

# 투과법을 이용한 폴리우레탄재료의 음향특성 측정

## Measurement of Acoustic Properties of Polyurethane by the through Transmission Method

김 태 식\*, 이 기 석\*, 안 봉 영\*\*, 이 진 형\*

(Tae Sik Kim\*, Ki Suk Lee\*, Bongyoung Ahn\*\*, Zin Hyoung Lee\*)

※ 이 논문은 수중음향특화연구센터 연구비에 의하여 연구되었음.

### 요 약

감쇠가 심하고 분산적인 폴리우레탄 재료의 음향특성을 평가하기 위하여 초음파 투과법을 이용하였다. 투과법에 있어서, 작은 크기의 시편에 적용할 수 있도록 Sachse의 방법을 이용하여 음속과 음향감쇠계수를 측정하였다. 기준 신호를 이용하여 음향특성을 측정하였을 때 정확한 결과를 얻기 어려웠다. 반면, 두께가 서로 다른 두 우레탄 시편을 가지고 음향특성을 측정하였을 때 보다 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 저주파 대역에서의 음향특성을 파악하기 위하여 Kramers-Kronig 관계를 적용하였다. 이를 통해 저주파 영역까지 확대된 주파수에 따른 음속관계식을 구하였고, 음속과 음향감쇠계수의 상관관계를 연구하였다.

### ABSTRACT

To obtain the acoustic properties of dispersive polyurethane with high attenuation, through transmission method was applied by ultrasonic. In through transmission method, the sound velocity and attenuation coefficient of specimen were obtained by using Sachse's method which can be applied to small size specimen. But there is a problem when the reference signal is selected, so the result is not precise. The more precise acoustic properties of polyurethane was obtained when two specimens with different thickness were used. To predict the acoustic properties of low frequency range, the acoustic properties extended to the low frequency range were calculated by Kramers - Kronig relation. As a result, we studied on the relation between the sound velocity and the attenuation coefficient with frequency.

### 1. 머리말

수중음향에 사용되는 음향센서재료의 개발을 위해서는 구성 고분자 재료의 음향특성을 아는 것이 필요하다. 재료의 음향 특성을 파악하기 위해서는 재료의 밀도와 음속의 곱으로 정의되는 음향 임피던스와 음향 감쇠 계수의 측정이 요구되어진다. 수중음향센서에서 주로 사용되는 주파수대역은 수십 kHz의 저주파 영역이다. 그러나 이 영역에서 음파를 이용하여 직접적으로 고분자 재료의 음향특성을 측정하기 위해서는 1m × 1m 정도의 큰 시편이 필요하여 시편제조상의 어려움이 있다. 따라서 재료를 개발하는 관점에서는 매번 큰 시편을 제작하여 측정하기가 힘들므로 작은 시편을 가지고 측정하여 원하는 주파수 대역의 음향특성을 파악할 수 있는 방법이 필요하다.

고분자의 점탄성 특성을 이용한 동적점탄성 측정 방법에서는 1~100Hz 정도의 주파수대역에서 작은 시편으로 재료의 점탄성 시험을 여러 온도에서 행하여 동적점탄성계수를 구한다. 그 결과를 시간-온도중첩원리(Time-temperature superposition principle)[1,2]로 원하는 주파수와 온도에서의 값으로 전환한 후, 수식을 통해 높은 주파수 영역의 음속을 계산한다. 그러나 이와 같은 간접적인 측정 방법과 실제 음향특성 측정값과의 오차를 비교한 보고가 드물고, 고분자 복합재료의 경우 점탄성적인 특성을 띄지 않아 이 방법의 적용이 힘들다. 따라서 이 방법의 오차와 신뢰성을 비교하고 다양한 고분자 재료에 적용시킬 수 있는 다른 방법의 적용이 요구되어진다.

본 연구에서는 MHz 영역에서 초음파를 이용한 음향특성 측정방법을 이용하였는데, 시편이 작고 감쇠가 심한 고분자 재료에 적용할 수 있도록 초음파 투과법을 적용하였다. 또 고주파 대역에서의 음향특성 측정결과를 토대로 수십 kHz 대역 저주파 영역의 음향특성을 파악하기 위한

\* 한국과학기술원 재료공학과

\*\* 한국표준과학연구원

접수일자: 1999년 6월 23일

방법으로 Kramers-Kronig relation을 적용하였다. 이를 통해 폴리우레탄 시편의 음속과 감쇠계수의 상관 관계식을 도출한 후, 이를 고찰하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 투과법을 이용한 음향특성 평가

투과법을 이용한 측정 방법은 감쇠가 심한 분산적인 고분자 재료와 이상적으로 평평하고 두 면이 평행이 아닌 상황에서 사용하기 적절한 방법으로써, 두 개 이상의 탐촉자(Transducer)를 사용하여 재료의 음향특성을 측정한다[3,4].

2.2. Time delay방법을 이용한 음속 측정 방법

그림 1과 같은 상황에서 초음파 투과법을 이용하여 얻은 신호에 대하여, 시편 내에 왕복한 신호가 없을 때 시편내의 음파 전달 속도는 다음과 같다.

$$c_s = \frac{h}{\Delta t} \tag{1}$$

여기서 h는 시편의 두께, Δt는 기준신호와 투과한 신호의 시간차이다.

