

폴리에틸렌기지 복합재료의 동적탄성계수에 대한 강화재의 효과

김경섭* · 정현규** · 홍순형*

Effect of Reinforcements on Dynamic Elastic Modulus of Polyethylene Matrix Composite Materials

Kyongsub Kim, Hyun K. Jung and Soon H. Hong

Key Words: polyethylene, polymer matrix composite, acoustic attenuation, dynamic elastic constant

Abstract

The attenuation coefficients of SiC particle reinforced low-density polyethylene (LDPE) matrix composites were measured by pulse echo method and dynamic elastic measure method with varying the volume fraction of SiC particle ranged from 0% to 40% and the size of SiC particles ranged from $0.8\mu\text{m}$ to $48\mu\text{m}$. The SiCp/LDPE composites were fabricated with the melt injection process and the fabricated composites showed almost full density above 99% up to 40vol% SiCp reinforcements. The attenuation constant of LDPE measured by dynamic elastic constant had same result with that measured by pulse echo method, but the attenuation constant of SiCp/LDPE measured by dynamic elastic constant did not have same result with that measured by pulse echo method.

기호설명

G' : shear storage modulus
G'' : shear loss modulus
 $\tan \delta$: loss factor (phase angle)
 α : acoustic attenuation coefficient
x : distance
P : sound pressure
 λ : wave length
f : frequency
 T_g : glass transition temperature

1. 서론

저잡음특성 수중음향탐지기를 개발하기 위해서는 구조설계의 개선[1]과 사용되는 재료의 개발이 필요하다. 잡음은 트랜스듀서로 여러 경로를 통해 전달되는데, 이 전달경로를 차단하려면 낮은 음향임피던스와 높은 음향감쇠특성을 가지는 재료가 필요하다. 재료의 음향 임피던스가 낮은 재료는 금속소재와의 계면에서 음파를 대부분 반사시켜서 전달을 막는 역할을 한다. 낮은 음향 임피던스를 만들기 위해서는 밀도가 낮아야 하고, 탄성계수도 작아야 한다. 일반적으로 고분자 재료가 밀도와 탄성계수가 낮으므로 이에 적합하다. 또한, 음향 감쇠특성이 높은 경우 재료 내부에서 많은 양의 잡음을 다른 에너지로 전환할 수 있게된다. 높은 음향 감쇠특성을 얻기 위해서는 원하는 주파수 영역에서 재료가 진동 에너지를 다른 에너지로 변환시키도록 만들어 주면 된다. 감쇠기구로 우선 고려할 수 있는 것은 고분자내

* 한국과학기술원 재료공학과

** 한국원자력연구소

부에서 진동을 열로 변환시키는 점탄성특성[2]과, 강화재에 의한 음파의 산란기구[3]를 이용할 수 있다. 복합재료는 일반적으로 단일재료보다 높은 음향감쇠능력이 크다고 알려져 있지만, 강화재가 음향감쇠능력에 어떠한 영향을 끼치는지 정량적으로 연구한 결과는 그렇게 많지 않다[4]. 본 연구에서는 강화재의 크기와 부피분율을 변화시키면서 복합재료에서 강화재가 음향감쇠계수에 어떠한 영향을 끼치는지 연구하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 SiC/LDPE 복합재료의 제조

실험에 사용된 복합재료는 8~48 μ m SiC 강화재와 저밀도폴리에틸렌 분말을 SPEX mill을 사용하여 혼합한 후, 170 $^{\circ}$ C로 온도를 올려 용융된 폴리에틸렌 혼합물을 압력을 주어 평판으로 제조하였다. 이때 강화재의 부피분율 및 크기를 변화시키며, 0~40 vol%의 복합재료를 제조하였다. 50%이상의 분말강화복합재료는 제조는 할 수 있었으나 100% 상대밀도의 시편을 얻지 못했다. 이때 성형압력은 복합재료 내부에 기공이 생기지 않는 압력 이상으로 조절하였다. 공기분위에서 온도를 너무 올리면 LDPE의 표면이 산화되므로 제조시에는 용융된 직후 10분이내에 가압을 하여 제조하였다.

