

상용 MC Nylon계 고분자 재료에서 초음파 특성의 온도 및 주파수 의존성

Temperature and Frequency Dependences of Ultrasonic Properties in Commercial MC Nylon Polymers

김명덕*, 김용태**, 이강일***†

Myung Deok Kim*, Yong Tae Kim** and Kang Il Lee***†

초 록 본 연구에서는 상용화된 monomer-cast nylon (MC nylon)계 고분자 재료로 만든 6종류의 시편에 대하여 감쇠계수 및 위상속도와 같은 초음파 특성의 온도 및 주파수 의존성을 조사하였다. 시편의 초음파 특성은 수중에서 2 MHz부터 8 MHz까지의 광대역 주파수 범위에 대하여 펄스투과법을 이용하여 측정하였다. 수온은 10°C부터 60°C까지 10°C 간격으로 변화시켰다. 측정에 사용된 모든 시편에서 감쇠계수는 주파수가 증가함에 따라 증가하였으며, 주파수의 지수 의존성 n 이 선형 ($n=1$)에서 약간 벗어난 1.16부터 1.44이내의 값을 가졌다. 위상속도는 60°C에서 ivory 시편을 제외한 모든 경우에 대하여 주파수가 증가함에 따라 감소하는 음의 분산 특성을 나타냈다. 주파수에 의존하는 위상속도는 모든 시편에서 온도가 증가함에 따라 감소하는 특성을 나타내었다.

주요용어: 초음파 재료, MC nylon 고분자, 감쇠계수, 위상속도, 온도, 주파수

Abstract In the present study, temperature and frequency dependences of ultrasonic properties such as attenuation coefficient and phase velocity was investigated for six kinds of commercial MC-Nylon polymer samples. The ultrasonic properties of the samples were measured by using a pulse transmission method in water over a broadband frequency range of 2 to 8 MHz. Water temperature was varied from 10 to 60°C with the 10°C interval. The attenuation coefficients of the samples increased with the frequency and the exponent n of frequency dependence ranged within 1.16 to 1.44, slightly deviating from the linear dependence ($n=1$). The phase velocities of the samples exhibited negative dispersion, i.e., decreasing velocity with increasing frequency, except for ivory sample at 60°C. The frequency-dependent phase velocities of the samples showed the decreasing tendency with increasing temperature.

Keywords: Ultrasonic Material, MC Nylon Polymer, Attenuation Coefficient, Phase Velocity, Temperature, Frequency

1. 서 론

의료용 초음파 분야에서 생체조직 이외에도 초음파 변환기를 구성하는 초음파 재료의 초음파 특성은 매우 중요하다. 의료용 초음파 변환기는

생체조직과 진단기기 사이에서 전기-음향 신호의 변환을 담당하는 핵심 부품으로서 음향렌즈, 정합층, 압전재료, 후면 흡음 재료, 및 하우징 재료로 구성된다[1]. 압전 재료에서 발생된 초음파가 매질을 전파할 때, 초음파는 매질 경계면에서

음향 임피던스 차에 의해 반사하거나 투과된다. 투과된 초음파는 매질 내에서 흡수와 산란에 의해 그 세기가 감소하고 흡수된 에너지는 다른 형태의 열에너지로 전환된다. 발생한 열에 의해 매질의 물성이 달라질 수 있으며, 매질의 변화된 물성은 감쇠계수 및 음속과 밀도의 곱으로 주어지는 음향 임피던스에 영향을 미친다. 궁극적으로 매질 내부와 경계면에서 전파 조건의 변화를 유발하여 초음파의 반사 및 투과 특성뿐만 아니라 초음파에 의해 야기되는 열적, 역학적 특성에도 큰 변화를 일으킨다.

