

< 논문 >

초음파를 이용한 금속기지 복합재료의 열충격 손상 평가

강문필* · 이민래** · 이준현†

(2005년 4월 1일 접수, 2005년 10월 22일 심사완료)

Evaluation of Thermal Shock Damage of Metal Matrix Composite Using Ultrasonics

Moon-Phil Kang, Min-Rae Lee and Joon-Hyun Lee

Key Words: Metal Matrix Composite(금속기지복합재료), Thermal Shock(열충격), Ultrasonics(초음파), Surface Wave(표면파), SH-Wave(수평횡파)

Abstract

Metal matrix composites(MMCs) have been rapidly becoming one of the strongest candidates for structural materials for many high temperature application. However, among the various high temperature environments in which metal matrix composites was applied, thermal shock is known to cause significant degradation in most MMC system. Due to the appreciable difference in coefficient of thermal expansion(CTE) between reinforcement and metal matrix, internal stresses are generated following temperature changes. Internal stresses affect degradation of mechanical properties of MMC by causing microscopic damage in interface and matrix during thermal cycling. Therefore, the nondestructive evaluation on thermal shock damage behavior of SiC/Al6061 composite has been carried out using ultrasonics. For this study, SiC fiber reinforced metal matrix composite specimens fabricated by a squeeze casting technique were thermally cycled in the temperature range 298~673 K up to 1000cycles. Three point bending test was conducted to investigate the effect of thermal shock damage on mechanical properties. The relationship between thermal shock damage behavior and the propagation characteristics of surface wave and SH-ultrasonic wave was discussed by considering the result of 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 자동차, 선박 및 항공우주산업 분야에 이르기까지 광범위한 응용이 기대되고 있다. 그러나 이

러한 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 금속재료의 경우보다 심각할 수도 있다.⁽¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 열충격 사이클이 진행됨에 따라 SiC 섬유강화 금속복합재료에 발생하는 내부손상에 대하여 초음파 표면파와 SH파를 이용한 비파괴적 모니터링 기법의 적용가능성을 검토하고자 하였다.⁽⁵⁻⁶⁾ 표면파는 재료의 표면 또는 표면 근처의 균열 검출 및 손상 평가에 유용하며 SH(polarized shear horizontally) 초음파가 SV(shear vertically polarized) 초음파나 종파, 그리고 표면파

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail: johlee@pusan.ac.kr
TEL: 051)510-3078 FAX: 051)512-9835

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

와 비교하여, 가지는 장점은 표면이나 다른 면에서 반사될 때 모드변환(mode conversion)이나 위상변화(phase shift)가 없다는 것이다. 모드변환과 위상변화는 재료의 미세구조, 특히 표면 및 표면근방에서의 원자결합 및 재배열에 의해 자주 영향을 받기 때문에 SH파는 표면깊이에서의 결합 평가에 유효한 것으로 보고되고 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 이러한 SH 초음파를 이용하여 열충격 사이클을 받은 SiC/Al6061 복합재료의 표면깊이를 통하여 전파하는 SH파의 파형 패턴을 분석하여 그 전파특성과 열충격 손상과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 금속복합재료 시험편 제작

본 연구에 사용한 시험편은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 얇은 평판 형상으로 약 600 줄의 SiC섬유 다발을 시험편의 장축과 평행하게 강화시켜 SiC/Al6061 복합재료 시험편을 제작하였다. Fig. 2에는 시험편 제작의 개략도를 나타내고 있다. 먼저 금형에 아세톤과 초음파 세척기를 이용하여 세척한 SiC섬유 다발을 팽팽하게 고정시킨 후 금형에 의한 냉각효과로 용탕이 불균일하게 응고되는 것을 방지하기 위해 금형을 573K으로 예열하였다. 예열 후 923K 온도로 용융시킨 Al6061 알루미늄 용탕을 강화섬유가 고정된 금형에 주입시켜 유압프레스로 50MPa의 압력을 23mm/sec의 펀치 속도로 5초간 가압하여 스퀴즈 캐스팅(squeeze casting)으로 제작하였다. 가압 후 시험편을 금형으로부터 분리하여 293K의 물에서 담금질한 후 표면에 손상이 가지 않도록 주의하여 #100에서 #2000까지의 연마지로 연마하였다.

