

論文

입자보강 금속복합재료의 미세구조와 비파괴 평가 특성에 관한 연구

정 현 조*

**Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites:
Correlation of Microstructure with Nondestructive Evaluation Signatures**

Hyunjo Jeong*

ABSTRACT

In this paper microstructural characterization and nondestructive evaluation (NDE) were conducted on silicon carbide particulate (SiCp) reinforced aluminum metal matrix composites. The composites studied included 2124, 6061 and 7091 Al alloys with 0~40 volume percent of SiCp. Through the scanning electron microscopy, SiCp, intermetallic compounds and porosity were revealed and quantified. Nondestructive evaluation included ultrasonic velocities and eddy current signature. While ultrasonic velocities were found to correlate primarily with SiCp loading, eddy current signature was affected by the presence of SiCp and intermetallic compounds. A linear superposition model was used to quantify the influence of SiCp and intermetallic compounds on the overall NDE signatures. The results showed that ultrasonic velocity measurements can be employed to predict SiCp loading while eddy current data can be used to estimate the volume fraction of intermetallic compounds. Thus, the multiple NDE techniques can be applied to quality control during the fabrication of the composite materials.

초 록

본 논문에서는 입자보강 알루미늄 금속복합재료의 미세구조 분석과 비파괴 평가를 수행하였다. 사용된 복합재료는 2124, 6061 및 7091 Al 기지합금에 부피분율 0~40%의 SiCp가 보강되었으며, 분말야금과 압출공정으로 제조되었다. 주사전자 현미경을 통해 SiCp 외에 금속간화합물과 기공이 포함되어 있는 것을 밝혔으며, 이들의 양을 정량적으로 구하였다. 비파괴 평가방법으로서 초음파의 속도와 와전류의 전압을 측정하였다. 초음파의 속도는 주로 SiCp 양에 의존하는 것으로 나타났으나 와전류의 전압은 SiCp와 금속간화합물에 민감한 반응을 보였으며, 이들 NDE 특성은 미세구조의 양과 좋은 선형관계를 보였다. 이를 기초로 미세구조의 부피분율을 예측하기 위하여 다수의 NDE 기법을 사용한 실험적인 선형중첩 모델을 제시하였다. 이 모델을 이용하여 SiCp와 금속간화합물의 부피분율을 초음파의 속도와 와전류의 전압 측정으로부터 비교적 정확하게 결정할 수 있었다. 따라서 이와 같은 다수의 비파괴 평가 기법은 금속복합재료의 제조과정중 품질관리에 적용될 수 있다.

* 국방과학연구소

1. 서 론

금속복합재료(Metal Matrix Composites, MMCs)는 산업, 항공 및 군수 분야의 고기능성 재료로서 가장 각광받는 재료중의 하나이다. 이들 재료는 기존의 금속재료보다 더 높은 온도에서 사용될 수 있고, 더 향상된 기계적 성질을 갖고 있다. 특히 알루미늄기 복합재료는 우수한 성능 대 무게비의 장점 때문에 자동차, 터빈엔진 부품 및 전자 패키징 보드를 포함하여 여러 곳에 응용되고 있다. 전자 패키징에의 응용에 있어서 실리콘 카바이드 입자(particle) 보강 알루미늄(Al) 합금은 높은 열 전도도를 제공하여 신속한 열 발산을 가능하게 하며, 낮은 열 팽창계수는 반도체 칩의 계수와 대등하다. 그러나, 이러한 최신의 복합재료도 상대적으로 신뢰성 높은 재료 합격판정 기술(material qualification techniques)의 부재로 가끔 그 사용이 제한받고 있다.

금속복합재료의 미세구조는 품질에 중요하며 따라서 제품의 성능을 결정한다. 특히 미세구조의 구성요소 양은 복합재료의 전체적 성질에 크게 영향을 미친다. 분말야금법으로 제조한 복합재료에서 미세구조는 보강재의 특성에 의해 결정되나 가끔 금속간화합물(intermetallic compounds)과 같은 다른 상이나 기공(porosity)과 같은 결함이 발생할 수 있다. 보강재의 양은 제품의 설계단계에서 평가할 수 있지만, 금속간화합물과 기공은 복합재료의 제조과정에서 형성되므로 미리 알 수 없다. 심지어 보강재의 경우에도 제작조건에 따라 최종 제품내의 보강재의 양은 설계치와 상당한 차이를 보일 수도 있다. 더우기, 실제 상황에서 재료내에 미세구조 성분의 불균일성이 불가피하게 나타난다. 이러한 측면에서 구성요소의 양을 결정하는 것은 복합재 제품의 정확한 특성평가를 위해 대단히 중요하다.

복합재료 구성요소의 양을 결정하기 위하여 디지털화된 주사전자 현미경(SEM) 사진을 이용하는 "point counting method"[1]과 같은 기술이 현재 사용되고 있으나, 이러한 방법을 제품 품질 결정을 위하여 제작과정중에 채택하기란 쉽지 않다. 이와 반대로 초음파나 와전류를 사용하는 비파괴 평가

방법은 여기에 실질적인 대안을 제공한다. 예를 들면, 와전류에 의한 전기 전도도를 측정하므로써, 미리 결정된 와전류 전기전도도와 미세구조와의 상관관계를 이용하여, 제품의 여러 위치에서 보강재, 금속간화합물 및 기공의 부피분율을 평가할 수 있다. 비파괴 측정치의 변화는 또한 재료내의 미세구조의 균일성에 관한 중요한 정보를 제공한다.

위에서 언급한 방법은 연속섬유강화 금속복합재료의 섬유 부피분율의 비파괴적 평가에 사용되었다[2,3]. 그러나, 제작과정중의 적용을 위한 보다 효과적인 기법이 되기 위해서 보강재의 양 뿐만 아니라 금속간화합물과 같은 구성성분의 양도 예측할 수 있어야 될 것이다. 이러한 목적을 위해 본 논문에서는 초음파와 와전류의 다수의 비파괴 평가방법을 이용하여 탄화규소 입자(SiC particulate, SiCp) 보강 Al 금속복합재료의 보강재와 금속간화합물의 부피분율을 결정하기 위한 모델을 개발하고자 한다. 이와 같은 접근방법에서 가장 중요한 것은 미세구조와 비파괴 평가 특성(NDE signatures) 사이의 상관관계를 구하는 것이다. 입자보강 복합재료는 보강재의 3차원적 형상 때문에 이러한 점에서 대단히 어려운 문제를 제기한다. 여기에 더하여 금속간화합물의 영향을 고려해야 하기 때문에 문제는 더욱 복잡해 진다.

