

Line-Focus-Beam 초음파 현미경을 이용한 금속복합재료의 피로손상에 관한 연구

이 준 현

부산대학교 공과대학 기계설계공학과

(1993. 6. 24 접수)

요 약 분말 야금법에 의해 제조된 SiC휘스커 강화 2124알루미늄 복합재료(SiCw/2124 Al)에 피로하중이 작용할 경우 복합재료의 계면에 있어서의 전위의 집적현상으로 인해 피로손상에 매우 민감하다. 그러나 이와같은 계면에 있어서의 전위의 집적현상으로 발생하는 피로미소균열의 검출 및 그 특성 평가에 대해서는 종래의 초음파 기술로서는 많은 문제점이 지적되고 있다.

본 논문은 SiC 휘스커 강화 알루미늄 복합재료에 있어서의 초기 피로손상을 평가하기 위하여 최근 새로운 비파괴 기법인 선집속 빔초음파 현미경의 적용 가능성에 대하여 연구하였다.

이를 위해 SiCw/2124 Al 복합재료 시험편에 대해 하중제어하에서 누설표면파와 누설 유사표면파의 속도를 $V(z)$ 곡선으로 부터 FFT해석으로 구해 그 특성에 대하여 검토하였다. 또 주파수 5MHz에 대한 종래의 표면파 기법에 의하여 얻어진 결과와 고주파 초음파 현미경에 의하여 구해진 결과를 비교 검토 하였다.

1. 서 론

최근, 음파를 이용한 검사, 관찰장치가 폭 넓게 사용되어지고 있다. 이것은 음파가 빛 또는 전자선 과는 달리, 물질의 밀도, 탄성율, 점성율 등의 탄성적 성질이 다른 경계면에 있어서 반사, 산란, 흡수 등을 일으켜, 물질 내부의 구조 및 조직의 관찰이 가능할 뿐 아니라 탄성적 성질의 변화를 반영한 정보를 제공해 주는 등의 특징을 가지고 있기 때문이다.

초음파 현미경은 음향렌즈에 의하여 집속되어진 음파의 반사강도 분포로부터, 시료표

면의 영상을 얻기 위한 장치이지만, 최근에는 국소영역에 있어서의 재료의 음향학적 특성을 정량적으로 계측할 수 있는 기능이 주목을 받고 있다. 특히 $V(z)$ 곡선 해석법⁽¹⁾을 이용함으로써, 국소영역에 있어서의 누설(leaky) 탄성표면파의 음속을 높은 정도로 측정하는 것이 가능하게 되어, 많은 분야에 적용이 시도되고 있다.

초음파 현미경 기술을 이용한 재료의 특성평가에는, 물질의 미세한 부분의 탄성적 성질을 2차원적인 초음파 영상으로서 계측하는 영상 계측법과 정량적인 계측치로서 평가하는 定量 계측법이 있다. 영상 계측용

초음파 현미경에는, 1971년 개발된 Laser 走査 초음파 현미경(SLAM)⁽²⁾과 1973년에 개발된 기계 走査型(SAM)⁽³⁾이 있다. 또 1981년에는 물질의 음향특성을 정량적으로 측정하는 전용장치로서 선집속(LFB) 초음파 현미경이 개발되었다.⁽⁴⁾

금속복합재료는 일반적으로 높은 비강성 비강도 뿐만 아니라 인장강도, 연성 및 인성 등의 고온에서의 우수한 기계적 성질과 제조공정이 기존의 금속재료 제조공정과 같거나 흡사하여 산업화가 유리하다는 점으로 인해 많은 관심의 초점이 되고 있다.

그러나 복합재료에 관한 현재까지의 연구 내용의 대부분은, 주로 Matrix합금의 종류에 미치는 섬유 배향상태, 인장강도에 대한 섬유의 체적 함유율 및 온도가 미치는 영향, 섬유와 Matrix의 혼합방법 등을 주 내용으로 하고 있다.

특히 최근에는 국내에서도 단섬유 및 입자 강화형 금속 복합재료의 기계적 성질에 미치는 재료 제조조건의 영향⁽⁵⁾ 및 정하중에

대한 파괴거동⁽⁶⁾에 대한 연구가 발표되고 있다.

