

초음파-광섬유 센서의 개발과 그 응용 Development of Ultrasonic-Optical Fiber Sensor and its Applications

임승현† · 오일권*
Seung-Hyun Lim, Il-Kwon Oh

Key Words : Optical Fiber(광섬유), Ultrasonic Wave(초음파), Piezoelectric Transducer(압전 변환기), Two Phase Flows(이상류)

ABSTRACT

The outstanding mechanical property of optical fiber and the merits of acoustic emission sensing technique are unified for novel sensor system. The generated ultrasonic wave from piezoelectric generator are propagated along the optical fiber and also sensed. The propagated wave can be influence by external pressure on the optical fiber or environmental circumstance. The optical fiber sensor using ultrasonic wave has advantages compare with existing sensor system. In this study, the sensitivity of the optical fiber sensor is experimentally investigated. As the applications of the optical fiber sensor system using piezoelectric ultrasonic waves, the point load on the optical fiber is measured and the monitoring system for the void fraction of two phase flows is developed. The experimental results show the linear relationship between sensed voltage and void fraction.

———— 기호설명 ————

- C_L = group velocity of longitudinal wave
- E = Young's modulus
- ρ = density
- f_r = resonance frequency of piezoelectric transducer
- Y_{11}^E = transversal elasticity under constancy of electric field
- σ = Poisson's ratio
- V = sensed voltage in optical fiber sensor
- VF = void fraction

1. 서론

광섬유를 응용한 센서 기술은 기존에 사용하고 있는 센서에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 다양한 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 광섬유의 기계적 특징은 가볍고 크기가 작으며 응답속도가 빠르고 외부의 전기적 노이즈에 대하여 독립적이며 또한 쉽게 부식이 되지 않는다. 이와 같은 특징은 구조물의 내부에 삽입된 형태의 센서나 화학적, 생물학적 센서에 응용하기에 적합하여 큰 규모의 구조물에 내삽되어 응력⁽¹⁾이나 진동

(2) 또는 손상⁽³⁾ 등을 감지하거나 화학물질에 대한 조성⁽⁴⁾을 판별하는 등 여러 분야에 걸쳐 다양한 응용이 가능하다.

현재의 센서 기술에 있어서 각광받고 있는 다른 하나는 초음파 진단기술이다. 초음파는 그 형태에 따라 종파(longitudinal wave), 횡파(transverse wave), 표면파(surface wave) 및 굴곡파(bending wave)로 나눌 수 있는데 이들은 그 형태에 따라 여러 가지 방법으로 응용되고 있다⁽⁵⁾. 초음파 진단기술에 있어서 파의 크기와 속도는 진단 대상의 상태를 파악하기 위한 중요 정보로 활용되는데 예를 들면 구조물에 가해지는 압력에 따라 파의 감쇠가 일어나거나 물체에 입력된 초음파 신호가 반사되는 시간의 차이를 이용하여 구조적 결함이 예상되는 위치를 파악 할 수가 있다⁽⁶⁾. 특히 이 방법은 구조물에 대하여 기계적인 결함을 발생시키지 않기 때문에 현대 사회에서 비 파괴 검사 방법의 하나로 폭넓게 이용되고 있다.

결론적으로 우리의 관심은 앞서 언급한 두 가지 기술의 장점을 통합하는 것으로서, 센서의 능력에 관하여 초음파 진단기술의 장점과 광섬유의 뛰어난 기계적 특성을 통합하여 하나의 센서 시스템을 구현하는데 그 목표가 있다. 따라서 본 연구에서는 광섬유를 초음파가 진행하는 도파관으로 사용 함으로서 두 가지 장점의 통합을 꾀하였다. 초음파의 발생과 감지를 담당하는 압전 변환기 두 개가 각각 광섬유의 끝 단에 연결되어 있고 초음파를 발생시키고 광섬유를 따라 진행한 초음파를 감지하는 형태의 센서 시스템을 구현 하였으며 이에 대하여 광섬유를 따라 진행하는 초음파의 속도

