

# 초음파를 이용한 금속복합재료의 열충격 손상 평가 연구

강문필\* · 이준현\*\*

## A Study on Evaluation of Thermal Shock Damage of Metal Matrix Composite using Ultrasonics

Moon-Phil Kang, Joon-Hyun Lee

**Key Words:** Metal matrix composite(금속복합재료), Thermal shock(열충격), Ultrasonics(초음파), Surface wave(표면파), SH-wave(수평횡파)

### Abstract

Metal matrix composites(MMCs) are rapidly becoming one of the strongest candidates for structural materials for many high temperature application. Among the high temperature environment, thermal shock is known to cause significant degradation in most MMC system. Therefore, the nondestructive evaluation on thermal shock damage behavior of SiC/Al6061 composite has been carried out using ultrasonic surface and SH-waves. For this study, SiC fiber reinforced metal matrix composite specimens fabricated by a squeeze casting technique were thermally cycled in the temperature range 25~400°C up to 1000 cycles. Three point bend test was conducted to investigate the effect of thermal shock damage on mechanical properties. The relationship between thermal shock damage behavior and the change of ultrasonic velocity and attenuation were discussed by considering SEM observation of fracture surface.

### 1. 서론

금속복합재료는 단일 금속재료에 비해 비강도, 비강성, 내열성 및 내구성이 우수할 뿐만 아니라 고분자기지 복합재료에 비해서도 내충격성 및 강성이 우수하며 고온환경에서의 열적 안정성이 높아 구조재로서 광범위한 응용이 기대되고 있다. 그러나 이러한 다양한 사용환경 중에서 반복적으로 가해지는 열충격은 대부분의 금속복합재료에 심각한 손상을 유발할 수 있는 가장 중요한 원인 중의 하나로 알려져 있다. 반복적인 열충격에 의한 손상은 강화재와 기지재의 열팽창계수(CTE) 차이 때문에 때로는 강화되지 않은 단일 금속재

료의 경우보다 심각할 수도 있다<sup>(1-4)</sup>.

Fig. 1 에는 열충격에 의한 손상메커니즘을 도식적으로 나타내었다. 금속복합재료에  $\Delta T$ 의 온도변화가 가해지면 강화재와 기지재의 열팽창계수  $\alpha_f$ ,  $\alpha_m$ 의 차이 때문에  $(\alpha_m - \alpha_f)\Delta T$ 만큼의 변형률 차이가 발생하고 이것은 일반적인 기지재로 사용되는 금속의 항복변형률 이상의 값을 가지게 되어 강화섬유와 기지재 사이의 계면 주위에 높은 내부응력을 발생시키게 된다<sup>(5)</sup>. 본

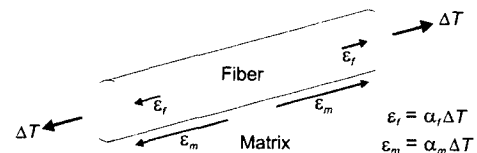


Fig. 1 Thermal Stress acting on a metal matrix composite

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

연구에서 사용된 SiC 강화섬유와 Al6061 기지재의 경우 열충격 온도차  $\Delta T = 375^\circ\text{C}$  일 때, 변형률 차이는  $7.17 \times 10^{-3}$ 으로 Al6061의 항복 변형률  $4 \times 10^{-3}$ 의 두배 가까운 값을 가진다. 기지재의 소성변형이나 크리프변형에 의해 높은 내부응력의 일부가 해소되더라도 반복적인 열충격이 가해지는 동안에 발생하는 내부응력은 강화재와 기지재 사이의 계면 및 기지재에 미시적 파손을 일으켜 금속복합재료의 기계적 성질 저하에 중대한 영향을 미치게 된다. 실제로 금속복합재료는 제조과정 중에 한번 이상의 급격한 온도변화를 거치게 되고 또한 구조재료 사용되고 있는 동안에도 항상 열적환경 변화에 노출되어 있기 때문에 금속복합재료의 우수한 기계적 성질을 유지하기 위해서 이에 대한 신뢰성 있는 평가 방법이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 SiC 섬유강화 금속복합재료의 열충격 사이클의 증가에 따른 내부손상을 초음파를 이용하여 비파괴적<sup>(6)</sup>으로 평가할 수 있는지에 대한 적용가능성에 대하여 검토하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 금속복합재료 시험편 제작

본 연구에서는 강화재로서 탄화규소섬유(SiC, Nicalon)를 기지재는 Al6061 알루미늄합금을 사용하였다. 강화섬유와 알루미늄합금의 주요 물성치는 각각 Table 1과 Table 2에 나타나 있다.