본 논문의 구성은 2절에서 SiCp 보강 Al 복합재료 시편을 자세히 소개하고 3절에서 실험을 통한 미세구조의 분석과 초음파의 속도 및 와전류의 전압 측정 방법을 다룬다. 4절에서는 실험 결과를 수록하고 고찰한다. 5절에서 미세구조와 비파괴 측정치 사이의 상관관계를 살펴보고 이를 기초로 SiCp와 금속간화합물의 부피분율 예측을 위한 실험적 선형 중첩 모델을 제안하였으며, 6절에는 본 연구의 결론이 요약되어 있다.

2. 복합재 시편

본 연구에서는 탄화규소 입자(SiCp) 보강 알루미늄(Al) 금속기 복합재료를 사용하였다. 이 복합재료는 분말야금법에 의해 제조되었으며 압출공정을 거쳐 평판의 형태로 미국의 DWA Composite Spe-

cialties, Inc.로부터 공급되었다. 사용된 Al 기지재는 2124, 6061 및 7091 합금이며 부피분율이 0~40%까지 넓은 범위의 SiCp로 보강되어 있다.

이들 복합재료의 최종 압출비는 각 시편에 따라 10:1에서 39:1의 범위에 속한다. 압출후, 2124 복합재는 T4 상태로 열처리하고 6061과 7091 복합재는 T6 열처리 하였다. 각 재료에 대한 기지합금, 빌렛번호, SiCp 부피분율, 열처리 상태, 압출비 등에 관한 자세한 내용이 Table 1에 수록되어 있다. 압출상태의 복합재 크기는 길이 30~240 cm, 폭 3.8~12.7 cm, 두께 0.64~1.27 cm이다.

Table 1. SiCp Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites.

Base Alloy	Billet Number	SiCp Volume Percent(%)	Heat Treatment	Extrusion Ratio
2124	PE-2600	0	T4	20:1
2124	PE-2404	25	T4	11:1
2124	PE-2229	25	T4	11:1
2124	PE-2488	30	T4	20:1
6061	PE-2045	0	T6	11:1
6061	PE-2047	20	T6	10:1
6061	PE-2099	25	T6	39:1
6061	PE-2731	30	T6	20:1
6061	PE-2869	40	T6	20:1
7091	PE-2730	0	T6	20:1
7091	PE-2711	10	T6	25:1
7091	PE-2712	20	T6	25:1
7091	PE-2713	30	T6	20:1
7091	PE-2665	30	T6	11:1

3. 실험

3-1. 미세구조의 분석

주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세구조 특성을 조사하기 위해 금속조직검사용 시편을 압출복합재로부터 절단, 가공하여 준비하였다. 재료의 압출면을 사용하였으며, 처음 연마는 240~260 grit의 금강사로 하고, fine-diamond paste를 곧바로 사용하여 표면이 1 μm 으로 마무리되게 추가로 연마하

였다. 최종 연마는 입자 크기 약 0.05 μm 인 cerium oxide로 달성하였다.

미세구조의 특성 검사는 SiCp, 금속간 화합물 및 기공의 부피분율 평가에 초점을 맞추었다. SEM에서 SiCp는 2차 전자화상(secondary electron image)의 현미경 사진을 통해 쉽게 관찰할 수 있었다. 금속간화합물과 기공은 후방산란 전자 화상(back-scattered-electron image)의 현미경 사진을 이용하여 이들의 내재를 명확히 알 수 있었다. 여기에 더하여, 에너지 분산 X-ray 스펙트로스코피(EDS)를 이용하여 금속간화합물의 화학조성을 분석하였다.

SiCp, 금속간화합물과 기공의 부피분율은 point counting technique[1]에 의해 정량적으로 결정하였다. 각 계열의 금속복합재료에 대하여 연마된 금속조직 검사용 시편으로부터 서너장의 SEM 사진을 체계적으로 촬영하였다. 가는 선의 그물을 현미경 사진위에 설치하여 point counting 분석을 실시하였다. 여기에 추가하여 SiCp의 크기와 형상비도 측정하였다.

3-2. 초음파의 속도 측정

고체내의 평면 탄성과(plane elastic waves)의 전파 속도(위상속도)는 재료의 밀도와 하나 또는 그 이상의 강성 매트릭스 성분 $C_{ij}(i, j=1, 2, \dots, 6)$ 에 의해 결정된다. 등방성 재료의 경우 2개의 독립 탄성상수로 재료의 탄성적 거동을 묘사할 수 있으며, 따라서 2개의 독립적인 파, 즉 종파와 횡파가 존재하는데 이 파들의 전달방향과 에너지 벡터의 방향은 일치한다. 이방성 재료의 경우 재료 성질의 대칭축(symmetry axis) 방향으로 전파하는 파는 순수 종파 또는 횡파로서 파의 전달 방향과 에너지 벡터의 방향(또는 군속도 방향)이 일치하나, 비대칭 방향으로 전파하는 경우 준 종파(quasi-longitudinal wave) 또는 준 횡파(quasi-shear wave)가 되며 일반적으로 에너지 벡터의 방향이 파의 전달방향과 일치하지 않는다. 그러므로 이방성 재료에서 재료 특성을 규명하기 위한 속도 측정시 주의할 기울여야 한다.

본 실험에서는 Al 금속복합재료의 성질을 직교

이방성(orthotropic)으로 가정하고 3개의 대칭축을 압출방향(x_1), 두께방향(x_3), 그리고 이 두 축에 수직한 방향(x_2)으로 선택하였다. 직교이방성 재료의 완전한 탄성계수 측정을 위하여 시편을 압출된 빌렛으로부터 $50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times (6.4 \sim 12.7 \text{ mm})$ 크기의 2개의 평행육면체 시편을 하나는 긴 변이 x_1 과 나란하게 다른 하나는 x_2 와 나란하게 절단한 후, 각 면이 $5 \mu\text{m}$ 이내로 평행하게 연마하였다. 초음파의 속도 측정은 수침, 투과법으로 하였으며, 중심 주파수 5 MHz, 직경 6.3 mm (0.25 inch)의 종파 탐촉자를 사용하였다. 물탱크속에서 두 탐촉자를 약 15 cm 띄어 송신 탐촉자와 수신 탐촉자를 정렬시킨다음 시편을 중간에 설치하여 초음파 빔이 시편의 평면에 수직이 되게 하였다. 디지털 오실로스코프 스크린에서 두께 방향으로 투과한 종파의 처음 펄스와 두번째 펄스 사이의 시간차이를 1 ns의 정밀도로 읽어 두께방향 종파 위상 속도를 $V_{33} = 2d/\Delta t$ (여기서 d =시편 두께, Δt =시간차이) 식으로부터 구하였다. 본 연구의 Al 금속복합재료를 직교이방성으로 가정하는 경우 시편의 두께 방향(x_3) 전파와 관련된 횡파속도는 2가지 형태가 있다. 하나는 전파방향이 x_3 이고 분극(polarization)이 x_1 인 V_{31} 이고, 다른 하나는 전파방향은 전자와 동일하고 분극이 x_2 인 V_{32} 이다. 이들 속도는 횡파 탐촉자를 사용하여 접촉식으로 직접 측정할 수 있으나, 여기서는 수침, 경사면 입사법(water immersion, oblique incidence)을 이용하여 이 두 파의 속도를 간접적으로 구하였다. 직교 이방성 재료의 9개의 완전한 탄성계수 측정을 위하여 수침, 경사면 입사법을 이용한 위상 속도 측정 절차가 참고문헌[4]에 나와 있다.

