

분말압출법으로 제조된 SiC_p/2024Al 복합재료에 있어서 압출온도와 다이각이 기계적 성질에 미치는 영향

성병권 · 이성호 · 이지환 · 유연철
인하대학교 공과대학 금속공학과

The Effect of Extrusion Temperature and Die Angle on Mechanical Properties of SiC_p/2024Al Composites Fabricated by Powder Extrusion Method

Byoung-Kwon Suh, Sung-Ho Lee, Chi-Hwan Lee, and Yeon-Chul Yoo
Department of Metallurgical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
(Received February 10, 1995)

ABSTRACT Effects of the extrusion temperature and die angle on the tensile properties of SiC_p/Al composites in powder extrusion have been investigated. SiC_p/Al composites were extruded at various extrusion temperatures (450, 500, 550°C) under the extrusion ratio of 25 : 1. The ram speed was maintained at 13 cm/min for all the extrusion conditions. The surface of the extruded rod appeared to be smooth without tearing at 450 and 500°C, whereas it was very rough due to tearing at 550°C. It was found that the tensile strength and elongation of the composites extruded at 500°C are greater than those of composites extruded at 450°C. This is due to the easier plastic deformation of composite extruded at 500°C, compared with the composites extruded at 450°C. The effect of die angle was examined under 2θ=60, 120, 180° die angles at extrusion temperature of 500°C under 25 : 1 extrusion ratio. The tensile strength of the composites extruded with 2θ=60° appeared to be higher than that of the composites extruded with 2θ=120 and 180°. This is attributable to the higher extrusion pressure, which mixed composite powders could be densely consolidated at elevated temperatures, resulting from high friction force between billet and sliding surface of conical die.

1. 서 론

SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료는 비강도와 비탄성 및 내마모성이 우수하여 자동차 동력전달 부품 및 브레이크 디스크 및 드럼 등에 적용되고 있으며, 이미 일본 등지에서는 고속전철(신간선)의 브레이크 디스크에 SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료가 적용되고 있다.¹⁾

SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료의 제조방법 중에서 복합재료를 진공열간가압한 후 열간압출을 행하는 공정은 SiC 입자의 분산상태가 우수하고 조직이 치밀한 복합재료를 제조할 수 있다는 장점으로 인하여 가장 활발히 연구되고 있다.²⁻⁴⁾ 그러나 위와

같은 제조방법에 필수적인 진공열간가압공정이 비교적 장시간을 요구하기 때문에 산업화에 많은 제약 받게 된다. 따라서 제조시간이 많이 소요되는 진공열간가압공정을 피하고 분말상태를 압출하는 분말압출에 대한 관심이 높아지고 있다.^{5,6)}

이러한 분말압출법은 제조공정의 단순화로 인한 제조원가의 절감 및 진공열간가압공정보다 분말의 급냉응고 특성을 더욱 나타낼 수 있으며, 일반복합재료에 비해 압출압력이 낮기 때문에 높은 SiC 입자 부피분율하에서도 압출이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구실에서도 이전에 분말압출을 행한 결과 압출온도, 압출 다이각등의 압출공정변수가 알루미늄 기지분말의 성형성에 대하여 중대한 영향에 대하여

고찰한 바 있다.^{7,8)}

따라서 본 연구에서는 이러한 SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료를 압출공정변수에 따라 분말압출을 행하여 미세조직 관찰 및 인장특성평가를 통하여 보다 체계적인 압출조건을 확립하는데 있다.

2. 실험방법

2.1. 소재

강화재는 평균입도 15 μm의 연마지석용 SiC 입자(Nanko사)를 사용하였으며, 기지재는 -325 mesh (44 μm 이하)의 가스분사법으로 제조된 2024Al 알루미늄합금분말(창성 Co.)을 사용하였으며, 표 1에 물리화학적 특성을 나타내었다.

2.2. 성형

SiC 입자와 2024Al 기지분말의 분산 및 혼합은 메탄올 중에서 약 30분간 강화상의 부피분율이 10, 20 vol%가 되도록 초음파 분산 및 기계적 교반을 행하였다. 분산 및 혼합이 끝난 후 혼합된 분말은 약 80°C의 건조기에서 12시간 건조시켜 사용하였다.

