

초음파탐상법에 의한 유리질 중합체의 피로거동 해석

이 역 섭*·노 은 호**

Fatigue Behavior of Glassy Polymers by Ultrasonic NDE

O. S. Lee and E. H. Rho

Abstract It is well-known that the defects (existing in structures) and the material degradation (caused by the fatigue load) generally initiate the failure of structures. The NDE such as ultrasonic technique which can be used to detect the size and the orientation of defects has been utilized to estimate the life and stability of structures. However, only few experimental reports made by using the ultrasonic technique have been published for the case of fatigue estimation of materials and structures. The purpose of this study is, thus, to derive the relationship between ultrasonic attenuation and fatigue behavior of Polycarbonate and PMMA through ultrasonic characterization. It is also attempted to offer NDE experimental procedure which may be useful to predict fatigue life.

Nomenclatures			
$\alpha(\omega)$: Attenuation constant	k	: Wave number
A_i	: Output voltage amplitude	$V_1(t)$: Electrical output signal from the receiving transducer corresponding to primary stress wave
ω	: Ultrasonic frequency	$F_2(\omega)$: Transduction ratio corresponding to the transformation of a stress wave in the specimen to an output electrical voltage
V	: Phase velocity	$\theta(\omega)$: Phase shift due to the transformation of an input voltage to a mechanical stress wave
L_i	: Specimen lengths	$R(\omega)$: Reflection coefficient
t_i	: Time shifts	$\sigma_2(x, t)$: Stress wave reflects from the end of the specimen
$\sigma_1(x, t)$: Stress wave between $x=0$ and $x=L$		
V_i	: Input electrical signal		
$F_2(\omega)$: Transduction ratio corresponding to the transformation of an input voltage to a mechanical stress wave		

* 인하대학교 공대 기계공학과

** 만도기계연구소

접수: 1990년 3월 2일

- $\phi(\omega)$: Phase shift due to boundary reflection
- $V_{o, ss}$: Steady-state output voltage
- Max. $V_{o, ss}$: Extrema of $V_{o, ss}$
- $\Delta\alpha^*$: Relative attenuation

1. 서 론

유리질 중합체가 공업적으로 많은 분야에서 그 사용범위가 넓어지고 유리질 중합체를 기저조직으로 한 여러가지 복합재료가 제조되어 이들 재료의 응용분야가 확대되어짐에 따라 파괴역학에 관련된 여러가지의 많은 연구가 요구되고 있다.

지금까지는 비파괴검사 기술중의 하나인 초음파탐상법을 이용하여 구조물에 존재하는 결함의 크기 및 위치등을 측정하여 구조물의 수명과 안전성을 연구해왔다.¹⁾ 그러나 초음파탐상법을 구조물이나 재료의 피로해석에 응용하려는 연구는 아직 초보단계에 있다.^{2,3,4)}

해외에서는 Vary와 Williams 등이 초음파탐상법을 이용하여 복합재료나 철강재료의 기계적성질을 도출시키므로써 안전설계에 필요한 자료를 제공하고 있으며^{5,6,7)}, 또한 이 방법을 이용하여 재료의 파괴인성치 결정에 관한 연구도 보고되고 있다.^{8,9)} 그러나 본 연구에서 시도하려는 초음파탐상법을 유리질 중합체의 피로해석에 응용하려는 연구는 아직 보고되지 않고 있다.

반복하중에 의해 구조물에 존재하는 결함이 균열로 성장하거나 재료내부의 열화(Degradation)는 구조물을 파손시키는 직접적인 원인이 되고 있다. 특히 취성재료는 반복하중을 받게되면 결함이 균열로 성장하기 전까지는 재료의 내부를 열화시키고 미소균열의 발생과 더불어 갑작스런 파손에 이른다. 따라서 재료 내부의 조직이나 구성요소들이 변태되어 재료가 열화되는 양상을 초음파탐상법에 의해 추정 또는 측정하는 것은 파괴역학적인 연구와 더불어 구조물이나 재료의 파손방지 및 수명산정에 공학적으로 응용될 수 있다.