시험편은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 얇은 평판 형상으로 약 600 줄의 SiC 섬유를 시험편의 장축과 평행하게 함침시켜 SiC/Al6061 복합재료 시험편을 제작하였다. SiC/Al6061 복합재료 시험편은 알루미늄을 전기로 내에서  $650^\circ\text{C}$  온도의 용탕상태로 용융시켜서 강화섬유가 고정된 금형에 주입시켜 프레스로 12 ton의 압력을 가하여 스퀴즈 캐스팅(squeeze casting)<sup>(7)</sup>으로 제작하였다. 이때 용탕 주입 후 금형에 의한 냉각효과로 용탕이 불균일하게 응고되는 것을 막기 위해 금형을  $300^\circ\text{C}$ 로 예열하였다. 그리고 약 5초간의 가압 후 시험편을 금형으로부터 분리하여 담금질하였다.

Table 1 Physical properties of SiC fiber

Density	2.748 g/cm <sup>3</sup>
Diameter	15 $\mu\text{m}$
Young's Modulus	180 GPa
Coefficient of thermal expansion (CTE)	4.47 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$

Table 2 Physical properties of Al6061

Density	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Young's Modulus	69 GPa
Coefficient of thermal expansion (CTE)	23.6 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$

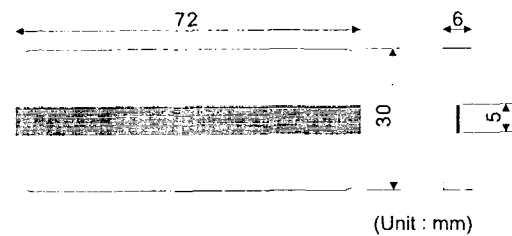


Fig. 2 Dimension of SiC/Al6061 composite specimen

### 2.2 열충격 시험

열충격 시험은 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 시험편의 가열 및 냉각 과정을 자동으로 제어할 수 있는 열충격 시험장치를 이용하여 반복적으로 열충격을 가하였다. 시험은 시험편을  $400^\circ\text{C}$ 의 온도로 유지되고 있는 전기로 속에서 10분간 가열시킨 후  $25^\circ\text{C}$ 의 냉각수 속으로 투하시켜 1분간 냉각시켰다. 이와 같은 한번의 가열-냉각 과정을 1사이클로 하여 1000사이클까지 열충격 시험을 수행하였다. 최대 사이클 온도  $400^\circ\text{C}$ 는 실제 SiC/Aluminum 복합재료가 사용되는 고온 환경보다 다소 높은 온도로서 가장 극한 환경에서의 열충격 손상을 평가하기 위해 선정하였다. 실제로  $350^\circ\text{C}$ 에서의 SiC/Aluminum 복합재료의 인장 및 항복 강도는 실온에서의 강도값의 50%에 불과한 것으로 보고되고 있다<sup>(8)</sup>.

### 2.3 초음파를 이용한 열충격 손상 평가

본 연구에서는 열충격 사이클의 증가에 따라 시험편에 발생하는 손상을 초음파를 이용하여 평가하였다. 시험은 표면으로부터 한 파장에서 수 파장 정도의 깊이로 표면을 따라 전파하여 표면