2.2 열충격 시험

열충격 시험은 Fig. 2에 나타난 바와 같은 시험편의 가열 및 냉각 과정을 자동으로 제어할 수 있는 열충격 시험장치를 이용하여 반복적으로 열충격을 가하였다. 시험은 시험편을 673K의 온도로 유지되고 있는 전기로 속에서 10분간 가열시킨 후 298K의 냉각수 속으로 투하시켜 1분간 냉각시켰다. Fig. 2(b)에 나타난 이와 같은 한번의 가열-냉각 과정을 1사이클로 하여 1000사이클까지 열충격 시험을 수행하였다. 최대 사이클은

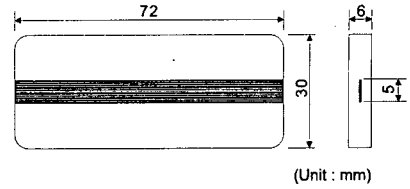


Fig. 1 Dimension of SiC/Al6061 composite specimen

Table 1 Physical properties of SiC fiber

Properties	SiC fiber	Al6061
Density	2.748g/cm ³	2.7g/cm ³
Young's Modulus	180 GPa	69 Gpa
Coefficient of thermal expansion (CTE)	4.47 μm/m°C	23.6 μm/m°C

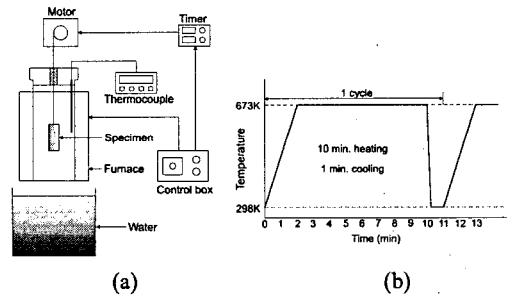


Fig. 2 Schematic diagram of thermal shock test and time-temperature profile

도 673K은 실제 SiC/Aluminum 복합재료가 사용되는 고온환경보다 다소 높은 온도로서 가장 극한 환경에서의 열충격 손상을 평가하기 위해 선정하였다. 실제로 623K에서의 SiC/Aluminum 복합재료의 인장 및 항복 강도는 실온에서의 강도값의 50%에 불과한 것으로 보고되고 있다.⁽¹¹⁾

2.3 표면파를 이용한 열충격 손상 평가

본 연구에서는 열충격 사이클의 증가에 따라 시험편에 발생하는 손상거동과 초음파의 전파특성과의 상관관계를 규명하고자 하였다. 실험은 표면으로부터 한 파장에서 수 파장 정도의 깊이로 표면을 따라 전파하여 표면 및 그 근방의 결합 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 사

이률을 가하기 전에 속도와 감쇠를 측정하고 열충격이 1000 사이클까지 진행되는 동안 매 100 사이클마다 열충격 시험기에서 꺼내어 측정하였다. Fig. 3에 표면파 측정의 개요도를 나타내고 있다. 주파수의 변화에 따른 시험편의 표면파 속도와 감쇠의 변화를 규명하기 위해 2.25MHz와 5MHz 탐촉자를 사용하여 비교하였다.

2.4 SH-wave를 이용한 열충격 손상 평가

한편, 표면파는 탐상면 상의 장애물이나 요철에 의한 감쇠가 커 표면상태의 영향을 받기 쉽고 에너지의 80~90%가 한 파장 깊이 이내에 집중되어 표면 부근의 손상 평가에는 유용하나 시험편 내부의 계면 근처의 손상을 파악하기는 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 SH파(polarized shear horizontal wave)를 이용한 보완 실험을 수행하여 열충격 사이클의 증가에 따라 시험편에 발생하는 손상거동과 SH파의 전파 특성과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

실험은 Fig. 4(a)에서 보여주는 것과 같은 SH파 탐촉자를 이용한 초음파 표면음진기(Toshiba Tungaloy Co. Tungsonic)를 사용하여 수행하였다. SH파 탐촉자는 가로 세로 각각 5mm×5mm 크기의 PZT[Pb(ZrxTi1-x)O3] 진동자를 가진 송신 탐촉자와 수신 탐촉자가 10mm 간격을 가진 브릿지 형태로 입사각 19°, 중심주파수는 5MHz이다. 측정은 SH파가 시험편을 전파하는 방향에 따른 특성을 비교하기 위해 Fig. 4(b)에서 보여주는 바와 같이 SH파가 강화섬유의 방향과 평행하게 전파하는 경우(Parallel), 강화섬유와 수직 방향으로 전파하는 경우(Perpendicular), 그리고 강화섬유가 함침되지 않은 부분(Matrix)에 대하여 SH파를 측정하였다. 시험편은 먼저 열충격 사이클을 가하기 전에 SH파를 측정하고 열충격 사이클이 1000 사이클까지 진행되는 동안 매 100 사이클마다 열충격 시험기에서 꺼내어 측정하였다.