그러나 금속복합재료의 대부분은 항공기 및 자동차 부품, 공작기계 등과 같이 기계적 성질 중에서도 특히 피로 및 충격강도가 매우 중요시 요구되는 각 부품에 많은 주목을 받고 있다. 따라서 금속복합재료의 실질적인 부품으로서의 적극적 활용을 위해서는 피로 및 충격손상에 대한 비파괴적 평가방법의 확립이 1차적인 재료의 신뢰성 확보 측면에서 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에 있어서는, 點-집속 비-임 렌즈(point focus beam)대신에, 임의의 방향으로 누설탄성 표면파를 전파 시킬 수 있는 1차원 집속 beam렌즈를 적용하여 금속복합재료의 피로 손상의 평가에 대한 초음파 현미경의 적용 가능성에 대하여 검토하고, 나아가 동일재료에 대해 5MHz주파수의 표면파를 이용한 종래의 초음파 측정결과와 비교 검토도 행하였다.

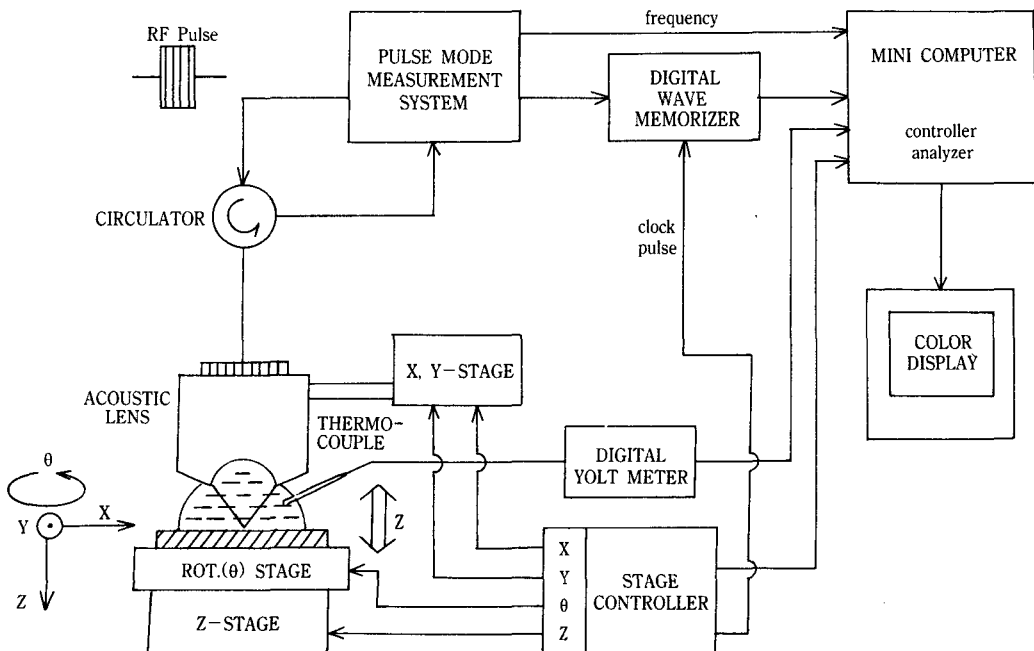


Fig. 1. Block diagram of the line focus acoustic microscope .

2. 실험방법

2.1. 장치 및 음속과 감쇠 측정

본 연구에 이용한 초음파 현미경은 Fig. 1과 같이 크게 4부분으로 구성되어 있다. 즉 $V(z)$ 곡선 측정에 사용하는 선-집속-비-임 음향렌즈, 음향렌즈에 RF 펄스를 보내고 또 금속 복합재료의 시험편으로 부터 반사해 되돌아 오는 RF 펄스를 검출하는 RF 펄스 모드 측정계, $V(z)$ 곡선을 측정하기 위해 시험편을 4축 방향으로 이동시키기 위한 기계 동작부 및 전체 시스템을 제어하고 측정결과를 해석하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. 또, 정량측정용의 1차원 집속 비-임렌즈는 Fig. 2와 같이, 누설 탄성 표면파가 한 방향(X방향)으로만 전파하기 때문에, X방향의 음향학적 성질만을 측정할 수 있다. 따라서 LFB렌즈와 회전 스테이지를 동시에 사용함으로써 음향 異方性을 임의의 방향으로 검출하는 것이 가능하다.