† 책임저자; 전남대학교 기계공학과 대학원
E-mail : karmax@hanamail.net
Tel : (062) 530-0076, Fax : (062) 530-1689

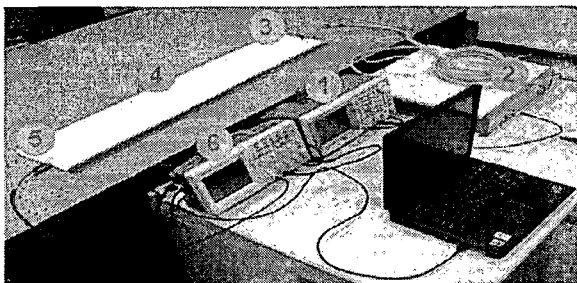
* 전남대학교 기계시스템 공학부

와 크기, 그리고 주파수 응답에 관한 관점으로 연구 하였다. 그리고 전체적인 센서 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 제안된 센서 시스템에 대한 감도와 특성을 파악하는 연구가 수행되었다. 또한 초음파의 가진에 의한 광섬유 센서의 기본적인 특성을 응용 할 수 있는 방법의 하나로서 국소 부의에 대한 압력 변화에 따른 반응을 조사하여 구조물에 내장되었을 경우에 외부 압력에 대한 감지할 수 있는 시스템의 가능성을 보였으며 이와 더불어 수평 기액 이상류를 모델링 하여 이를 감지할 수 있는 센서 시스템을 개발하였다.

2. 초음파 가진에 의한 광섬유 센서

2.1 실험장치

그림 1.a, 1.b 는 초음파 가진을 이용한 광섬유 센서에 대한 구성과 그에 대한 기본적인 원리를 보여준다. 이 실험에서 제작된 광섬유 센서는 10mm×3mm×0.4mm 크기의 bar type 압전 변환기 (Fuji Ceramics, c-82) 와 62.5 μm 의 피복을 가지는 지름 150 μm 의 광섬유가 사용 되어졌다. 광섬유는 초음파의 전달 시 모드변환이 일어나지 않고 종파형태의 초음파를 잘 전달 할 수 있도록 압전 발생기와 평행하게 부착되었다. 함수 발생기로부터 발진된 5-cycle 의 sine toneburst 파형은 앰프에서 100vpp 로 증폭된다. 이 신호는 압전 발생기로 전달되어 초음파를 발생시키고 이 초음파는 광섬유를 따라 전파된 후 반대편에 부착된 압전 감지기에 감지된다 함수발생기와 오실로스코프는 서로 트리거되어 신호의 발진시간과 수신 시간이 동기화 되어있다. 따라서 발생한 초음파의 시간 정보는 오실로스코프를 통하여 정확하게 측정된다.



- 1 Arbitrary function generator
- 2 PZT amplifier
- 3 Piezoelectric generator of ultrasonic wave
- 4 Optical fiber guide
- 5 Piezoelectric receiver
- 6 Digital oscilloscope

그림 1a. 기본적인 광섬유 센서 시스템의 구성

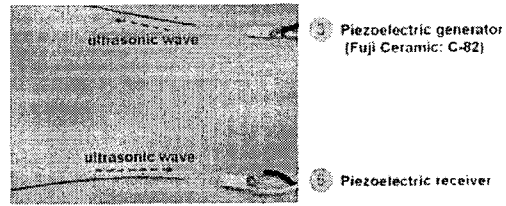


그림 1.b 광섬유를 따라 진행되는 초음파

그림 2.는 광섬유 센서 시스템으로부터 감지된 파형을 보여주고 있다. 첫 번째 파형은 초기에 발진되어 압전 감지기에 의해 감지된 파형이고 이 신호가 압전 감지기로부터 반사된 후 다시 압전 발생기에 의해 반사 된 파가 감지되어 두 번째 파형으로 나타난다. 이와 같이 전체적인 초음파의 반사는 압전 발생기와 감지기의 사이에서 반복적으로 반사되어 지속적으로 감지된다. 그림에서 보는 바와 같이 1.2m 의 거리를 지나 온 초기 파형의 시간과 양끝에서 두 번 반사되어 2.4m 를 지나 온 두 번째 파형의 시간은 두 배의 관계를 보인다.