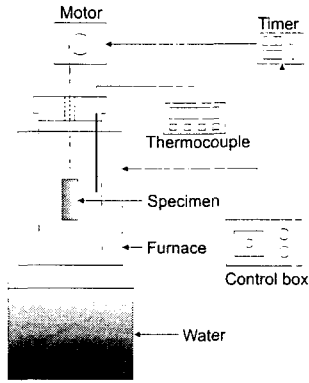


Fig. 3 Schematic diagram of thermal shock test

및 그 근방의 결함 검출에 용이한 초음파 표면파 (surface wave)를 이용하여 열충격 사이클의 증가에 따라 시험편에 발생하는 손상거동과 표면파의 속도변화 및 감쇠변화와의 상관관계를 규명하고자 하였다. 시험편은 먼저 열충격 사이클을 가하기 전에 속도와 감쇠를 측정하고 열충격 사이클이 1000 사이클까지 진행되는 동안 매 100 사이클마다 열충격 시험기에서 꺼내어 측정하였다. 표면파 측정은 pitch-catch 방법<sup>(9-10)</sup>으로 실시하였으며, Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 Pulsar/Receiver로부터 송신탐촉자를 통해 발생된 표면파는 시험편의 장축을 따라 일정거리 (45mm)를 전파한 후 수신탐촉자에 수신되어 50 dB 증폭되어 디지털 오실로스코프(Lecroy 9310A)에서 파형을 저장한 후 PC에서 속도와 감쇠를 계산하였다. 그리고 주파수의 변화에 따른 시험편의 표면파 속도와 감쇠의 변화를 규명하기

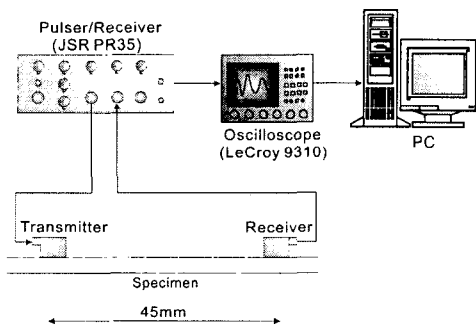


Fig. 4 Schematic diagram of ultrasonic surface wave measurement.

위해 2.25 MHz 와 5 MHz 탐촉자를 사용하여 비교하였다.

한편 위에서 언급한 표면파는 탐상면상의 장애물이나 요철에 의한 감쇠가 커 표면상태의 영향을 받기 쉽고 에너지의 80~90%가 한파장 깊이가 이내에 집중되어 계면 근처의 손상을 파악하기 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 표면 SH파(polarized shear horizontal wave)를 이용하여 보완 실험을 하였다. 표면 SH파는 음파의 진동방향이 탐상면과 평행하기 때문에 표면상태의 영향이 적고 다른 모드파가 동시에 존재하지 않기 때문에 표면 및 표면 근방의 결함 평가에 유효한 것으로 보고되고 있다<sup>(11)</sup>. 또한 침투 깊이가 3mm 정도까지 유효하기 때문에 표면 근방 뿐 아니라 계면 부근에서의 손상도 검출가능할 것으로 기대된다. 실험은 Fig. 5(a)에서 보여주는 것과 같은 SH파 탐촉자를 사용하는 초음파 표면음진기(Toshiba Tungaloy)를 사용하여 수행하였다. SH파 탐촉자는 각각 5mm×5mm의 접촉 면적을 가진 송신 탐촉자와 수신 탐촉자가 10mm 간격을 가진 브릿지 형태로 입사각 19°, 중심주파수는 1.6MHz 이다. 그리고 SH파가 시험편을 전파하는 방향에 따른 특성을 비교하기 위해 Fig. 5(b)에서 보여주는 바와 같이 SH파가 강화섬유의 방향과 동일하게 전파하는 경우(Longitudinal), 강화섬유와 수직 방향으로 전파하는 경우(Transverse), 그리고 강화섬유가 함침되지 않은 부분(Matrix)에 대하여 송신 탐촉자로부터 수신 탐촉자로의 SH파의 전파시간을 측정하였다.

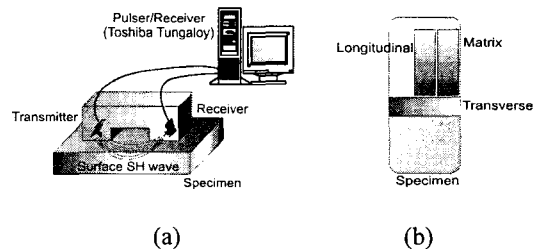


Fig. 5 Schematic diagram of ultrasonic surface SH-wave measurement.