3-3. 와전류의 전압측정

와전류의 원리에 기초한 비파괴 평가 방법은 불연속과 미시구조의 특성이 전자기적 거동에 미치는 영향을 탐지하기 위해 설계된 특수한 탐촉자(교류 코일)를 필요로 한다. 교류 시험코일을 전기적 전도성이 있는 재료 근처에 가져가면 전자유도의 결과로 재료내에 와전류장이 생성된다. 이 전기장은

여기코일(exciting coil)자체의 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 코일의 응답을 주의깊게 측정하면 피시험체의 성질과 연관시킬 수 있다. 특히, 코일 임피던스의 변화는 재료의 성질을 추출하는데 사용될 수 있다. 많은 인자가 와전류의 크기, 따라서 코일 임피던스에 영향을 미칠 수 있다. 코일의 특성(크기, 모양등)과 에너지 관련 인자(주파수, 전류의 세기 등)에 추가하여, 시험체의 전기 전도도와 자기 투자율 뿐만 아니라 불연속의 존재는 임피던스에 영향을 미친다. 와전류 시험의 전도도와 투자율에 대한 높은 감도와 이들 인자와 재료 성질 사이의 관계에 근거하여 와전류 비파괴 측정법으로 재료의 성질을 직접 평가할 수 있다. Al 금속복합재료는 최소의 투자율을 가지므로 와전류법은 금속복합재료의 전기 전도도 측정에 이용되었다[5~7].

본 연구에서 와전류 시험을 위하여 Notec NDT-16 eddyscope와 10 kHz(SP-10A) 탐촉자를 사용하였다. 이 범위의 주파수를 선택한 것은 전자기장이 재료의 표면 뿐만 아니라 내부의 성질을 반영해야 하며, 한정된 두께의 영향을 피하기 위해서이다. 압출 복합재료로부터 시편을 절단하여 평행육면체 형태로 가공하고, 각 면은 압출면과 이에 수직한 두 면과 나란하게 하였다. 주어진 기지 Al 합금과 SiCp 부피분율의 금속복합재료로부터 각각 서너개의 시편을 준비하였다. 제일 작은 복합재 시편의 크기는 $40 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 였다. 탐촉자 코일의 크기는 충분히 작으므로 모든 시편의 가장 자리에 의한 영향을 받지 않는다.

Lift-off 신호에 의한 출력 전압은 Fluke 27 디지털 멀티미터를 와전류 탐상기 뒷면의 출력단자에 연결하여 측정하였다. 와전류 코일의 원형 대칭성 때문에 시편의 표면에서 측정하는 와전류 출력 전압은 그 측정면내의 각 방향의 전압의 평균이 되므로 특정 방향 전압이 되지 않고 평면 전압이 된다. 각 시편의 압출면위에서 3~5회 반복 측정하여 평면 전압의 평균치와 표준편차를 구하였다. 표준편차는 0.5% 이하였다. 측정된 전압은 교정곡선을 이용하여 % IACS(International Annealed Copper Standard) 단위의 전기 전도도 값으로 변환시킬 수 있다[8].

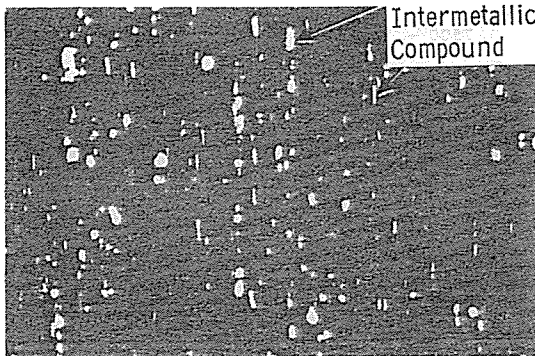
4. 실험결과 및 고찰

4-1. 미세구조의 특성

금속조직 검사용 시편의 SEM 사진은 2차 전자 화상과 후방산란 전자 화상 기법 양자를 이용하여 촬영하였다. Fig.1과 Fig.2는 각각 2124 Al 기지 합금(0% SiCp, PE-2600)과 30% SiCp 보강 복합재료(PE-2488)의 압출면상의 전형적인 미세구조를 보여주고 있다. 각 그림에서 한 쌍의 2차 전자와 후방산란 전자 화상으로 촬영한 사진이 제시되어 있다. 2차 전자 화상 사진(Fig.2a)은 SiCp의 형태를 선명하게 보여주는 반면 후방 산란 전자 화상에 의한 사진(Fig.1b, Fig.2b)은 금속간화합물과 기공의 내재를 식별하는데 특히 유용함을 알 수 있다. 미세구조 특성분석 결과는 Table 2에 나와 있다.



(a) Secondary Electron Image

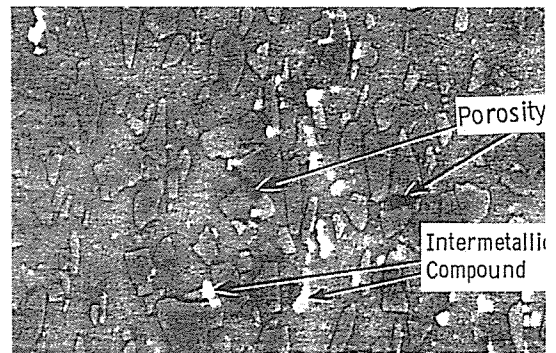


(b) Back-Scatter Electron Image

Fig.1. Microstructure of 2124 Al alloy (0% SiCp, PE-2600).



(a) Secondary Electron Image



(b) Back-Scatter Electron Image

Fig.2. Microstructure of 2124 Al/SiCp MMCs (30% SiCp, PE-2488).

SiCp의 부피분율을 측정하였는데 이는 제조회사가 제공한 공칭 부피분율과 잘 일치하였다. 각 계열의 금속복합재(2124, 6061 및 7091)에서 SiCp의 평균 크기는 2~4 μm , 평균 형상비는 2~3였다.