2.3. Phase spectrum analysis를 이용한 음속 측정

Sachse and Pao[6]는 그림 1과 같이 투과모드로 작동하는 두 개의 탐촉자를 이용하여 재료의 위상속도(phase velocity)를 구하는 방법을 제시하였다. 먼저 두 개의 탐촉자를 서로 붙여서 기준 신호를 얻은 후, 시편의 양쪽 면에 두 탐촉자를 붙여 두께가 h인 재료 내를 전파한 신호를 받는다. 시간 도메인의 신호를 푸리에 변환을 이용하여 주파수 도메인으로 전환하였을 경우 두 신호는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있게 된다[5].

$$\frac{F[u_h]}{F[u_0]} = T_{12}T_{21} e^{-i(kh + k_0h)} \tag{2}$$

여기서 F[u<sub>h</sub>]와 F[u<sub>0</sub>]는 각각 시편의 두께가 h일 때의 전파한 신호, 시편 없이 두 개의 탐촉자를 붙였을 때의 신호를 푸리에 변환한 것이다. k=β-ia(α≥0)는 복소수로 표현되는 파수이고, α는 감쇠계수를 나타낸다. k<sub>0</sub>는 u<sub>0</sub>일 때의 파수이다. 위 식으로부터 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\frac{F[u_h]/F[u_0]e^{ik_0h}}{T_{12}T_{21}} = Me^{i\phi} \tag{3}$$

$$\beta = -\phi/h \tag{4}$$

$$\alpha = (\ln M)/h \tag{5}$$

$$M = \left| \frac{F[u_h]}{F[u_0]} \right| / T_{12}T_{21} \tag{6}$$

여기서, M은 식 (6)과 같이 정의되고, φ는 위상을 나타낸다. T<sub>ij</sub>는 그림 2에서처럼 매질 i로 입사한 파가 매질 j를 통해 투과할 때의 투과 계수를 의미한다.

푸리에 변환을 하여 위상을 구하는데 있어서 atan 함수는 -π에서 π까지만 표현이 가능하지만 실제로 펄스를 푸리에 변환할 경우 주파수의 변화에 따라 주기적으로 변함을 관찰할 수 있다. 이렇게 주기적으로 변하는 위상을 연속인 선으로 나타내기 위해 2π를 더해주거나 빼주면서 위상(φ)을 구해서 식 (4)에 나타낸 것처럼 β(파수, wave number)를 구한 후 c=ω/β의 식에 대입하면, 식 (7)처럼 재료 내를 전파하는 음파의 위상속도를 구할 수 있게 된다.

$$c = \frac{\omega h}{-\phi} \tag{7}$$

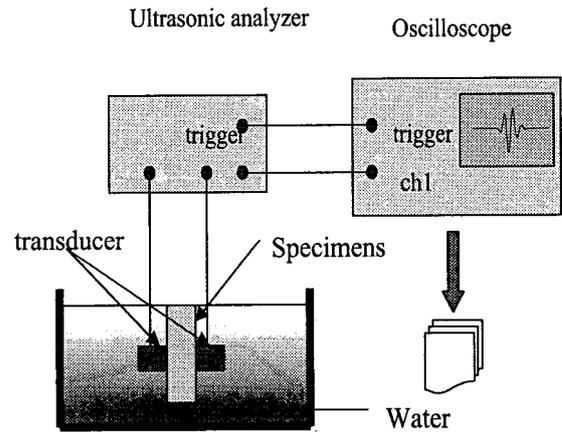


그림 1. 측정 장치의 구성도  
Fig. 1. The schematic diagram of the measurement system.

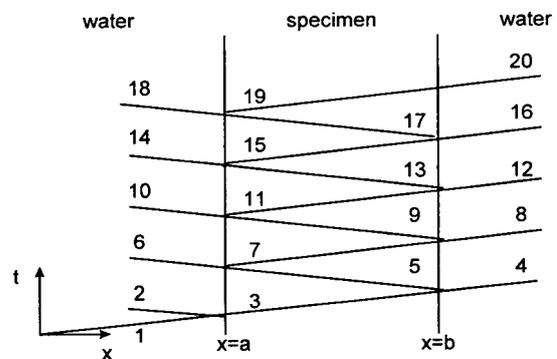


그림 2. 다른 매질 사이의 평판에서 음파의 반사와 투과[5]  
Fig. 2. Various reflections and transmissions from a plate.

## 2.4. 감쇠 (attenuation)의 측정

감쇠( $\alpha$ )는 진행하는 초음파 전파경로의 두 지점에서 구한 진폭비에 대한 자연로그 값으로 정의되며, 단위는 Neper/unit length 이다. 본 연구에서는 분산적인 재료의 감쇠계수를 구하기 위해서 시간도메인을 주파수도메인으로 전환하여 Amplitude spectrum을 구하고, 유효 Band width 내에서 감쇠계수를 구하였다. Band width는 Amplitude spectrum을 Power spectrum으로 전환하여 Power spectrum의 1차 미분의 최대값 중 주파수가 낮은 값을 Band width의 최소값으로 정하고, 2차 미분의 최대값 중 주파수가 큰 값을 Band width의 최대값으로 정하였다[7].