## 2.4 열충격 사이클에 따른 경도 및 잔류강도 평가

한편 본 연구에서는 열충격 사이클의 증가에 따른 시험편의 기계적 특성변화를 평가하기 위하여 경도 측정과 3점 굽힘시험을 실시하였다. 경도 측정은 Vicker's 경도기로 열충격 사이클이 진행되는 동안 매 100 사이클마다 측정하였다. 3점 굽힘시험은 열충격을 가하지 않은 시험편과 각각 200, 400, 600, 800, 1000 사이클의 열충격을 가한 시험편을 2개씩 추출하여 실시하였다. 시험에 사용된 시험편은 섬유가 강화되지 않은 가장자리 부분을 절단하여 길이 65 mm, 폭 10 mm, 두께 6 mm로 가공하여 중앙에 깊이 1 mm의 45° 노치를 주었다. 그리고 양 지지점 간 거리(span length)를 52.5 mm로 하여 최대하중 10 ton의 유압식 재료시험기(INSTRON 8501)를 사용하여 1.3 mm/min의 변위 제어를 하였다.

한편 열충격에 따른 시험편의 미시적 손상을 확인하기 위하여 광학현미경과 주사식 전자 현미경(SEM)을 이용하여 시험편의 표면과 굽힘시험을 실시한 시험편의 파단면 및 계면을 조사하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 초음파를 이용한 열충격 피로손상 평가

본 연구에서는 먼저 열충격 피로 사이클의 증가에 따라 시험편내에 발생하는 피로손상과 초음파 표면파의 속도변화 및 감쇠변화와의 상관관계를 규명함으로써 초음파를 이용한 금속 복합재료의 열충격 손상에 대한 비파괴적 평가 방법의 적용 가능성을 검토하였다.

Fig. 6은  $\Delta T = 375^\circ\text{C}$ 의 열충격 사이클 증가에 따른 표면파의 속도변화를 각각 중심주파수 2.25MHz와 5MHz의 탐촉자에 대하여 나타내었다. 그래프는 열충격 사이클의 증가에 따른 표면파의 속도변화(V)를 초기상태와 비교하기 위해 시험편의 초기 속도, 즉 0 사이클일 때의 속도( $V_0$ )로 무차원화시켜 나타내었다. 측정결과에서 보여주는 바와 같이 5MHz에서는 다소 불

규칙적이고 별다른 변화를 보이지 않는 반면, 2.25MHz에서는 600 cycle 이후 다소 증가함을 보여주고 있다. 그러나 이와 동시에 오차범위도 확대되어 2.25MHz에서도 열충격 사이클의 증가에 따른 열충격 피로손상과 표면파 속도와의 상관관계를 규명할 수 없었다.

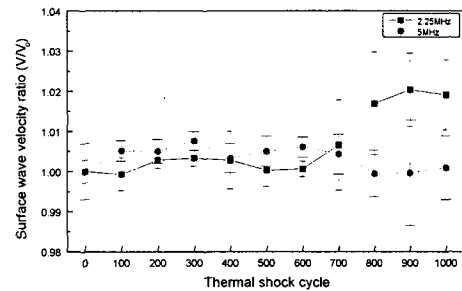


Fig. 6 Relationship between surface wave velocity ratio and number of thermal shock cycle

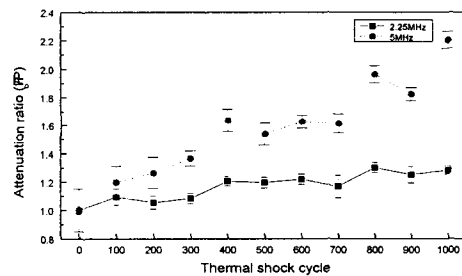


Fig. 7 Relationship between attenuation ratio and number of thermal shock cycle

Fig. 7은 열충격 사이클의 변화에 대한 초음파 표면파의 감쇠특성을 2.25MHz, 5MHz의 주파수에 대하여 나타내었다. 그래프는 열충격 사이클을 받지 않은 상태에서의 음압( $P_0$ )을 각 열충격 사이클의 시험편에 대하여 측정된 음압( $P$ )에 대하여 무차원화시켜 감쇠변화의 비로 나타내었다. 결과에서 보여주는 바와 같이 열충격 사이클이 증가할수록 감쇠비는 점차 증가하고 있다. 이는 열충격 사이클이 증가함에 따라 시험편 표면에서 균열이 발생하고 또한 반복되는 내부응력