초음파 변환기를 구성하고 있는 부분 중 정합층은 압전 재료의 진동에 의해 발생한 초음파를 전달하려는 매질과의 음향 임피던스 차이를 줄여 초음파를 효율적으로 전달하는 역할을 한다. 정합층 재료의 음향 임피던스는 압전 재료의 음향 임피던스와 전달하려는 매질의 음향 임피던스 사이의 기하 평균값으로 결정되며, 최적의 설계를 위하여 재료의 온도에 따른 음향 임피던스를 조사할 필요가 있다. 일반적으로 고분자는 금속처럼 기계적 강도가 우수하지만, 금속과 달리 전기 절연체 또는 높은 전기저항을 갖는 재료로 가공이 용이하며, 또한 어려운 형상을 쉽게 구현할 수 있는 장점이 갖고 있다. 특히 금속에 비하여 밀도가 상대적으로 낮아 경량화가 용이하며, 음향 임피던스도 물과 압전 복합체의 기하 평균값을 가지기 때문에 초음파 재료로 사용될 수 있다. 상용 고분자 재료의 경우에 기계적 특성은 제조사로부터 제공되는 자료를 이용할 수 있지만, 초음파 특성은 제조사로부터 제공되는 경우가 거의 없다. 또한 초음파 특성의 주파수에 따른 변화는 방대한 분량의 문헌을 조사하더라도 제조사별 차이를 짐작하기는 매우 어렵다. 특히 초음파 특성의 온도에 따른 변화는 문헌조사를 통하여도 구하기 어려운 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 다양한 고분자 재료들 중에서 국내에서 생산된 6종류의 monomer-cast nylon (MC nylon)계 고분자 재료에 대하여 감쇠계수 및 위상속도와 같은 초음파 특성의 온도 및 주파수의 의존성을 조사하였다. 고분자 재료의 초음파 특성은 의료용 초음파에서 자주 사용되는 2-8 MHz의 광대역 주파수 범위에 대하여 수중에서 펄스 투과법을 이용하여 측정하였다[2]. 또한 수온을 10-60℃의 온도 범위에 대하여 10℃ 간격으로 변

화시켜가며 온도에 따른 초음파 특성 변화를 측정하였다. 이로부터 MC nylon계 고분자 재료에 첨가되는 물질에 따라 초음파 특성의 온도 및 주파수 의존성이 변하는 것을 확인하였으며, MC nylon계 고분자 재료의 초음파 특성에 대한 기초 자료로 활용하기 위한 목적으로 체계적으로 분류하여 제시하였다.

2. 초음파 감쇠계수 및 위상속도

감쇠계수는 초음파가 매질 내를 진행하면서 흡수나 산란 등에 의해서 감쇠된 양으로서 고분자 재료의 감쇠계수 $\alpha(\omega)$ (dB/cm)는 주파수 함수에 대하여 다음과 같은 식으로부터 계산되었다[3].

$$\alpha(\omega) = 8.686 \left[\alpha_w + \frac{1}{d} \{ \ln Tr(\omega) \} + \frac{1}{d} \ln \left(\frac{A_w}{A_s} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 ω 는 각주파수, d 는 고분자 재료의 두께, α_w 는 수중에서의 감쇠계수로서 주파수 f 와 $\alpha_w = \alpha_{w0} \times f^2$ 의 관계를 갖는다. α_{w0} 는 특성감쇠계수로서 상온(23℃)에서는 약 2×10^{-3} dB/cm/MHz²의 값을 갖는다[4]. A_w 및 A_s 는 서로 마주보는 초음파 송-수신기 사이에, 즉 초음파가 전파하는 경로에 고분자 재료가 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호의 파워 스펙트럼 레벨이다. $Tr(\omega)$ 는 수중에서 고분자 재료의 투과계수로서 주파수 함수에 대하여 다음과 같은 식으로부터 주어진다[3].

$$Tr(\omega) = \frac{4(\rho_s c_s)(\rho_w c_w)}{(\rho_s c_s + \rho_w c_w)^2} \quad (2)$$

여기서 ρ_w 및 ρ_s 는 각각 물 및 고분자 재료의 밀도이며, c_s 는 아래의 식(3)으로부터 주어지는 고분자 재료의 위상속도이다. 고분자 재료의 위상속도 $c_s(\omega)$ (m/s)는 주파수 함수에 대하여 다음과 같은 식으로부터 계산되었다[5].

$$c_s(\omega) = \frac{c_w}{1 + \frac{c_w \Delta \phi(\omega)}{\omega d}} \quad (3)$$

여기서 c_w 는 온도 및 압력에 의존하는 증류수의

음속, d 는 고분자 재료의 두께, $\Delta\phi(\omega)$ 는 초음파가 전파하는 경로에 고분자 재료가 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호의 위상차이다. 본 연구에서 측정된 MC nylon계 고분자 재료의 감쇠계수 및 위상속도에 대한 측정값의 표준불확도는 5% 이하였다.