Sachse는 한 개의 시편을 가지고 투과법을 이용하여 재료의 음향특성을 구하였다. 그러나 투과법을 이용하여 감쇠계수를 구할 때 기준신호와 한 개의 시편에서 얻은 신호를 이용하여 구할 경우, 그림 2와 식 (6)에서 보는 것과 같이 계면에서의 투과계수와 반사계수로 인해 측정되는 신호는 재료만을 투과한 음파의 진폭보다 작은 값을 갖게 된다. 즉  $T_{12}T_{21}$ 이 그대로 남아 있게 됨으로 시편 한 개를 이용한 감쇠 측정이 용이하지 않게 된다.

이를 해결하는 방법으로 시편의 두께가 다른 두 개의 시편을 상호 비교함으로써  $T_{12}T_{21}$ 을 제거할 수 있게 된다. 그림 1의 경우와 같이 탐촉자와 시편을 직접 접촉하는 경우에는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{F[u_{h_1}]}{F[u_{h_2}]} = \frac{M_{h_1}}{M_{h_2}} e^{i\alpha(h_2 - h_1)} = e^{-i\beta(h_1 - h_2)} e^{-\alpha(h_1 - h_2)} \quad (8)$$

여기서,  $h_1$ 과  $h_2$ 는 비교하고자 하는 각각의 시편 두께이다.

식 (8)로부터 아래와 같은 감쇠계수의 식을 도출할 수 있게 된다.

$$\alpha = -\frac{\ln\left(\frac{|F[u_{h_1}]|}{|F[u_{h_2}]|}\right)}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

## 2.5. 음속과 감쇠계수와와의 상관관계

고분자 재료와 같이 감쇠가 주파수에 대해 선형적으로 변할 경우 O'Donnell[8]은 감쇠와 위상속도사이에는 Kramers-Kronig relations 이 존재한다고 하였으며, 그 관계식을 식 (10)과 같이 정리하였다.

$$\frac{1}{c_0} - \frac{1}{c(\omega)} = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2} d\omega' \quad (10)$$

여기서  $\omega (= 2\pi f)$ ,  $\omega_0 (= 2\pi f_0)$ 는 각주파수이며,  $c_0$ 는  $\omega_0$  일 때의 음속이다. 고분자의 감쇠 메커니즘을 연구했던 Hartmann[9]은 이와 같은 관계를 Hysteresis absorption 이라 칭하였으며, Hysteresis absorption 메커니즘은 고분자 구조내의 많은 준안정 위치에 고분자가 trapping됨으로써 발생한다고 보고하였다.

## III. 실험 방법

### 3.1. 시험시편

분산적인 시편으로는 SONAR 재료로 고려 중인 폴리우레탄(TDI/PPG(1000)/MOCA)을 택하였다. 분산적인 폴리우레탄 재료와 음향특성을 비교하고 측정의 정확성을 파악하기 위하여, 비분산적인 재료로써 알루미늄(Al6061)을 선택하였다. 시편의 크기는 100mm×100mm이며, 우레탄 시편은 두께가 1.29mm, 1.88mm, 2.98mm, 5.11mm, 10mm 인 5개 시편을 준비하였다. 또 알루미늄(Al6061)시편의 경우, 3.01mm, 6.06mm, 9.73mm, 15.74mm, 19.75mm인 시편을 준비하였다. 각 시편의 두께는 Digimatic caliper를 이용하여 구하였고, 두께측정 오차는  $\pm 0.02$ mm 내의였다.

### 3.2. 측정 방법

실험에 쓰인 초음파 측정 장치의 구성은 그림 1과 같고 수침용 Plane type의 탐촉자를 사용하였기 때문에 물 속에서 측정하였다. 투과법의 적용 시, 시편을 가볍게 지지할 정도로만 두 개의 탐촉자를 시편의 양쪽에 붙여서 측정하였고, 중심주파수가 2.25MHz인 탐촉자를 사용하여 신호를 얻었다. 초음파 Analyzer로는 Panametrics사의 Pulser & receiver 5052UA를 사용하였으며, 신호의 크기 측정 및 분석은 Lecroy 9310 oscilloscope를 사용하였다. 각 시편에서 10ns간격으로 20 $\mu$ s까지의 신호를 측정하였다. 시간 도메인에서 수신된 디지털 신호의 주파수 분석[10] 및 음속 계산은 컴퓨터 프로그램을 이용하였다.

### 3.3. 음속 측정

음속의 측정은 Time delay를 이용한 음속 측정 방법과 Phase spectrum analysis를 이용한 음속 측정방법을 모두 이용하였다. 감쇠가 심한 우레탄 재료에 대해서는 기준신호와 두 개의 탐촉자 사이에 시편을 넣은 후 얻은 신호를 비교하여 음속을 구하거나, 두께가 서로 다른 시편에서 얻은 첫 번째 신호를 서로 비교하여 음속을 구하였다. 비분산적인 알루미늄(Al6061) 시편은 우레탄 재료의 결과와 비교하기 위해서 첫 번째 투과한 신호와 왕복신호, 기준신호를 이용하여 음속을 구하였다.

### 3.4. 감쇠의 측정

두께가 다른 우레탄 시편들에 대한 신호로부터 각각의 Amplitude spectrum을 얻었다. 이후, 2개의 시편을 선택하여 각 진폭을 비교함으로써 Band width 범위 내에서 앞에서 구한 식 (9)을 적용하여 감쇠계수를 구하였다.

