

저주파 영역에서 고분자 재료의 음속 측정에 관한 연구

Study on Measuring the Acoustic Velocity Propagating Through the Polymeric Materials in the Low Frequency Ranges

김 창 현*, 조 국 영*, 박 정 기*

(Chang Hyeon Kim*, Kuk Young Cho*, Jung Ki Park*)

*이 논문은 1997년도 수중음향특화연구센터 연구비에 의하여 연구되었음.

요 약

저주파 영역의 음파의 투과속도 측정에 기존의 펄스에코방법이나 투과법(transmission method)가 이용되는 경우, 탐촉자 및 시편의 크기, 시편과 탐촉자 사이의 거리가 사용하는 음파의 주파수가 작아질수록 대형화되어 측정에 어려움을 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 고분자 재료의 음향특성을 평가할 수 있는 간단한 방법으로 고분자 재료의 주파수에 따른 동적 탄성률(dynamic modulus)을 시간-온도 중첩의 원리를 이용하여 측정하고, 고분자 내에서 저주파 영역의 음파의 전달 속도와 주파수에 따른 탄성률(elastic modulus), 전단 탄성률(shear modulus) 그리고 밀도의 관계식으로부터 음속을 측정하였다. 실험결과 주파수가 증가함에 따라 고분자 재료의 동적 탄성률이 증가하였으며, 음속도 주파수에 따라 증가하였다. 본 연구에서 사용한 폴리우레탄 재료의 음속은 100 Hz ~ 10 kHz 영역에서 약 1500 m/sec에서 3000 m/sec를 나타내었다.

ABSTRACT

In measuring the acoustic velocity propagating through the polymer materials in low frequency ranges, the pulse echo method or the transmission method has difficulties that the size of the transducers and the samples, and the distance between the transducers must be enlarged as the frequency of the acoustic wave is lowered. We propose the simple method of obtaining the acoustic velocity in low frequency ranges by measuring the dynamic modulus of the polymers and using the time-temperature superposition principle. The dynamic modulus and the acoustic velocities of the polymeric materials increased as the frequency increased. The acoustic velocities in the polyurethanes tested in this study were in the range of the 1500 m/sec to the 3000 m/sec.

I. 서 론

수중에서 잠수함 또는 다른 잠수정들을 찾아내거나 위치를 확인하기 위해서 수중음향센서를 이용하는 것이 가장 일반적이다. 이러한 용도로 사용되는 하이드로폰(hydrophone)은 높은 수압에도 그 감도를 잃지 않고 제 기능을 발휘하여야 한다. 이러한 하이드로폰을 높은 수압과 분과의 접촉으로부터 보호하기 위해 수중음향센서 보호용 음향투과재료를 사용하여 SONAR, 어군 탐지기 등을 제조하고 있다. 이러한 SONAR는 수심이 깊은 곳에서 사용하기 때문에 투과손실이 작고 수압을 견딜수 있는 강도를 가져야 한다. 이러한 용도로 현재 사용되거나 연구되어지고 있는 음향투과재료로서 Butadiene rubber, Polyurethane 등이 가

장 많이 쓰이고 있으며, Spectra라고 하는 초고분자량 폴리에틸렌 섬유(ultra-high molecular weight polyethylene fiber)를 이용한 복합체도 일부 사용되고 있다.^{1,2} 이러한 음향투과재료는 높은 수압 하에서 초음파 발생장치인 압전소자를 물로부터 접촉되는 것을 방지함으로써 전기적 단락이 일어나지 않게하는 절연체의 기능과 무과 손실을 없애기 위해 음파가 전달되는 물의 임피던스와 음향투과재료의 임피던스를 매칭되게하고 음파전달을 용이하게 하기 위한 저감쇠 특성이 중요하다.