본 연구에서는 Through-Transmission 방법을 이용하여 유리질 중합체(Glassy Polymer)의 일종인 Polymethyl Methacrylate(PMMA)와 Polycarbonate(PC)의 피로특성을 해석해 보고자 시도하였다. 또한 피로 Cycles수에 따른 이들 재료의 초음파 Attenuation 특

성을 규명하여 피로수명과 초음파 전파특성의 관계를 도출하려 하였다. 피로특성을 초음파탐상법으로 규명할 수 있는 결과가 이 방법에 의해 도출되면 이를 여러 가지 재료에 확대 적용시켜 구조물의 안전설계에 공학적으로 응용될 수 있는 기초자료를 제공하게 될 것이다.

2. 초음파탐상법에 대한 기본이론

2-1. 응력파의 Attenuation과 속도

응력파의 Attenuation은 응력파가 매질을 통과할 때 에너지 손실에 기인한 것이고 재료의 기계적 성질과 밀접한 관계가 있다.^{10,11,12)} 이러한 에너지 손실은 크게 두 가지로 나누어지는데 첫째는 응력파가 매질을 통과할 때 재료의 점성, 열전도, 분자구조등에 의해 재료에 흡수되는 에너지이며, 둘째는 재료의 불균질 부분에 의해 응력파가 산란되는데서 기인한 에너지 손실이다.

초음파의 Attenuation은 Pulse-Echo 방법이나 Through-Transmission 방법을 이용하여 실험적으로 구할 수 있다. Pulse-Echo 방법은 한개나 두개의 Transducers를 시편의 같은면에 접촉시키고 Pulse를 시편에 입사시켜 시편의 저면이나 결함으로 부터 반사되는 Echo를 해석하여 결함의 위치나 재료의 특성을 측정한다. Through-Transmission 방법은 전압을 응력파로 바꾸어 주는 Transmitting Transducer와 시편을 통과한 응력파를 전압으로 바꾸어주는 Receiving Transducer로 구성되어 있으며, 응력파가 시편과 Receiving Transducer를 통과한 후 Oscilloscope에 나타난 파형을 해석하여 Attenuation을 측정한다.

Through-Transmission 방법에 의한 응력파의 Attenuation은 두께가 다른 동질의 재료에 초음파를 통과시켜 나오는 신호의 진폭과 재료의 두께 차이에 의해 다음 식으로 계산된다.

$$\alpha(\omega) = \frac{\ln(A_1/A_2)}{(L_2 - L_1)} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 A_1 : 출력신호의 진폭.

L_1 : 시편의 두께.

ω : 초음파의 Frequency.

응력파의 속도는 입력신호가 시편을 통과한 후 출력되기 까지의 시간지연을 측정하므로써 계산할 수 있다. Through-Transmission System 자체에서 생기는 시간지연은 두께가 다른 동질의 재료에 초음파를 통과시켜 응력파의 속도를 구하므로써 없앨수 있으며 응력파의 속도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V = \frac{(L_2 - L_1)}{(t_2 - t_1)} \dots \dots \dots (2)$$

2-2. 출력신호에 대한 해석

Through-Transmission 방법에서 Transmitting Transducer에 입력되는 전압을 V_i 라 할 때 응력파는 아래와 같이 표현된다.¹³⁾

$$\sigma_1(x, t) = V_i F_1(\omega) e^{-\alpha x} e^{i(kx - \omega t)} \dots \dots \dots (3)$$

- 여기서 t : 시간.
- x : 시간 t 에서의 응력파의 위치.
- $F_1(\omega)$: 전압이 응력파로 바뀔때의 변환비.
- k : Wave Number($k=2\pi/\lambda$).

식 (3)의 응력파는 시편의 저면($x=L$)에서 다음과 같이 표현되며

$$\sigma_1(L, t) = V_i F_1(\omega) e^{-\alpha L} e^{i(kL - \omega t)} \dots \dots \dots (4)$$

Receiving Transducer에서 응력파는 전기적 신호로 바뀌어 아래와 같은 전압을 출력시킨다.

$$V_1(t) = V_i F_1(\omega) F_2(\omega) e^{-\alpha L} e^{i(kL - \omega t)} \dots \dots \dots (5)$$

여기서 $\theta(\omega)$: 응력파가 전압으로 바뀔때 생기는 위상변위($0 \leq \theta < 2\pi$).