## IV. 결과

### 4.1. 알루미늄(Al6061)의 음속측정 결과

알루미늄(Al6061)시편에 대한 시간도메인상의 신호 몇 가지를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(d)에서 왕복한 펄스가 분리되어 주기적으로 나타나는데, 첫 번째 왕복신호와 두 번째 왕복 신호의 시간간격  $\Delta t$ 는 3.03  $\mu$ s이고, 두

번째와 세 번째 신호간격  $\Delta t$ 는  $3.04 \mu s$ 이다. 각각의 신호 간격은 시편두께의 2배인 전파거리에서, 거의 같은 신호간격을 보이는 비분산적인 재료의 성질을 나타낸다. 이때 Time delay method로 구한 음속은 대략  $641m/sec$ 로 유사하였다.

그러나, 그림 3(a)의 기준신호에서 진폭이 “-”부호를 갖는 첫 번째 Peak 와 그림 3(d)에서 첫 번째 신호의 진폭이 “-”부호를 갖는 첫 번째 Peak 와의 시간간격  $\Delta t$ 는  $1.45 \mu s$  로 앞에서의 결과와 비교하여 정확히 시간 간격이 1/2배가 안 되고, 음속은  $6710m/sec$ 로 부정확한 값을 얻었다. 따라서 투과법을 적용할 때 기준신호를 사용하지 않는 것이 측정의 신뢰성을 높일 수 있다고 보여진다.

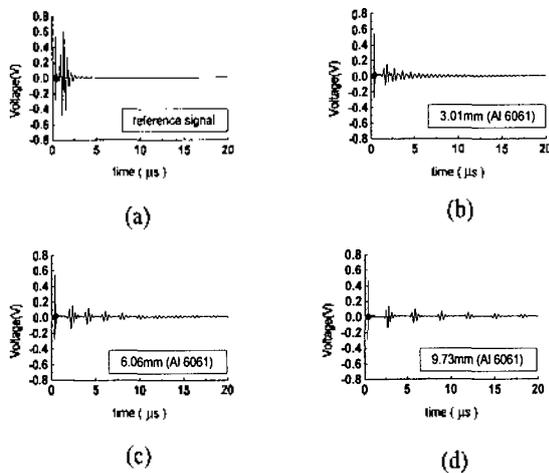


그림 3. 알루미늄(Al6061)의 두께 변화에 따른 측정 신호  
Fig. 3. The received signal with the variation of the thickness of Al6061 specimen.  
(a)without specimen, (b)3.01mm  
(c)6.06 mm, (d)9.73mm

4.2. 폴리우레탄의 음속측정 결과

4.2.1. Time delay method를 이용한 음속 측정

그림 4에서 알 수 있듯이, 폴리우레탄 시편은 알루미늄(Al6061)시편에 비해 감쇠가 큰 재료이기 때문에 시편 내에서 왕복한 신호는 얻을 수가 없었다. 표 1은 Time delay를 이용한 음속 측정 방법으로 구한 결과를 나타내었다. 여기서 아래첨자 min은 첫 번째로 투과한 신호에 대해서 시간도메인 상의 진폭이 “-”부호를 갖는 첫 번째 Peak 값을 갖는 시간을 의미한다. 두 시편의 두께 차가 작을 경우에는 두께측정 오차로 인한 음속 측정값의 부정확성이 문제가 되었다. 즉 1.29mm 시편과 1.88mm 시편에서 측정된 음속은 대략  $2034m/sec$ 이며, 두께차이가 가장 큰 1.29mm 시편과 10.00mm 시편의 경우  $1857m/sec$ 의 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 분산적인 재료의 음속은 주파수의 함수인 점을 고려하면, 1.29mm 시편과 10.00mm 시편에 대한 Time delay를 이용한 음속 측정 또한 분산에 의한 오차가 포함되어 있다고 본다. 그러므로 분산적

인 재료에 대한 Time delay를 이용한 음속 측정값은 급속과 같은 비분산적인 재료에 대한 음속 측정값처럼 비교적 정밀한 값을 얻을 수 있기보다는 근사치를 얻게 된다. 따라서 주파수의 변화에 대한 보다 신뢰성을 갖는 재료의 음속측정값을 얻기 위해서는 Time delay를 이용한 속도 측정보다는 Phase spectrum analysis를 통한 음속 측정을 행할 필요가 있다.

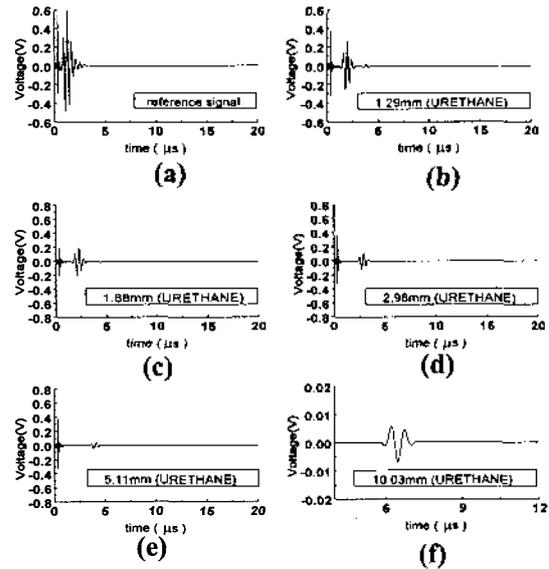


그림 4. 폴리우레탄의 두께 변화에 따른 측정 신호  
Fig. 4. The received signal with the variation of the thickness of Polyurethane.  
(a)without specimen, (b)1.29mm,  
(c)1.88mm, (d)2.98mm,  
(e)5.11mm, (f)10.00mm.