Table 1. Properties of 2024Al powder

Density (g/cm ³)	2.78				
Powder size (μm)	44				
Elastic modulus (GPa)	75				
Chemical composition (wt%)					
Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Al
4.69	1.13	0.67	0.14	0.13	bal.

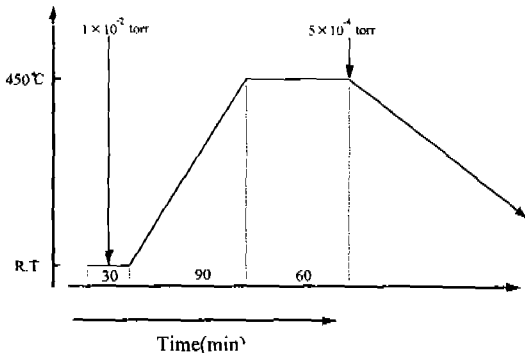


Fig. 1. Degassing procedure of SiC_p/2024Al composites.

건조된 혼합분말을 50×80 mm의 6061 알루미늄 캔에 장입하고 그림 1과 같이 상온에서 30분간 탈가스 처리(1×10⁻² torr)를 행한 다음 60분간 450°C까지 승온한 후, 450°C에서 180분간 탈가스처리(5×10⁻⁴ torr)를 행하여 진공봉입하였다. 그림 2는 본 실험에 이용된 탈가스처리 장치의 개략도이다. 진공봉입된 압출용 캔은 450, 500, 550°C의 압출온도 및 2θ=60, 120, 180°의 다이각의 압출공정변수를 가지고서 열간압출장치로 분말압출하여 성형하였으며, 이때의 압출비는 25 : 1, ram speed는 13 cm/min으로 분말압출하여 직경 10 mm의 압출봉을 얻었다.

그림 3은 SiC_p/2024Al기 복합재료의 제조방법의 도식적인 그림이다.

2.3. 밀도측정

각 부피분율 및 압출다이각에 따라 제조된 성형

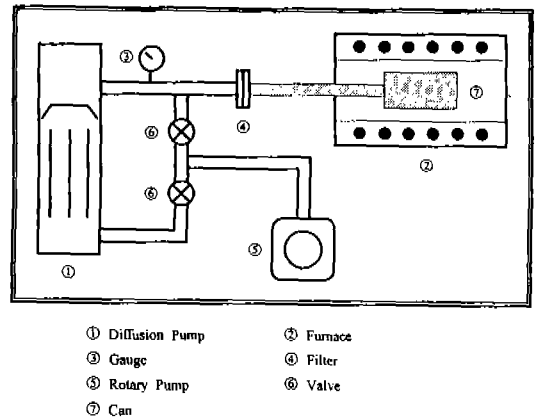


Fig. 2. Schematic sketch of the degassing equipment.

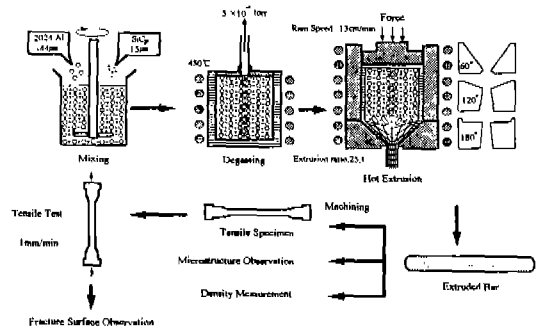


Fig. 3. Schematic diagram of SiC_p/2024Al composites fabrication process.

체의 밀도는 자동밀도측정기인 Pycnometer(Accu-
pyc, B30, micrometric Co.)를 이용하여 각 부피분율
및 압출온도 압출다이각에 따라 10회씩 측정하여
평균값을 구하였다.