기지 Al 합금을 포함하여 모든 복합재에는 금속간화합물이 내재하고 있었다(Table 2). SEM의 EDS 분석에서 금속간화합물은 Al, Si, Mn, Fe, Cu, Cr, Mg, Co, Zn, Ti과 Zr과 같은 여러 원소들의 조합으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. Table 2에서 알 수 있듯이, 각 계열의 복합재에서 금속간화합물의 부피분율은 큰 차이를 보이고 있다. 특히 6061 Al 계열에서 20% SiCp 보강 복합재(PE-2047)의 금속간화합물은 약 15.5%로서 다른 시편에 비해 비정상적으로 높다. 2124 Al 계열의 복합재에서 PE-2404와 PE-2229 모두 25%의 SiCp 분율이나 PE-2229의 금속간화합물은 PE-2404보다 약 2배 이

상이다. 이러한 현상은 7091 계열의 30% SiCp 보강 시편인 PE-2713과 PE-2665에서도 마찬가지로 나타나고 있다.

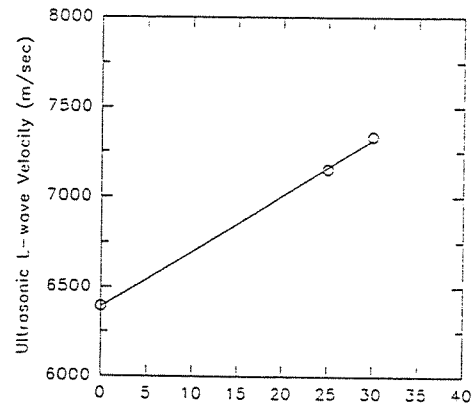
기공은 30%의 SiCp 보강 복합재에서 간혹 관찰되었다. 기공의 부피분율은 2124, 6061 및 7091 Al 계열의 30% SiCp 보강 시편에서 약 1.4~4.2%를 포함하고 있으나, 7091 Al 계열의 10% SiCp 보강 시편(PE-2711)은 약 0.5%를 갖고 있다. 기공은 일반적으로 SiCp와 기지 Al 합금 사이에서 발생하는 것으로 관찰되었다.

Table 2. Microstructural Features of SiCp Reinforced Al Metal Matrix Composites.

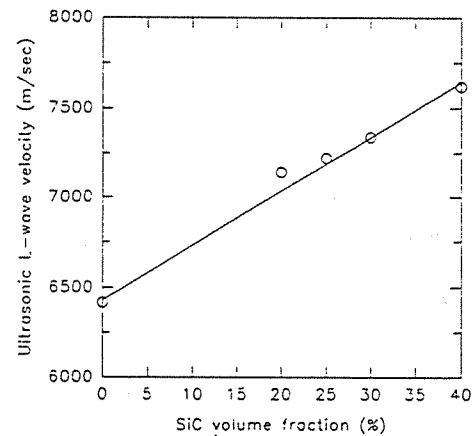
Base Alloy	Billet Number	Volume Percent of Intermetallics (%)	Volume Percent of Porosity (%)
2124	PE-2600	7.4 ± 1.7	0
2124	PE-2404	4.4 ± 2.8	0
2124	PE-2229	10 ± 3.9	0
2124	PE-2488	6.7 ± 3.7	1.4 ± 1.8
6061	PE-2045	5.2 ± 2.2	0
6061	PE-2047	15.5 ± 4.8	0
6061	PE-2099	2.9 ± 2.2	0
6061	PE-2731	1.2 ± 2.1	2.6 ± 2.3
6061	PE-2869	3.3 ± 1.2	0
7091	PE-2730	6.9 ± 2.6	0
7091	PE-2711	6.9 ± 2.8	0.5 ± 0.9
7091	PE-2712	4.4 ± 2.6	0
7091	PE-2713	3.2 ± 1.1	4.2 ± 2.8
7091	PE-2665	6.9 ± 2.8	1.6 ± 1.4

4-2. 초음파 속도

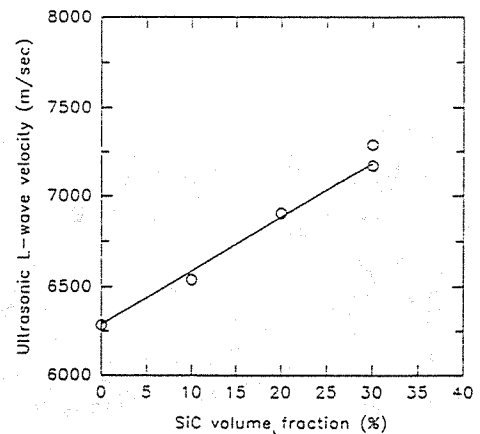
Figure 3에 두께방향의 종파속도 V_{33} 를 SiCp의 함수로 각 계열의 복합재료에 대해 나타내었다. 세 계열의 복합재료에서 SiCp의 보강은 초음파의 속도를 증가시키고 있다. 이는 SiCp의 탄성계수가 Al 기지 합금보다 훨씬 높기 때문이다. 더우기, 두께방향의 종파속도는 SiCp 부피분율이 증가함에 따라, 비록 야간의 데이터가 선형관계에서 벗어나긴 하지만, 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.



(a) 2124 Al/SiCp MMCs



(b) 6061 Al/SiCp MMCs



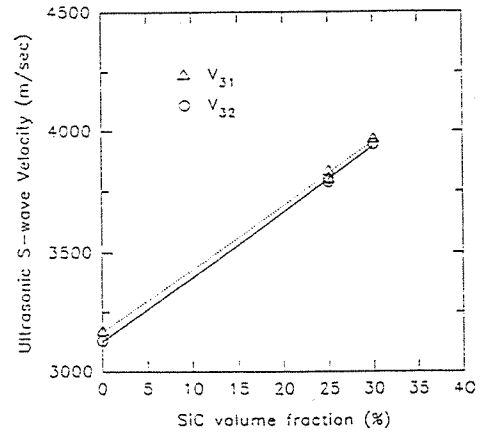
(c) 7091 Al/SiCp MMCs

Fig. 3. Ultrasonic longitudinal wave velocity V_{33} versus SiCp volume fraction.

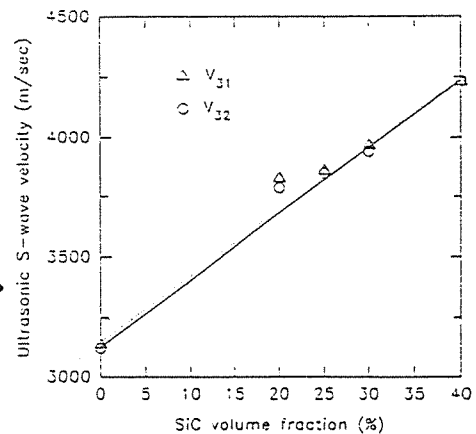
Figure 4는 횡파속도 V_{31} 과 V_{32} 를 SiCp 부피분율의 함수로 표시하였다. 종파속도에서 관찰된 것과 마찬가지로 SiCp의 증가는 횡파의 속도를 증가시키며, 이들 양자는 거의 선형관계를 갖고 있다. V_{31} 과 V_{32} 의 크기를 비교해 보면 V_{31} 이 일반적으로 조금 큰 데 이는 형상비 2-3의 SiCp 방향이 압출방향(x_1)으로 많이 향하고 있기 때문이다. 본 연구에서는 취급하지 않았지만 초음파의 속도를 세 방향 모두 측정해 보면 재료의 거시적 이방성을 알 수 있고, 이를 미세구조와 연관시키면 SiCp의 특정 방향 분포에 기인함을 알 수 있다[4].