3. 재료 및 측정방법

MC nylon은 원재료 nylon monomer를 다른 여러 가지의 원료와 중합하여 대기압 하에서 성형한 복합재이며, 중합하는 원료의 종류와 함량에 따라 다양한 복합재의 구성이 가능하다[6]. 대기압 하에서 성형하여, 사출성형이나 압출성형으로 만드는 다른 고분자 복합재에 비하여 무게가 가벼우면서도 기계적 강도, 내마모성과 가공성이 우수하다. 또한 고분자 재료는 내열성, 내약품성이 금속 재료보다 우수하므로 기계부품이나 산업소재로서 독특한 장점을 지니는 재료이다. 또한 이 재료는 음향 임피던스가 물과 압전 복합체 재료의 중간 정도의 값을 가지므로 의료용 또는 비파괴 평가 등에서 초음파 변환기의 정합층 재료로도 이용될 수 있다. 본 연구에서는 서로 다른 첨가물을 이용하여 제작된 6종류의 MC nylon계 고분자 재료(black, blue, charcoal gray, gray, ivory, 및 red)의 주파수에 의존하는 초음파 특성을 온도를 변화 시켜가며 조사하였다. Table 1은 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대한 밀도 및 음향 임피던스를 나타낸 것이며, 측정용 시편은 지름 50 mm 및 두께 10 mm를 갖는 원통형으로 가공하였다. 밀도와 음속의 곱으로 주어지는 음향 임피던스를 계산하기 위하여 시편의 음속은 5 MHz 및 20°C에서 측정된 위상속도를 이용하였다.

Table 1 Densities and acoustic impedances for the six MC nylon polymers

	Black	Blue	Charcoal gray	Gray	Ivory	Red
Density (kg/m ³)	1201	1147	1159	1132	1153	1143
Acoustic impedance (MRayl)	3.46	3.11	3.22	2.99	3.11	3.06

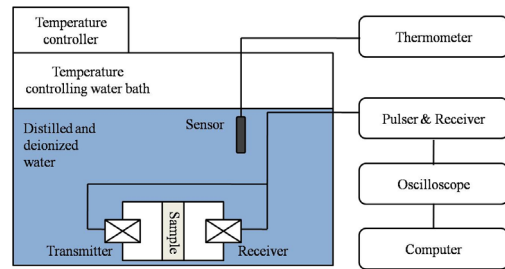


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement for measuring ultrasonic properties of the MC nylon polymers in water

고분자 재료의 초음파 특성은 Fig. 1과 같이 수중에서 2-8 MHz의 광대역 주파수 범위에 대하여 펄스투과법을 이용하여 측정되었다. 초음파 송-수신기로서 직경 12.7 mm 및 중심 주파수 5 MHz를 갖는 한 쌍의 비집속형 초음파 변환기 (Technisonic, ISL-0504-GP)가 이용되었다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 고분자 재료의 온도를 변화시키기 위하여 온도 조절이 가능한 수조 (MGW LAUDA, RC 20) 내에 고분자 재료를 침수시켰으며, 온도조절기(MGW LAUDA, RCS)를 이용하여 수온을 정밀하게 조절하였다. 수온 및 고분자 재료의 온도 변화는 10³°C의 분해능을 갖는 기준 온도계(ASL, F250 MK2)를 이용하여 확인되었으며, 수온을 10-60°C의 온도 범위에 대하여 10°C 간격으로 변화시켜가며 온도에 따른 초음파 특성 변화를 측정하였다. 이때 고분자 재료의 온도 및 수온의 변화를 최소화하기 위하여 실내 온도는 25 ± 3°C, 습도는 56 ± 5%로 항온항습 상태를 유지하였다. 또한 고분자 재료가 열적 평형상태가 되도록 해당 온도의 수중에서 1시간 30분 동안 충분히 가열하였다. 초음파의 송신 및 수신을 위하여 펄서-리시버(Panametrics, 5052 UAX 50)가 이용되었으며, 수신된 신호는 디지털 오실로스코프(Tektronix, TDS 5054)를 이용하여 수집되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 감쇠계수

Fig. 2는 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대

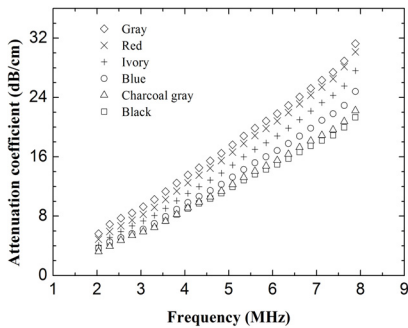


Fig. 2 Attenuation coefficients measured at 20°C as a function of frequency for the six MC nylon polymers

하여 주파수 함수로서 20°C에서 측정된 감쇠계수를 나타낸다. Fig. 2의 범례는 구별의 편의성을 위하여 감쇠계수의 값이 큰 순서대로 나타냈다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각각의 고분자 재료에 대하여 20°C에서 측정된 감쇠계수는 주파수가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 의존성을 나타냈다. 본 연구에서 이용된 각각의 고분자 재료는 근본적으로 모두 동일한 MC nylon계 재료이지만 서로 다른 첨가물 및 조성비를 가지므로 감쇠계수의 크기도 서로 다르게 나타났으며, 주파수가 증가함에 따라 그 차이도 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 주파수 함수로서 10, 20, 30, 40, 50 및

60°C에서 측정된 감쇠계수를 나타낸다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 각각의 고분자 재료에 대하여 측정된 감쇠계수는 모든 온도에 대하여 주파수가 증가함에 따라 증가하는 특성을 보였으며, 주파수의 지수의존성 n 이 선형에서 약간 벗어난 1.16부터 1.44이내의 값을 가졌다. 반면에 각각의 고분자 재료에 대한 Fig. 3에서 감쇠계수의 값이 큰 순서대로 나타낸 범례에서도 알 수 있듯이 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 2-8 MHz의 주파수 범위에서 측정된 감쇠계수는 온도에 대하여 서로 다른 의존성을 나타냈다.