2.4. 인장시험

인장시험은 Tinius Olsen 5000을 이용하여 cross
head speed 1 mm/min의 조건으로 상온에서 행하
였다. 인장시험 후 인장강도와 연신율을 측정하여
분말압출온도 및 다이각조건에 따라 비교하였다. 이
때 인장시험편의 표점거리는 25 mm, 직경 5 mm이
었으며 압출방향과 평행하게 인장시험편을 제조하
였다. 이러한 압출공정변수 및 부피분율에 따라 분
말압출된 복합재료의 미세조직과 인장시험 후의 과
단면을 SEM을 통하여 관찰하여 압출공정변수에
따른 인장강도의 차이를 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 압출온도에 따른 압출압력

그림 4는 분말압출한 복합재료에 있어서 압출온
도와 부피분율에 따른 압출압력의 변화를 나타낸
것이다. 압출압력은 압출온도가 높아짐에 따라 감소

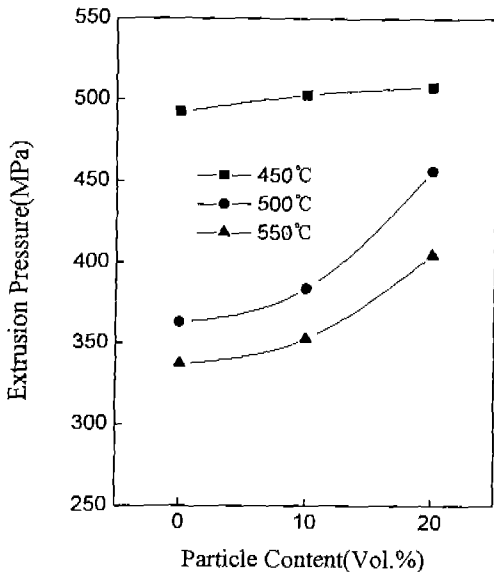


Fig. 4. Effect of particle content on extrusion pressure of $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ composites at various temperatures.

하고 있다. 이는 압출온도의 증가에 따른 알루미늄
분말의 소성변형용력의 감소 및 부분적인 액상으로
인하여 압출압력이 감소하는 것에 기인한다고 생각
된다. 그러나 그림 5에서 보는 바와 같이 550°C의
압출온도에서 분말압출을 행하였을 경우, 압출재의
표면에 가로 균열 또는 전나무 균열과 같은 압출결
함이 형성됨을 관찰할 수 있다. 이러한 가로 균열로
인하여 550°C에서 분말압출한 복합재료는 인장시험
편을 제조할 수가 없었다. 이러한 가로 균열의 원
인으로서 K. Sukanuma와 T. Fugita⁹⁾ 등은 세라믹
섬유강화 알루미늄기 복합재료를 고액공존 상태의
고온에서 압출을 행할 경우 다이벽과의 마찰로 인
하여 복합재료의 기지에 부분적인 액상이 존재하게
된다고 보고하고 있다. 본 실험에 사용된 복합재료의
기지재인 2024Al의 고상선은 502°C이기 때문에 만약
550°C의 온도에서 분말압출을 행할 경우 기지재에
부분적인 액상이 존재하게 된다. Kurt Laue는 금속
재료를 열간압출시 다이 표면과의 마찰 때문에 압
출재 표면의 온도가 약 60~80°C 정도 증가하게 된
다고 보고한 바 있다.¹⁰⁾ 따라서 위와 같은 결과로
인하여 캔재료로 사용한 6061Al합금의 고상선은
582°C이지만, 550°C로 분말압출을 행하였을 경우
6061Al 표면은 순간적으로 약 610°C 정도로 증가하게
되어 캔 표면에 국부적인 액상이 형성될 확률이 크
다고 추측된다. 따라서 압출재가 다이를 빠져나올
때 압출재에 2차 인장응력이 형성되며,¹¹⁾ 2024Al
기지와 6061 캔 표면에 국부적인 액상은 이러한 2차

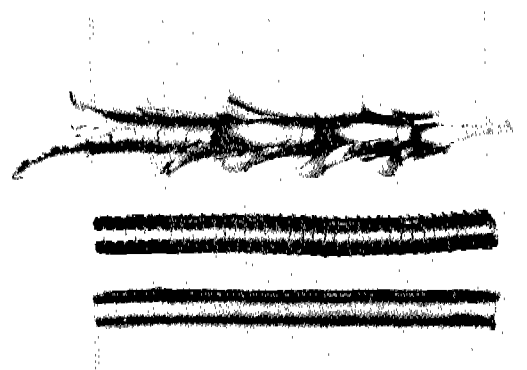


Fig. 5. Extrusion defects of the bars extruded at 550°C.