의 발생으로 인한 표면 근방의 결함이 발생함으로써 초음파의 산란을 유발시켜 진폭의 감쇠를 가져오기 때문이다. 그리고 2.25MHz 주파수에서는 감쇠비가 미소하게 증가한 반면 5MHz에서는 보다 높은 감쇠비의 증가를 보여주고 있다. 일반적으로 이와 같은 감쇠계수의 주파수 의존 특성은 주파수가 증가함에 따라 전파하는 초음파의 파장(wavelength)의 감소에 기인하는 것이다

또한 본 연구에서는 앞서 언급한 초음파 표면파가 가지는 단점을 보완하기 위하여 초음파 표면 SH파를 이용하여 열충격 사이클의 증가에 따른 시험편의 손상거동과 표면 SH파의 전파특성의 상관관계를 규명하여 그 적용가능성을 검토하였다. Fig. 8은  $\Delta T = 375^\circ\text{C}$ 의 열충격 사이클 증가에 따른 SH파의 전파시간의 변화를 각각 SH파가 강화섬유의 방향과 동일하게 전파하는 경우(Longitudinal), 강화섬유의 방향과 수직으로 전파하는 경우(Transverse), 그리고 강화섬유가 함침되지 않은 기지재(Matrix)에 대한 측정값으로 나타내었다.

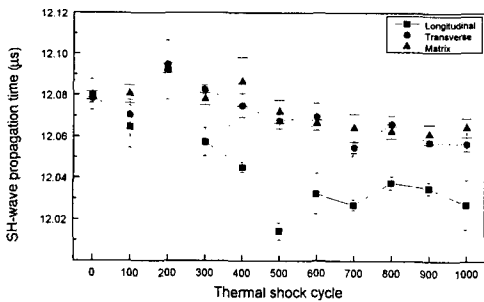


Fig. 8 Relationship between SH-wave propagation time and number of thermal shock cycle.

결과에서 보여주는 바와 같이 세 가지 경우 모두 다소 불규칙적이기는 하나 200 사이클까지는 전파시간이 다소 증가하였다가 이후 점차적으로 감소하고 있음을 보여주고 있다. 특히 Transverse 나 Matrix에 비해 Longitudinal 방향으로의 전파시간이 더 큰 감소를 보여주고 있다. 이러한 SH파 전파시간의 감소는 200 사이클까지는 시험편이 열충격에 의해 경화됨으로써 밀도가 증가하여 음속이 감소한 것으로 추정된다. 그리고 200 사이클 이후부터는 열충격의 증가로 인한 시험편의

소성변형에 의해서 시험편에 존재하는 기체물, 석출물 등의 제2상 입자에서 미소공동(cavity)이 발생하여 성장, 합체 과정을 통해 밀도가 감소한 것으로 추정된다. 이것은 뒤에 언급할 SEM 사진을 통해서도 확인할 수 있었다.

### 3.2 열충격 사이클의 증가에 따른 재료의 기계적 특성 평가

한편 본 연구에서는 앞의 초음파를 이용한 열충격 사이클에 의한 손상평가의 적용 가능성을 확인하기 위하여 경도시험과 3점굽힘시험을 통하여 기계적 특성 변화를 평가하였다.

Fig. 9는 열충격 사이클의 증가에 따른 시험편의 Vicher's 경도의 변화를 나타낸 것이다. 경도는 열충격 사이클이 증가함에 따라 300 사이클까지는 증가하다가 이후 다시 감소하는데 Fig. 8의 SH파의 전파시간과 다소 유사한 경향을 보여 준다.