Fig. 3과 같이 gray 및 red 고분자 재료는 온도가 증가함에 따라 감쇠계수도 증가하는 경향을 나타내며, black, blue, charcoal gray 및 ivory 고분자 재료는 10°C부터 40°C까지 온도가 증가함에 따라 감쇠계수가 감소하다가 최소값을 갖는 40°C (ivory의 경우에만 30°C) 이후에는 증가하는 비선형적인 경향을 나타낸다. 이와 같은 감쇠계수의 서로 다른 온도 의존성을 기준하여 본 연구에서 이용된 6종류의 MC nylon계 고분자 재료를 blue군 (black, blue, charcoal gray, 및 ivory) 및 gray군(gray 및 red)과 같이 2개의 재료군으로 분류하였다.

Table 2는 Fig. 3에 나타낸 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 주파수 함수로서 10, 20, 30, 40, 50 및 60°C에서 측정된 감쇠계수를 곡선맞춤(curve fitting)한 결과를 보여준다. Table 2에서 a_0 및 n 은 각각 다음과 같은 식으로부터 결정되었다.

Table 2 Results of curve fitting for the attenuation coefficients measured at 10, 20, 30, 40, 50 and 60°C as a function of frequency for the six MC nylon polymers

Temperature (°C)		Black	Blue	Charcoal gray	Gray	Ivory	Red	Minimum R ²	Maximum Standard Uncertainty
10	a_0	1.66	1.76	1.69	2.33	1.92	2.07	0.998	4.65×10^{-2}
	n	1.26	1.31	1.29	1.22	1.30	1.28		1.19×10^{-2}
20	a_0	1.46	1.38	1.34	2.39	1.63	1.95	0.991	5.24×10^{-2}
	n	1.29	1.39	1.35	1.23	1.36	1.31		1.21×10^{-2}
30	a_0	1.33	1.21	1.10	2.66	1.48	2.00	0.998	4.16×10^{-2}
	n	1.30	1.41	1.44	1.21	1.38	1.30		1.32×10^{-2}
40	a_0	1.30	1.16	1.20	3.09	1.49	2.20	0.998	6.48×10^{-2}
	n	1.31	1.39	1.38	1.2	1.38	1.29		1.48×10^{-2}
50	a_0	1.48	1.29	1.36	3.42	1.60	2.71	0.997	7.62×10^{-2}
	n	1.26	1.37	1.36	1.19	1.36	1.24		1.83×10^{-2}
60	a_0	1.69	1.52	1.60	3.75	2.04	3.63	0.991	19.32×10^{-2}
	n	1.23	1.32	1.33	1.2	1.28	1.16		2.83×10^{-2}