2.2 동적탄성계수의 측정

2.2.1 동적탄성계수와 음향감쇠계수

동적탄성계수는 탄성체가 주기적인 응력을 받았을 때, 응력을 모두 strain으로 바꾸지 못하고 일부는 잃어버리는 성질을 가지고 있기 때문에 탄성계수를 응력이 strain으로 바뀌는데 사용되는 실수값과 없어진 에너지로 부터 기인하는 허수값으로 나누기 위해서 사용되는 값이다. 음향감쇠계수는 초음파와 같은 음파가 재료를 지나갈 때, 재료 내부에서 음파의 크기가 지속적으로 줄어드는데 이 줄어드는 비율을 로그함수의 계수값으로 나타낸 것이다. 이 동적탄성계수와 음향감쇠계수는 측정방법 및 개념에서는 차이가 있으나, 특정한 조건에서 두 값은 비교될 수 있다. 보통 다음과 같은 식으로 비교가 된다.[6]

$$G^* = G' + G'' \quad [1]$$

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad [2]$$

$$\alpha = \frac{-1}{x} \ln \frac{P}{P_0} \quad [3]$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}{\tan \delta} \right) \approx \frac{\pi}{\lambda} \tan \delta \quad [4]$$

식 [4] 에서 알 수 있듯이 동적탄성계수의 loss factor와 음향감쇠계수는 비례하는 관계를 가진다. 하지만 주파수에 따라서 음파의 파장이 짧아지므로 주파수가 커지는 경우 동적탄성계수의 loss factor는 일정하더라도 음향감쇠계수는 커지게 된다.

2.2.2 동적탄성계수의 측정

동적탄성계수의 측정에는 Rheometric Scientific사의 ARES 55011을 사용하였다. 측정시편의 크기는 45mmx12.7mm에 2.7mm의 두께를 가지는 평판시편을 이용하였고, 측정방법은 torsional mode를 사용하여 shear modulus(G^*)를 측정하였다. 측정장비의 모습은 그림 1과 같다. 측정온도는 -30 $^{\circ}$ C, -20 $^{\circ}$ C, -10 $^{\circ}$ C이었으며, 측정주파수는 0.1Hz에서 200Hz까지 측정을 하였다.

2.2.3 음향감쇠계수의 측정

음향감쇠계수의 측정은 pulse echo방법을 사용하였다. pulse echo방법은 시편의 표면의 상태와는 상관없이 내부의 음향감쇠계수를 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 시편의 음향감쇠계수가 너무 큰 경우 반사파를 관찰하지 못할 수도 있다는 단점이 있다. 음향감쇠계수 측정에는 0.5, 1.0, 2.25MHz의 broadband transducer를 사용하였다. 온도는 18 $^{\circ}$ C의 상온에서 측정을 하였고, 시편은 지름 70mm, 두께 10~20mm의 판형시편을 이용하였다. 시편의 측정의 모습은 그림 2와 같다.

2.2.4 Time Temperature Superposition Principle

동적탄성계수의 측정결과는 보통 0.1~1kHz 사이의 값에서 측정된다. 하지만 J. D. Ferry에 의해 정리된 TTSP(Time Temperature Superposition Principle)을 이용하면, 저온의 측정결과를 이용하여 고주파수의 측정값을 예측할 수 있다. TTSP의 식은 아래 식 [5]와 같다.

$$\ln\left(\frac{f}{f_0}\right) = \frac{C_1 \times C_2 (T - T_0)}{C_2 (C_2 + T - T_g) (T - T_g)} \quad [5]$$

이 식에 사용된 상수인 C_1 과 C_2 는 3개이상의 온도에서 주파수를 달리하여 동적탄성계수를 측정된 결과로부터 얻을 수 있다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 SiCp/LDPE의 Pulse Echo 측정결과