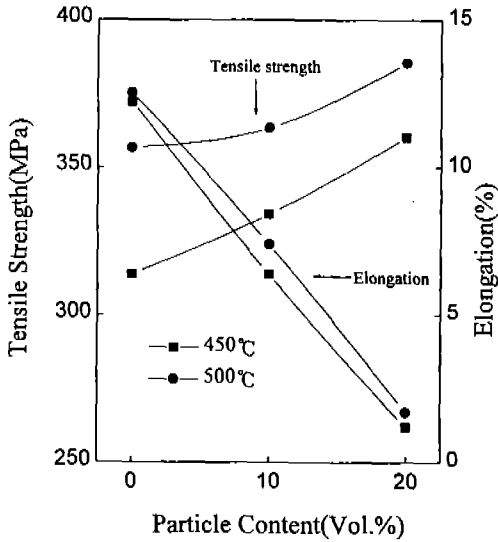


Fig. 6. Variations of tensile strength and elongation of SiC_p/2024Al composites with particle content at various extrusion temperatures.

인장응력을 지탱하여 주지 못하기 때문에 550°C에서 분말압출하였을 경우 가로 균열 또는 전나무 균열이 형성되었다고 생각된다. 위와 같은 결과로 보아 압출속도를 감소시키고 고상선이 약 610°C 이상이 되는 재료를 캔으로 사용한다면 가로 균열 또는 전나무 균열과 같은 압출결함을 억제할 수 있다고 사료된다. 그리고 SiC 입자의 부피분율이 증가할수록 압출압력은 증가하고 있으며, 이는 SiC 입자의 부피분율이 증가할수록 알루미늄분말의 소성변형에 대한 SiC 입자의 저항이 증가하기 때문에 압출압력이 증가한다고 생각된다.

3.2. 압출온도에 따른 인장특성

그림 6은 여러 압출온도 조건에서 분말압출한 복합재료의 상온인장강도 및 연신율값을 나타낸 것이다. 550°C에서 분말압출한 복합재료는 위에서 설명한 바와 같이 가로 균열 또는 전나무 균열과 같은 압출결함으로 인하여 인장시험편을 제작할 수 없었기 때문에 450, 500°C에서 분말압출한 복합재료에 한하여 인장시험을 행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 압출온도에서 부피분율이 증가할수록 인장강도는 증가하고 있다. 이는 C. Y. Barlow¹²⁾가 보고한 바와 같이 세라믹 입자강화 금속기 복합재

Table 2. Relative density vs. volume fraction in SiC_p/2024Al composites extruded at 450°C and 500°C

Extrusion temp.	Volum percent 0 vol%	10 vol%	20 vol%
450°C	99.28	99.17	99.05
500°C	99.89	99.7	99.58

료의 강도 증가의 원인은 강화상과 기지금속간의 열팽창계수의 차이로 인한 기지조직의 전위증식에 기인한다는 보고와 일치한다. 그러나 그림 6에서 보는 바와 같이 500°C에서 분말압출한 복합재료의 인장강도가 450°C에서 분말압출한 복합재료의 인장강도보다 높음을 알 수 있다. 낮은 압출온도에서 소성변형에 대한 알루미늄 분말의 저항이 증가하여 분말의 소성유동성이 500°C의 경우에 비해 저하한다. 이러한 불충분한 알루미늄분말의 소성유동으로 인하여 압출다이에서 빠져나오는 복합재료의 기지분말은 분말과 분말 사이에 형성될 수 있는 미세기공 (micro pore)의 형성을 억제하지 못할 뿐만 아니라 SiC 입자와 알루미늄과의 계면에 형성될 수 있는 결함을 억제할 수 없기 때문에 SiC 입자와 기지금속 계면에 미세결합이 발생하게 된다. 따라서 이러한 기지조직내의 미세기공 및 계면간의 미세결합에 의하여 450°C에서 분말압출된 복합재료의 인장강도가 감소되었다고 생각한다. 이러한 결과는 인장시험 후의 연신율에서도 나타난 바와 같이 450°C에서 분말압출한 복합재료는 계면 사이의 미세결합으로 인하여 연신율의 감소 및 표 2에서 나타난 바와 같이 밀도 또한 감소하고 있다. 그림 7은 인장시험 후의 시험편의 파단면에 대한 주사 전자현미경사진이다. 450°C에서 분말압출한 기지재료의 파단면인 경우 기지조직내의 미세기공으로 인하여 파단시 형성된 dimple의 크기가 500°C에서 분말압출하였을 경우보다 지름이 작고 얇은 것을 관찰할 수 있다. 450°C에서 분말압출된 복합재료에 있어서도 불충분한 알루미늄분말의 소성유동이 복합재료의 계면에 미세결합을 형성하였기 때문에 파단시 이 미세결합에서 파단이 시작되었음을 관찰할 수 있었다.