또한 열충격에 따라 시험편에 발생하는 미세적 손상을 확인하기 위하여 광학현미경과 주사식 전자 현미경(scanning electron microscope)을 이용하여 시험편의 표면과 굽힘 시험을 실시한 시험편의 파단면 및 계면을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면파를 이용한 열충격 피로손상 평가

Fig. 5는 $\Delta T = 375 K$ 의 열충격 사이클 증가에 따른 표면파의 속도변화를 각각 중심주파수 2.25MHz와 5MHz의 탐촉자에 대하여 나타내었다. 열충격 사이클의 증가에 따른 표면파의 속도 변화(V)를 초기상태와 비교하기 위해 시험편의 초기 속도, 즉 0 사이클일 때의 속도(V0)로 무차원화시켜 나타내었다. 측정결과에서 보여주는 바와 같이 5MHz에서는 다소 불규칙적이고 별다른 변화를 보이지 않는 반면, 2.25MHz에서는 600 사이클 이후 다소 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 6은 열충격 사이클의 변화에 대한 초음파 표면파의 감쇠특성을 2.25MHz, 5MHz의 주파수에 대하여 나타내었다. 그래프는 열충격 사이클을 받지 않은 상태에서의 음압(P0)을 각 열충격 사이클의 시험편에 대하여 측정된 음압(P)에 대하여 무차원화시켜 감쇠변화의 비로 나타내었다.

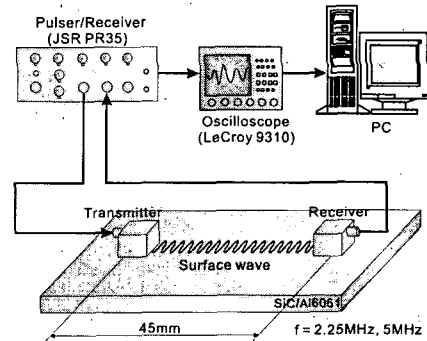


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic surface wave measurement

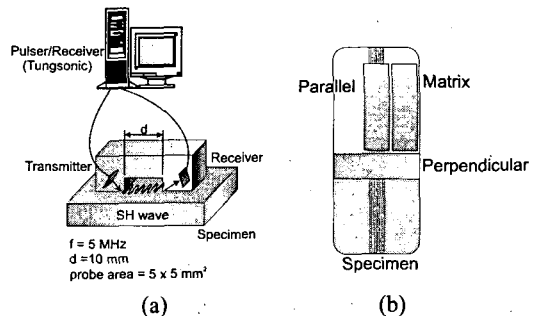


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up for ultrasonic SH-wave measurement

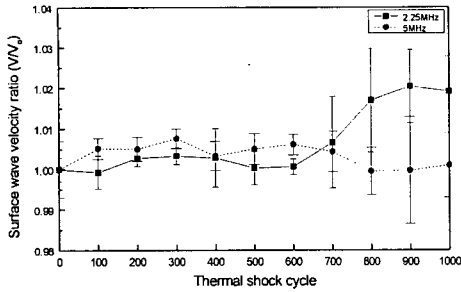


Fig. 5 Relationship between surface wave velocity ratio and number of thermal shock cycle

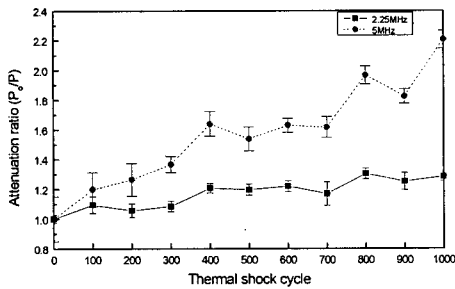


Fig. 6 Relationship between attenuation ratio and number of thermal shock cycle

결과에서 보여주는 바와 같이 열충격 사이클이 증가할수록 감쇠비는 점차 증가하고 있다. 이는 열충격 사이클이 증가함에 따라 시험편 표면에서의 균열과 반복되는 내부응력의 발생으로 인하여 표면 근방에서 결함이 발생함으로써 초음파의 산란을 유발시켜 진폭의 감쇠를 가져오기 때문이다. 그리고 2.25MHz 주파수에서는 감쇠비가 미소하게 증가한 반면 5MHz에서는 상대적으로 보다 높은 감쇠비의 증가를 보여주고 있다. 일반적으로 이와 같은 감쇠계수의 주파수 의존 특성은 주파수가 증가함에 따라 전파하는 초음파 파장(wavelength)의 감소에 기인하는 것이다.