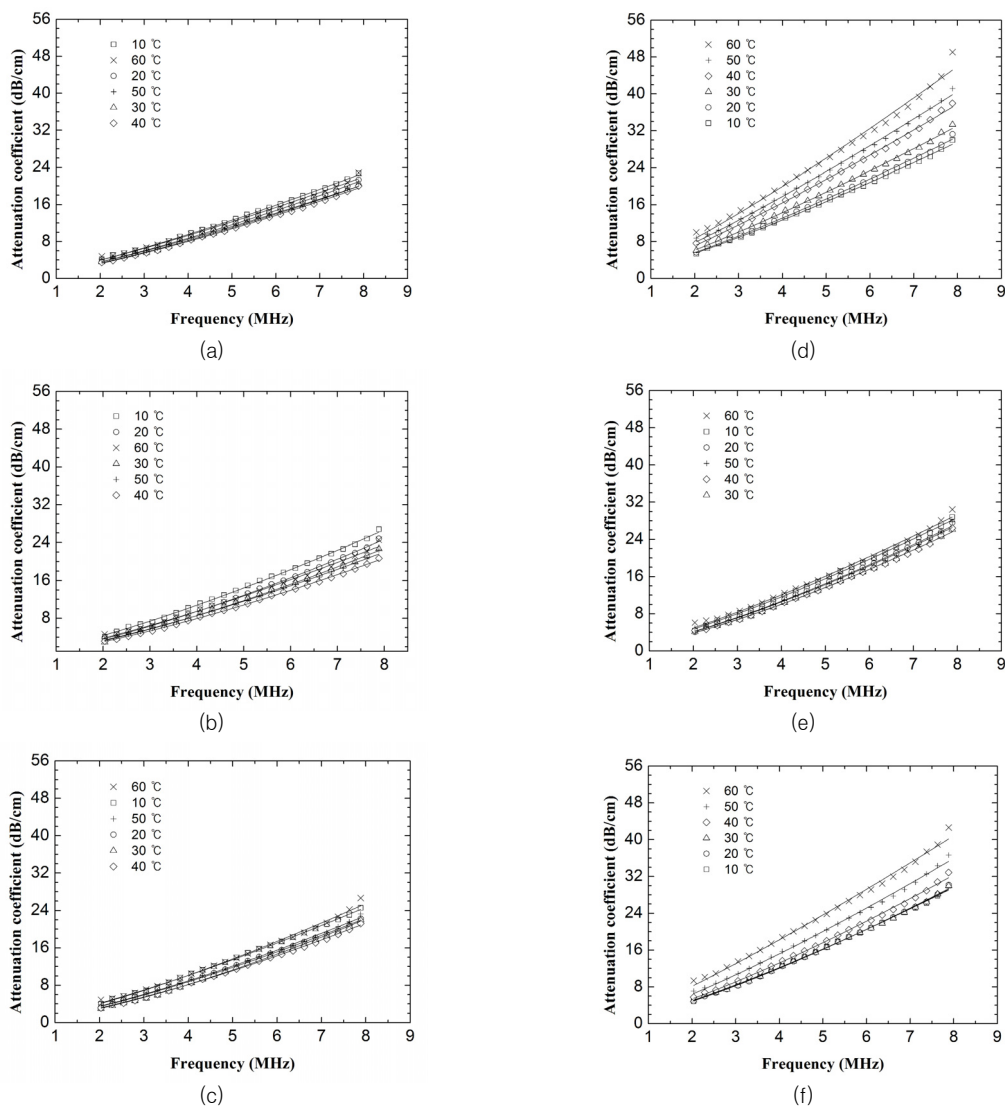


Fig. 3 Attenuation coefficients measured at 10, 20, 30, 40, 50 and 60°C as a function of frequency for the six MC nylon polymers: (a) black, (b) blue, (c) charcoal gray, (d) gray, (e) ivory, and (f) red

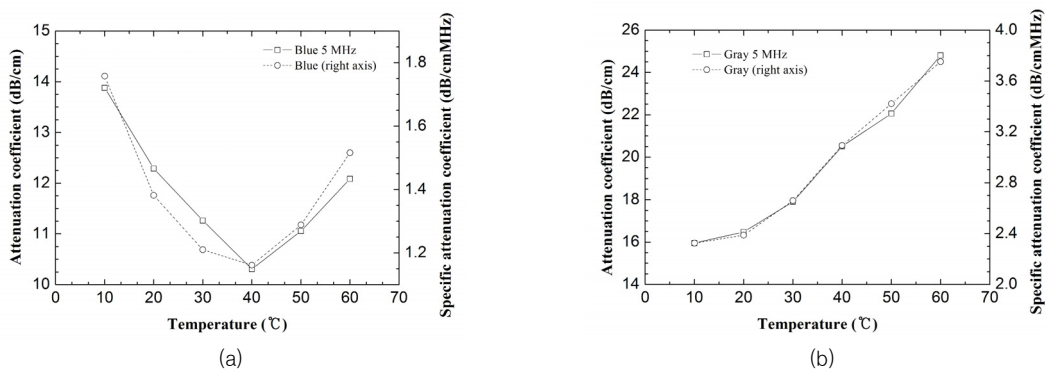


Fig. 4 Attenuation coefficients and specific attenuation coefficients measured at 5 MHz as a function of temperature for the blue and the gray polymers: (a) blue and (b) gray

$$\alpha = a_0 f^n \quad (4)$$

여기서 a_0 는 특성감쇠계수로서 2-8 MHz의 주파수 범위에서 감쇠계수의 주파수에 대한 변화율을 의미한다. 또한 R^2 은 곡선 맞춤한 결과에 대한 결정계수이다. Table 2에서 볼 수 있듯이 감쇠계수의 주파수 의존성을 의미하는 n 은 온도 변화에 민감하지 않음을 알 수 있으며, 또한 6종류의 MC nylon계 고분자 재료 모두 서로 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다 (black: 1.27 ± 0.03 , blue: 1.36 ± 0.04 , charcoal gray: 1.35 ± 0.05 , gray: 1.21 ± 0.01 , ivory: 1.34 ± 0.04 , red: 1.26 ± 0.06).