3.3. 압출다이각에 따른 압출압력

최저의 압출온도인 500°C에서 압출다이각을 달리

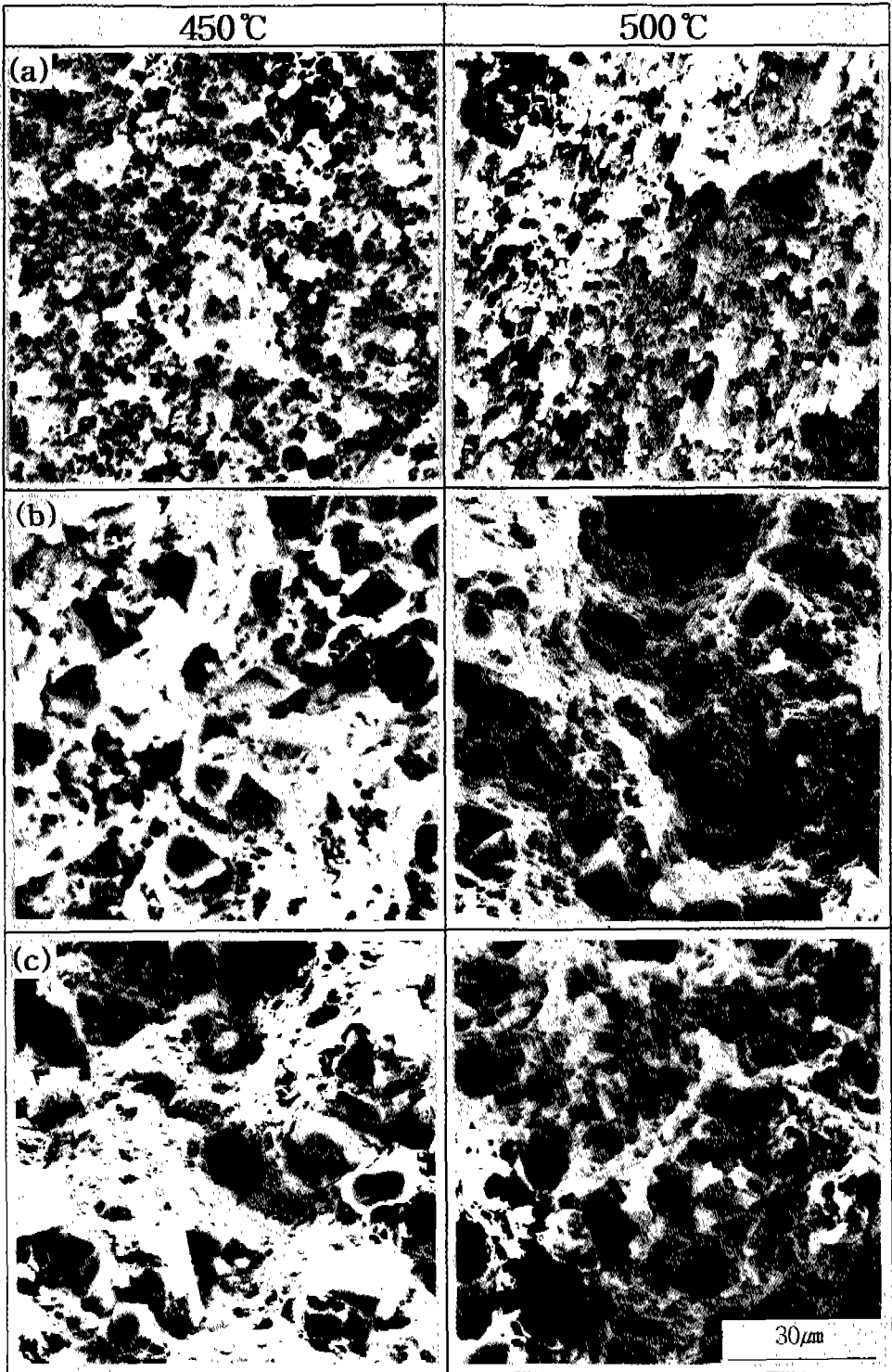


Fig. 7. SEM fractographs of $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ composites extruded at 450°C and 500°C ; (a) 0 vol% (matrix), (b) 10 vol% and (c) 20 vol% of particle content, respectively.