그림 3 에서 강화재의 부피분율의 변화에 따라 음향감쇠계수가 변하는 것을 볼 수 있었다. SiC 강화재가 30vol% 첨가된 경우 음향감쇠계수가 최고값을 가지는 것을 알 수 있다. 그림 4 에서는 강화재의 부피분율의 변화에 따라 음속의 변화를 볼 수 있었다. 음속의 경우 처음에는 강화재가 조금 들어간 경우 느려졌다가 강화재가 더 들어간 경우 다시 빨라지는 것을 볼 수 있었다. 그리고 음향감쇠계수가 최대값을 가지는 30vol%의 강화재를 첨가할 때까지는 LDPE의 음속보다 낮거나 비슷하다가, 음향감쇠계수가 떨어지는 40vol%의 강화재를 첨가하는 경우에는 음속이 증가하기 시작하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 탄성계수에 관한 Reuss model에 의해서 예측한 결과와 비슷한 경향을 보이다가, 부피분율이 증가하자 LDPE의 음속과 비슷해지는 값을 가지는 것으로 볼 수 있다.

3.2 SiC/LDPE의 동탄성계수 측정결과

LDPE의 동적탄성계수는 -10, -20, -30℃에서 측정되었다. 이 측정자료는 서로 다른 3가지 온도의 측정자료로 TTSP를 사용하여 원하는 주파수의 자료로 바꿀 수 있었다. LDPE의 18℃의 주파수로 바꾼 결과는 그림 5 와 같다. 이 결과에서 알 수 있듯이 LDPE의 경우 동적탄성계수의 측정결과와 다른 주파수 구간으로 잘 바뀌어짐을 알 수 있다. 이 측정자료를 이용하여 동적탄성계수로부터 LDPE의 phase angle을 측정된 결과는 그림 6와 같이 나타났다.

SiCp/LDPE의 동적탄성계수는 -10, -20, -30℃에서 LDPE와 같은 방법으로 측정되었다. 이 측정결과는 그림 6 에 나타나있다. 여기서 음파의 속도를 예측하는데 사용되는 동적탄성계수의 실

수값인 storage modulus G' 은 SiCp/LDPE의 pulse echo방법을 이용한 음파속도 측정결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 하지만 동적탄성계수의 허수값인 loss modulus G'' 은 pulse echo법을 사용하여 측정된 결과에서는 SiC 강화재의 부피분율 증가에 따라 음향감쇠계수도 지속적으로 증가하였지만, 동적탄성계수측정결과에서 G'' 은 SiC 강화재를 혼합한 경우, LDPE 자체의 G'' 값보다 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 강화재가 혼합된 고분자 복합재료인 SiCp/LDPE의 경우 저주파수에서 측정된 동적탄성계수 결과는 TTSP를 이용하여 고주파수로 변환시킬 수 없음을 알 수 있었다. 그리고 SiCp/LDPE 고분자 복합재료의 경우 강화재는 저주파수에서는 오히려 단일 고분자 재료인 LDPE에 비해서 damping 이 작다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

고분자에서 음파속도 예측에 이용되는 Time-Temperature Superposition Principle은 고분자복합재료에서 음향감쇠특성을 예측하는 것으로는 부적절함을 알 수 있었다. 하지만, TTSP를 이용해서 예측한 음파의 속도는 비슷한 경향성을 가지는 것을 알 수 있었다. 0.1-100Hz에서 측정된 동탄성계수를 이용하여 예측한 고분자 복합재료의 음향감쇠효과는 단일 고분자 재료보다 떨어지는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) P.R.Anderson, US. Patent: 5,243,566
- (2) B.Hartmann, J. Acou. Soc. Am. vol. 95 (1994) pp.226-233
- (3) N.T.Nguyen, M.Lethiecq, B.Karlsson and F.Patat, Ultrasonics vol.34 (1996) pp.669-675
- (4) M.G.Grewe, T.R.Gururaja, T.R.Shrouf and R.E. Newnham, IEEE. Tra. Sound. Ultra. vol.37 (1990) pp.506-514
- (5) N.T.Nguyen, M.Lethiecq, B.Karlsson and F.Patat, Ultrasonics vol.34 (1996) pp.669-675
- (6) B.Hartmann, G.F.Lee, J.D.Lee and J.J.Fedderly, J. Acou. Soc. Am. vol.101 (1997) pp.2008-2011