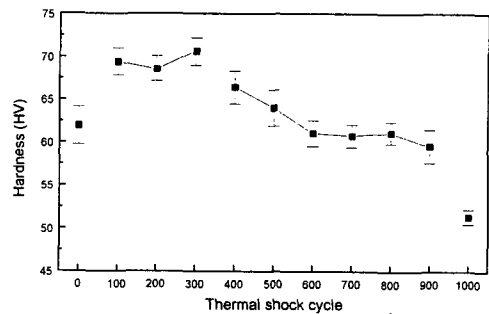


Fig. 9 Relationship between Hardness and number of thermal shock cycle

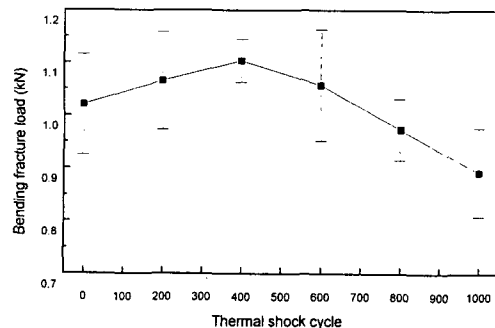


Fig. 10 Relationship between and number of thermal shock cycle.

Fig. 10은 사이클을 받은 시험편에 대한 잔류강도 변화를 평가하기 위하여 열충격 사이클을 받은 각 시험편에 대하여 3점 굽힘시험을 실시하여 굽힘파단하중을 측정된 값을 나타낸 것이다. 결과에서 다소의 오차가 있지만 열충격 사이클이 증가함에 따라 400 사이클 까지는 잔류강도가 증가하고, 이후에는 점차적으로 감소하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 9에서의 경도변화에서 보여주듯 열충격 사이클은 대략 400 사이클까지는 기계적 성질 저하에 영향을 주지 않는 반면 400 사이클 이후에는 점차적으로 기계적 성질의 저하에 영향을 주고 있음이 확인할 수 있다. 이러한 기계적 성질의 변화는 Fig. 7과 Fig. 8의 초음파를 이용한 평가로 유추되는 열충격 손상과 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다.

### 3.3 광학현미경 및 전자현미경에 의한 미세적 손상 특성 평가

초음파를 이용하여 금속복합재료의 열충격 손상거동을 비파괴적으로 평가하기 위해서는 열충격 사이클에 따른 SiC/Al6061 복합재료 시험편의 손상상태를 실제로 비교, 검토하여야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 광학현미경 및 주사식 전자현미경을 이용하여 시험편의 표면 및 3점 굽힘시험을 실시한 시험편의 계면 및 파단면을 관찰하였다.

Fig. 11은 열충격 사이클을 가하기 전과 1000 사이클을 가한 후의 시험편 표면을 광학현미경으로 촬영한 것이다. Fig. 11(a)의 열충격을 가하기 전의 표면은 시험편을 제작한 후 연마한 상태로 어떠한 결함도 발견되지 않았으나, Fig. 11(b)의 1000 사이클의 열충격을 가한 후의 시험편 표면에는 다수의 미소균열이 관찰되었다.

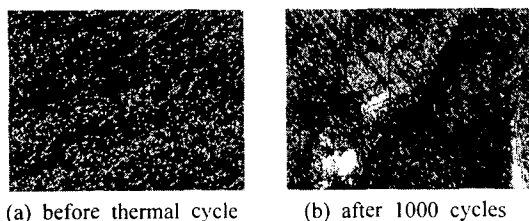


Fig. 11. Optical micrographs of surface (  $\times 50$  )

Fig. 12는 시험편의 계면사진으로 (a)의 열충격을 가하기 전의 계면상태는 접합이 잘되어 있으나 (b)의 1000 사이클의 열충격을 가한 후의 시험편에서는 강화섬유와 기지재간의 계면분리(debonding)가 다수 관찰되었다.

Fig. 13은 각각 3점 굽힘시험을 실시한 시험편의 파단면을 보여주고 있다. 사진에서 보여주듯이 1000 사이클의 열충격을 받은 시험편의 파단면에서는 열충격을 받지 않은 시험편에 비해 훨씬 커진 미소공동을 관찰할 수 있다.