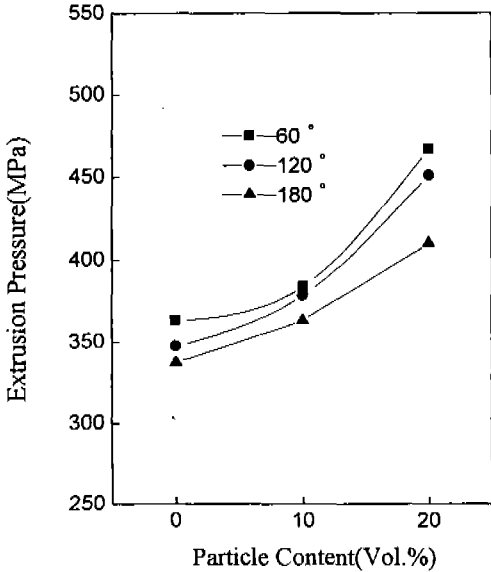


Fig. 8. Effect of particle content on extrusion pressure in SiC_p/2024Al composites extruded at 500°C at each die angle.

하여 분말압출하였을 경우의 압출압력을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 압출다이각이 감소할 수록 압출압력은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 다이의 경사면과 압출재 표면의 마찰 증가에 기인한 것이라 생각되며, 2θ=180°의 다이각에서는 다이 표면과 압출재 표면의 마찰은 거의 없고 단지 국부적인 분말의 소성변형에 의한 응력만이 작용하기 때문에 압출압력이 감소하는 것으로 생각된다. 이러한 압출압력의 감소는 분말압출한 후 압출다이에 남아 있는 discard 부분을 압출방향으로 절단하여 분말압출재의 유동형태를 관찰하면 더욱 명백히 확인할 수 있다(그림 9). 2θ=60° 다이(a)인 경우에는 소성유동의 흐름이 경사진 다이부근에서는 압출재 표면과 다이간의 마찰로 인하여 다이부근을 따라 중심부가 우선적으로 수성변형하려는 현상을 나타내고 있다. 그러나 압출다이에서 빠져나올 때의 압출재 표면과 중심부 band의 간격이 거의 같음을 보아 분말압출시 압출다이를 빠져나오는 알루미늄분말의 소성변형이 균일하게 일어남을 관찰할 수 있다. 그러나 2θ=180° 다이(c)인 경우에는 다이부근에 부동영역(dead zone)이 형성되어 있으며, 압출재 표면과 중심부 band의 간격이 압출재 표면에서는 좁음을

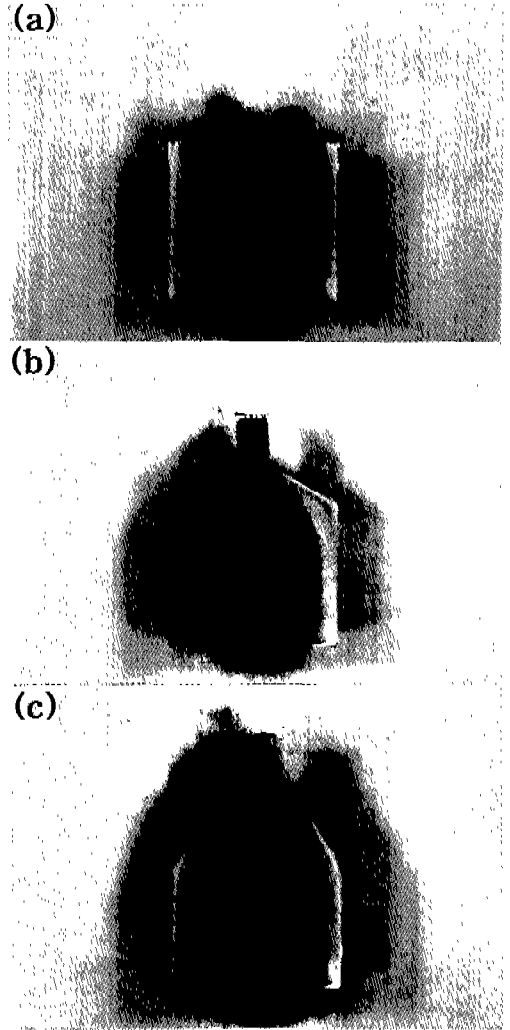


Fig. 9. Extrusion flow patterns of the SiC_p/2024Al composites extruded with various die angles. (a) 60°, (b) 120° and (c) 180°.