음향투과재료의 음향 특성을 조사하기 위해서는 필수적으로 재료내의 음속을 구하여야 한다. 음향투과재료 내의 음파의 투과 속도는 현재 펄스에코방법과 두 개의 탐촉자 사이에 시편을 위치시킬 때와 그렇지 않을 때의 음파의 도착 시간차와 탐촉자 사이의 거리로부터 속도를 측정하는 투과법(transmission method)이 많이 사용되고 있다.^{3,9} 통상적으로 MHz 영역에서 여러 가지 고분자 재료

* 한국과학기술원 화학공학과

접수일자: 1998년 8월 3일

의 음속을 펄스에코방법이나 투과법을 이용하여 측정하여 왔다. 그러나 SONAR에서 사용하는 주파수 영역은 대략 수 내지 수십 kHz이며, 최근에는 100 Hz 영역의 주파수를 사용하는 극저주파 SONAR도 개발되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 SONAR에 사용되는 유향투과재료를 개발하기 위해서는 저주파 영역의 음파의 전달 속도를 측정하여야 한다. 이러한 저주파 영역의 음파의 투과 속도 측정에 펄스에코방법이나 투과법이 이용되는 경우, 탐촉자 및 시편의 크기, 시편과 탐촉자 사이의 거리가 사용하는 음파의 주파수가 작아질수록 대형화되는 문제점을 나타내게 된다. 이러한 문제점으로 인하여 저주파 영역에서의 고분자 재료의 음향특성을 평가할 수 있는 방법이 아직까지 확립되어 있지 않은 실정이다.

일반적으로 재료 내에서의 음파의 투과속도는 재료의 벌크 탄성률(bulk modulus), 전단 탄성률(shear modulus), 그리고 밀도의 함수로 표현된다. 이미 금속 재료의 경우에는 음파의 투과 속도와 밀도를 측정함으로써 재료의 탄성률을 측정하는 연구들이 많이 이루어지고 있어¹⁾, 재료 내에서의 음파의 투과 속도가 탄성률과 밀도의 함수로 표현됨을 입증하고 있다. 그러나 고분자 재료의 경우에는 주파수에 따라 고분자 재료의 탄성률이 변하기 때문에 음파의 투과 속도 또한 주파수에 따라 달라지게 된다.

본 논문에서는 유향 투과 재료로 사용되는 고분자 재료 내에서 음파의 전달속도를 저주파 영역에서 주파수에 따른 고분자 재료의 동적 탄성률을 측정하여 재료 내에서의 음파의 전달속도를 계산함으로써 저주파 영역에서 고분자 재료의 음향특성을 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

II. 실험 방법

1. 시 료

음속 측정에 사용된 고분자 재료로써 TPU5095, TPU1155, TPU1170의 세가지 종류의 열가소성 폴리우레탄을 정우산업(주)으로부터 받아 90℃, 진공하에서 5시간 동안 건조시켜 사용하였다. 각 시료의 유리전이온도(T_g)는 Dupont Thermal Analyst 2000기기를 이용하여 질소 분위기에서 10℃/min으로 승온하여 측정하였다. 각 시료의 구조와 밀도, 유리전이온도는 표 1에 나타내었다.

표 1. 열가소성 폴리우레탄 재료의 기초 물성
Table 1. Structural parameters of thermoplastic polyurethane.

Sample 명	분자 구조	밀도(g/cm ³)	유리전이온도(℃)
TPU5095	Polycster-MDI ^a	1.23	-30
TPU1155	TPU ^b /ABS ^c Blend	1.01	-63
TPU1170	TPU/ABS Blend	1.01	-17

a: Polyester계열의 디알콜과 MDI(Methylene diphenyl Isocyanate)를 축중합하여 제조한 폴리우레탄
b: Thermoplastic PolyUrethane
c: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer

2. Dynamic Modulus 측정

Dynamic elastic modulus는 길이 75 mm, 너비 3.0mm, 두께 1.8mm의 직육면체 모양의 시편에 대하여 Visco-Elastic Spectrometer(VES)를 이용하여 0.1 Hz에서 100 Hz 까지, 각 재료의 유리전이온도 이상의 세 온도(TPU5095 : -20℃, -10℃, 0℃; TPU1155 : -30℃, -20℃, -10℃; TPU1170 : -10℃, -4℃, 5℃)에서 측정하였다. Dynamic shear modulus는 길이 65 mm, 너비 12.7mm, 두께 2.8mm의 직육면체 모양의 시편을 제조하여 Rheometrics Mechanical Spectrometer(RMS)를 이용하여 0.1 Hz에서 100 Hz 까지, dynamic elastic modulus 측정 시와 같은 온도에서 측정하였다.