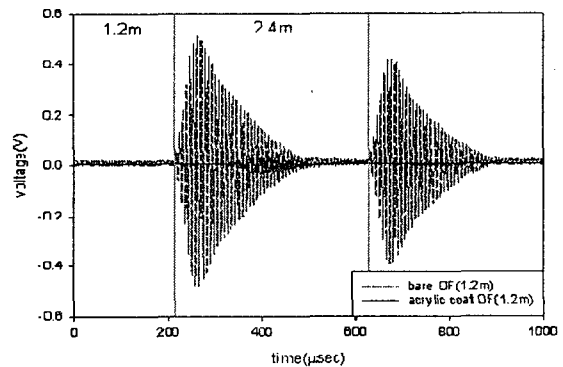


그림 2. 초음파 가진 광섬유에서 감지된 파형

고체상태인 원통형의 막대에서 초음파는 종파, 횡파 그리고 비틀림파의 형태로 나타날 수 있다. 이 중에서 비틀림파는 그림 1. 에서 보이는 바와 같이 압전 발생기와 광섬유가 평행하게 부착되어 있기 때문에 발생되기 어렵다. 광섬유 내에서 진행되는 종파의 균속도는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$C_L = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

여기서 C_L 은 종파의 속도를, E와 ρ 는 광섬유의 영계수와 밀도를 뜻한다. 위의 식은 광섬유와 같이 얇고 긴 막대 형태의 대상에 일반적으로 적용할 수 있다. 광섬유의 재질을 96%의 실리카 성분의 유리($E=68\text{GPa}$, $\rho=2181.176\text{kg/m}^3$)로 가정 했을 경우에 종파의 속도는 5583m/s 가 된다. 위의 실

험에서 1.2m의 광섬유를 지나 감지된 초기 파형은 215 μ s의 시간이 걸렸고 이에 계산된 5581m/s의 속도는 이론적인 계산과 일치함을 보인다. 초음파가 압전 변환기에서 반사될 때 모드 변환이 발생할 가능성이 있으나 같은 매질상에서 횡파의 군속도는 종파의 1/2 수준을 보이고 또한 반사된 파의 시간 간격이 첫 번째 파형의 시간 간격의 두 배로 일치한다. 또한 압전 변환기가 종파와 관련된 주파수로 가진 되고 자유 상태에 있는 유연한 광섬유에서는 횡파 형태의 초음파 전달이 부적합하므로 위 센서 시스템에서 관측된 초음파는 종파로 정의할 수 있다.

아크릴 코팅이 된 광섬유에서 감지된 초음파는 피복이 벗겨진 상태의 광섬유에 비해 그 속도가 느리며 신호의 크기도 훨씬 작은 것을 알 수 있는데 이것은 광섬유를 따라 진행하는 초음파가 그 주위에 접촉하여 둘러 싸고 있는 피복으로 누출됨과 동시에 그 속도에 대한 장애가 발생하기 때문이다. 따라서 센서의 감도는 피복의 두께가 얇을수록 유리하므로 우리는 이하에 기술된 실험에서 최고의 감도를 얻기 위하여 피복이 벗겨진 상태의 광섬유를 대상으로 실험하였다.

2.2 센서의 공진 주파수

초음파를 이용한 광섬유 센서에 사용되는 초음파는 압전 변환기에 의하여 발생 되므로 그 감도를 높이기 위해선 공진 주파수에 대하여 고려해야 할 필요성이 있다. 하단의 그림에 bar 형태의 압전 변환기에 대한 bending vibration(a) 과 length vibration(b)을 보이고 있다.

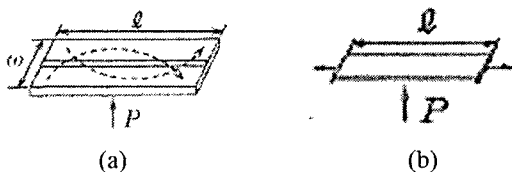


그림 3. 각 모드에 따른 진동의 형태

표.1 압전 변환기의 물성치(C-82, Fuji ceramics).