표 1. Time delay method를 이용한 폴리우레탄의 음속  
Table 1. Sound velocity of Polyurethane by using Time delay method.

No	Thickness(mm)	t min(μm)	c(m/sec)
1.	1.29 ± 0.02	1.81	1845 ± 75.5
2.	1.88 ± 0.02	2.10	
3.	2.98 ± 0.03	2.73	
4.	5.11 ± 0.02	3.88	
5.	10.00 ± 0.03	6.50	

4.2.2. Phase spectrum analysis를 이용한 음속 측정

기준 신호와 각 우레탄 시편의 첫 번째 신호에 대하여 식 (7)을 적용하여 얻은 음속 측정결과를 그림 5에 나타내었다. 그 결과, 기준 신호를 사용하였기 때문에 2MHz 부근에서는 그래프의 모양이 주파수에 대하여 완전한 선형성을 보이지 않고 음속 들어간 형태를 가졌다.

그림 6에서는 알루미늄(Al6061)에 대하여 식 (7)을 적용하여 구한 음속결과를 나타내었다. 폴리우레탄과 마찬가지로 기준신호를 이용하여 음속을 구하였을 때 그래프

의 모양이 선형성을 보여주지 않았다. 또 기준 신호를 사용하지 않고 알루미늄(A16061) 15.74mm 시편의 첫 번째 신호와 알루미늄(A16061) 19.75mm 시편의 첫 번째 신호를 비교하여 구한 음속 측정 결과를 보면, 하나의 시편에서 얻은 첫 번째 신호와 두 번째 신호를 이용하여 구한 음속 측정 결과와 일치하여 정확한 측정 결과를 얻었다.

위의 결과를 토대로 우레탄 시편에 대해서 이번에는 기준 신호를 사용하지 않고, 두께가 다른 두 시편의 첫 번째 신호들을 서로 비교하고 식 (7)을 적용해 구한 음속 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 1.29mm 시편과 1.88mm 시편을 비교하여 구한 음속은 2MHz~3MHz의 범위에서 약 2000m/sec 안팎이고, 1.88mm 시편과 2.98mm 시편을 비교하여 구한 음속은 1730m/sec(2MHz)에서 1760m/sec(3MHz)의 범위를 갖고 있다. 그리고 그 외의 두 시편을 이용한 음속측정 결과는 약 1810m/sec(2MHz)에서 1845m/sec(3MHz)의 범위를 갖고 있으며, 주파수에 대하여 거의 동일한 선형성을 보인다. 여기서 1.29mm 시편과 1.88mm 시편을 비교하여 구한 결과와 1.88mm 시편과 2.98mm 시편을 비교하여 구한 결과가 다른 결과와 크게 차이가 나는 이유는 시편 두께 차가 작음으로써 계산하는 과정에서 오차가 크게 부각되었기 때문으로 사료되어진다.

시편에 대한 두께측정시의 오차를  $\epsilon$ , 두 시편에 대한 두께 측정 최대 오차를  $\Delta\epsilon$ , 두께 측정 오차  $\Delta\epsilon$ 로 인한 음속의 오차를  $\Delta c$ , 두 시편의 두께 차이를  $\Delta h$ 라고 하면 식 (7)은

$$c + \Delta c = \frac{\omega(\Delta h + \Delta\epsilon)}{\Delta\phi} \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (7)과 식 (11)로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta h} \quad (12)$$

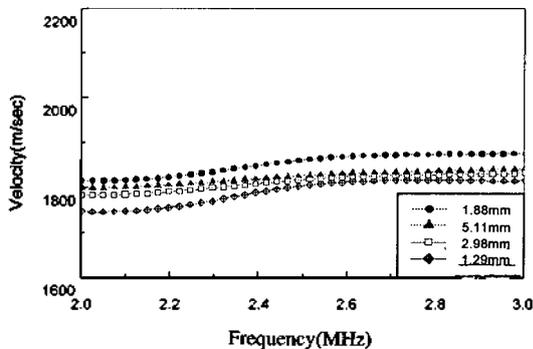


그림 5. 기준신호와 첫 번째 신호를 이용한 폴리우레탄의 음속  
Fig. 5. Sound velocity of Polyurethane by using the reference signal and the 1st signal of the specimen.