3.2 SH파를 이용한 열충격 피로손상 평가

본 연구에서는 앞서 언급한 초음파 표면파가 가지는 단점을 보완하기 위하여 열충격 사이클의 증가에 따라 시험편에 발생하는 피로손상과 SH-초음파의 전파특성의 상관관계를 규명함으로써 SH파를 이용한 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 손상에 대한 비파괴적 모니터링 기법의 적용가능성을 검토하였다. 먼저 본 실험에 앞서 SiC/Al6061

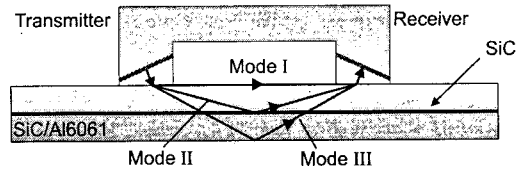
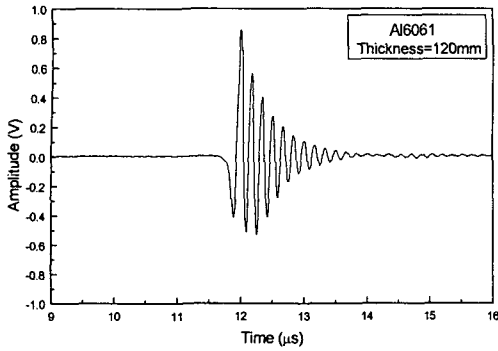


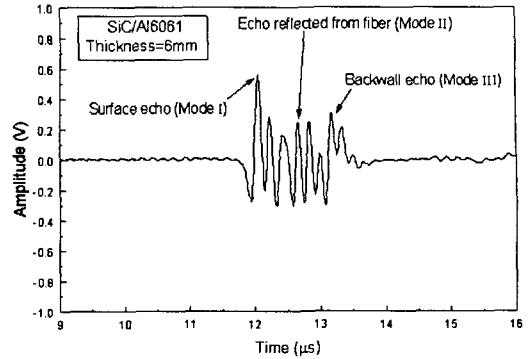
Fig. 7 Three different propagating path of SH-wave

복합재료 시험편을 전파하는 SH파의 경로는 시험편의 두께가 6mm이고 시편 중앙에 SiC섬유가 함침되어 있기 때문에 송신 탐촉자로부터 세 가지의 경로를 통하여 수신 탐촉자로 전파될 수 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이, 첫 번째는 시험편의 표면 깊이를 따라 전파하여 수신되는 경로이다(Mode I). 두 번째는 시험편 내로 입사된 후 SiC섬유 다발에서 반사되어 수신되는 경로이다(Mode II). 그리고 세 번째는 시험편 내로 입사된 SH파가 SiC섬유 다발을 투과하여 시험편의 저면(backwall)에서 반사된 후 다시 SiC섬유 다발을 투과하여 수신되는 경로이다(Mode III).