$F_2(\omega)$: 응력파가 전압으로 바뀔때의 변환비.

시편의 저면(Boundary)으로 부터 반사되는 응력파의 영향을 고려하여 식(4)를 다시 표현하면 응력파는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_2(x, t) = V_i F_1(\omega) R(\omega) e^{-\alpha(2L-x)} e^{i(k(2L-x) - \omega t - \phi)} (6)$$

- 여기서 $R(\omega)$: 반사계수($0 \leq R \leq 1$).
- $\phi(\omega)$: 응력파가 시편의 저면(Boundary)으로부터 반사될 때 생기는 위상변위($0 \leq \phi < 2\pi$).

정상상태에서 Receiving Transducer에 출력되는 전

압은 Fig. 1과 같은 과정을 거쳐 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\begin{aligned} V_{o,ss} &= V_i F_1 F_2 e^{-\alpha L} e^{i(kL - \omega t - \theta)} \\ &+ V_i F_1 F_2 R^2 e^{-3\alpha L} e^{i(3kL - \omega t - 2\phi - \theta)} \\ &+ V_i F_1 F_2 R^{2j} e^{-5\alpha L} e^{i(5kL - \omega t - 4\phi - \theta)} + \dots \dots \dots \\ &= V_i F_1 F_2 \sum_{j=0}^{\infty} R^{2j} e^{-(2j+1)\alpha L} e^{i((2j+1)kL - \omega t - 2j\phi - \theta)} \end{aligned} (7)$$

만약 (7)식에서 $(kL - \theta)$ 만큼 위상을 이동시키면

$$V_{o,ss} = V_i F_1 F_2 \sum_{j=0}^{\infty} R^{2j} e^{-(2j+1)\alpha L} e^{i(2j(kL - \theta) - \omega t)} (8)$$

이 되며 $\phi'(\omega) = kL - \theta$ 로 놓으면 식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{o,ss} = V_i F_1 F_2 \sum_{j=0}^{\infty} R^{2j} e^{-(2j+i)\alpha L} e^{i(2j\phi' - \omega t)} (9)$$

식 (9)의 실수부분만을 고려하면 아래와 같이 표현되며

$$V_{o,ss} = V_i F_1 F_2 e^{-\alpha L} \sum_{j=0}^{\infty} R^{2j} e^{-2j\alpha L} \cos(2j\phi' - \omega t) (10)$$

식 (10)을 삼각함수의 정리와 자연대수의 성질을 이용하여 다시 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} V_{o,ss} &= V_i F_1 F_2 e^{-\alpha L} \left[\cos \omega t \sum_{j=0}^{\infty} e^{-j(2\alpha L - 2\ell nR)} \cos[j(2\phi')] \right. \\ &\quad \left. + \sin \omega t \sum_{j=0}^{\infty} e^{-j(2\alpha L - 2\ell nR)} \sin[j(2\phi')] \right] \end{aligned} (11)$$

식 (11)의 Summation을 풀어쓰면

$$\begin{aligned} V_{o,ss} &= V_i F_1 F_2 e^{-\alpha L} \left[\cos \omega t \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sinh(2\alpha L - 2\ell nR)}{\cosh(2\alpha L - 2\ell nR)} - \cos(2\phi') \right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + \sin \omega t \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\sin(2\phi')}{\cosh(2\alpha L - 2\ell nL) - \cos(2\phi')} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

여기서 $(2\alpha L - 2\ell nR) > 0$ 이고

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\gamma} \sin(n\delta) = \frac{1}{2} \frac{\sin\delta}{\cosh\gamma - \cos\delta}, \gamma > 0$$

$$1 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\gamma} \cos(n\delta) = \frac{\sinh\gamma}{\cosh\gamma - \cos\delta}, \gamma > 0$$

인 조건을 이용하면

$$V_{o,ss} = \frac{V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha L}}{2 \{ \cosh[2(\alpha L - \ell nR)] - \cos(2\phi') \} \left\{ e^{2(\alpha L - \ell nR)} \cos\alpha t - \cos\alpha t \cos(2\phi') + \sin\alpha t \sin(2\phi') \right\}} \quad (12)$$