2MHz에서 1.29mm 시편과 1.88mm 시편을 비교해 구한

음속이 1810m/sec라고 하면,  $c + \Delta c = 1933m/sec$  가 되고, 1.88mm와 2.98mm시편의 비교에서는  $c - \Delta c = 1745m/sec$ 가 된다. 이 결과는 그림 7의 결과와 거의 일치하였다. 결국 두 시편을 비교하여 음속을 측정할 경우, 두께차이가 클 때 음속 측정의 신뢰성이 커짐을 알 수 있었다. 위 두 결과를 제외한 나머지 결과들을 평균하여 주파수  $f(\text{Hz})$ 에 대한 음속의 회귀직선 관계식을 얻을 수 있었다.

$$c = 1744 + 3.33488 \times 10^{-5} \times f \quad (13)$$

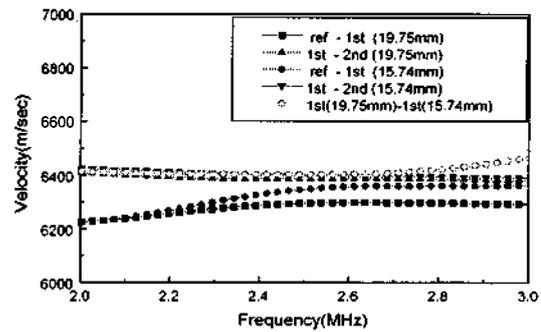


그림 6. 알루미늄(A16061)의 음속  
Fig. 6. Sound velocity of (A16061).

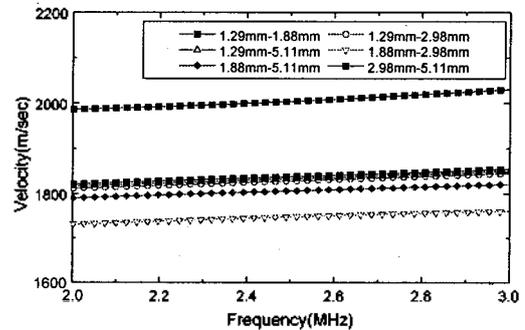


그림 7. 두께가 서로 다른 두 시편을 이용한 폴리우레탄의 음속  
Fig. 7. Sound velocity of Polyurethane by using the 1st signals of the two different specimens.

### 4.3. 감쇠의 측정

그림 8(a)는 그림 4의 우레탄 재료에서 얻은 신호들에 대하여 계산한 Amplitude spectrum이다. 그림 9에서 우레탄 1.29mm시편에 대한 Power spectrum의 미분을 통해서 구한 Band width는 1.98MHz에서 3MHz의 범위이었다. 이것은 진폭의 1/2값일 때 해당하는 주파수 범위를 Band width로 정하는 것과 거의 일치함을 볼 수 있다.

그림 8(b)은 식 (9)를 이용하여 얻은 10개의 결과 중, 오차가 큰 최대값과 최소값의 감쇠계수를 제외한 8개의 값을 평균하여 나타낸 것이다. 이 결과 주파수에 따른 감쇠계수의 변화를 다음과 같은 1차 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha(Np/m) = -13.196 + 2.0875 \times 10^{-4} \times f \quad (14)$$

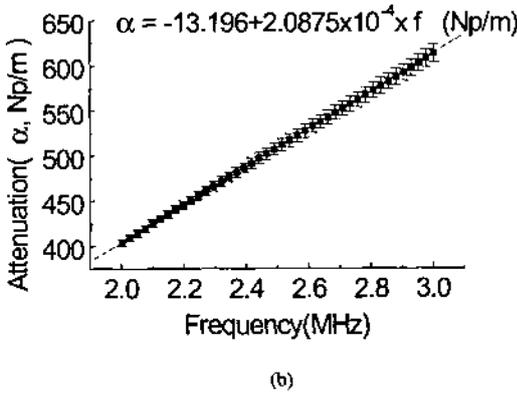
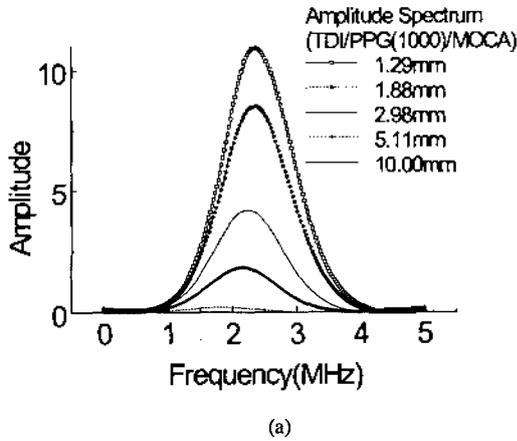


그림 8. 폴리우레탄의 Amplitude spectrum과 주파수에 따른 감쇠계수 변화

Fig. 8. (a)Amplitude spectrum of Polyurethane specimens (b)the variation of attenuation coefficient of polyurethane with frequency(2MHz~3MHz).

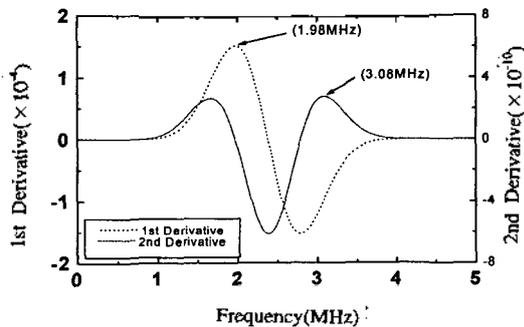


그림 9. 폴리우레탄의 측정 유효 주파수 결정  
Fig. 9. The determination of valid frequency (1.98MHz~3.08 MHz) for polyurethane(1.29mm).

4.4. 주파수에 따른 음속과 감쇠계수 사이의 상관관계 고찰

고주파 대역에서의 측정 결과를 토대로 저주파대역에

서 고분자 재료의 음향특성을 파악하기 위해서 Kramers - Kronig relation 을 적용하였다.