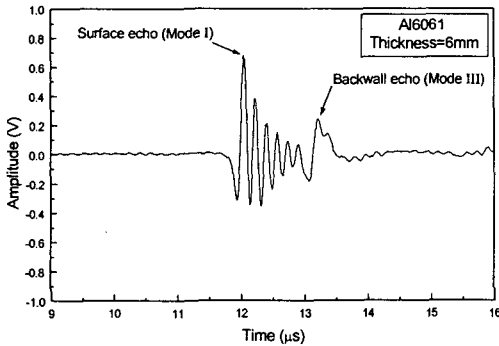
Fig. 8은 이와 같은 SH파 전파 경로 예측을 검증하기 위해서 실시한 예비시험에서 얻은 결과이다. (a)는 시험편에 사용된 기지재와 동일한 Al6061 합금으로 두께 120mm의 기지재 시험편을 준비하여 SH파를 입사시켜 수신된 파형이다. 기지재 시험편은 내부에 SH파가 반사될 수 있는 개재물이 없으며 또한 두께가 120mm이기 때문에 입사된 SH파가 저면에서 반사되어 수신될 수는 없다. 따라서 12μs 부근에서 나타난 단일 에코는 기지재 시험편의 표면 깊이를 따라 전파한 SH파의 에코임을 알 수 있다. (b)는 저면 및 SiC섬유에서 반사가 일어나지 않는 (a)의 기지재 시험편과 비교하기 위해서 SiC/Al6061 시험편에서 SiC섬유가 함침되지 않은 Matrix 부분에 대하여 측정된 것이다. SiC/Al6061 시험편에서는 (b)의 기지재 시험편과는 달리 두 개의 에코가 검출되었는데 12μs 부근의 첫 번째 에코는 (a)의 기지재 시험편에서의 것과 매우 유사한 패턴을 보여주고 있다. 따라서 첫 번째 에코는 Fig. 7에서 Mode I으로 정의된 표면 깊이를 따라 전파하여 수신된 에코(이하 표면에코)임을 추정할 수 있다. 그리고 두 번째 에코는 파형의 후반부에 표면 에코(surface echo)의 1/3 정도 크기의 진폭을 나타내었는데 이것은 송신 탐촉자로부터 사각입사(angle



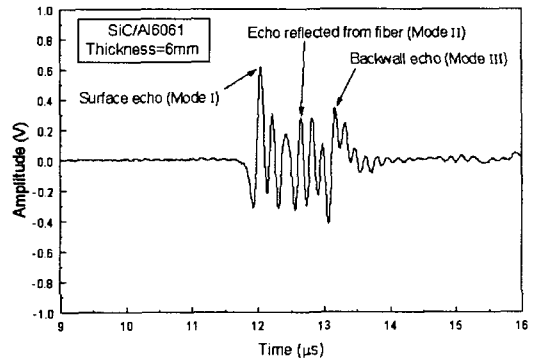
(a) Al6061 (Thickness=120mm)



(a) Parallel with fiber



(b) Al6061 (Thickness=6mm)



(b) Perpendicular to fiber

Fig. 8 The received SH-wave waveforms for different thickness

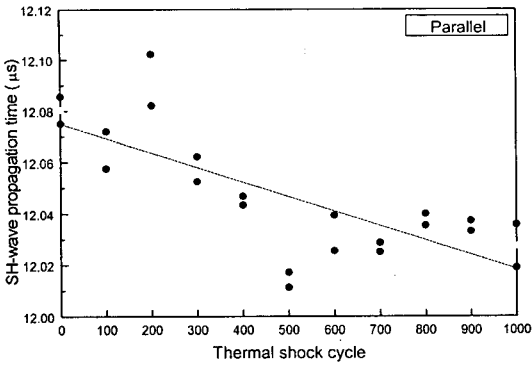
Fig. 9 Typical waveforms at different propagating direction in MMC

incident)된 SH파가 6mm 깊이의 시험편 저면에서 반사되어 수신된 저면반사 에코(back reflection echo)로 Fig. 7에서 Mode III의 경로를 따른 것으로 추정할 수 있다.

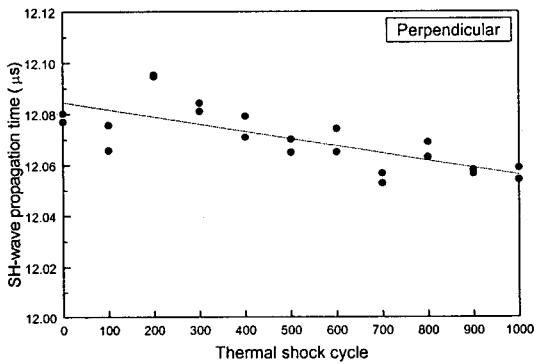
Fig. 9는 SiC섬유가 강화된 부분에 대하여 측정된 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 SiC섬유와 평행(a) 및 수직(b)하게 전파하여 수신된 두 파형은 매우 유사한 패턴을 나타내고 있다. 여기서 두 방향에서의 파형 모두 12 μ s 부근의 에코는 표면 에코(Mode I)이고, 13 μ s 이후의 에코는 저면반사 에코(Mode III)임을 알 수 있다. 또한 두 방향 모두에서 표면 에코와 저면반사 에코 사이에 또 다른 에코가 관찰되었는데 이것은 시험편의 중앙에 강화되어 있는 SiC섬유 다발로부터 반사된 에코(echo reflected from interface)로 Mode II의 경로를 따른 것으로 추정된다. 따라서 Mode I으로 정의