Y_{11}^E (Transversal elasticity)	$6.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
ρ (Density)	$7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
σ (Poisson's ratio)	0.34
$l \times w \times t$	$10 \times 3 \times 0.4 \text{ (mm)}$

위의 내용을 바탕으로 횡파를 발생시키는 bending vibration 과 종파를 발생시키는 length vibration 에 대한 공진주파수를 구하는 식을 각각 (2)와 (3)에

나타내었다.

$$f_r = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \cdot \frac{w}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{2}{(1+\sigma)}} \cdot \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}} \quad (3)$$

식(2)와 (3)에 의하여 얻어진 결과로서 횡파는 약 47kHz, 종파는 약 143kHz 의 공진 주파수를 갖는 것을 알 수 있다.

실험적인 공진 주파수를 구하기 위하여 이전에 언급된 실험구성을 바탕으로 40kHz 부터 200kHz 까지 1kHz 단위로 주파수에 따른 최대 전압의 크기를 조사하였다.

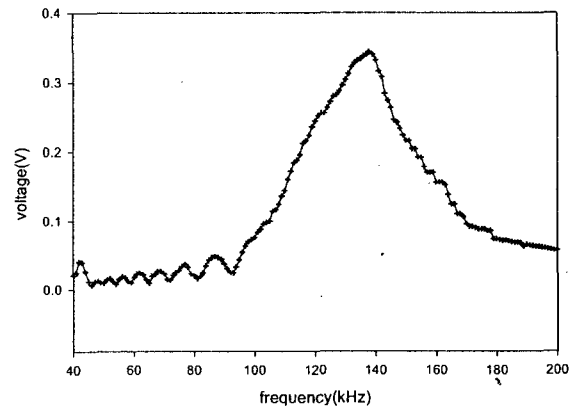


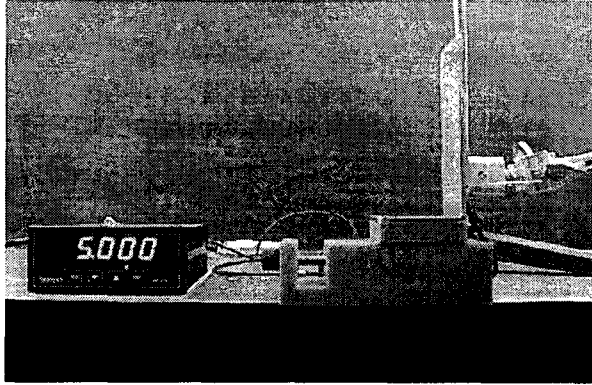
그림 4. 주파수에 따른 최대 전압의 크기

위 그림에서 보는 바와 같이 감지된 전압은 138kHz 에서 가장 큰 값을 가지며 이 주파수는 앞서 계산된 종파의 발생과 관련된 주파수와 일치함을 알 수 있다. 또한 42kHz 부분에서 또 다른 공진을 확인 할 수 있는데 이는 횡파의 발생과 관련된 주파수임을 알 수 있다. 결론적으로, 종파는 138kHz 에서 가장 잘 발생함을 알 수 있으며 이 결과에 따라 이 논문에서 실행한 실험에선 모두 138kHz 의 주파수를 사용하였다.