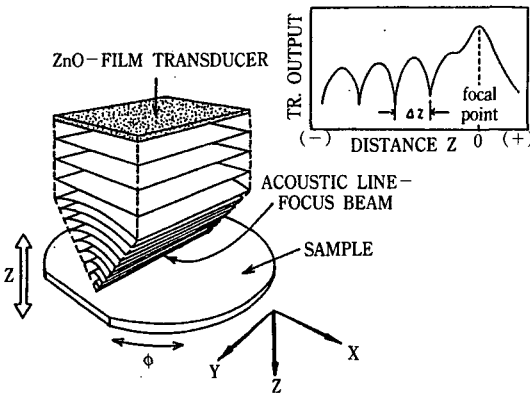
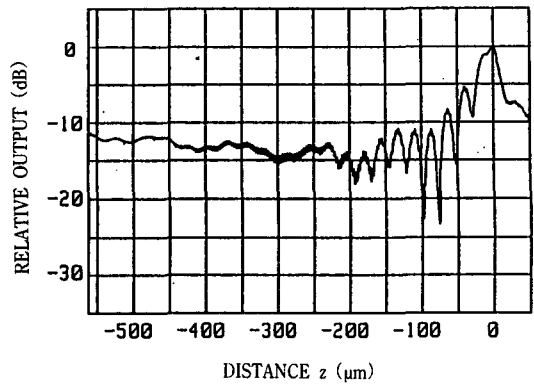
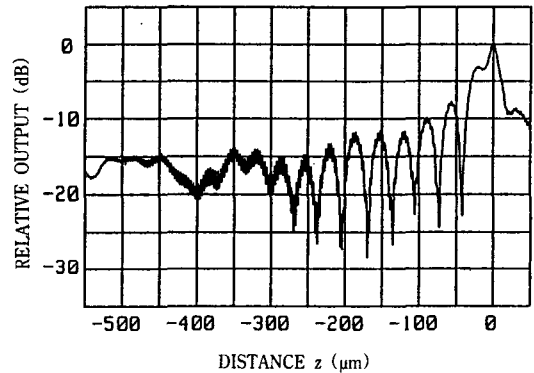


Fig. 2. Illustration of material characterization method by line-focus-beam acoustic microscope.

음속 및 감쇠 측정에는 $V(z)$ 곡선 해석법을 이용하였다. Fig. 3(a), (b)에 본 연구에서 얻어진 2124 Al(모재) 및 20% SiC-Al금속복합재료의 누설탄성표면파(LSAW)의 음속 v 는 $V(z)$ 곡선의 주기의 간격 Δz 로부터 다음식에 의하여 구해진다.⁽⁴⁾



(a)



(b)

Fig. 3. Typical example of $V(z)$ curve (a) 2124 Al alloy (b) 20% SiC/Al composite.

$$v = V_w (1 - (1 - V_w 2f \cdot \Delta z)^2)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

(V_w : Couplant 내의 음속, f : 주파수 (=225 MHz))

또 시료 표면 근처에 전파하는 누설탄성 표면파의 전파감쇠(ATT)는 다음과 같이 나타낸다.

$$V_1(z) = C \cdot ATT \cdot \exp(j(\xi z + \Psi)) \dots \dots \dots (2)$$

여기서,

$$ATT = \exp(-2\alpha_w t(z)) \cdot \exp(2\gamma z \cdot \tan\theta_{LSAW}) \dots \dots \dots (3)$$

$$\gamma = 2\pi f a | V_{LSAW} \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha = \alpha_{L,SAW} + \alpha_b + \alpha_s \dots\dots\dots (5)$$

한편 위 (3), (4), (5)식에서,

α_w : 물의 감쇠계수

$\alpha_{L,SAW}$: 물의 負荷효과(Loading effect)에 따른 무차원 감쇠계수

α_b : 음향체적 흡수효과에 따른 무차원 감쇠계수

α_s : 재료의 구조적 산란에 따른 무차원 감쇠계수

본 연구에 사용한 LFB렌즈에 의한 음속 측정 영역은 대략 $0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$ 의 범위이다.

