

수중음향 윈도우 재료용 이층 구조 폴리우레탄의 기계적 물성 및 음향 특성에 관한 연구

이성남¹, 성시준¹, 하현대¹, 김병남², 이강일², 윤석영², 박정기^{1,*}

¹한국과학기술원 생명화학공학과, ²성균관대학교 물리학과
*jungpark@kaist.ac.kr

1. 요약

수십 kHz 주파수 대역에서 수중음향 투과 특성이 우수하며 기계적 물성 또한 우수한 수중음향 윈도우 재료를 개발하기 위하여 이층 구조를 가지는 폴리우레탄 시편을 제조하였으며 제조된 시편의 기계적 물성 및 수중음향 특성을 평가하였다. 이층 구조 폴리우레탄은 음향 투과 특성은 떨어지나 기계적 물성이 우수한 보호층과 기계적 물성은 떨어지나 음향 투과 특성이 우수한 음향투과층으로 이루어져 있으며 무접착 성형 방법을 이용하여 성공적으로 제조하였다. 제조된 이층 구조 폴리우레탄 시편은 보호층의 도입으로 표면 경도가 60 (shore A) 이상이었으며 감쇠 계수는 1.0dB/cm 내외를 나타내었다.

2. 서론

수중음향 윈도우 재료는 어뢰의 센서 부분을 보호하기 위하여 센서 앞부분에 위치하는 재료이다. 이러한 재료는 높은 수압에도 견딜 수 있는 기계적 강도를 유지하는 한편 음향 투과 특성이 우수해야 한다 [1]. 수중음향 윈도우 재료로는 다양한 물질이 응용될 수 있지만 폴리우레탄은 밀도가 낮고 우수한 기계적 특성을 나타내며 조성에 따라 물성 변화가 용이하기 때문에 수중음향 윈도우 재료로 응용될 수 있는 가장 가능성이 높은 재료의 하나이다 [2, 3]. 본 연구실에서 수행한 연구 결과에 따르면 폴리우레탄은 기계적 강도와 음향 투과 특성이 반비례하는 것으로 밝혀졌으며, 따라서 높은 경도와 낮은 감쇠 계수를 나타내는 단층 폴리우레탄 재료는 불가능할 것으로 생각된다. 이에 기계적 강도가 우수한 폴리우레탄층을 음향투과 특성이 우수한 폴리우레탄층에 적층하여 단층 폴리우레탄재료의 단점을 보완하고자 하였다. 본 연구에서는 총 4 가지 종류의 이층 구조 폴리우레탄 시편을 제조하여 수중음향 특성을 평가하였으며 최종적으로 이층 구조 폴리우레탄 시편의 수중음향 윈도우 재료로서의 가능성을 제시하고자 하였다.

3. 실험 방법

3-1. 폴리우레탄의 제조

폴리우레탄 제조에 사용된 폴리올은 분자량이 1000 (P1), 2000 (P2)인 Poly(propylene glycol) diol (PPG diol) 및 butanediol (BD), hexanediol (HD)을 사용하였으며, 가교제는 분자량이 각각 700 (G7), 3000 (G3)인 PPG triol 을 사용하였다. 디이소시아네이트로는 2,4'-methylene-bis(phenyl iso cyanate) (MDI)를 사용하였다. 이층 구조 폴리우레탄 시편의 제조 공정을 그림 1 에 나타내었으며

실험에 사용된 각층의 폴리우레탄 조성을 표 1 에 나타내었다.