SiCp 이외의 미세구조 성분이 초음파의 속도에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다. 먼저 2124 Al 계열의 PE-2404와 PE-2229는 동일한 SiCp로 보강되었으나, 금속간 화합물의 양은 PE-2229가 PE-2404보다 2배 이상 높다(Table 2참조). 이 두 시편의 초음파 속도를 비교해 보면 종파속도는 거의 같고 횡파속도는 V_{31} , V_{32} 모두 PE-2229의 값이 PE-2404 보다 아주 조금 높다(1% 미만). 7091 Al 계열의 PE-2713과 PE-2665도 보강재의 양은 30%로 같으나 PE-2665의 금속간화합물의 양이 PE-2713보다 2배 이상 높다. 이 경우 초음파의 속도를 비교해 보면 PE-2665의 종파는 약 1.7%, 횡파는 약 1.2% 더 높다. 특히 7091 계열의 이 두 시편에서 서로 다른 양의 기공이 포함되어 있으므로 앞에서 구한 속도에는 기공의 영향이 작용하였을 것이다. 6061 Al 계열의 PE-2047은 다른 시편에 비하여 지나치게 높은 양의 금속간화합물을 포함하고 있다. 이러한 이유로 이 시편은 초음속 속도-SiCp 사이의 선형관계에서 약간 위로 벗어나 있으며 나중에 언급하겠지만 굉장히 비정상적인 거동을 보이고 있다.

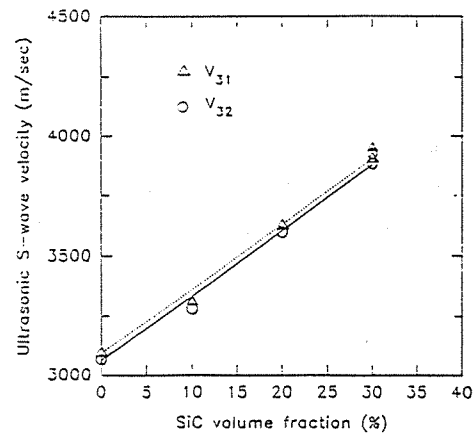
본 연구에서 기공이 초음파의 속도에 미치는 영향은 정확하게 알 수 없으나, 일반적으로 고체내에서 기공은 초음파의 속도를 감소시키는 점에 착안하여 정성적으로 그 영향을 관찰할 수 있다. 7091 Al 계열의 PE-2711은 약 0.5%의 기공을 갖고 있으며 속도-SiCp 사이의 선형관계에서 약간 아래로 벗어나 있는데 이는 모두 기공의 영향으로 보기 힘들고 다른 더 큰 속도 감소요인이 존재하는 것으로 보인다. 또한 7091 Al 계열의 30% SiCp 보강된 PE-2713과



(a) 2124 Al/SiCp MMCs



(b) 6061 Al/SiCp MMCs



(c) 7091 Al/SiCp MMCs

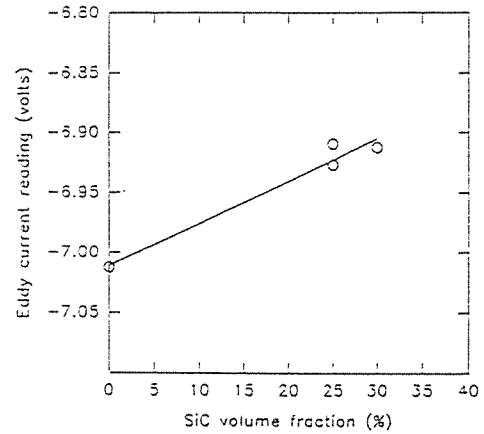
Fig. 4. Ultrasonic shear wave velocity V_{31} and V_{32} versus SiCp volume fraction.

PE-2665 시편은 비록 금속간화합물이 동시에 존재하지만 기공함유량이 더 낮은 PE-2665의 속도가 상대적으로 더 높아 기공이 속도에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 보인다.

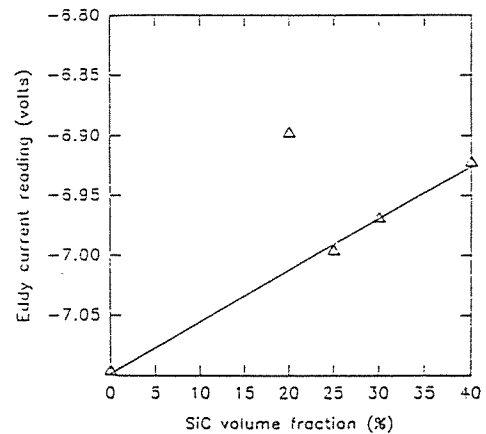
4-3. 와전류 출력 전압

Figure 5에 각 계열별 복합재료에 대한 와전류 출력 전압을 SiCp 부피분율의 함수로 도시하였다. 먼저 SiCp 보강재의 양이 증가함에 따라 전압도 증가함을 알 수 있다. 이는 SiCp의 전기전도도가 Al 기지합금보다 3자릿수 이상으로 낮기 때문이다. 몇 개의 데이터를 제외하고 와전류 전압-SiCp 사이에 선형관계가 있다. SiCp 부피분율 외에 다른 미시구조가 와전류 측정 전압에 미치는 영향을 살펴본다. 2124 계열에서 PE-2404와 PE-2229의 SiCp 부피분율은 25%로서 모두 같으나, 그들의 와전류 전압값은 PE-2229가 더 높다. 이는 PE-2229의 금속간화합물 양이 PE-2404의 그것보다 약 2배 이상 높기 때문으로 보인다. 7091 계열의 PE-2713과 PE-2665도 비슷한 경우로서 PE-2665의 금속간화합물 양이 더 많으므로 조금 높은 전압치를 나타내고 있다. 6061 계열에서 20% SiCp 보강된 PE-2047의 전압은 40% 보강된 PE-2869의 값보다 오히려 더 높다. 이는 PE-2047의 금속간화합물 양이 약 15.5%로서 지나치게 높은데서 기인한 것으로 보인다.