III. 이 론

1. 음파의 전달

매질 내에서의 음파의 진행은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = M^* \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (1)$$

이때 ρ 는 매질의 밀도, ξ 는 매질내 입자의 변위, $M^* = M' + iM''$ 로 표현되는 복소수 탄성률(complex modulus)이다. 또 M^* 는 다시 식 (2)와 같이 벌크 탄성률(K^*)와 전단 탄성률(G^*)로 표현된다.

$$M^* = K^* + \frac{4}{3} G^* \quad (2)$$

식 (1)의 편미분 방정식의 해를 구하면, M^* 는 감쇄계수 α (absorption coefficient)와 음파의 속도 U 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁰⁾

$$M' = \rho U^2 \left[\frac{1 - (\alpha U/\omega)^2}{\{1 + (\alpha U/\omega)^2\}^2} \right] \quad (3)$$

$$M'' = \frac{2\rho U^2 (\alpha U/\omega)}{\{1 + (\alpha U/\omega)^2\}^2} \quad (4)$$

일반적으로 고체 매질을 통과하는 음파의 감쇄계수는 아주 작으므로, $(\alpha U/\omega)^2 \ll 1$ 이 되어 식 (3)과 (4)는 아래와 같이 표현된다.

$$M' = \rho U^2 \quad (5)$$

$$M'' = 2\rho U^2 \alpha/\omega \quad (6)$$

따라서

$$U^2 = \frac{M'}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left[K' + \frac{4}{3} G' \right] \quad (7)$$

과 같이 음파의 속도가 표현된다. 이때, K' 는 매질의 벌크 탄성률의 실수부, G' 는 전단 탄성률의 실수부, ρ 는 재료의 밀도이다. 그리고 벌크 탄성률은 다음의 식 (8)과 같이 탄성률(E')와 전단 탄성률(G')로 표현된다.¹¹

$$K' = \frac{1}{3} \frac{E'}{3 - E'/G'} \quad (8)$$

이 관계를 식 (7)에 적용하면, 음파의 속도는 아래의 식 (9)와 같이 G' , E' 그리고 ρ 의 함수로써 표현된다.

$$U^2 = \frac{M'}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{4G' - E'}{3 - E'/G'} \right] \quad (9)$$

즉, 매질의 탄성률과 전단 탄성률을 측정하게되면 식 (9)에 의해 음파의 전달속도를 구할 수 있게 된다. Sidney Lees et. al.¹²은 위의 식 (9)를 이용하여 Epoxy와 같은 고분자 물질에 Tungsten과 같은 단단한 filler를 섞은 복합체내에서의 음파의 전달속도를 고분자 물질과 filler의 탄성률 값과 밀도로부터 계산하였다. 또한 Hideji Fujii et. al.¹은 단단한 filler와 다양한 고분자 계열의 고분자 물질을 섞은 복합체의 밀도, 음파의 전달속도, 탄성률을 Reuss model에 의해 계산하였고, 이의 이론치와 실험치가 거의 일치함을 보였다. 그러나 위의 두 연구 모두 음파의 속도를 측정하기 위해 MHz 영역의 초음파를 사용하였으며, 탄성률은 어떤 주파수에서 측정하였는지에 대한 구체적인 표기를 하지 않고 있다.

2. 시간-온도 중첩의 원리

일반적으로 고분자 물질은 점탄성(visco-elastic) 특성을 가지고 있다. 점탄성 특성을 가지고 있다는 것은 재료의 기계적 특성이 시간 또는 주파수에 따라 항상 변함의 미하며, 따라서 이를 동적 특성(dynamic property)이라고 부른다. 이러한 고분자의 점탄성 특성을 나타내는 구성방정식은 일반적으로 다음과 같다.⁸

$$\sigma(t) = S(t)\epsilon(0) + \int_0^\infty S(t-\tau) \frac{\partial \epsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (10)$$