2.2. 사용재료

사용한 재료는 강화 휘스카를 포함하지 않는 모재(base material)의 2124 Al과 20%의 SiC휘스카로 강화된 금속복합재료(SiC-Al composite)의 두 종류이다. Photo. 1에 SiC-Al 복합재료의 조직 사진을 나타내었다. 대부분의 강화 SiC 휘스카는 비교적 압연방향과 동일하게 우선적으로 분포하고 있는것

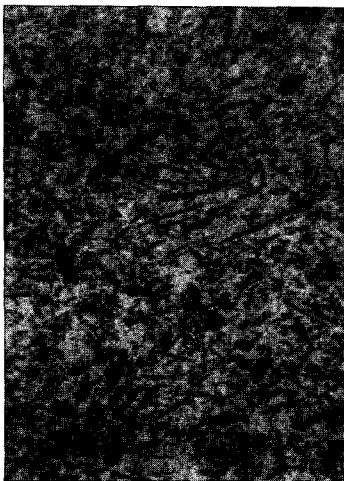


Photo. 1. Microstructure of SiC-Al composite

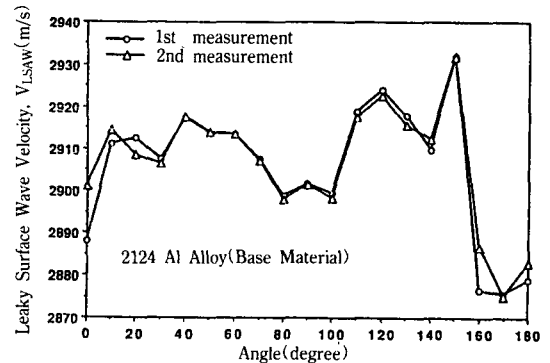
이 특징적이다.

피로손상의 도입은 유압 피로 시험기를 이용해 $\sigma = 270 \text{MPa}$, 응력비 $R=0$ 의 정현파로 하중 사이클은 동일 시편에 대해 0에서 50, 100, 5,000, 25,000으로 변화 시켰다.

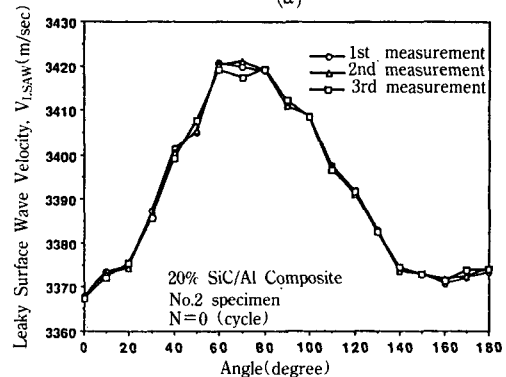
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로하중에 대한 누설 탄성표면파의 속도 및 감쇠 변화 특성

Fig. 4(a)에 피로하중이 전혀 작용하지 않은 기지재(matrix)인 2124 Al合金의 異方性 효과에 따른 누설 탄성 표면파와 속도 V_{LSAW} 변화를 나타내고 있다. 기지재인 2124 Al합금의 표면에는 CuAl_2 , MnAl_6 등의 소량의 금



(a)



(b)

Fig. 4. Variation of leaky surface acoustic wave velocity as a function of angle (a) 2124 Al alloy (b) 20% SiC/Al composite

속간 상(intermetallic phases)들이 존재하고 있지만, 측정결과에서 보는바와 같이 기지재인 2124 Al합금에서는 V_{LSAW} 는 회전각도의 변화에 따라 전체적으로 불규칙적인 변화를 보이고 있으며 또 특정방향에 대한 명확한 방향의존성은 관찰되어 지지 않고 있다.

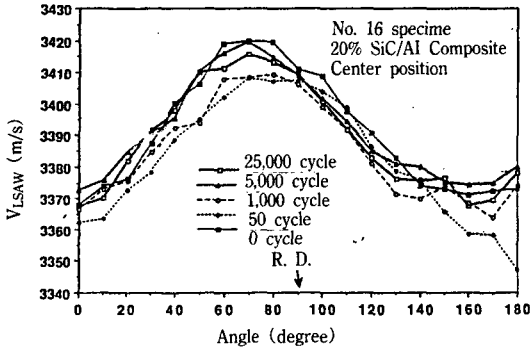


Fig. 5. Variation of V_{LSAW} due to the number of fatigue loading as a function of angle.

