따라 감지되는 신호의 크기는 크게 변하며 특히 주변이 액상일 경우에 그 감쇠량은 매우 크다고 언급하였고 또한 간접적으로 응고감시 실험을 통하여 보인 바 있다. 따라서 Fig.10 과 같이 메스 실린더에 광섬유를 설치하고 물을 부어 그 양을 늘려가며 초음파 신호의 변화를 관찰하였다.

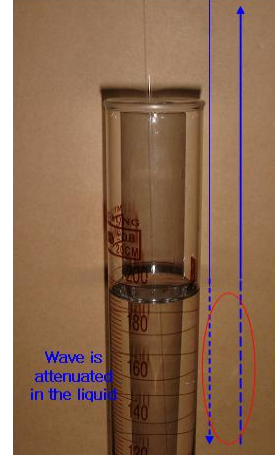


Fig. 10 Liquid level measurement using ultrasonic active fiber sensor.

신호 관찰은 초음파의 첫 번째 와 두 번째 반사 신호의 피크 값을 취득하였으며 이를 종합하여 Fig.11 에 나타내었다.

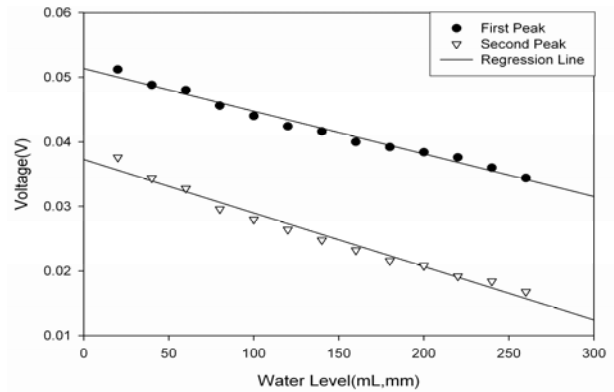


Fig. 11 Sensed voltage according to the change of liquid level

실험결과로서 감지된 초음파 신호는 수위가 올라감에 따라 성형적으로 감소함을 알 수 있으며 이는 광섬유에 접촉된 액체의 양이 많아 질 수록 감쇠되는 초음파 에너지의 양이 크기 때문이다. 위와 같은 결과로 액체의 수위 측정에 대한 가능성을 확인하였으며 초음파능동형광섬유 센서 자체로서 국소압력 응고상태 확인 등의 구조물 안전진단의 다 기능적 역할이 수행 가능하므로 철저한 안전성이 필요한 저장탱크의 응용에도 적합하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 구조물 안전진단을 위한 초음파 능동형광섬유 센서 시스템을 새롭게 제안하였다. 초음파가 광섬유를 통하여 발견하였을 경우 도중의 환경 변화나 압력에 따라 감쇠 또는 반사가 된다. 이 신호의 측정을 통하여 주변환경 변화 및 압력의 유/무를 확인 할 수 있다. 또한 국소 압력에 대하여 반사되는 파의 시간 간격의 측정을 통하여 그 위치를 정확히 판별 할 수 있다는 것을 증명하였으며 이를 통하여 구조물 안전진단에 대한 응용 가능성을 보였다. 또한 이 시스템의 중요한 성능 중의 하나인 탐지거리를 증가시키기 위한 방법으로서 burst 횟수를 늘리는 방법을 제안하여 탐지거리에 맞는 적절한 burst 횟수의 선택이 중요함을 보였다. 이 센서 시스템을 적용한 예로서 응고과정 감시와 액체의 수위를 측정하는 실험을 수행하였으며 각 응용실험에 따라 도출된 결과를 분석함으로써 의도하였던 역할을 충분히 할 수 있음을 증명하였다. 초음파능동형광섬유 센서는 본 논문을 통하여 밝힌 바와 같이 다기능적인 센서의 응용이 가능하므로 구조물 안전진단의 여러 분야에 응용이 가능하다고 할 수 있다.

후 기

본 논문은 전남대학교 BK 사업단 지능형기계시스템 사업단에 의하여 지원 되었음

참고문헌

- (1) Jianjun Ma and Anand Asundi, 2001, "Structural Health Monitoring using a Fiber Optic Polarimetric Sensor and a Fiber Optic Curvature Sensor-static and Dynamic Test", Smart Materials and Structures, Vol.10, pp.181~188.
- (2) Nobui Takeda, 2002, "Characterization of Microscopic Damage in Composite Laminates and Real-time Monitoring by Embedded Optical Fiber Sensors", International Journal of Fatigue, Vol.24, pp.281~289
- (3) Jie Lin, 2000, "Recent Development and Applications of optical and Fiber-Optic pH Sensors", Trends in Analytical Chemistry, Vol.19, No.9, pp.541~552
- (4) Libo Yuan, Li-min Zhou and Wei Jin, 2004, "Long-gauge Length Embedded Fiber Optic Ultrasonic Sensor for Large-scale Concrete Structure", Optics & Laser Technology, Vol.36, pp.11~17
- (5) Libo Yuan, Li-min Zhou and Wei Jin, 2005, "Detection of Acoustic Emission in Structure using Sagnac-like Fiber-loop Interferometer", Journal of Sensors and Actuators A, Vol.118,

pp.6~13

- (6) Norimichi Fukuma, Kenji Kubota, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha, 2006, "An Interrogator for Fibre Bragg Grating Sensors Using an Ultrasonically Induced Long-Period Optical Fibre Grating", Measurement Science and Technology, Vol.17, pp.1046~1051
- (7) Il-Kwon Oh, Seung-Hyun Lim, Jung-Ryul Lee, and Fu-Kuo Chang, 2008, "Fiber Sensor Based on Piezoelectric Ultrasonic Wave", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 19, No. 3, pp.299~304
- (8) B.Mitra, D.J. Booth, 1998, "Remote Cure Monitoring of Epoxy Materials using Optical Techniques", Journal of Ultrasonics, Vol.35, pp.569~572