된 표면깊이를 따라 전파한 표면 에코는 시험편의 표면 및 표면 근방의 결합 평가에 유용하고, Mode III의 경로를 따라 전파한 저면반사 에코는 시험편의 내부 및 SiC섬유와 Al6061 기지재 사이의 계면 근방의 결합평가에 유용할 것이라 예측하였다. 따라서 본 연구에서는 각 세 방향(Parallel, Perpendicular, Matrix)에서 측정된 SH파의 파형을 분석하여 표면 에코와 저면반사 에코의 전파시간(propagation time)을 측정하여 열충격 사이클의 증가에 따른 시험편의 손상거동과의 상관관계를 규명하였다.

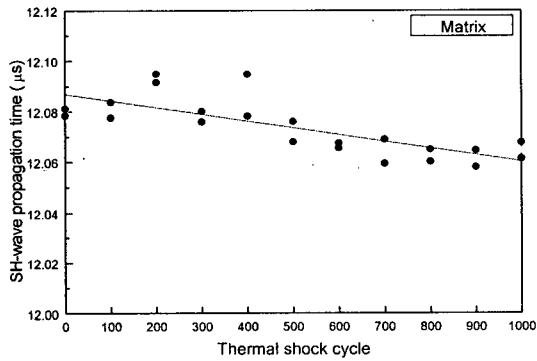
Fig. 10은 $\Delta T = 350K$ 의 열충격 사이클의 증가에 따른 표면에코의 전파시간의 변화를 각각의 전파 방향에 대하여 나타낸 것이다. 표면깊이를 따른 전파시간은 세 방향 모두 200사이클까지는 다소 증가하였다가 이후 사이클의 증가에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다.



(a) Parallel direction with fiber



(b) Perpendicular direction to fiber

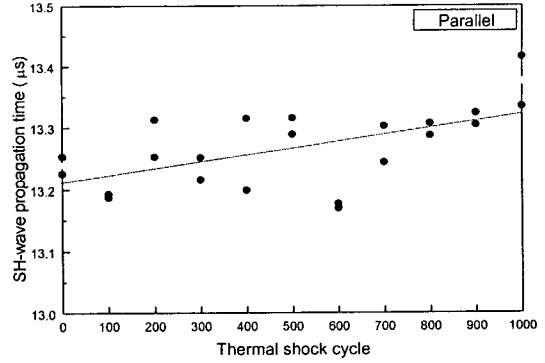


(c) Matrix direction

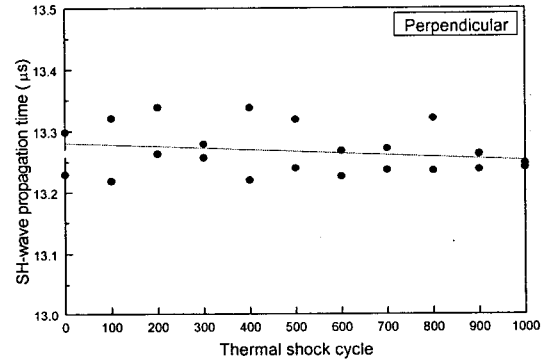
Fig. 10 Relationship between SH-wave propagation time and the number of thermal shock cycle (Mode I)

특히, Fig. 10(a)와 같이 섬유방향과 평행한 경우 Fig. 10(b)의 Perpendicular와 (c)의 Matrix 방향보다 두드러진 감소를 나타내었다.

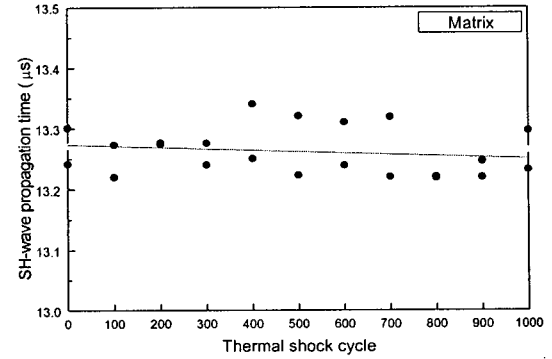
Fig. 11은 시험편을 전파한 SH파의 Mode III 경로를 통한 저면 반사에코 신호의 전파시간 변화