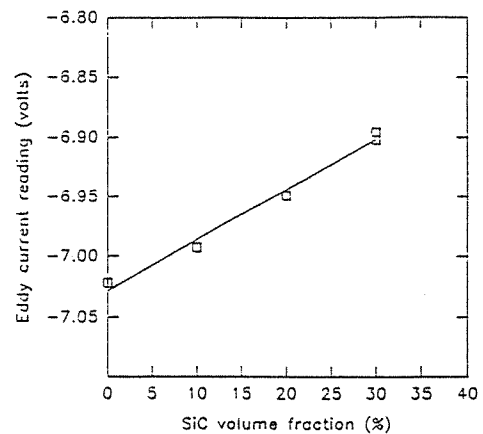
기공의 전기전도도는 거의 0에 가까우므로 기공은 SiCp와 마찬가지로 와전류의 전압을 증가시키게 된다. 7091 Al 계열의 PE-2711 시편은 전압-SiCp의 선형관계에서 아래로 약간 치우쳐 있다. 만약 이러한 벗어남이 기공의 영향에 의한 것이라면 위로 치우치게 할 것이다. 따라서 이러한 벗어남의 원인은 다른 미시구조에 의한 것으로 보이나 분명하지 않다. 다상 복합재료의 미시역학 모델(micromechanics model)을 사용하면 복합재료의 미시구조의 특성(부피분율, 기하학적 형상 등)이 비파괴 성질에 미치는 영향을 보다 정확하게 알 수 있을 것이다.



(a) 2124 Al/SiCp MMCs



(b) 6061 Al/SiCp MMCs



(c) 7091 Al/SiCp MMCs

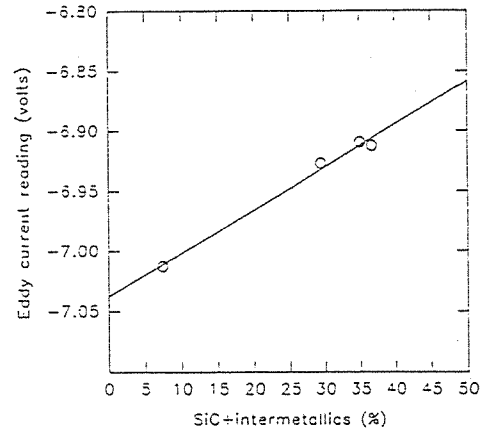
Fig. 5. Eddy current output voltage versus SiCp volume fraction.

5. 미시구조와 비파괴 특성사이의 관계

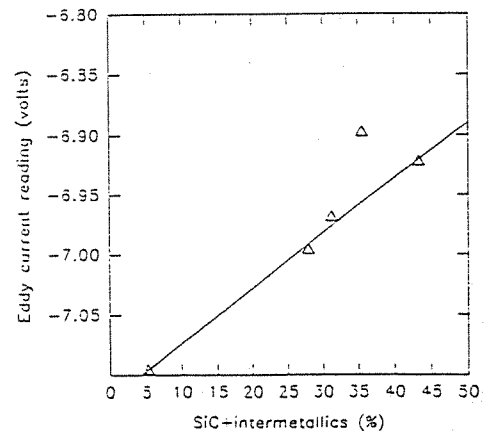
일반적으로 금속간화합물과 기공은 제조과정중의 결함으로서 금속복합재료의 강도를 저하시키며 국부적인 응력집중부로서 균열 시작과 진전을 가속화시키는 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 적절한 비파괴 평가 방법을 동원하여 규정수준 이상의 결함을 함유한 재료를 식별하는 일이 필요하다. 이러한 목적의 비파괴 평가는 제품의 품질관리 측면에서 아주 중요한 역할을 한다. 금속복합재료의 구성요소 각각은 그 성질(기계적 및 물리적), 부피분율, 기하학적 형상 등에 따라 서로 다르게 전체적인 비파괴 평가 특성에 영향을 미치게 된다. 여기서는 앞 절에서 실험적으로 관찰한 금속복합재료의 미시구조와 비파괴 평가 특성 사이의 상호관계를 이용하여 다수의 구성요소 (SiCp, 금속간화합물 또는 기공)의 부피분율을 결정할 수 있는 비교적 단순한 실험적 모델을 개발하여 그 타당성을 점검하고자 한다. 기공은 각 계열의 30% SiCp 시편에서만 존재하고 비파괴 특성에 미치는 영향이 분명치 않으므로 기공의 영향은 여기서 고려하지 않기로 한다.

4절의 실험결과에 의하면(Figs. 3, 4) 모든 계열의 복합재료에 대하여 초음파 속도-SiCp 사이에 비교적 좋은 선형관계가 있었다. SiCp 외에 금속간화합물이 초음파 속도에 미치는 영향을 좀 더 자세히 파악하고자 SiCp와 금속간화합물의 부피분율의 합의 함수로 속도를 그려 조사해 보았으나 전반적으로 더 나은 선형관계는 발견할 수 없었다. 같은 이유로 와전류 전압을 SiCp와 금속간화합물의 부피분율의 합으로 그려보았다(Fig. 6참조). Figure 6을 Fig. 5와 비교하면 2124 Al 계열과 7091 Al 계열에서 더 좋은 선형관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 이 결과는 와전류의 전압이 SiCp 뿐만 아니라 금속간화합물에도 민감하게 반응함을 시사하고 있다.

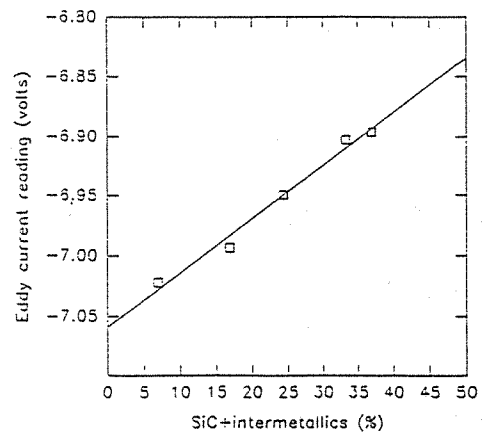
품질관리를 위해 높은 양의 금속간화합물을 함유한 복합재료를 특히 제조과정중에 탐지하는 것이 중요하다. Figures 3, 4와 Fig. 6에 제시된 결과는 이러한 목적을 위하여 유용한 방법을 제공한다. 복합재료내의 SiCp 양을 아는 경우 와전류 방법과 같은 비파괴 방법을 사용하여 금속간화합물의 양을 예측



(a) 2124 Al/SiCp MMCs



(b) 6061 Al/SiCp MMCs



(c) 7091 Al/SiCp MMCs

Fig. 6. Correlation of eddy current output voltage with the volume fractions of SiCp and intermetallic compounds.

할 수 있다. 이러한 비파괴 평가기술은 복합재료의 품질관리를 위해 대단히 중요하다. 다수의 비파괴 평가 방법을 이용하여 SiCp와 금속간화합물의 부피분율을 정량적으로 구하는 방법이 다음에 기술되어 있다.