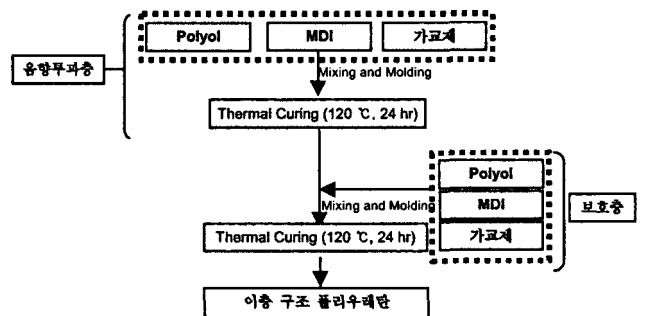


그림 1. 이층 구조 폴리우레탄 시편의 제조 공정

제조된 이층 구조 시편의 두께는 보호층, 음향투과층 각각 1cm 이고 크기는 50cm*50cm 로 조절하였다.

표 1. 보호층과 음향투과층의 조성 (mole%)

	Notation	폴리올	MDI	가교제
보호층	A	24 (P1)	52	24 (BD)
	B	24 (P1)	52	24 (G7)
음향투과층	C	24 (P1)	52	24 (G3)
	D	24 (P2)	52	24 (G3)

3-2. 기계적 물성 측정

제조된 폴리우레탄 시편의 경도 (hardness)는 ASTM D 2240-68 규격에 따르는 기기를 사용하여 Shore A 경도를 측정하였으며 밀도는 밀도계를 이용하여 상온에서 측정하였다. 고분자의 열적 특성을 분석하기 위해서 Differential Scanning Calorimetry (DSC)를 사용하여 유리전이 온도 (T_g)를 측정하였다. 각 층의 폴리우레탄 시편의 기계적 물성을 표 2 에 나타내었다.

표 2. 보호층과 음향 투과층의 기계적 물성

시편	밀도 (g/cm^3)	경도 (Shore A)	T_g (°C)
A	1.13	70	4.1
B	1.11	64	-13.0
C	1.05	44	-45.0
D	1.04	9	-54.0

3-3. 음향 특성 측정

폴리우레탄 시편의 음향특성으로서 주파수별 음파의 위상속도 (phase velocity)와 감쇠계수 (attenuation coefficient)를 측정하기 위하여 펄스 투과법 (pulse

transmission technique)이 사용되었다. 시편에서 주파수별 음파의 위상 속도는 시편의 유무에 따라 수신된 신호들의 fast Fourier 변환을 통하여 획득된 각 주파수별 위상 정보로부터 얻어진다. 감쇠 계수 또한 이와 비슷하게 Fourier 변환을 통하여 얻어진 각 주파수별 진폭 정보로부터 얻어진다. 주파수별 위상 속도 c 및 감쇠계수 a 를 구하는 식은 아래와 같다.

$$c = \frac{c_w}{1 - \frac{\Delta\phi}{w_d} c_w} \quad (1)$$

$$a = -\frac{20}{d \ln 10} \ln P_i \quad (2)$$

이 식에서 c_w 는 물에서의 음속, $\Delta\phi$ 는 시편의 유무에 따른 신호의 위상차를 나타내며, w 와 d 는 각각 각 주파수 (angular frequency)와 시편의 두께를 나타낸다. P_i 는 두께 d 의 시편을 투과하였을 때 수신된 신호의 음압을 나타낸다. 이때, 주파수 200 kHz에 대하여 각 층의 폴리우레탄 시편의 수중음향 임피던스 및 감쇠 계수를 표 3에 나타내었다.

표 3. 보호층과 음향투과층의 수중음향 임피던스 및 감쇠 계수

시편	임피던스 (MRayl)	감쇠 계수 (dB/cm)
A	2.10	2.6
B	1.89	3.0
C	1.53	0.7
D	1.53	0.5

4. 실험 결과 및 고찰

폴리우레탄 시편은 기계적 강도가 우수할수록 물과의 음향 임피던스 차가 커지는 것을 표 2, 표 3을 통해서 알 수 있다. 이는 밀도가 증가할수록 폴리우레탄 내부의 자유 부피가 감소하여 음파의 에너지 손실이 커지는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 단층 구조 폴리우레탄 시편 단독으로는 수중음향 윈도우용 재료 개발에 한계가 있음을 알 수 있다. 이층 구조 폴리우레탄 시편의 notation을 표 4에 나타내었다.