식 (14)을 보면  $f = 0$ 일 때 감쇠가 음수가 되는 문제점이 있다. 이를 보정하기 위해 식 (14)의 상수항을 제거하고, 감쇠함수가 주파수에 선형으로 비례한다고 가정하여 식 (10)에 대입하면, 아래 식을 얻을 수 있었다.

$$c(f) = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + 2.115 \times 10^{-5} \times \text{Ln}\left(\frac{f_0}{f}\right)} \quad (15)$$

그림 10에서 Phase spectrum analysis를 통해 얻은 음속 측정 결과(식 13)를 Bandwidth 범위 내에서 나타내었으며, 위에서 구한 결과와 비교하였다. Phase spectrum analysis를 이용하여 구한 실험 결과와 Kramers-Kronig relation을 이용한 결과는 상당히 근사함을 볼 수 있다.

위에서의 실험결과를 토대로, 이번에는 1MHz, 2.25MHz, 5MHz 세 가지 탐촉자를 이용하여 폴리우레탄(TDI/PPG(1000)/MOCA)의 음향감쇠계수와 음속을 측정하였다. 그림 11은 주파수의 변화에 따른 감쇠계수를 유효 Bandwidth 범위 내에서 나타내었다. 감쇠계수가 주파수에 따라 직선적으로 변함을 알 수 있었다.

T. L. Szabo는 재료의 주파수에 따른 음향감쇠계수의 변화를 각주파수( $\omega$ )에 대한 지수함수로 파악하였다[11]. 그림 11의 결과를  $\alpha = \alpha_0 \times f^y$  인 지수함수 형태로 나타내면,  $y = 1.054$  이고,  $\alpha_0 = 8.9755 \times 10^{-5}$  Np/m 인 값을 얻게 된다. 여기에서 구한 지수형태의 감쇠함수를 식 (10)에 대입하고, T L. Szabo[11]에 의해 제시된 식을 수정하면 다음과 같은 Kramers-Kronig 관계식을 얻게된다.

$$c(2\pi f) = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \alpha_0 \tan\left(\frac{\pi y}{2}\right) [ |2\pi f|^{y-1} - |2\pi f_0|^{y-1} ]} \quad (16)$$

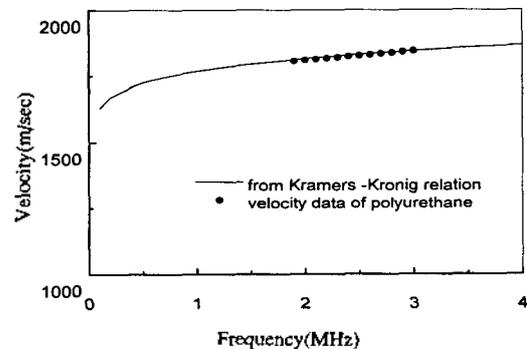


그림 10. Kramers-Kronig 관계와 2.25MHz에서 측정된 결과 비교

Fig. 10. Kramers-Kronig relation and the variation of sound velocity of Polyurethane with frequency obtained at 2.25 MHz by phase spectrum analysis method.

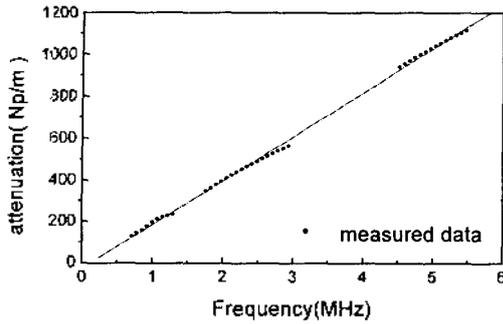


그림 11. 주파수에 따른 폴리우레탄의 감쇠계수의 변화  
 Fig. 11. The variation of attenuation coefficient of Polyurethane with frequency(obtained at 1MHz, 2.25MHz, 5MHz).

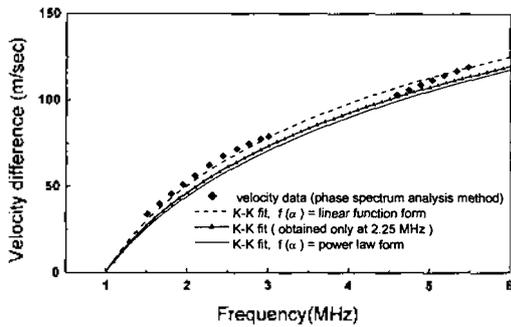


그림 12. 폴리우레탄의 음속측정 결과와 여러 형태의 감쇠함수 적용에 의한 Kramers-Kronig 관계  
 Fig. 12. The sound velocity data of Polyurethane and the result of the comparison with three different Kramers-Kronig fittings including the result shown in fig. 10.

그림 12에서 감쇠함수를 지수함수로 해석하여 전개한 위 식의 결과와 감쇠함수를 주파수에 대하여 선형으로 해석하여 구한 Kramers-Kronig relation 식을 그래프로 나타내었고, Phase spectrum analysis method로 구한 음속 측정값을 그래프 위에 나타내었다. 또 앞에서 구한 2.25 MHz에서만 측정하여 얻은 Kramers-Kronig relation 식 (15)도 함께 비교하여 보았다. 여기서  $\Delta c = c(\omega) - c_0$ 를 의미하고,  $c_0$ 는 1MHz에서의 음속,  $f_0$ 는 1MHz이다. 그 결과 폴리우레탄 재료는 주파수의 변화에 따른 음속의 변화정도( $\Delta c$ )가 감쇠계수를 선형으로 해석한 결과와 지수함수로 해석한 경우에 있어서 거의 같은 결과를 얻었다. 이는 지수 형태를 갖는 감쇠계수 함수의 지수가 1과 가깝기 때문에 선형으로 해석한 방법과 근사한 결과를 얻었다고 보여진다[11].