보아 큰 소성변형을 받았음을 알 수 있었으며, 중심부는 band의 간격이 표면에 비해서 상대적으로 넓음을 보아 알루미늄분말의 소성변형이 심하게 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 위와 같은 압출재 중심부와 표면과의 분말의 소성유동이 불균일함을 관찰함에 따라 2θ=180° 다이로 분말압출한 복합재료의 기계적 특성이 2θ=60° 다이로 분말압출한 복합재료에 비해 저하함을 예측할 수 있다.

3.4. 압출다이각에 따른 인장특성

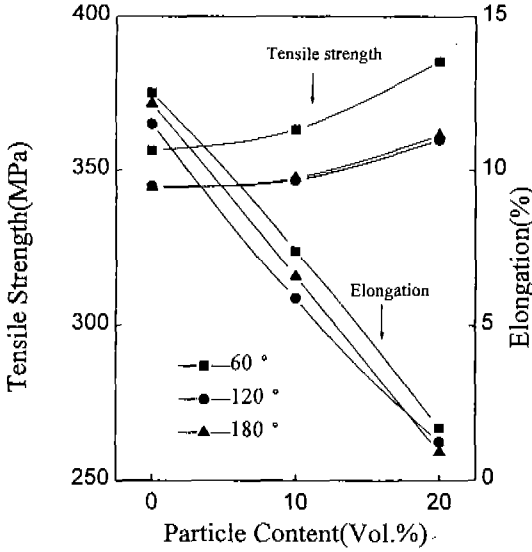


Fig. 10. Effect of particle content on tensile strength in SiC_p/2024Al composites extruded at 500°C at each die angle.

Table 3. Comparison of relative density of SiC_p/2024Al composites with various die angles at each particle content

Volumn percent Die angle	0 vol%	10 vol%	20 vol%
60°	99.89	99.7	99.59
120°	99.74	99.28	98.91
180°	99.7	99.24	98.89

그림 10은 압출다이각에 따른 인장강도 및 연신율의 변화를 나타내고 있다. 압출다이각이 증가할수록 분말압출된 복합재료의 인장강도 및 연신율은 감소함을 알 수 있다. 또한 표 3에서 보는 바와 같이 분말압출한 복합재료의 측정밀도를 이론밀도로 나눈 상대밀도 또한 압출다이각이 증가할수록 감소함을 나타내고 있다. 이러한 결과는 압출다이를 달리하여 분말압출한 후의 미세조직사진(그림 11)을 관찰하면 인장강도 저하 및 밀도 감소의 이유를 명백히 알 수 있다. 높은 압출다이각(2θ=120, 180°)을 가지고 분말압출한 복합재료의 경우에는 알루미늄분말의 소성변형이 충분하지 않아 압출방향쪽으로 SiC 입자와 알루미늄 기지 사이의 계면에 미세결함이 존재함을 관찰할 수 있다. 이러한 계면에 존재하는 미소결함