5-1. 선형중첩모델

복합재 구성요소의 부피분율과 NDE 특성과의 관계로부터 다음과 같은 선형중첩 모델을 사용할 수 있다.

$$AX + BY + CZ = \text{NDE Signature} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 X = SiCp 부피분율
Y = 금속간화합물의 부피분율
Z = Al기지합금의 부피분율(=1-X-Y)
A = SiCp의 NDE 계수
B = 금속간화합물의 NDE 계수
C = Al 기지합금의 NDE 계수

Equation(1)의 좌변에 2개의 독립변수 X와 Y가 존재하며 Z는 X와 Y로부터 구할 수 있다. Equation(1)을 사용하여 2가지 경우를 해결할 수 있다. 첫째, X, Y, Z의 값을 알면 NDE Signature를 예측할 수 있다. 둘째, NDE Signature를 알면 X, Y, Z의 값을 결정할 수 있다. 두번째 경우, 2개의 독립 선형 방정식을 풀어야 된다. 본 연구에서 2가지의 비파괴 방법(초음파와 와전류)이 사용되었으므로 2개의 해를 얻을 수 있다. 따라서, 원칙적으로 2개의 독립적인 비파괴 측정치로부터 SiCp와 금속간화합물의 부피분율을 구할 수 있다.

선형중첩 모델을 적용하기 위하여 Eq. (1)의 NDE 특성 계수를 먼저 구해야 된다. 먼저 초음파의 속도는 SiCp 부피분율에만 의존하며 이들 사이에 선형관계를 가정하면 Eq. (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} AX + C(1-X) &= \text{Ultrasonic Velocity} \\ \text{또는} & \dots\dots\dots (2) \\ (A-C)X + C &= \text{Ultrasonic Velocity} \end{aligned}$$

Figure 3, 4에 나와 있는 초음파의 속도(종파 V_{33} 및 횡파 V_{31})와 SiCp 사이의 관계에 관한 일차곡선으로부터 종파와 횡파속도에 대한 계수 A와 C를 구하였으며 그 값을 Table 3에 수록하였다. 여기서는 사용되지 않았지만 동일한 방법으로 횡파속도 V_{32} 에 대한 계수를 구할 수 있다.

와전류의 전압에 대한 계수를 구하기 위하여 와전류는 복합재료 구성요소 중 SiCp와 금속간화합물의 부피분율에 의존하며 이들 사이에 선형관계를 가정한다. 6061 Al 계열의 PE-2047은 비정상적인 거동 때문에 linear curve fit에서 제외시켰다. Equation(1)을 다시 쓰면

$$(A-C)X + (B-C)Y + C = \text{Eddy current voltage} \dots\dots\dots (3)$$

먼저 Fig. 6의 와전류 전압과 SiCp와 금속간화합물의 합인 부피분율 사이의 일차곡선의 y축 절편으로부터 계수 C를 구할 수 있으며 그 값이 Table 3에 나와 있다. Equation(3)의 나머지 계수 A와 B는 각 계열의 복합재에서 2개 이상의 각기 다른 SiCp와 금속간화합물의 부피분율을 가진 시편이 있으므로 쉽게 구할 수 있다. 각 계열내의 모든 복합재 시편의 영향을 고루 반영하기 위하여 서로 다른 선형 연립방정식의 조합으로부터 각각 해를 구한 후 평균하여 A와 B를 결정하고 그 값을 역시 Table 3에 수록하였다.

Table 3. Coefficients (A, B and C) of SiCp, Inter-metallic Compound and Al Base Alloy in the Linear Superposition Model.

Coefficients	초음파 종파속도(V_{33})	초음파 횡파속도(V_{31})	와전류전압
2124 Al/SiCp A	9476.6	5796	-6.6705
B	0	0	-6.6989
C	6389.3	3166	-7.0374
6061 Al/SiCp A	9540.6	5942	-6.6589
B	0	0	-6.6645
C	6420.3	3142	-7.1199
7091 Al/SiCp A	9263.8	5785.8	-6.6215
B	0	0	-6.5243
C	6291.6	3093.6	-7.0588

5-2. SiCp 및 금속간화합물의 부피분율 계산

이제 선형중첩 모델의 계수를 모두 구하였으므로 실험으로 측정한 NDE 특성을 이용하여 각 계열의 복합재료의 SiCp와 금속간화합물의 부피분율을 결정하고자 한다. 초음파의 종파속도와 횡파속도는

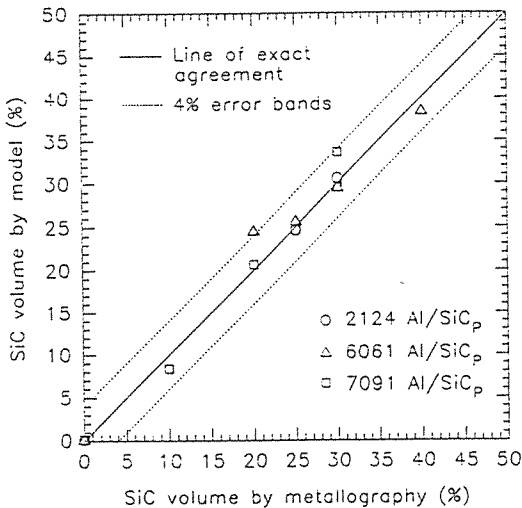


Fig. 7. Comparisons of SiCp volume fractions determined by the linear superposition model and the metallography techniques(V_{33} used).

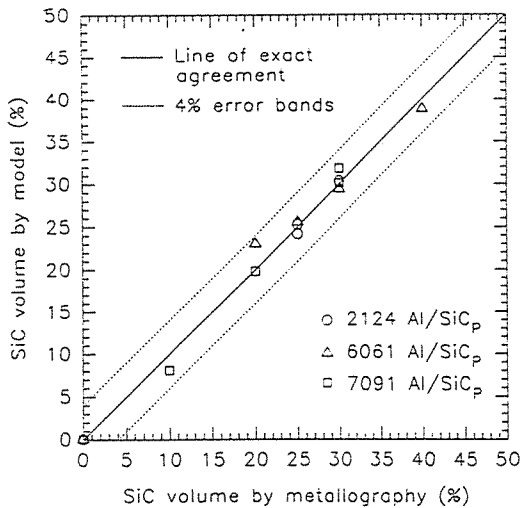


Fig. 8. Comparisons of SiCp volume fractions determined by the linear superposition model and the metallography techniques(V_{31} used).

SiCp의 함수이므로 이들은 SiCp 부피분율 예측에 이용될 수 있다. Figure 7은 종파속도로부터, Fig. 8은 횡파속도로부터 구한 SiCp의 부피분율과 주사 전자 현미경 사진에서 측정한 SiCp의 부피분율을 비교하였다. 모든 계열의 복합재료에서 예측값과 실측치는 4% 이내로 잘 일치한다.