으로 쓸 수 있다. $V_{o,ss}$ 의 최대값은 아래식을 이용하여 얻을 수 있으며

$$\frac{dV_{o,ss}}{dt} = 0 \quad (13)$$

식 (12)를 식(13)에 대입하여 정리하면

$$\tan\alpha t = \frac{\sin(2\phi')}{e^{2(\alpha L - \ell nR)} - \cos(2\phi')} \quad (14)$$

이 되며, $\frac{1}{\cos^2\theta} = 1 + \tan^2\theta$ 이므로 식 (14)는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\cos\alpha t = \left[1 + \left(\frac{\sin(2\phi')}{e^{2(\alpha L - \ell nR)} - \cos(2\phi')} \right)^2 \right]^{-0.5} \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)를 (12)식에 대입하여 정리하면 정상상태에서의 최대출력전압은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Max } V_{o,ss} = \quad (16)$$

$$\frac{V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha L} \left[e^{4(\alpha L - \ell nR)} - 2\cos(2\phi') e^{2(\alpha L - \ell nR)} + 1 \right]^{0.5}}{2 \{ \cosh[2(\alpha L - \ell nR)] - \cos(2\phi') \}}$$

식 (16)은 아래와 같이 단순화 시킬 수 있으며 이때 발생하는 오차는 10%이내에 있다.²⁾

$$\text{Max } V_{o,ss} \doteq V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha L} \quad (17)$$

식 (17)을 두께가 다른 동질의 시편에 대해 표현하면

$$\{\text{Max } V_{o,ss}\}_1 = V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha_1 L_1} \quad (18)$$

$$\{\text{Max } V_{o,ss}\}_2 = V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha_2 L_2} \quad (19)$$

로 쓸 수 있으며 식 (18)의 각변을 식 (19)의 각변으로 나누면 아래 식과 같다.

$$\frac{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_1}{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_2} = \frac{V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha_1 L_1}}{V_1 F_1 F_2 e^{-\alpha_2 L_2}} e^{-(\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2)} \quad (20)$$

식 (20)에 자연대수를 취해 정리하면

$$-(\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2) = \ell n \frac{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_1}{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_2} \quad (21)$$

$$\alpha_2 - \alpha_1 \frac{L_1}{L_2} = \frac{1}{L_2} \ell n \frac{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_1}{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_2} \quad (22)$$

로 되며 식 (22)를 아래와 같이 표현할 수 있다.

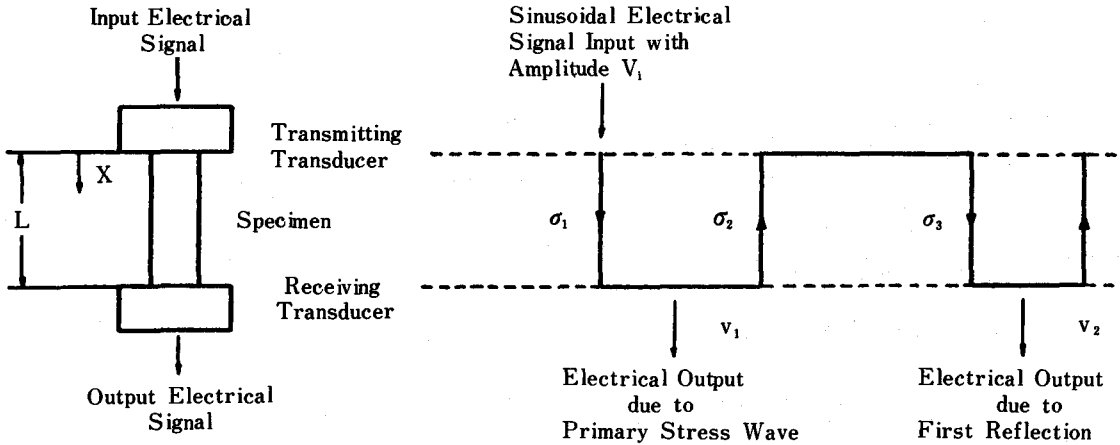
$$\Delta\alpha^* = \alpha_2 - \alpha_1 \frac{L_1}{L_2} = \frac{1}{L_2} \ell n \frac{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_1}{\{\text{Max } V_{o,ss}\}_2} \quad (23)$$

식 (23)에서 $\Delta\alpha^*$ 는 Relative Attenuation량이며 본 연구에서는 이 값을 여러가지 조건하에서 측정하여 그 결과를 고찰하였다.