Fig. 4는 각각 blue군 및 gray군을 대표하는 blue 및 gray 고분자 재료에 대하여 온도 함수로서 5 MHz에서 측정된 감쇠계수 및 특성감쇠계수를 나타낸다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 각각의 고분자 재료에 대하여 감쇠계수 및 특성감쇠계수는 온도에 대하여 거의 유사한 의존성을 나타낸다. 이는 위에서도 언급하였듯이 식(4)에서 감쇠계수의 주파수 의존성을 의미하는 n 이 온도 변화에 민감하지 않기 때문이다. 또한 Fig. 3에서도 나타내었듯이 blue 및 gray 고분자 재료의 감쇠계수 및 특성감쇠계수는 온도에 대하여 서로 다른 의존성을 나타낸다. 즉 Fig. 4(a)의 blue 고분자 재료는 간과 같은 연부조직과 유사하게 10°C부터 40°C까지 온도가 증가함에 따라 감쇠계수가 감소하다가 최소값을 갖는 40°C 이후에는 증가하는 비선형적인 온도 의존성을 나타낸다. 반면에 Fig. 4(b)의 gray 고분자 재료는 온도가 증가함에 따라 감쇠계수도 지속적으로 증가하는 온도 의존성을 갖는 것을 알 수 있다.

이와 같이 blue군 및 gray군의 고분자 재료에서 관찰되는 감쇠계수의 온도 의존성은 고분자 재료에 첨가되는 물질의 종류에 따라 서로 다르게 나타나는 것으로 설명될 수 있다. blue군에 포함되는 고분자 재료 중에서 blue 및 ivory는 근본적으로 첨가물이 없는 cast nylon이며, black 및 charcoal gray는 각각 유리 섬유 및 이황화몰리브덴(molybdenum disulfide)이 첨가된 고분자 재료이다. gray군에 포함되는 고분자 재료의 경우에 gray는 고휘형 윤활제인 wax가 첨가되었으며, red는 wax와 함께 액상 윤활제인 oil이 첨가된 고분자 재료이다. 그러므로 black 및 charcoal gray에 각

각 첨가된 유리 섬유 및 이황화몰리브덴에 비하여 gray군의 고분자 재료에 공통적으로 첨가된 wax 성분이 cast nylon에서 나타나는 감쇠계수의 온도 의존성에 큰 영향을 미치는 것으로 이해된다.

4.2. 위상속도

Fig. 5는 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 주파수 함수로서 20°C에서 측정된 위상속도를 나타낸다. Fig. 5의 범례는 구별의 편의성을 위하여 위상속도의 값이 큰 순서대로 나타났다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 각각의 고분자 재료에 대하여 20°C에서 측정된 위상속도는 주파수가 증가함에 따라 감소하는 의존성(음의 분산)을 나타내는 것을 알 수 있다. 일반적으로 Kramers-Kronig (K-K) 분산관계에 따르면 한 매질의 위상속도와 감쇠계수는 주파수 변화에 따라 상호연계적인 것으로 알려져 있다[7]. 즉 K-K 분산관계를 적용하면 주파수가 증가함에 따라 한 매질의 감쇠계수가 증가하는 경우에 위상속도 또한 증가하는 것으로 나타나야 한다. 그러나 Fig. 2 및 5에서 볼 수 있듯이 6종류의 MC nylon계 고분자 재료는 K-K 관계를 따르지 않고 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수는 증가하는 반면에 위상속도는 감소하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 매질 내부에서 산란에 의한 음향감쇠가 지배적인 유체에 포화된 모래 퇴적층이나 사람의 해면질골과 같은 다공성 매질의 경우에도 본 연구에서 이용된 MC nylon계 고분자 재료와 같이 K-K 분산관계를 따르지 않고 위상속도가 음의 분산을 나타내

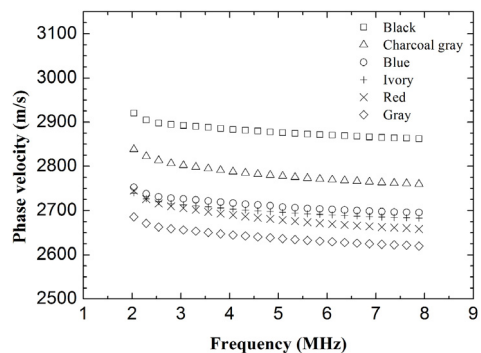


Fig. 5 Phase velocities measured at 20 ° C as a function of frequency for the six MC nylon polymers