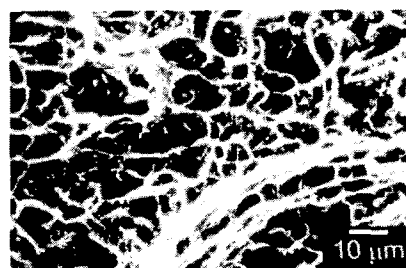


(a) before thermal cycle

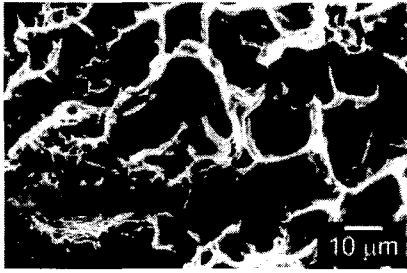


(b) after 1000 cycles

Fig. 12 Scanning electron micrograph of the interface between fiber and matrix (  $\times 3500$  )



(a) before thermal cycle



(b) after 1000 cycles

Fig. 13 Scanning electron micrograph of fracture surface of matrix(Al6061) region ( $\times 1000$ )

#### 4. 결론

본 연구에서는 초음파 기법을 이용하여 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 사이클에 따른 손상거동을 비파괴적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초음파 표면파를 이용한 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 손상 평가를 하는데 있어서 초음파 표면파 속도변화 보다는 감쇠변화를 측정하여 평가하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 즉, 열충격 사이클에 대한 초음파 표면파의 속도변화는 다소 불규칙적인 양상을 나타낸 반면 감쇠변화는 열충격 사이클이 증가할수록 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 이러한 감쇠변화의 양상은 2.25MHz 보다 5MHz 에서 더욱더 현저함을 알 수 있었다.

(2) 표면 SH파의 전파속도는 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 손상평가에서 열충격 사이클의 증가에 따른 경도변화와 잔류강도의 변화에 민감한 변화를 보여주었으며 또한 초음파 표면파의 속도변화와 감쇠변화를 이용한 손상평가보다도 민감한 반응을 보여주었다. 이로써 표면 SH파 전파시간은 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 사이클에 따른 손상평가에 유용한 측정도구로서 적용 가능하다고 판단된다.

#### 참고문헌

(1) Tetsuyuki Kyono, Etsuro Kuroda, Atsushi

- Kitamura, Tsutomu Mori, Minoru Taya, 1988, "Effects of Thermal Cycling on Properties of Carbon Fiber/Aluminum Composites", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.110, pp.89~95.
- (2) C. Badani, M. La Vecchia, A. Giurcanu, 1997, "Damage of 6061/SiC<sub>w</sub> composite by thermal cycling", Journal of Materials Science, Vol.32, pp.921~930.
- (3) Robert C. Wetherhold, 1988, "Thermal cycling of tungsten-fibre-reinforced superalloy composites", Journal of Materials Science, Vol.23, pp.713~717.
- (4) S. M. Pickard and B. Derby, 1991, "The behaviour of metal matrix composites during temperature cycling", Materials Science and Engineering, Vol.A135, pp.213~216.
- (5) Minoru Taya, Richard J. Arsenault, 1989, "Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior", Pergamon Press.
- (6) Lee, Joon-Hyun and Park, Young-Chul, 1995, "Nondestructive Characterization of Metal Matrix Composite by Ultrasonic Measurement", Journal of Composite Engineering, Vol.5, No.12, pp.1423~1431.
- (7) G. A. Chadwick, 1991, "Squeeze casting of metal matrix composites using short fibre preforms", Materials Science and Engineering", Vol.A135, pp.23~28.
- (8) T. J. Reinhart, 1987, "Engineered Materials Handbook", Vol.1, pp.890.
- (9) 이준현, 이진경, 조운호, 1998, "세라믹의 열충격 손상거동 및 초음파 Lamb파를 이용한 비파괴적 손상평가", 대한기계학회 논문집 A 권, 제22권 제12호, pp.2278~2285.
- (10) 이준현, 이진경, 김부안, 1999, "알루미나 세라믹의 열충격 손상에 따른 기계적 특성변화에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 A 권, 제23권 제9호, pp.1507~1515.
- (11) Mikio Fukuhara, Yoshiyuki Kuwano, 1998, "Propagation characteristics of SH ultrasonic waves through the surface depth of an isotropic medium", NDT&E International, Vo.31, No.3, pp.201~210.