3. 실험

3-1. 시편재료와 형상

시편의 재료는 고인성재료인 Polycarbonate와 취성 재료인 PMMA를 사용하였으며 이들 재료의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 시편의 길이는 피로시험에 적당한 길이(160mm)로 가공하였으며 피로시험 시 파단위치가 일정치 않아 초음파탐상에 어려움이 있었기 때문에 시편중앙의 양단에 U-노치를 내어 실험하였다. 시편의 형상을 Fig. 2에 나타내었으며 동일한 재료로서 두께가 다른 여러가지 시편을 제작하여 실험하였다.



Where $\sigma_1 = V_1 F_1 e^{-ax} e^{i(kx - \omega t)}$
 $\sigma_2 = V_1 F_1 R e^{-a(2L-x)} e^{i(k(2L-x) - \omega t - \phi)}$
 $\sigma_3 = V_1 F_1 R^2 e^{-a(2L+x)} e^{i(k(2L+x) - \omega t - 2\phi)}$
 $V_1 = V_1 F_1 F_2 e^{-aL} e^{i(kL - \omega t - \theta)}$
 $V_2 = V_1 F_1 F_2 R^2 e^{-aL} e^{i(3kL - \omega t - 2\phi - \theta)}$

Fig. 1. Illustration showing propagating stress wave and corresponding output signal.

Table 1. Mechanical Properties

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
PC	65.56	64.19	2747	0.36
PMMA	44.93	32.37	3433	0.35

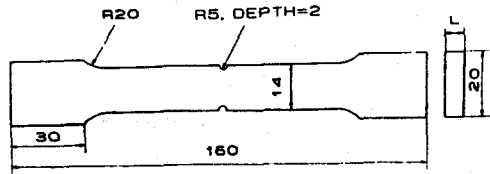


Fig. 2. Fatigue specimen (dimension in mm)

3-2. 실험장치

피로시험기는 Universal Material Testing M/C (Saginomiya Model Servopac-10)을 사용하였다.

응력파의 Attenuation은 Fig. 3과 같은 Through-Transmission System을 이용하여 측정하였다. 이 System은 Sine Wave를 발생시키는 RF Signal Generator (Philips Model PM 5326); 입·출력 Transducers (AET FC-500); 증폭기(Wavetek Model 432); Oscilloscope(Tektronix Model 468); Couplant(AET SC-6)등으로 구성되어 있다.

Transducer와 시편 사이의 접촉압력을 일정하게 유지시키기 위해 Strain Gage를 이용한 측정장치를 고안하였다. Strain의 측정은 Universal Digital Measuring System(Model UCAM-8AL)을 사용하여 측정하였다. Strain Gage를 이용한 압력장치는 Fig. 4에 나타내었으며 전체적인 실험장치도는 Fig. 5에 나타내었다.

3-3. 실험방법

피로시험은 주파수 30Hz의 Sine Wave로 인장-인장 하중을 주어 실험하였다. Polycarbonate의 경우는 최대응력 $0.45\sigma_u$, 최소응력 $0.3\sigma_u$ 로 하중을 주었고 PMMA의 경우는 최대응력 $0.6\sigma_u$, $0.4\sigma_u$ 로 피로시험을 하였다. 여기서 σ_u 는 각 재료의 인장강도이다. PMMA의 하중에 비해 작은 하중을 Polycarbonate에 작용시킨 이유는 피로시험시 Polycarbonate의 경우는 U-노치에 크랙이 발생하여 피로수명이 단축되어 그 결과 피로 Cycles수에 따른 Attenuation을 측정하는데 어려움이 있었기 때문이다.

응력파의 Attenuation은 시편과 Transducer사이의 접촉압력을 0.4MPa이상으로 유지시키면서 측정하였으며 Fig. 4에 나타낸 실험장치의 양쪽에 Strain Gage를 붙이고 여기서 얻은 Strain을 압력으로 환산하여 압력을 측정하였다.