그러나 모재의 Al 합금에 비교해 SiC 휘스카 강화 금속복합재료에 있어서는 Fig. 4 (b)에서와 같이 2124 Al 기지재에 대한 결과와는 대조적으로, 피로하중이 전혀 작용하지 않은 경우에도 강화 휘스카의 배향방향의 영향으로 V_{LSAW} 가 명료한 회전각도 의존성을 보이고 있으며, 특히 압연방향에 거의 동일한 90° 전후에 V_{LSAW} 가 최대치를 보이고 있다. 한편 피로하중이 작용하는 경우의 복합재료에 있어서의 V_{LSAW} 변화는 Fig. 5에서와 같이 피로하중 사이클 수(number of cycle)의 증가에 비례한 V_{LSAW} 의 정량적인 변화는 관찰되지 않으나 피로하중이 작용하지 않은 $N=0$ (cycle)에 있어서의 재료의 V_{LSAW} 의 크기에 비해 피로하중 사이클이 작용한 경우의 재료의 V_{LSAW} 는 비교적 전체 회전각도에 대해 다소 감소하는 경향이 관찰되고 있다. 이것은 피로하중을 받는 금속복합재료에 있어서 기지재와 강화 SiC 휘스카 사이의 계면 및 기지재 자신의 미세적이고 국부적인 피로손상의 발생으로 인해 실질적으로는 이들 피로손상 영역에 대한 미세적인 표면상

태의 변화에 기인하는 것으로 여겨진다. 일반적으로 고주파 초음파 현미경에 있어서의 표면파의 파장(wavelength)은 비교적 짧기 때문에 시험편의 표면 거칠기(surface roughness)등의 국부적인 변화에 대해 표면파 속도는 영향을 받게된다. 실제 2124 Al합금에 있어서의 V_{LSAW} 는 미세적인 표면 거칠기의 증가에 따라 감소하는 결과과 최근 보고되고 있다.⁽⁷⁾ 따라서 본 연구의 Fig. 5의 결과와 같이 피로하중을 받은 시험편의 V_{LSAW} 의 감소는 시험편의 미세적인 피로손상(계면의 박리, 미소균열의 발생등)의 축적으로 인한 시험편의 미세적인 표면 거칠기의 변화에 기인된 것으로 생각되어 진다.

3.2. 재료표면을 전파하는 누설표면 탄성과 mode 특성

일반적으로 재료에 따라서는 複數의 누설파 mode가 존재한다. 앞의 Fig.3(a), (b)의 기지재 및 복합재료의 $V(z)$ 곡선에서 보는 바와 같이, 두 재료의 표면 근처에서 전파하는 누설표면 탄성과 mode에는 다소의 차이가 있다.

즉, Fig. 3(a)의 기지재에는 $z=-180(\mu\text{m})$ 이하의 표면에서는 또 다른 누설파 모드가 존재하고 있다. 이는 누설 유사 탄성표면파(Leaky Pseudo Surface Acoustic Wave)로서 Fig. 6(a)와 같이 Fig. 3(a)의 $V(z)$ 곡선에 대해서 FFT해석을 행해보면 더욱 명료하게 알 수 있다. 즉 Fig. 6(a)에서와 같이 기지재는 LPSAW mode에 대응하는 peak가 현저하게 나타나고 있다. 그러나 복합재료인 경우에는 Fig. 6(b)와 같이 LPSAW mode는 보이지 않고, 주로 LSAW가 표면에서의 전파 특성을 지배하고 있다. 또 기지재의 표면 전파에 영향을 주는 LSAW 및 LPSAW mode 중에서 기지재의 異方性 효과에 대해서는 Fig. 7(a), (b)에서 보는 바와 같이 LPSAW 보다 LSAW가 더욱 민감함을 알 수 있으며 따라서 기지재의 물성평가에 대해서는 LSAW를 추출하여 해석하는 것이 유효하다고 생각되어 진다.

3.3. 저주파수 탐촉자를 이용한 측정 결과와의 비교 검토

초음파 현미경에 의한 미소 영역에서의 누설탄성과 속도 및 전파감쇠 결과를 저주파수의 탐촉자를 이용하여 비교적 넓은 영역에서 측정된 값과 비교검토를 하기 위하여, Fig. 8과 같이 5MHz의 탐촉자를 이용하