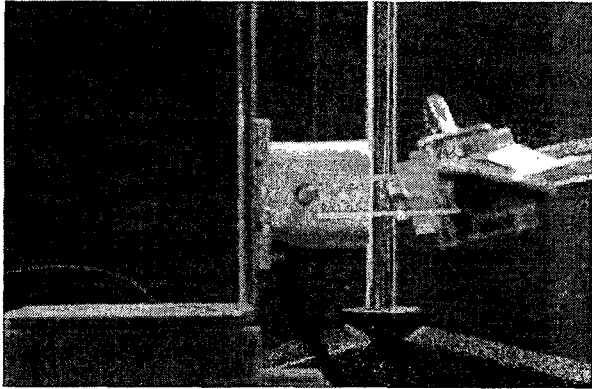
3. 압력의 변화에 따른 반응

광섬유를 따라 진행하는 초음파는 마치 그 형태가 호스에 따라 흐르는 물의 흐름과 같아 도중에 하중과 같은 외부 자극이 가해지면 그 진행이 원활하지 못하게 된다. 따라서 광섬유의 중간에 하중이 가해지면 압전 변환기에 의해 감지되는 신호가 줄어들게 된다. 이와 같은 개념에 의하여 초음파를 이용하는 광섬유 센서는 구조물에 걸리는 하중을 감지 할 수 있는 센서의 역할을 수행할 수

있다. 이에 관련하여 실험을 수행하기 위하여 그림 5.a, b에서 보이는 바와 같이 실험 장치를 구성하였다.



(a) 로드셀과 광섬유가 설치된 모습



(b) 확대된 그림

그림 5. 광섬유 센서의 하중감지 성능 측정을 위한 실험 구성

실험장치의 전반적인 구성은 그림.1 에서 언급한 바와 동일하며 광섬유에 가해지는 압력을 측정하기 위하여 위 그림에서 보이는 바와 같이 광섬유의 한 부분을 로드셀의 측정로드와 아크릴 막대 사이에 위치하고 로드셀을 우측으로 이동시켜 광섬유에 하중을 가하고 이때 가해진 하중의 값을 로드셀 인디케이터를 통하여 확인하였다. 가해지는 하중은 0.1gf 단위로 증가시켜 0.1gf 부터 3gf 까지의 범위에 대하여 광섬유 센서에 감지되는 변화를 측정하였다.

위에 설명한 실험을 통하여 측정한 데이터는 선형 회귀 분석법을 통하여 선형화 되었고 그 결과를 그림 6. 에 나타내었다. 정리된 결과에 의하면 광섬유에 가해지는 압력의 증가에 따라 광섬유 센서로부터 감지되는 신호의 크기가 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이 결과는 초음파를 이용하는 광섬유 센서가 실제 구조물에 삽입될 경우 넓은 범위에 걸쳐서 가해지는 외부의 하중을 효율적으로 감지 할 수 있는 가능성을 보여준다.