표 4. 이층 구조 폴리우레탄의 notation

Notation	보호층	음향투과층
AC	A	C
AD	A	D
BC	B	C
BD	b	D

제조된 이층 구조 폴리우레탄 시편의 음향 임피던스를 표 5에 나타내었으며 표에서 알 수 있듯이 제조된 시편의 임피던스는 각각의 보호층과 음향투과층의 중간값에 해당함을 알 수 있다. 이는 임피던스가 상대적으로 큰 보호층의 도입에 의한 것으로 이층 구조 폴리우레탄 시편의 음향 투과 특성의 저하를 예상할 수 있다.

그림 2에 이층 구조 폴리우레탄 시편의 투과 계수 및 감쇠 계수를 나타내었다. 그림 2는 각각의 이층 구조 폴리우레탄 시편의 음향 임피던스가 낮을수록 주파수 증가에 따라서 음향 투과 계수와 감쇠 계수가 전반적으로 향상됨을 보여준다. 그러나, 시편간 음향 특성의 차이는 주파수가

낮아질수록 감소함을 알 수 있다. 비록, 경도가 높은 음향 보호층의 도입으로 인하여 이층구조 시편의 감쇠 계수가 단층의 음향 투과층에 대한 감쇠계수에 비하여 전체적으로 높게 나타나지만, 수십 kHz 대역에서의 이층 구조 시편의 감쇠 계수는 수중음향 윈도우 재료로 사용되기에 충분한 1.0 dB/cm 정도를 모두 나타내었다. 또한 보호층의 도입으로 표 2에서 알 수 있듯이 표면 경도가 60 이상이므로 수중에서 충분한 강도를 지니는 윈도우 재료가 될 것임을 예상할 수 있다.

표 5. 이층 구조 폴리우레탄 시편의 음향 임피던스

시편	임피던스 (MRayl)
AC	1.80
AD	1.74
BC	1.62
BD	1.59

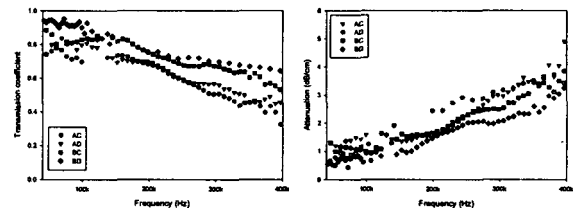


그림 2. 이층 구조 폴리우레탄 시편의 수중음향 특성

결론

본 연구에서 제조된 이층 구조 폴리우레탄 시편은 기계적 강도가 우수한 보호층을 음향투과층에 도입함으로써 음향 투과 특성의 저해가 나타났으나 수중음향 윈도우 재료로서의 특성을 어느 정도 유지할 수 있었음을 알 수 있었으며 표면의 기계적 물성은 향상되었음을 알 수 있었다. 이는 수중음향 윈도우 재료로서의 이층 구조 폴리우레탄의 적용 가능성을 제시하는 결과라고 생각되며 수십 kHz 대역에서의 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해서는 시편의 두께 증가시켜 추가적인 연구 수행이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- Huy X. Nguyen, "Composites Reinforced with Extended Chain Polyethylene Fibers : Acoustically Transparent Materials for Underwater Applications," *Polymer News*, 17, pp. 135-140, 1992.
- C. M. Thompson and W. L. Heimer, II, "Relationship between acoustic properties and structure of polyurethanes," *J. Acoust. Soc. Am.* 77(3), pp.1229-1238, 1985.
- C. Hepburn, *Polyurethane Elastomers* (Elsevier Applied Science, London and New York, 1992), Chap.3 and Chap.5, pp.51-106 and pp.122-171.

본 연구는 수중음향특화연구센터 (UA-33) 연구비에 의하여 연구되었음