위의 결과로부터 폴리우레탄(TDI/PPG(1000)/MOCA)재료는 주파수에 따라 음속과 감쇠계수간의 상관관계를 가지는 것으로 파악 할 수 있었고, 측정된 음향특성을 토대로 저주파 영역까지 확장된 Kramers-Kronig 관계식을 얻을 수 있었다. 이와 같이 구한 Kramers-Kronig 관계식은 측

정영역에서 얻은 결과의 신뢰성을 파악하고 저주파 영역에서의 음향특성을 예측하는 방법으로 사용될 수 있다. 그러나 어느 일정범위에서 측정된 결과를 이용하여 얻었기 때문에, 측정범위 외에서의 고분자 재료의 음향특성을 정확히 예측하고 파악하기 위해서는 더 넓은 주파수 영역에서의 측정과 많은 자료를 통해 정확한 감쇠함수를 구하는 작업이 필요하리라 생각된다.

V. 결론

크기가 작고 감쇠가 심한 고분자 재료의 음향특성을 평가하기 위하여 투과법을 적용하였다. 분산적인 폴리우레탄 재료에 대해서는 Phase spectrum analysis 를 통해 음속을 구하였고, 감쇠계수는 Amplitude spectrum을 구하여 유효 주파수 범위에서 구하였다. 음향특성을 구할 때 기준신호를 사용하지 않은 경우, 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 투과법의 적용 시, 두께가 서로 다른 여러 개의 시편 준비가 필요하였다.

고주파 대역에서의 측정결과를 가지고, 저주파 대역의 음향특성을 파악하기 위해서는 Kramers-Kronig relation의 도입이 필요하다. 폴리우레탄 재료의 감쇠는 주파수에 대해 1차 함수식 또는 지수가 1에 가까운 지수형태의 함수로 표현되었고, Kramers-Kronig relation을 이용해서 음속과 음향감쇠계수의 주파수에 따른 상관 관계식을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

1. Bruce Hartmann "Acoustic Properties," Physical Properties of Polymers Handbook, (American Institute of Physics, 1996), pp.677
2. M. L. Williams, R. F. Landel, and J. D. Ferry, Journal of American Chemistry Society vol 77, pp. 3701, 1955
3. ASTM Standards, "Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials," ASTM, pp.181-193(E 494), 1997
4. R. N. Thurston and Allan D. Pierce, "Ultrasonic Measurement Methods," The Measurement of Ultrasonic Velocity, (Academic Press, 1990), chapter 2
5. Alan Wolfenden, "Dynamic Elastic Modulus Measurements in Materials," ASTM, , pp.18-46, 1990
6. W. Sachse and Y. H. Pao, "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids," J. Appl. Phys. Vol. 49, pp.4320-4327, 1978
7. ASTM Standards, pp.563-572(C 1332), 1997
8. M. O' Donnell, E. T. Jaynes, and J. G. Miller, "Kramers-Kronig relationship between ultrasonic velocity and phase velocity," J. Acoust. Soc. Am. Vol.69, pp.696-701, 1981
9. Bruce Hartmann and Jacek Jarzynski, "Ultrasonic Hysteresis absorption in polymers," J. Appl. Phys. Vol. 43, pp.4304-4312, 1972
10. E. Oran Brigham, "The Fast Fourier transform and its applications," ( Prentice-Hall Int., 1988)
11. Thomas L. Szabo, "Causal theories and data for acoustic

attenuation obeying a frequency power law," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 97, No. 1, pp.14-24, 1995

▲김 태 식(Tae Sik Ki)

1997년 2월 : 서울대학교 금속공학과(학사)

1999년 2월 : 한국과학기술원 재료공학과(석사)

현재 : 삼성전관주식회사 근무

▲이 기 식(Ki Suk Lee)

1998년 2월 : 한양대학교 금속공학과(학사)

1998년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술원 재료공학과 석사과정

▲안 봉 영(Bongyoung Ahn)

1983년 : 연세대학교 물리학과(학사)

1985년 : 연세대학교 물리학과(석사)

1998년 : 한국과학기술원 재료공학과(박사)

현재 : 한국표준과학연구원 비파괴평가그룹 책임연구원

※ 주관심 분야 : 초음파와 전자기적 방법을 이용한 재료물성 평가, EMAT, 초음파현미경

▲이 진 형(Zin Hyoung Lee)

1969년 : 서울대학교 금속공학과(학사)

1974년 : 아헨공대(독일) 금속공학과(석사)

1977년 : 이헨공대(독일) 금속공학과(박사)

1978년 : 독일 Mahle GMBH 개발담당연구원

1979년 : KIST 주물기술센터 선임연구원

1982년 : 미국 Mahle Inc. 주조 부장

1985년 ~ 현재 : 한국과학기술원 교수