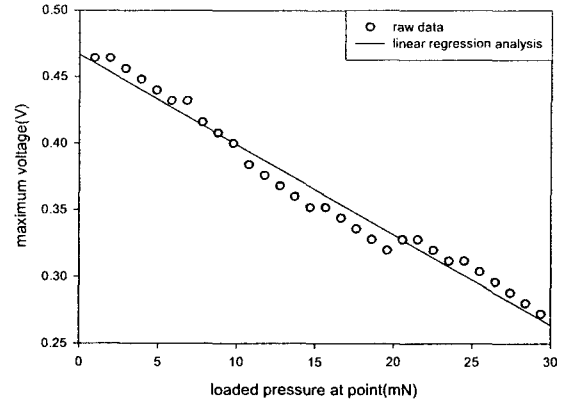


그림 6. 압력의 변화에 따른 감지된 전압

4. 센서의 응용

4.1 이상류 void fraction 측정에 대한 개념

이상류에 관한 문제는 주로 열교환 시스템에 관한 부분에서 주로 나타난다. 특히 기액 이상류 열교환 시스템은 작동유체의 상 변화에 따른 잠열을 이용하기 때문에 유체상태 만으로서 작동되는 열교환 시스템에 비하여 그 효율이 높다⁽⁷⁾. 그러나 이 시스템의 작동 유체는 기상과 액상이 동시에 존재하기 때문에 두 상간의 밀도 차에 의한 상 분리로 인하여 불규칙적이고 불안정한 흐름이 발생할 수 있다. 이와 같은 현상은 고온의 상태로 작동하는 열 교환 시스템에서 주로 발생하는데, 이와 같은 현상이 발생하게 되면 열 전도율이 낮은 공기나 증기가 열 교환 파이프의 내벽과 지속적으로 접촉하게 되어 상대적으로 액체상태의 작동유체가 파이프 내벽에 접촉하기가 어렵게 되고 그에 따라 열 교환 효율이 떨어짐으로써 전체 시스템에 심각한 문제를 초래할 수 있다. 따라서 여러 가지 이상류 감지를 위한 기술들이 연구되어 왔는데 그 예로 electric conductivity 측정법⁽⁸⁾, ultrasonic pulse-echo 기술⁽⁹⁾, 그리고 electric conductance 측정 기술⁽¹⁰⁾ 등이 있다. 하지만 이와 같은 기술들은 제한된 범위 또는 프로브 주변에 대해서만 감지가 가능하다. 따라서 보다 넓은 지역에 걸쳐서 감지가 가능한 시스템의 개발이 필요한데 광섬유 센서는 그 특성상 넓은 범위에 걸친 감지에 적합하며 또한 지름이 작기 때문에 구조물에 삽입하기에 적합하므로 이상류 감지를 위한 센서 시스템으로 응용에 대하여 많은 장점을 갖고 있다.

광섬유를 따라 진행되는 초음파는 광섬유 주위의

환경에 따라 그 감지 신호가 변화한다. 이 개념에 의하여 초음파로 가진 되는 광섬유 센서가 환경요소에 대한 감지가 가능한 시스템으로서 응용될 수 있는 가능성에 대하여 설명 할 수 있다. 따라서 이 실험에서는 기체와 액체상태의 차이에 대하여 광섬유 센서의 반응을 조사하였다. 실험에는 150 μm 의 피복이 벗겨진 상태인 1.2m 길이의 광섬유가 사용되었고 138kHz 의 초음파가 가진 되었다.

그림 7. 에서 보는 바와 같이 감지된 신호의 크기는 광섬유가 공기 중에 존재하는 상태에 비하여 물에 의해 둘러 쌓여 있을 경우에서 더 낮음을 알 수 있다. 이는 광섬유 표면이 전체적으로 물에 접촉한 상태에서 물과 광섬유의 표면이 커플되어 광섬유를 따라 진행하는 초음파 에너지가 광섬유로부터 물로 누출되기 때문에 발생하는 현상으로서, 물과 접촉하는 광섬유의 표면적이 증가함에 따라서 신호의 감쇠도 증가하게 된다. 결론적으로, 광섬유 센서는 감지되는 신호의 감쇠 정도에 따라 기액 이상류의 void fraction 를 감지하는데 사용될 수 있으며 이 개념은 초음파 가진에 의한 광섬유 센서가 이상류를 실시간으로 감시할 수 있는 시스템에 성공적으로 적용 할 수 있다는 것을 보여준다.

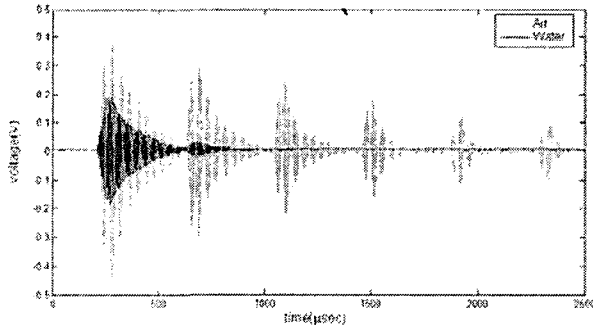


그림 7. 광섬유 센서에서 주위 환경의 차이에 따른 감지 신호의 비교

4.2 이상류의 void fraction 감시에 대한 광섬유 센서의 응용

그림 8. 과 9. 는 이상류 감지를 위한 실험의 모습을 보여주고 있다 모든 실험 설정은 그림 1 에서 설명된 실험 설정과 동일하며 길이 900mm 지름 20mm 의 아크릴 관의 중심에 광섬유가 탑재되어 있다. 그리고 아크릴 관은 그림 8 에서 보이는 수조에 설치된 상태에서 물 속에 잠겨 있는 상태이다.