이때, ϵ 는 재료의 변형(strain)으로써 $\partial u/\partial x$ (위치 x 에 따른 변위 u 의 편미분)로 표현되며, σ 는 응력(stress), S 는 고분자 재료의 응력-완화 탄성률(stress-relaxation modulus)으로써 일반적으로 고분자 재료의 탄성률(E')이나 전단 탄성률(G')을 의미한다. ϵ 과 σ 는 시간 t 의 함수이며, S 는 시간 t 와 온도 T 의 함수이다. 온도에 따른 탄성률 S 의 변화는 단지 시간축을 이동시킴으로써 표현할 수 있는데, 이를 시간-온도 중첩의 원리(time-temperature superposition principle)라 한다. 시간-온도 중첩의 원리는 점탄성 재료에 있어서, 한 온도에서 측정된 탄성률은 단지 그 탄성률 값을 시간축을 따라 이동시킴으로써 인해 다른 온도에서 측정된 탄성률 값과 중첩(superimpose)될 수 있다

는 것을 의미한다. 이때 이동시키는 인자인 이동인자(shift factor) a_T 는 아래의 식 (11)와 같이 표현되며, 이를 Williams-Landel-Ferry (WLF) 식이라 한다.¹¹

$$\log a_T = \log t/t_T = \frac{-C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (11)$$

이때, T_s 는 기준 온도를 나타내며, 본 연구에서는 각 열가소성 폴리우레탄 재료의 유리전이온도를 기준온도로 설정하였다. 일반적으로 기준 온도를 유리전이온도로 설정하였을 때, 상수인 C_1 , C_2 값은 각각 17.44, 51.6이다. WLF 식을 이용하여 어느 한 온도에서 주파수에 따른 탄성률 변화를 구할 수 있으며, 또한 그 반대로 어느 한 주파수에서 온도에 따른 탄성률의 변화를 구할 수 있다. 이러한 WLF식은 고분자가 부정형이고 균일한 상을 이룰 때 잘 적용된다.

위에서 살펴 본 바와 같이, 고분자 재료는 점탄성 특성을 가지고 있으므로 실험에 사용되는 음파의 주파수에 따라 재료의 탄성률이 변한다. 즉, 고분자 재료를 통과하는 음파의 주파수에 따라서 그 전달속도가 달라지게 됨을 의미한다. 따라서 주파수에 따른 고분자 재료의 탄성률(elastic modulus)와 전단 탄성률을 측정하게되면, 식 (9)를 이용하여 고분자 매질 내에서 음파의 주파수에 따른 음파의 전달속도를 구할 수 있다.

IV. 실험 결과 및 고찰

주파수에 따른 탄성률을 측정하기 위하여 VES와 RMS를 이용하여 동적 탄성률(dynamic elastic modulus), 동적 전단 탄성률(dynamic shear modulus)를 각각 구하였다. VES와 RMS를 사용하여 측정 가능한 주파수의 범위는 0.1에서 100 Hz까지이다. 그러나 수중음향센서에 사용하는 음파는 그 주파수가 일반적으로 수 내지 수십 kHz 범위의 초음파를 사용한다. 수중음향센서 보호용 재료로 사용되는 고분자 재료의 음향특성을 평가하기 위해 kHz 영역에서의 재료의 탄성률의 직접적인 측정이 어려우므로, 고분자 재료에 적용되는 일반적인 이론인 시간-온도 중첩의 원리를 이용하여 kHz 영역의 주파수를 포함하는 고분자 재료의 탄성률을 간접적으로 측정할 수 있었다.

VES와 RMS를 이용하여 각각 세 온도(예를들어 TPU5095 우레탄 재료의 경우에는 20°C, 10°C, 0°C)에서 0.1~100 Hz범위에 해당하는 탄성률(E')과 전단 탄성률(G')을 측정하여, 위 식(11)의 이동인자를 이용하여 원하는 온도의 탄성률 값으로 이동시킬 수 있다. 대표적으로 그림 1과 그림 2에 TPU5095의 주파수에 따른 탄성률(E')과 전단 탄성률(G')을 시간-온도 중첩의 원리에 의하여 20°C로 이동시켜 얻은 값들을 도시하였다. 그림 1과 2로부터 TPU5095가 시간-온도 중첩의 원리에 잘 적용됨을 알 수 있으며 TPU5095의 탄성률(E')과 전단 탄성률(G')은 $\log(freq. (Hz))$ 에 거의 선형적으로 의존함을 볼 수 있