입력신호로는 18V의 전압을 Transmitting Transducer에 입력시켰으며 이 전압이 시편과 Receiving Transducer를 통과한 후 Oscilloscope에 나타난 파형의 진폭을 측정하여 Attenuation을 계산하였다. 한편 피로 Cycles수에 따른 Relative Attenuation의 측정은 10만 Cycles까지는 0, 1만, 5만 Cycles에서 이후에는 10만 Cycles 단위로 Attenuation을 측정하였고 초음파의 Frequency는 0.5MHz에서 2.0MHz로 변화시키면서 동일한 측정을 반복하였다.

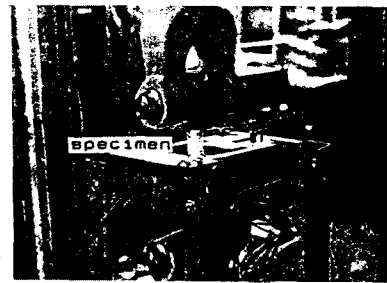
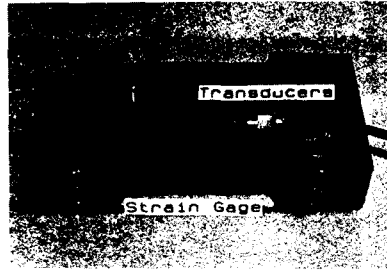


Fig. 4. Photographs of fixture that provides constant pressure between transducers and specimen interface.

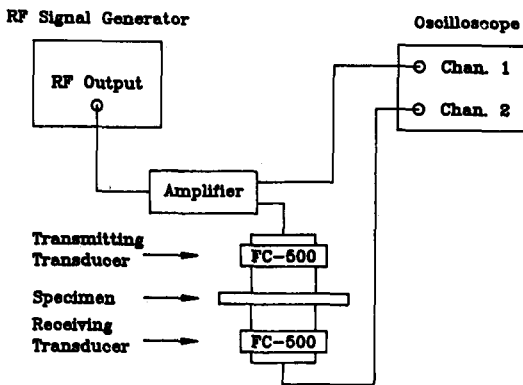


Fig. 3. Block diagram of experimental system for through transmission measurements.

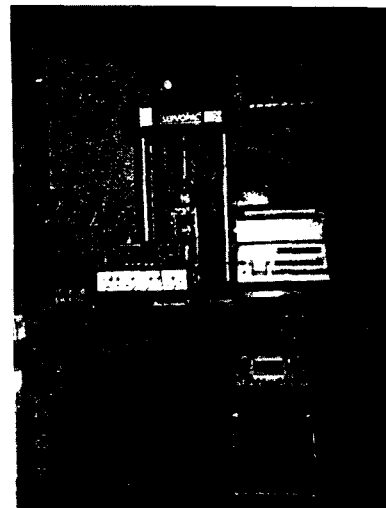


Fig. 5. A photograph of experimental set-up.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 Strain 량에 대한 시편과 Transducer사이의 접촉압력을 나타낸 것으로 Strain 량을 읽으면 접촉압력을 알 수 있었으며, Fig. 7은 시편과 Transducer사이의 접촉압력에 따른 출력전압을 나타내었으며 접촉압력이 0.4Mpa이상일때 최대출력을 얻을 수 있었다.

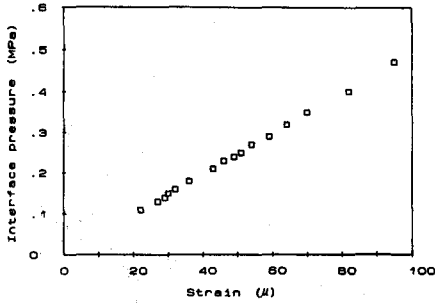


Fig. 6. Interface pressure vs. strain.

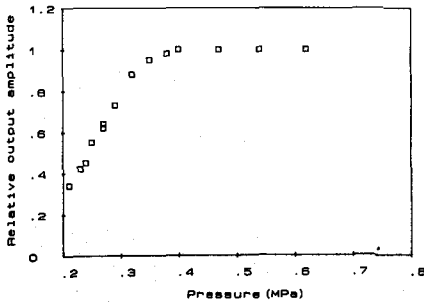


Fig. 7. Variation of relative output amplitude vs. interface pressure.