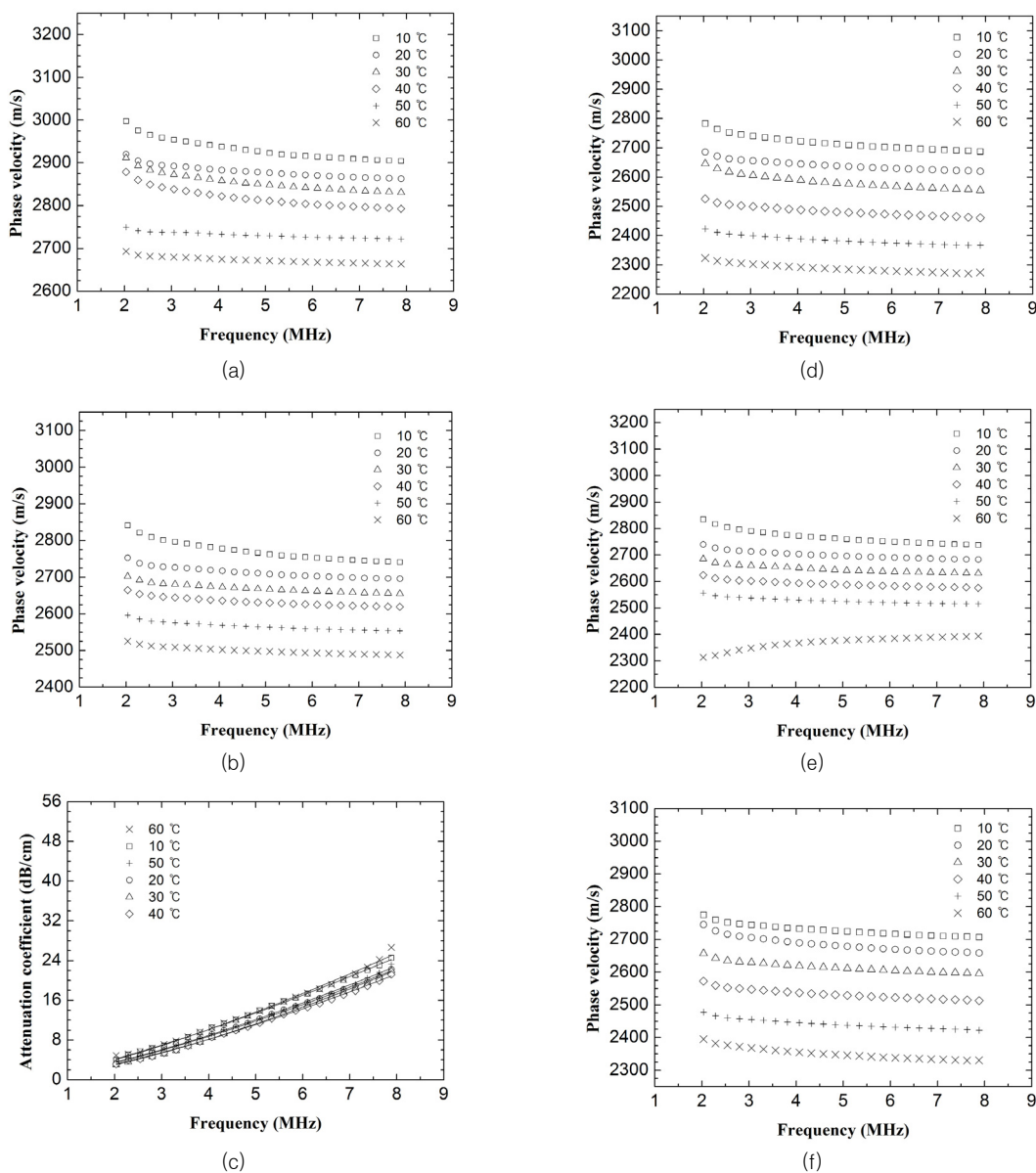


Fig. 6 Phase velocities measured at 10, 20, 30, 40, 50, and 60° C as a function of frequency for the six MC nylon polymers: (a) black, (b) blue, (c) charcoal gray, (d) gray, (e) ivory, and (f) red

는 것으로 보고되고 있다[8-10]. 그러므로 MC nylon계 고분자 재료의 경우에도 흡수보다 산란에 의한 음향감쇠가 크기 때문에 이와 같은 음의 분산이 나타나는 것으로 이해될 수 있다.