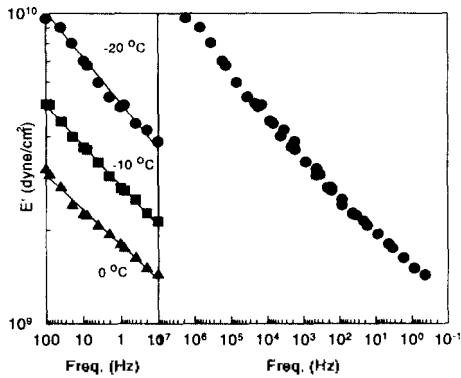


그림 1. 20°C에서 TPU5095의 주파수에 따른 elastic modulus의 변화

Fig. 1. The elastic modulus change of TPU5095 with frequencies at 20°C.

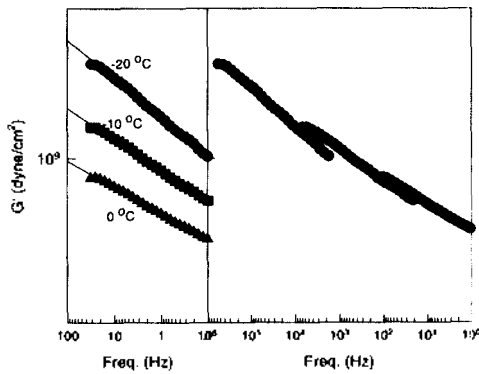
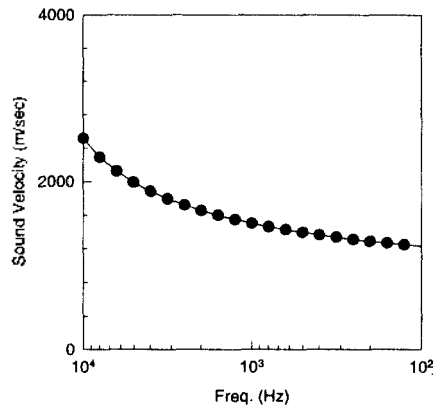


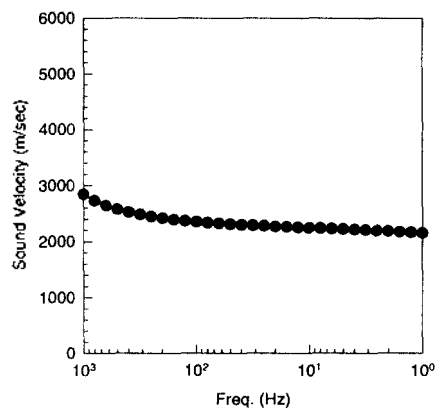
그림 2. 20°C에서 TPU5095의 주파수에 따른 shear modulus의 변화

Fig. 2. The shear modulus change of TPU5095 with frequencies at 20°C.