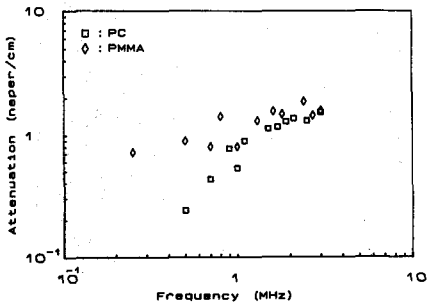


Fig. 8. Attenuation vs. frequency

Fig. 8은 초음파의 Frequency에 대한 Attenuation을 나타낸 것으로 초음파의 Frequency가 높아질수록 Attenuation이 더 많이 되었다. 또한 초음파의 Frequency에 따른 초음파 Attenuation은 PC의 경우가 더 급격한 증가를 보였다.

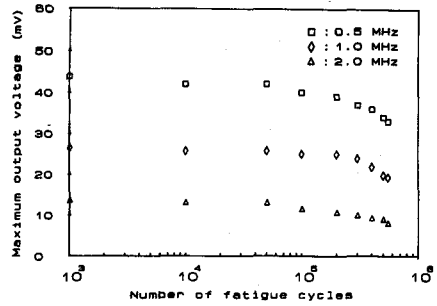


Fig. 9. Maximum output voltage vs. number of fatigue cycles of Polycarbonate.

Fig. 9와 Fig. 10은 피로 Cycles수에 따른 최대출력 전압을 나타낸 것으로 피로 Cycles수가 증가될수록 출력전압이 점점 감소되었으며 PMMA가 PC보다 더 많이 감소되었다. 또한 초음파의 Frequency가 높을수록 출력전압이 초기값에 비해 많이 감소되었다.

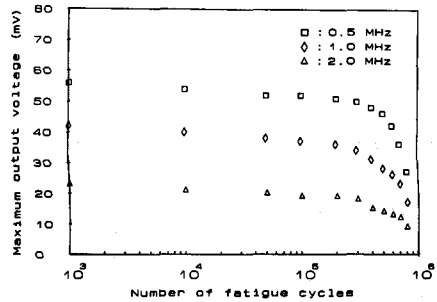


Fig. 10 Maximum output voltage vs. number of fatigue cycles of PMMA.

Fig. 11과 Fig. 12는 피로 Cycles에 따른 Relative Attenuation을 나타낸 것으로 피로 Cycles수가 증가될수록 Attenuation이 증가하였으며 10만 Cycles이후에 급격한 증가를 보이고 있다. 또한 초음파의 Frequency가 높을수록 Relative Attenuation은 큰 폭으로 증가하였다.

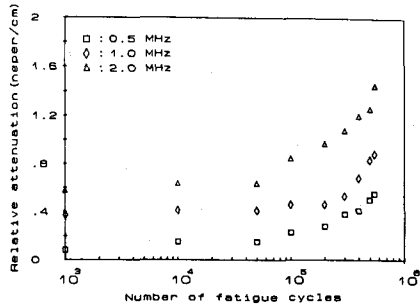


Fig. 11. Relative attenuation vs. number of fatigue cycles of Polycarbonate.

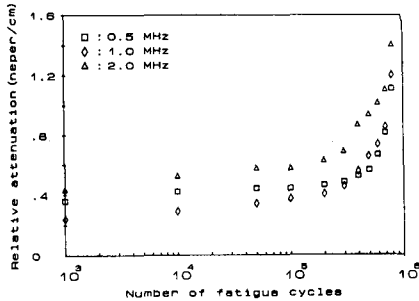


Fig. 12. Relative attenuation vs. number of fatigue cycles of PMMA.

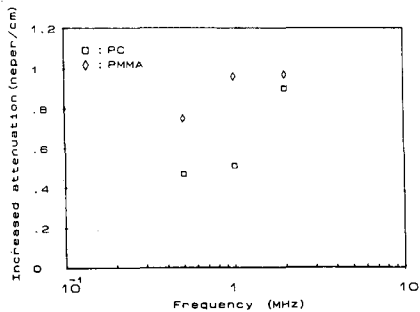


Fig. 13. Increased attenuation vs. frequency.