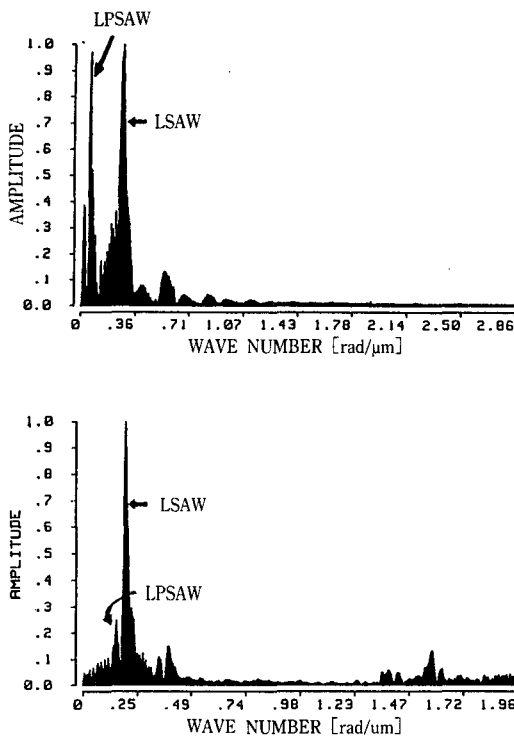


Fig. 6. FFT-analyzed mode spectra for $V(z)$ curves (a) 2124 Al alloy (b) 20% SiC/Al.

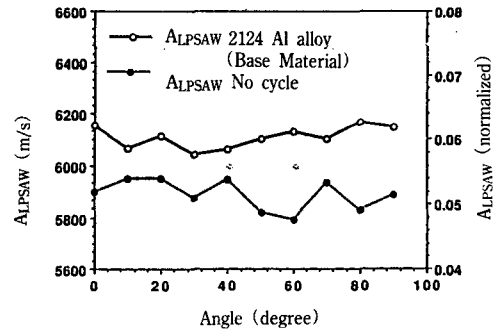
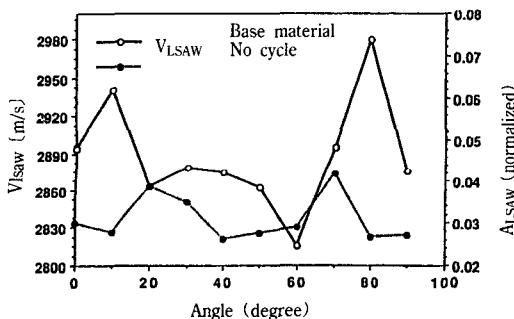


Fig. 7. Experimental results of propagating characteristics of leaky SAW and the leaky pseudo-SAW on water-Al alloy boundary (a) Leaky SAW (b) leaky pseudo-SAW.

여 pitch-catch법에 근거한 표면파의 속도 및 감쇠에 대하여 측정을 행하였다. 이때 두 탐촉자 사이의 측정거리는 약 40mm이며 시험편에서의 측정방향은 압연방향과 표면파 전파 방향이 同一하다. Fig. 8의 장치를 이용한 측정결과를 $N=0$ (cycle)에서의 표면파속도 C_{R0} 및 감쇠계수 α_0 를 이용한 상배로서 Table 1에 나타내었다. Fig. 8과 같이 5MHz의 주파수를 가지는 탐촉자를 이용해 Table 1에서와 같이 종래의 초음파 탐상법에서 많이 이용하고 있는 5MHz의 주파수를 가지고는 $N=0\sim 25,000$ (cycle)범위 내에서는 표면파 속도 및 감쇠는 아무런 변화도 관찰되지 않았으며, $N=50,000$ (cycle)이후로부터 속도 및 감쇠의 변화가 약간 관찰되기 시작하였다. 따라서 초음파 현미경을 이용한 미소 영역에서의 물성변화측정 결과는 재료 근처에서의 미시적인 변형기구를 이용하는데 매우 유효함을 알 수 있으며 앞으로 재료의 특성 및 미소 영역 비파괴 평가에 큰 도움을 줄 것으로 여겨진다.

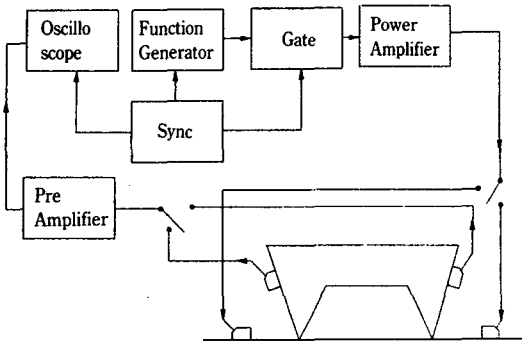


Fig. 8. Block diagram of ultrasonic surface wave technique.