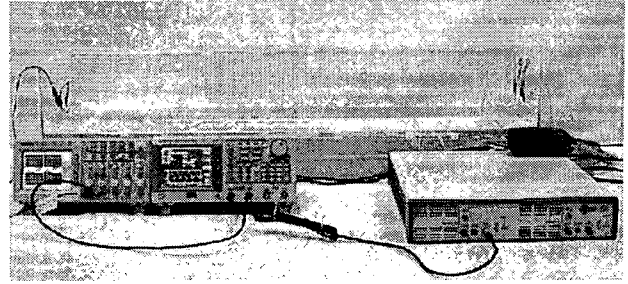


그림 8. 이상류 감지를 위한 실험 설정

Void fraction 을 조절하기 위하여 공기량의 조절이 가능한 에어펌프가 사용되었고 공기가 토출되는 튜브의 끝이 아크릴 관의 한쪽 하단에 설치하였다. 따라서 토출된 공기는 액체와 함께 기액 이상류의 형태로 진행 된 후 아크릴 관의 반대쪽 끝부분에서 배출된다. 토출되는 공기의 양은 6 단계로 설정되어 실험을 진행하기 이전에 그 양을 정확히 측정하였고 감지된 신호는 첫 번째 파형의 최고 전압 값으로 선정하였으며 최종적인 데이터는 16 번에 걸친 데이터 획득에 의한 평균값으로 계산 하였다. 이 실험에서 관찰된 이상류의 형태는 그림 10 에서 보는 바와 같이 공기의 층이 중력의 영향에 의하여 관의 상부에 모여서 진행하였으며 그 형태는 slug flow 의 형태를 보였다.

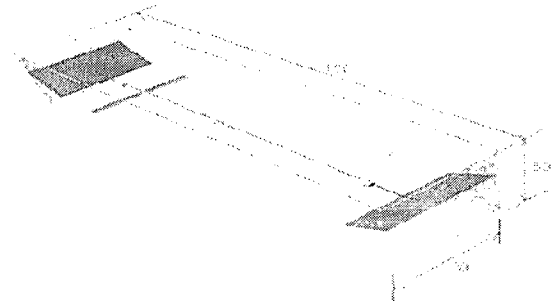


그림 9. 제작된 수조의 모습

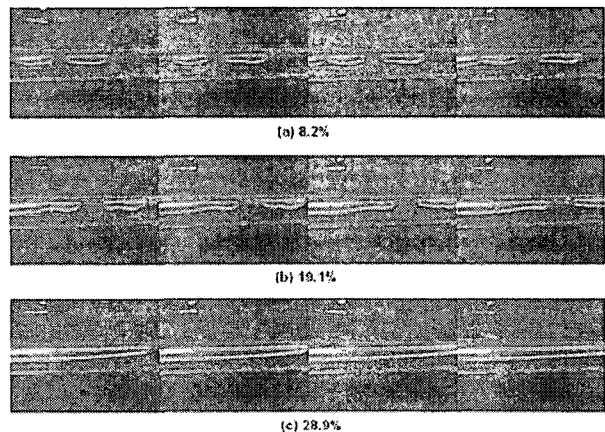


그림 10. 실험에서 관측된 이상류의 모습

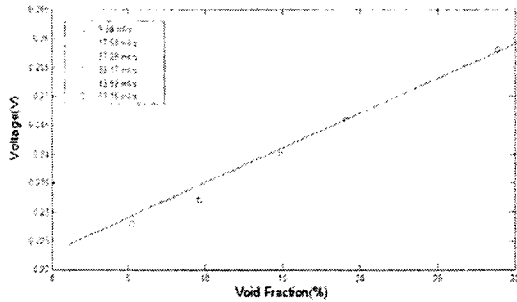


그림 11. 이상류 void fraction 의 변화에 따라 광섬유 센서에 감지된 전압

위 실험의 결과 그래프를 그림 11. 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 감지된 신호의 전압은 이상류의 void fraction 이 증가함에 따라 증가 함을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 선형 회귀 분석법에 의하여 선형화된 결과 식이 다음과 같이 제시된다.

$$V = 0.0012VF + 0.2231 \quad (4)$$

여기서 V 는 감지된 신호의 전압을, VF 는 이상류의 void fraction 을 나타낸다. 결과적으로 선형화된 식 (4)는 초음파를 이용하는 광섬유 센서가 이상류의 void fraction 을 감지 할 수 있는 가능성을 증명한다.