Fig. 13은 초음파의 Frequency에 대해 파단직전에 측정된 Relative Attenuation과 Initial Attenuation의 차이를 나타낸것으로 PMMA가 PC에 비해 Attenuation이 많이 났음을 알 수 있었다.

Receiving Transducer에 출력되는 전압은 Couplant의 두께, 시편과 Transducer사이의 접촉압력, 시편 표면의 거칠기, 시편과 Transducer사이의 배열 등에 따라 영향을 받으며, 대체적으로 Couplant의 두께는 얇고 접촉압력은 클수록 출력전압은 증가하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합재료의 기지조직으로 많이 사용되고 있는 유리질 중합체의 일종인 Polymethyl Methacrylate(PMMA)와 Polycarbonate(PC)의 피로특성을 초음파탐상법으로 규명하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 시편과 Transducer사이의 접촉압력을 0.4 MPa이상으로 유지시켜주어야 일정한 출력을 얻을수 있었으며 실험오차를 적게할 수 있었다.
- (2) 고인성 재료인 Polycarbonate보다 취성재료인 PMMA에서 더 많은 초음파의 Attenuation이 발생하는 것을 실험적으로 확인하였다.
- (3) 피로 Cycle수에 따른 Relative Attenuation이 피로수명의 30~40%에서 급격하게 증가하였다. 위의 결과로 미루어 초음파의 Attenuation은 재료의 피로수명과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

위 실험결과는 재료내부의 열화현상을 초음파탐상법으로 예측하므로써 구조물의 수명산정 및 안전설계에 기초자료를 제공하게 될 것이다.

References

1. 김 병 철; "초음파검사시 ASME와 RCC-M CODE에 따른 결함크기 측정 및 허용기준 비교 평가", 한국비파괴검사학회지, Vol. 8, No. 1, 1988.
2. J. H. Williams, Jr., H. Yuce, and S. S. Lee; "Ultrasonic and Mechanical Characterizations of Fatigue States of Graphite Epoxy Composite Laminates", NASA Contractor Report 3504, January, 1982.
3. J. H. Williams, Jr., and B. Doll; "Ultrasonic Attenuation as an Indicator of Fatigue Life of Gra-

- fite/Epoxy Fiber Composite", NASA Contractor Report 3179, 1979.
4. 이 억 섭 ; "Ultrasonic Nondestructive Evaluation (NDE) of Composite Materials", 한국비파괴검사학회 춘계학발표회, May, 1989, PP. 3-13.
 5. J. H. Williams ; "Ultrasonic Evaluation of Impact Damaged Graphite Fiber Composite", Materials Evaluation, Vol. 38, No. 12, Dec. , 1980, PP. 8-72.
 6. J. H. Williams ; "Ultrasonic Determination of the Elastic Constants of the Stiffness Matrix for Unidirectional Fiberglass Epoxy Composite", NASA Contractor Report 4034, 1986.
 7. A. Vary ; "Ultrasonic Measurement of Material Properties", Research Techniques in Nondestructive Testing", Vo. 4, R. S. Sharpe, ed. , Academic Press, London.
 8. A. Vary ; "Correlations Between Ultrasonic and Fracture Toughness Factors in Metallic Materials", NASA Technical Memorandum TM-78905, June, 1978.
 9. A. Vary ; "Correlations among Ultrasonic Propagation Factors and Fracture Toughness Properties of Metallic Materials", Materials Evaluation, Vol. 36. no. 7, June, 1978, PP. 55-64.
 10. A. Vary and K. J. Bowles ; "Ultrasonic Evaluation of the Strength of Unidirectional Graphite-Polyimide Composites", NASA Technical Memorandum Tm-73646, April, 1977.
 11. A. Vary and R. F. Lark ; "Correlation of Fiber Composite Tensile Strength with the Ultrasonic Stress Wave Factor", NASA Technical Memorandum TM-78846, April, 1978.
 12. J. Szilard ; "Ultrasonic Testing", John Wiley & Sons, 1982, PP. 21-23.
 13. S. S. Lee and J. H. Williams, Jr. ; "Stress Wave Attenuation in Thin Structures by Ultrasonic Through-Transmission", NASA Contractor Report 3203, Jan. , 1980.