(a) Parallel direction with fiber



(b) Perpendicular direction to fiber



(c) Matrix direction

Fig. 11 Relationship between SH-wave propagation time and the number of thermal shock cycle (Mode III)

를 열충격 사이클에 따라 나타낸 것이다. Fig. 11(b)와 (c)의 Perpendicular와 Matrix 방향의 경우는 아주 미소하게 감소하거나 별다른 변화를 보이지 않은 반면 (a)의 parallel 방향의 경우는 사이클의 증가에 따라 전파시간이 증가하는 경향을

보여주었다. 이러한 현상은 기지재와 SiC섬유 사이의 계면에서 손상으로 인한 전파시간 및 전파 속도변화의 요인으로 판단된다.

3.3 열충격 사이클의 증가에 따른 SiC/Al6061 기계적 특성 평가

Fig. 12는 기계적 특성 변화를 평가하기 위하여 열충격 사이클의 증가에 따른 시험편의 Vicker's 경도와 3점 굽힘 시험을 통하여 측정된 잔류강도의 변화를 과단 굽힘 하중의 값으로 나타낸 것이다. 3점 굽힘 시험은 열충격을 가하지 않은 시험편과 각각 200, 400, 600, 800, 1000 사이클의 열충격을 가한 시험편을 4개씩 추출하여 실시하였다. 경도는 열충격을 가하기 전 약 64의 경도를 나타냈는데 열충격 사이클이 증가함에 따라 300 사이클까지는 약간 증가하여 경도 71로 약 9%의 증가를 나타내었으나 이후 점차적으로 감소하여 1000 사이클의 열충격을 받은 후에는 경도값이 약 50으로 초기상태와 비교하여 약 20%의 경도 감소를 나타내었다.

또한 잔류강도는 400 사이클까지는 잔류강도가 초기보다 약 5% 증가하였다가, 이후 사이클이 증가함에 따라 점차적으로 감소하여 1000 사이클 후에는 초기보다 약 15%의 감소를 나타내었다. 한편, 경도 및 잔류강도 변화에서 대략 300 사이클까지는 오히려 기계적 성질이 다소 증가되는 양상을 나타내었다. 이와 같이 강도가 증가하는 주요기구에 대해서는 향 후 보다 깊은 연구가 요구된다.

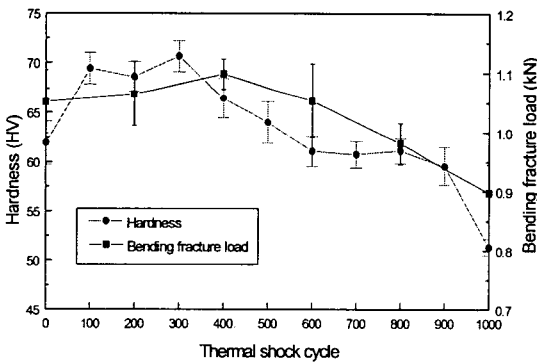
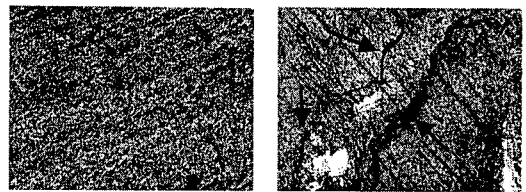


Fig. 12 Relationship between hardness and residual strength and the number of thermal shock cycle

3.4 광학현미경 및 전자현미경에 의한 미시적 손상 특성 평가

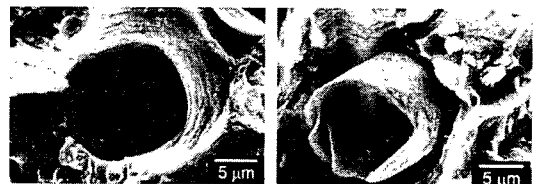
초음파를 이용하여 금속복합재료의 열충격 손상거동을 비파괴적으로 평가하기 위해서는 열충격 사이클에 따른 SiC/Al6061 복합재료 시험편의 손상상태를 실제로 비교, 검토하여야 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 광학현미경 및 주사식 전자현미경(SEM)을 이용하여 시험편의 표면과 3점 굽힘 시험을 실시한 시험편의 계면 및 과단면을 관찰하였다. Fig. 13은 열충격 사이클을 가하기 전과 1000 사이클을 가한 후의 시험편 표면을 광학현미경으로 촬영한 것이다. Fig. 13(a)의 열충격을 가하기 전의 표면은 시험편을 제작한 후 연마한 상태로 어떠한 결함도 발견되지 않았으나, Fig. 13(b)의 1000 사이클의 열충격을 가한 후의 시험편 표면에는 사진과 같은 미소균열이 국부적으로 관찰되었다.