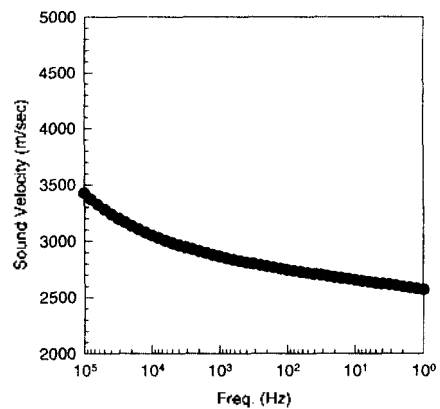
었다. Catsiff와 Tobolsky는 polyisobutylene의 주파수에 따른 탄성률을 시간-온도 중첩의 원리를 이용하여 master curve를 작성하였다.¹¹ 이 연구 결과에서는 주파수에 따라서 polyisobutylene의 상태가 유리상(glassy state)에서 고무상(rubbery state), 고무상(rubbery state)에서 액체 흐름상(liquid flow state)로 변할 때 탄성률의 급격한 변화가 있음을 나타내었다. 반면 본 연구에서 사용한 주파수 영역에서는 그림 1과 그림 2에서 알 수 있듯이 어떠한 전이를 보이지 않음을 알 수 있다. 고분자 사슬의 완화시간이 주기적인 응력을 가하는 시간보다 늦을 경우에 고분자는 유리상으로 존재하게 되고, 반대로 고분자 사슬의 완화시간이 주기적인 응력을 가하는 시간보다 빠를 경우에 고분자는 고무상으로 존재하게 되며, 고분자 사슬의 완화시간과 주기적인 응력을 가하는 시간이 같을 때가 유리상에서 고무상으로 전이하는 때이다. 즉, 본 실험에서는 주기적인 응력을 사용한 고분자의 유리전이온도 이상에서 가하였으며, 따라서 이 주파수 영역에서 고분자는 고무상으로 존재하기 때문에 유리상에서 고무상으로의 전이를 보이지 않는 것이다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. 20°C에서 열가소성 폴리우레탄 재료의 주파수에 따른 음파의 전달속도

(a) TPU5095 (b) TPU1155 (c) TPU1170

Fig. 3. The sound velocity propagation through the polyurethane at 20°C; (a) TPU5095 (b) TPU1155 (c) TPU1170

본 연구에서 사용한 열가소성 폴리우레탄 재료는 TPU5095, TPU1155, TPU1170의 3개의 상용화된 폴리우레탄 재료로서 이들의 기초 물성은 표 1에 나타나 있다. TPU5095는

polyester계의 soft segment와 MDI로 이루어진 폴리우레탄이며, TPU1155와 TPU1170은 열가소성 폴리우레탄 단일 중합체와 ABS(Acrylonitrile-co-Butadiene-co-Styrene copolymer)의 블렌드로 이루어진 물질로 밀도가 1.01로서 물과 아주 유사한 값을 가지고 있다.

이러한 3종류의 열가소성 폴리우레탄 재료의 주파수에 따른 음파의 전달속도를 시간-온도 중첩의 원리를 이용하여 구한 elastic modulus와 shear modulus를 식(9)에 대입하여 구하였으며, 이를 그림 3(a)~(c)에 나타내었다. 100 Hz ~ 10 kHz 영역에서 음파의 전달속도가 약 1500 m/sec에서 3000 m/sec 사이에 있으며, 주파수가 증가할수록 음속이 증가하는 특성을 보여주고 있다. 이것은 주파수가 증가함에 따라 재료의 탄성률이 그림 1과 2에서 살펴본 바와 같이 증가하기 때문에 식 (9)에서 살펴본 바와 같이 음속이 증가하게 된다. 이전의 연구자들은 polymethylmethacrylate(PMMA)에 대하여 음속의 주파수 의존성을 MHz 영역에서 조사하여 주파수가 증가함에 따라 음속이 증가하는 결과를 나타내었으며, 주파수가 10배 증가함에 따라 음속은 약 1% 증가한다고 보고하였다.^{3,8,9} 이는 선행 연구자들이 사용한 PMMA는 MHz 영역에서 유리상태(glass state)에 있기 때문에, 주파수 변화에 따라 탄성률이 크게 변하지 않고, 그 결과 음속의 변화도 작다. 반면 본 연구에서 사용한 폴리우레탄 재료는 저주파 영역에서 고무상에 있으며, 주파수에 따른 음속의 변화가 PMMA의 경우보다 훨씬 더 큰 것을 알 수 있었다.

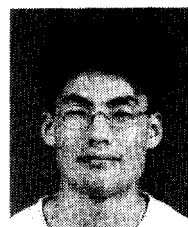
IV. 결 론

수중음향센서에 사용하고 있는 음파의 주파수는 수 내지 수십 kHz 범위의 저주파이다. 이러한 저주파 영역에서 사용되는 음향투과재료의 음향특성을 평가할 수 있는 간단한 방법으로 고분자 재료의 주파수에 따른 동적 탄성률을 시간-온도 중첩의 원리를 이용하여 구하고, 고분자 내에서 저주파 영역의 음파의 전달 속도와 주파수에 따른 탄성률(elastic modulus), 전단 탄성률(shear modulus) 그리고 밀도의 관계식으로부터 음속을 측정하였고, 그 결과 주파수가 증가함에 따라 재료의 동적 탄성률이 증가하였으며, 음속도 주파수에 따라 증가하였다. 주파수가 100 Hz ~ 10 kHz 영역인 초음파의 전달속도는 약 1500 m/sec에서 3000 m/sec를 나타내었다.