Table 1. Changes in surface wave velocity and attenuation due to cyclic loading

Number of cycles	0	50	1000	5000	25000	30000	35000
Ratio of SW Velocity C_{RCRP}	1	1	1	1	1	1.0015	1.0017
Ratio of SW attenuation α/α_0	1	1	1	1	1	1.25	1.29

4. 결 론

SiC 휘스카 강화 복합재료의 피로하중에 대한 표면 손상의 평가를 위해 22MHz의 LFB렌즈 초음파 현미경을 이용하여 연구를 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기지재인 2124 Al합금에 비해 SiC 휘스카 강화 복합재료에 있어서는 누설표면파 V_{LSAW} 의 방향의존성이 명확히 관찰되었으며 또 금속복합재료에 있어서는 피로하중이 작용함에 따라 V_{LSAW} 가 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 미시적인 피로손상의 축적에 기인하는 시험편의 미시적인 표면거칠기의 변화에 따른 영향으로 생각되어진다.
2. 기지재인 2124 Al합금과 SiC 휘스카 강화 금속복합재료의 표면근처에서 전파하는 누설 탄성과 mode에 있어서, 기지재에는 LSAW 및 LPSAW의 兩 mode에 의한 간섭이 현저하게 관찰되는 것에 비해 금속

복합재료에 있어서는 LSAW만이 관찰되었다. 그러나 기지재 및 금속복합재료 모두, 피로 하중에 의한 표면 근처에서의 물성 변화 평가에는 누설 탄성과 mode中 LSAW가 매우 효과적임이 명백하게 관찰되었다.

3. 고주파 초음파 현미경은 저주파의 표면파법에 의하여는 검출되지 않는 피로하중 초기에 있어서의 재료内の 물성 변화 검출이 가능함을 보였다. 이는 앞으로 금속복합재료의 피로 균열 발생 메카니즘의 규명(특히 stage I에서)에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 여겨진다.

References

- 1) J. Kusibiki and N. Chubachi, IEEE Vol. SU-32, No.2, pp.189-212(1987)
- 2) A. Korpel, L. W. Kessler and P. R. Palermo, "Acoustic microscope operating at 100 MHz", Nature, Vol. 232, pp.110-111 (1971)
- 3) R. A. Lemons and C. F. Quate, "A scanning acoustic microscope", 1973 IEEE Ultrasonics Symp. Proc., pp.18-20(1973)
- 4) J. Kushibiki, A. Ohkubo and N. Chubachi, "Linearly focused acoustic beams for acoustic microscopy", Electron, Lett., Vol. 17, pp. 720-722(1981)
- 5) 김영환, 이성학, 이두영, 김남준, "Al/SiCw 금속복합재료의 파괴거동", 한국복합재료학회 춘계학술 발표회, pp.23(1990).
- 6) 홍태민, 임태원, 한경섭, "한국복합재료학회, 추계학술 발표회", pp. 17(1988)
- 7) Y.C. Lee, J.D. Achenbach, and J.O. Kim, "Acoustic microscopy measurements to correlate surface wave velocity and Surface roughness, Presented at Annual Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, July(1992).

Evaluation of Fatigue Damage of Metal Matrix Composite by LFB Acoustic Microscopy

Joon-Hyun Lee

Dept. of Mechanical Design Engineering, College of Engineering
Pusan National University
(Received May 24, 1993)

Abstract Composites composed of a precipitation harden 2124 alloy matrix reinforced by SiC whiskers, which are fabricated by powder metallurgy, are susceptible to fatigue damage due to the pile-up of moving dislocation and the microcrack initiation along SiC-Al interfaces, especially at the external surfaces of a body. The initial process, such as pile-up of dislocation or microcrack, that corresponds to the stage I during fatigue failure process are too small to be detected and characterized by conventional ultrasonic technique.

This paper describes the applicability of an acoustic microscope with Line-Focus-Beam(LFB) lens of 225MHz to evaluate fatigue damage of SiC whiskers reinforced Al alloy. The specimens which were 6.6mm thick, 13mm wide, and 105mm long in the gage section were fatigued in tension-tension under load control. The velocity of leaky surface and leaky pseudosurface acoustic waves are obtained by FFT analysis technique from $V(z)$ curve which is a record of output of piezoelectric transducer. These results are discussed with the change of number of fatigue cycles. The result obtained by acoustic microscope is compared with that by ultrasonic technique generated at 5MHz with conventional surface wave transducers.