SiCp의 양이 결정되었으므로 와전류의 전압 측정치를 이용하여 금속간화합물의 부피분율을 예측할 수 있다. Figure 9, 10에 각각 종파속도와 횡파속도로부터 예측한 SiCp 양을 모델에 대입하여 구한 금속간화합물의 부피분율을 실측치와 비교하였다. 이들 두 값은 PE-2047 시편을 제외하고 모든 계열의 복합재료에 대해 4% 이내로 서로 잘 일치하고 있다. 여기서 주목할 것은 6061 Al 계열의 PE-2047 시편은 비정상적인 거동으로 인하여 오차 범위 훨씬 밖에 있다.

이상의 결과비교를 통해 제시된 선형중첩 모델은 SiCp와 금속간화합물의 부피분율을 비교적 정확하게 예측해 주고 있다. 선형중첩 모델은, 원칙적으로, 기공의 부피분율 예측에도 확장될 수 있다. 그러한 모델은 3개의 미지수를 구하기 위하여 3개의 독립된 비파괴 측정치를 필요로 한다. 그러나, 무엇보다도

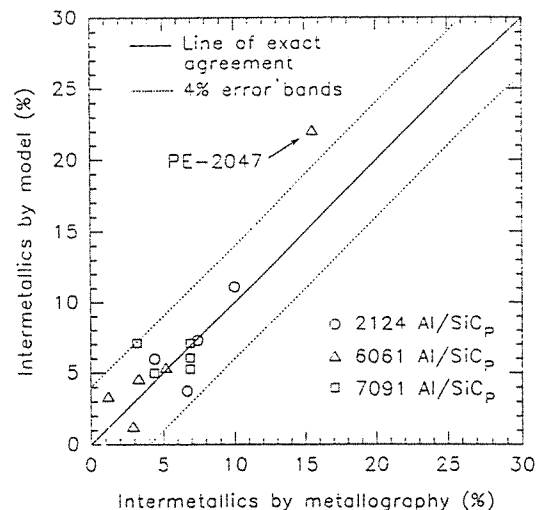


Fig. 9. Comparisons of the concentrations of the intermetallic compounds determined by the linear superposition model and the metallography techniques(V_{33} used).

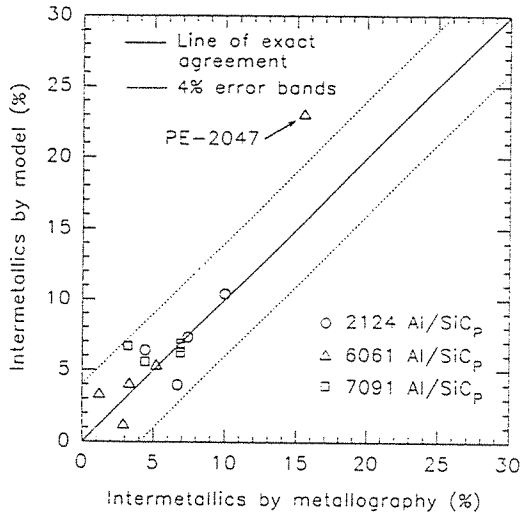


Fig. 10. Comparisons of the concentrations of the intermetallic compounds determined by the linear superposition model and the metallography techniques (V_{31} used).

잘 제어된 양의 기공을 함유한 금속복합재 시편을 필요로 하며, 비파괴 특성에 미치는 기공의 영향 평가가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 압출 금속복합재료의 품질 평가를 위한 간단한 비파괴적 접근방법을 제시하고 있는데, 이는 제조과정의 on-line monitoring을 위하여 쉽게 채택될 수 있다. 더우기, 제품내의 여러 위치에서 비파괴 검사와 선형중첩 모델에 의한 부피분율의 계산을 통해 미시구조의 균일도(uniformity)와 입자군(particle clusters)의 위치에 대한 유익한 정보를 얻을 수 있다.

6. 결 론

SiCp 보강 Al 금속복합재료의 미시구조 분석과 비파괴 평가를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기지 Al 합금을 포함하여 모든 계열의 복합재료는 금속간화합물을 함유하고 있었으며 기공은 30% SiCp 보강 복합재료에서 소량으로 나타났다.
- (2) 초음파의 속도와 와전류의 전압은 복합재료의 미시구조에 좌우되었다. 특히 초음파의 속도는 SiCp

양이 증가함에 따라 커지고 이들 사이에는 좋은 선형관계가 있었다. 또한 와전류의 전압은 SiCp 뿐만 아니라 금속간화합물에도 민감한 반응을 보였으며, 전압과 SiCp와 금속간화합물의 부피분율의 합 사이에 좋은 선형관계가 있었다.

(3) 미시구조와 NDE 특성 사이의 관계에 근거하여 선형중첩 모델을 제시하였다. 모델을 이용 초음파의 속도로부터 SiCp의 부피분율을, 와전류의 전압으로부터 금속간화합물의 부피분율을 예측하였으며, 예측된 값은 실측치와 4% 이내로 잘 일치하였다.

(4) 본 논문에서 다수의 NDE 특성을 이용하여 복합재료내의 여러가지 미시구조의 부피분율을 예측할 수 있는 능력을 보였으며, 이러한 비파괴 평가기술은 금속복합재료의 품질관리를 위한 on-line 공정제어에 적용될 수 있고, 제품내의 미시구조의 균일성에 관한 유익한 정보를 얻는데도 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Hilliard, J.E., and Cahn, J.W., *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 221, 1961, p.344.
2. Beissner, R.E., Burkhardt, G.L., and Fisher, J.L., "Eddy Current Measurements of Fiber Volume Fraction in Metal Matrix Composites," *Presented at the Quantitative Nondestructive Evaluation Conference*, La Jolla, CA, 1992.
3. Liu, X.C., "Application of Electrical Resistance Method in Study of SiC/Al Composite," *Advanced Composites Letters*, Vol.2, 1993, pp.61-64.
4. Jeong, H., Hsu, D.K., Shannon, R.E., and Liaw, P.K., "Characterization of Anisotropic Elastic Constants of Silicon Carbide Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites: Part I. Experiment," *Metallurgical Transactions A*, In press.
5. Libby, H.L., *Introduction to Electromagnetic*

Nondestructive Test Methods, R.E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1971.

6. Junker, W.R., private communication, Westinghouse R&D Center, Pittsburgh, PA, 1990.

7. Rosen, M., *Metallurgical Transactions A*, Vol.20A, 1989, p.481.

8. Liaw, P.K., Pitchumani, R., Yao, S.C., Hsu, D.K., Foster, B., and Jeong, H., "Eddy Current Characterization of Silicon Carbide Re-

inforced Aluminum Metal-Matrix Composites," in *Damage in Composite Materials*, G.Z. Voyiadjis, eds., Elsevier Science Publishers, The Netherlands, 1993, pp.249-282.

9. Kim, Y.-H., Lee, S., and Kim, N.J., "Fracture Mechanisms of a 2124 Aluminum Matrix Composite Reinforced with SiC Whiskers," *Metallurgical Transactions A*, Vol.23A, 1992, pp. 2589-2596.