참 고 문 헌

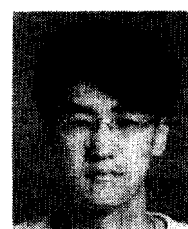
- H. Fujii, C. Nakaya, H. Takeuchi, T. Kondo, and Y. Ishikawa, "Acoustic Properties of Lens Materials for Ultrasonic Probes", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34, pp. 312-315, 1995.
- Huy X. Nguyen, "Composites Reinforced with Extended Chain Polyethylene Fibers : Acoustically Transparent Materials for Underwater Applications", *Polym. News*, 17, pp. 135-140, 1992.
- Emmanuel P. Papadakis, "The measurement of ultrasonic velocity" in *Ultrasonic Measurement Methods*, R.N. Thurston, Allan D. Pierce Ed., Academic Press INC., San Diego, 1990, pp. 81-106.
- Y. Wada, A. Itani, T. Nishi, and S. Nagai, "Grüneisen Constant and Thermal Properties of Crystalline and Glassy Polymers", *J. of Polym. Sci., Part A-2*, 7, pp. 201-208, 1969.
- M. P. Felix, "Attenuation and Dispersion Characteristics of Various Plastics in the Frequency Range 1-10 MHz", *J. Comp. Mat.*, 8, pp. 275-287, 1974.
- D.L. Lamberson, J.R. Asay, and A.H. Guenther, "Equation of state of Polystyrene and Polymethylmethacrylate from Ultrasonic Measurements at Moderate Pressures", *J. Appl. Phys.*, 43(3), pp. 976-985, 1972.
- H. Singh and A.W. Nolle, "Pressure Dependence of the Viscoelastic Behavior of Polyisobutylene", *J. Appl. Phys.*, 30(3), pp. 337-341, 1959.
- H. J. Sutherland and R. Lingle, "An acoustic characterization of polymethyl methacrylate and three epoxy formulations", *J. Appl. Phys.*, 43(10), pp. 4022-4026, 1972.
- J.R. Asay, D.L. Lamberson, and A.H. Guenther, "Pressure and Temperature Dependence of the Acoustic Velocities in Polymethylmethacrylate", *J. Appl. Phys.*, 40(4), pp. 1768-1783, 1969.
- Andrew T. Matheson, *Molecular Acoustics*, John Wiley & Sons Ltd., Bristol, England, 1971, pp. 166-186.
- D.W. Van Krevelen, *Properties of Polymers*, 3rd Ed., Elsevier Science Publishers, New York, 1990, pp. 367-438.
- S. Lees and C.L. Davidson, "Ultrasonic Measurement of Some Mineral Filled Plastics", *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-24(3), pp. 222-225, 1977.

▲김 창 현(Chang-Hyeon Kim)



1994년 2월 : 한국과학기술원 화학공학
학과(학사)
1996년 2월 : 한국과학기술원 화학공학
학과(석사)
1996년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술원 화
학공학과 박사과정

▲조 국 영(Kuk Young Cho)



1996년 2월 : 서울대학교 공업화학
학과(학사)
1998년 2월 : 한국과학기술원 화학공
학과(석사)
1998년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술원 화
학공학과 박사과정

▲박 정 기(Jung-Ki Park)



1974년 2월: 서울대학교 화학공학과
(학사)

1976년 2월: 한국과학기술원 화학공
학과 (석사)

1986년 2월: Stanford University, Che-
mistry (박사)

1987년 11월~1991년 2월: 한국과학
기술원 화학공학과 조교수

1991년 3월~1996년 8월: 한국과학기술원 화학공학과 부
교수

1996년 9월~현재: 한국과학기술원 화학공학과 교수