표 2. 이상류의 void fraction 감지에 대한 데이터.

Void Fraction(%)	8.2	9.6	14.9	19.1	23.9	28.9
Voltage(V)	0.228	0.232	0.24	0.246	0.256	0.258

5. 결 론

이 연구에서는 초음파를 이용한 광섬유 센서 시스템이 개발되었다. 압전 변환기로부터 발생하는 초음파는 종파의 형태로서 광섬유를 따라 진행하고 그 신호는 반대편에 부착 되어있는 압전 감지기에 의하여 감지된다. 최초 감지된 파형과 반사되어 감지된 파형의 시간 간격은 정확하게 두 배의 관계를 보임으로서 이론적으로 계산된 값과 실험값이 일치함을 보였다. 센서의 감도를 증가시키기 위하여 가진 주파수에 따라 감지되는 전압을 조사하여 가장 감도가 높은 가진 주파수 값을 구하였고 그 값은 이론적으로 계산된 결과에 의하여 검증되었다.

초음파를 이용한 광섬유 센서는 광섬유에 가해지는 압력의 차이와 주변의 환경변화에 따라 그 값이 변한다. 따라서 광섬유에 가해지는 하중에 따라 센서에 감지되는 전압을 조사하였고 그 관계

가 선형적임을 보였다. 그리고 이상류 시스템을 모델링하고 광섬유 시스템을 적용하여 이상류의 void fraction 과 감지된 전압이 선형적인 관계를 보임을 증명하였다.

참고문헌

- (1) Barry G Grossmann and Li-Tien Huang. 1998, Fiber Optic Sensor Array for Multi-Dimensional Strain Measurement. Smart Materials and Structures., vol 7: 159-165.
- (2) Jianjun Ma and Anand Asundi. 2001, Structural Health Monitoring Using a Fiber Optic Polarmetric Sensor and a Fiber Optic Curvature Sensor-Static and Dynamic Test., Smart Materials and Structures, vol 10 pp.181-188.
- (3) Nobui Takeda., 2002, Characterization of Microscopic Damage in Composite Laminates and Real-Time Monitoring by Embedded Optical Fiber Sensors. International Journal of Fatigue, vol24 pp281-289.
- (4) Jie Lin. 2000, Recent Development and Applications of Optical and Fiber-Optic pH Sensors, Trends in Analytical Chemistry., vol 19(9) pp541-552.
- (5) Wenzel S W and White R M., 1989, Analytic Comparison of the Sensitivities of Bulk-Wave, Surface Wave and Flexural Plate-Wave Ultrasonic Gravimetric Sensors., Appl.Phts. Lett . vol 54 pp1976-1978.
- (6) Rose J L., 1999, Ultrasonic waves in Solid Media. Cambridge University Press.
- (7) A. A. M. Delil., 1998, On Thermal Gravitation Modeling, Scaling and Flow Pattern Mapping. Issues of Two-Phase Heat Transport Systems., NLR-TP-98268 pp1-14.
- (8) Yool-Kwan Oh, Dong-Pyo Seo., 2005, A Study on the Characteristics of Two-Phase Flow Driven by Bubbles in a Liquid Bath., International Journal of Air-conditioning and Refrigeration., vol 13(1)pp44-50.
- (9) In-Cheol Chu, Chul-Hwa Song, and Won-Pil Beak. , 2004, Application of the Through-Transmitted Ultrasonic Signal for the Identification of Two-Phase Flow Patterns in a Simulated High Temperature Vertical Channel., Journal of the Korean Nuclear Society, vol 36(1)pp12-23.
- (10) Chul-Hwa Song, Moon Ki Chung, HeeCheon No., 1998, Measurements of Void Fraction by an Improved Multi-Channel Conductance Void Meter., Nuclear Engineering and Design, vol 184 pp 269-285.