Fig. 14는 3점 굽힘 시험을 실시한 시험편의 과단면 중에서 SiC 섬유와 Al6061 사이의 계면 사진으로 (a)의 열충격을 가하기 전의 계면상태는 양호한 접합상태를 보이고 있으나 (b)의 1000 사이클의 열충격을 가한 후의 시험편에서는 SiC 섬유와 Al6061 기지재 사이에서 계면분리(debonding)가 다수 관찰되었다. 이러한 결함들의 증가는 앞서 언급한 SH파의 감쇠 및 전파속도차이의 원인 중 하나로 판단된다.



(a) before thermal cycle (b) after 1000 cycles

Fig. 13 Optical micrographs of surface (×50)



(a) before thermal cycles (b) after 1000 cycles

Fig. 14 Scanning electron micrograph of the interface between fiber and matrix (×3500)

4. 결 론

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

(1) 초음파 표면파를 이용한 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 손상 평가에서는 사이클의 증가에 따른 표면파의 속도변화 보다는 감쇠변화를 측정하여 평가하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

(2) SH파를 이용한 SiC/Al6061 복합재료의 열충격 손상 평가에서 표면 및 표면 근방에서의 손상평가를 목적으로 사용된 표면깊이를 전파하는 SH파의 전파시간은 시험편의 표면경도 변화와 유사한 경향을 나타내었으며 열충격 사이클이 진행됨에 따라 표면경도가 감소할수록 SH파의 전파시간은 증가함을 알 수 있었다.

(3) 열충격 사이클의 증가에 따라 발생하는 시험편의 내부손상 평가를 목적으로 사용된 저면반사 SH파는 SiC첨유가 강화된 방향과 동일하게 전파할 경우 가장 민감하게 반응하였으며, 미세조직검사 결과, 실제 계면에서의 손상과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

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) Pickard, S. M. and Derby, B., 1991, "The Behaviour of Metal Matrix Composites during Temperature cycling," *Materials Science and Engineering*, Vol. A135, pp. 213~216.
- (3) Taya, M. and Mori, T., 1987, "Modeling of Dimensional Change in Metal Matrix Composites Subjected to Thermal Cycling," *Thermomechanical Couplings in Solids*, pp. 147~162.
- (4) Minoru Taya and Richard Arsenault, J., 1989, "Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior," Pergamon Press.
- (5) 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.
- (6) Lee., J.H., Lee, J.K. and Cho. Y.H., 1998, "The Thermal Shock Damage Behavior of Ceramics and Its Nondestructive Evaluation Using Ultrasonic Lamb Wave," *J. of KSME(A)*, Vol. 22, No. 12, pp. 2278~2285.
- (7) Fukuhara, M. and Kuwano, Y., 1998, "Propagation Characteristics of SH Ultrasonic Waves through the Surface Depth of an Isotropic Medium," *NDT&E International*, Vol. 31, No. 3, pp. 201~210.
- (8) Fukuhara, M., Kuwano, Y., Saito, K., Hirasawa, T. and Komura, I., 1998, "Performance of Non-Destructive Evaluation by Diffracted SH Ultrasonic Waves in Predicting Degree of Fatigue in Cyclic Bending of Ferritic Steel," *NDT&E International*, Vol. 31, pp. 211~216.
- (9) Fukuhara, M., Kuwano, Y. and Oguri, M., 1996, "Determination of Thermal Degradation of Heated Polyvinyl Chloride using Diffraction SH Ultrasonic Waves," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 3088~3092.
- (10) Ik Keun, Park, Jung Sun Lee and Hae moo Lee, 1998, "Experimental Verification on the Detachability and Quantitative Evaluation of Surface Flaws using Surface SH-wave Ultrasonic Method(Part1)," *Proc. of KSNT Spring Annual Meeting*, pp. 97~108.
- (11) Reinhart, T. J., 1987, "Engineered Materials Handbook," Vol. 1, p. 890.
- (12) Birks, Albert S. and Green, Robert E., 1991, "Nondestructive Testing Handbook: 2nd edition, Vol. 7, Ultrasonic Testing," American Society for Nondestructive Testing.