Fig. 6은 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 주파수 함수로서 10, 20, 30, 40, 50 및 60°C에서 측정된 위상속도를 나타낸다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 각각의 고분자 재료에 대하여 측정

된 위상속도는 거의 모든 온도에 대하여 주파수가 증가함에 따라 감소하는 의존성(음의 분산)을 나타냈다. 다만 ivory 고분자 재료의 경우에 60°C에서 측정된 위상속도는 주파수가 증가함에 따라 증가하는 의존성(양의 분산)을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 감쇠계수의 값이 큰 순서대로 나타낸 범례에서도 알 수 있듯이 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여

2-8 MHz의 주파수 범위에서 측정된 위상속도는 10°C부터 60°C까지 온도가 증가함에 따라 감소하는 의존성을 나타냈다. 그러므로 일정한 압력 하에서 온도가 증가함에 따라 MC nylon계 고분자 재료의 밀도(또는 체적)는 변하지 않지만 체적탄성율(bulk modulus)이 감소하는 것으로 이해된다. Asay 등은 PMMA(polymethylmethacrylate) 재료에서 일정한 압력 하에 온도가 증가할 때 체적탄성율과 음속이 감소함을 관찰하였으며[11], 본 연구 결과의 경향과 잘 일치한다. 즉 MC nylon계 고분자 재료는 열가소성 수지로서 10-60°C의 온도 범위 내에서 물성 변화가 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 상용화된 6종류의 monomer-cast nylon(MC nylon)계 고분자 재료에 대하여 감쇠계수 및 위상속도와 같은 초음파 특성의 온도 및 주파수 의존성을 조사하였다. 각각의 고분자 재료에 대하여 측정된 감쇠계수는 모든 온도에 대하여 주파수가 증가함에 따라 증가하는 특성을 보였으며, 주파수의 지수의존성 n 이 선형에서 약간 벗어난 1.16부터 1.44이내의 값을 가졌다. 반면에 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 2-8 MHz의 주파수 범위에서 측정된 감쇠계수는 온도 변화에 대하여 서로 다른 의존성을 나타냈다. 각각의 고분자 재료에 대하여 측정된 위상속도는 거의 모든 온도에 대하여 주파수가 증가함에 따라 감소하는 의존성 (음의 분산)을 나타냈다. 6종류의 MC nylon계 고분자 재료에 대하여 2-8 MHz의 주파수 범위에서 측정된 위상속도는 10°C부터 60°C까지 온도가 증가함에 따라 감소하는 의존성을 나타냈다. 이와 같이 본 연구에서는 MC nylon계 고분자 재료에 첨가되는 물질에 따라 초음파 특성의 온도 및 주파수 의존성이 변하는 것을 확인하였으며, 초음파의 활용 목적에 따라 주파수 및 온도 의존성에 유의하여 사용하여야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기

초연구사업(No. 2011-0014292). 또한 한국표준과학연구원에서는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 <실감교류 인체감응솔루션> (한국연구재단-M1AXA003-2011-0028371)의 재원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] T. L. Szabo, "Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out," p. 105, Elsevier Academic Press, New York, (2004)
- [2] K. I. Lee and M. J. Choi, "Phase velocity and normalized broadband ultrasonic attenuation in Polyacetal cuboid bone-mimicking phantoms," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121, No. 6, pp. EL263-EL269 (2007)
- [3] Y. T. Kim, H. C. Kim, M. Inada-Kim, S. S. Jung, Y. H. Yun, M. J. Jho and K. Sandstrom, "Evaluation of tissue mimicking quality of tofu for biomedical ultrasound," *Ultrasound in Med. Biol.* Vol. 35, No. 3, pp. 472-481 (2009)
- [4] B. A. Herman and G. R. Harris, "Calibration of miniature ultrasonic receivers using planar scanning technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 5, pp. 1357-1363 (1982)
- [5] K. A. Wear, "The dependencies of phase velocity and dispersion on trabecular thickness and spacing in trabecular bone-mimicking phantoms," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 118, No. 2, (2005)
- [6] I. W. Cho and J. H. Ahn, "Monomer casting of nylon 6," *Polymer(Korea)*, Vol. 1, No. 2, pp. 101-108 (1977)
- [7] M. O'Donnell, E. T. Jaynes and J. G. Miller, "Kramers-Kronig relationship between ultrasonic attenuation and phase velocity," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 69, No. 3, pp. 696-701 (1981)
- [8] K. A. Wear, "Group velocity, phase velocity, and dispersion in human calcaneus in vivo," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121, No. 4, pp. 2431-2437 (2007)

- [9] K. I. Lee, Y. T. Kim and M. J. Choi, "Study on the Dependence of Ultrasonic Phase Velocity on Porosity, Frequency and Propagation Angle in Cancellous Bone," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 28, No. 2, pp. 112-118 (2008)
- [10] K. I. Lee, V. F. Humphrey, B. N. Kim and S. W. Yoon, "Frequency dependencies of phase velocity and attenuation coefficient in a water-saturated sandy sediment from 0.3 to 1.0 MHz," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 21, No. 2, pp. 110-119 (2002)
- [11] J. R. Asay, D. L. Lamberson and A. H. Guenther, "Pressure and temperature dependence of the acoustic velocities in polymethylmethacrylate," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 4, pp. 1768-1783 (1969)