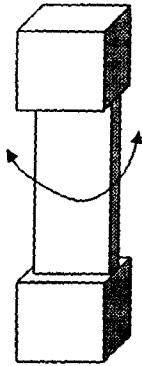


그림 1 SiC/LDPE의 Rheometer 측정방법

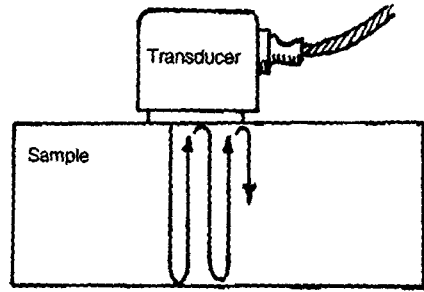


그림 2 SiC/LDPE의 Pulse Echo 측정방법

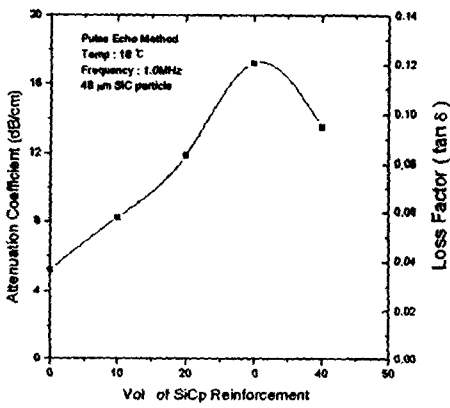


그림 3 부피분율에 따른 SiCp/LDPE의 음향감쇠

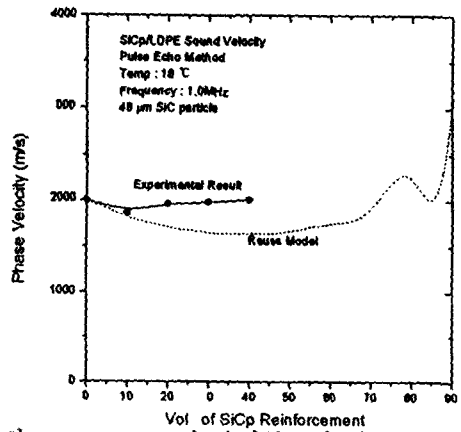


그림 4 SiCp/LDPE의 부피분율에 따른 음파속도

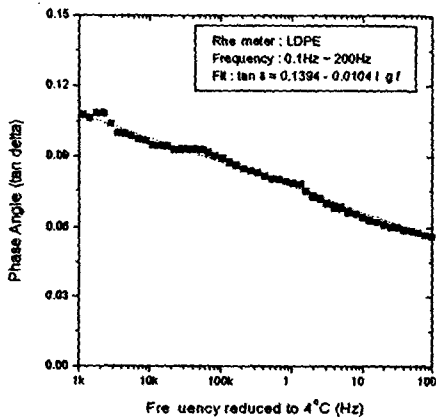


그림 5 LDPE의 Rheometer 측정 TTSP 결과

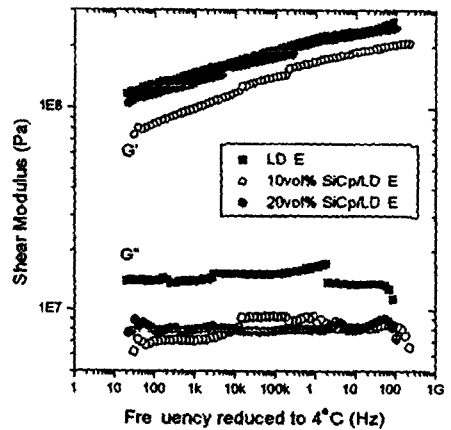


그림 6 SiCp/LDPE의 Rheometer 측정결과