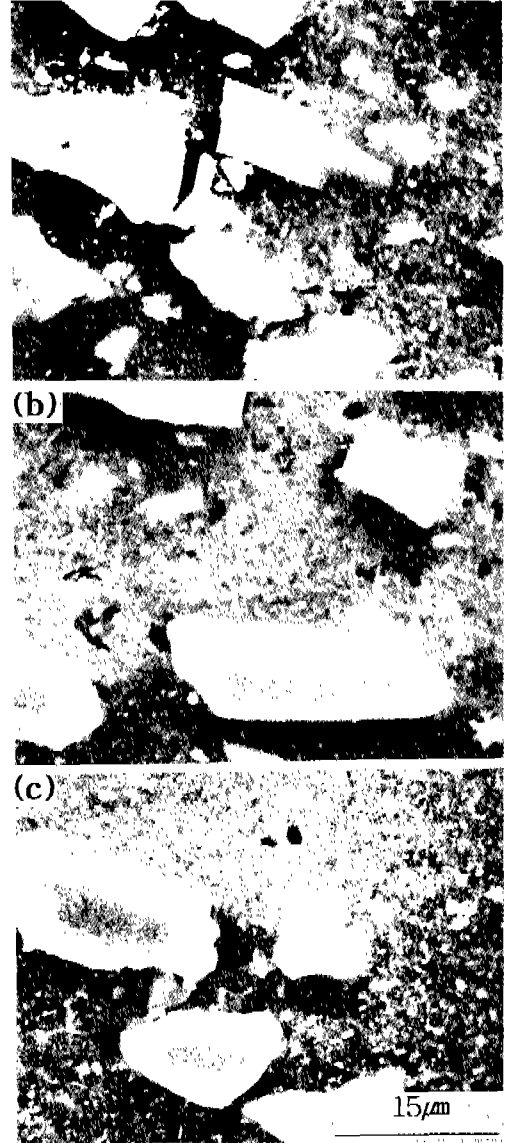


Fig. 11. Microstructures of 10 vol% SiC_p/2024Al composites with various die angles; (a) 60°, (b) 120° and (c) 180°, respectively.

으로 인하여 인장강도와 연신율 그리고 밀도가 감소한다고 생각된다. SiC 입자와 알루미늄 기지 사이의 계면에 형성되는 미소기공의 생성기구는 압출다이각에 따른 분말압출동안에 압출다이내에서 일어날 수 있는 Al 분말의 소성변형을 도식적으로 나타낸 그림 12를 보면 확실히 알 수 있다. 분말압출을 행하기 전의 SiC 입자와 기지분말을 혼합한 상태는

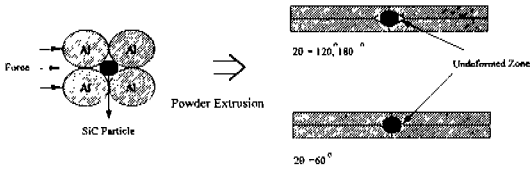


Fig. 12. Schematic diagram showing the plastic deformation model of Al powders during hot extrusion.

이상적으로 큰 알루미늄분말 사이에 상대적으로 작은 SiC 입자가 끼어 들어 있는 상태라 할 수 있다. 이러한 혼합분말을 미세결합이 거의 없는 복합재료로 성형하기 위해서는 큰 압력과 높은 성형온도가 필요하게 된다.¹³⁾ 이러한 열간압출변수를 통하여 분말압출을 행할 경우 복합분말은 완전하게 성형이 된다. 따라서 완전한 분말간의 성형을 위하여서는 성형온도가 상대적으로 높으면서 또한 성형압력이 높아야 가능하다. 이러한 이유로 인하여 20=60° 다이인 경우에는 20=120, 180° 다이에 비해 다이간의 마찰로 인한 유동압력이 증가하게 됨에 따라 복합분말의 성형압력이 상대적으로 120, 180° 다이에 비해서 높게 된다. 따라서, 20=60° 다이의 경우는 완전한 분말의 성형을 위한 높은 성형압력을 얻을 수 있으므로 SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료의 분말압출에 가장 적합한 다이각이라고 생각된다. 그림 13은 인장시험 후의 파단면사진이다. 낮은 다이각에서는 SiC 입자와 알루미늄 기지와 접착이 우수하기 때문에 계면부근에서의 기지의 연신을 관찰할 수 있었지만, 높은 다이각에서는 이러한 계면부근에서의 기지의 연신을 관찰할 수 없었으며, SiC 입자의 끝부분에서 파단되는 현상을 관찰할 수 있었다.

5. 결 론

1) 압출압력은 압출온도가 증가할수록 감소하였으며, 550°C의 높은 압출온도에서는 기지분말과 캔재료의 국부적인 용융에 의하여 압출재 표면에 압출결합이 발생하였다.

2) 다이각이 감소할수록 압출압력은 다이 표면과 압출재 표면의 마찰력 증가로 인하여 증가하였으며, 높은 다이각에서는 국부적인 기지분말의 소성변형만이 작용하기 때문에 압출압력이 감소하는 것으로

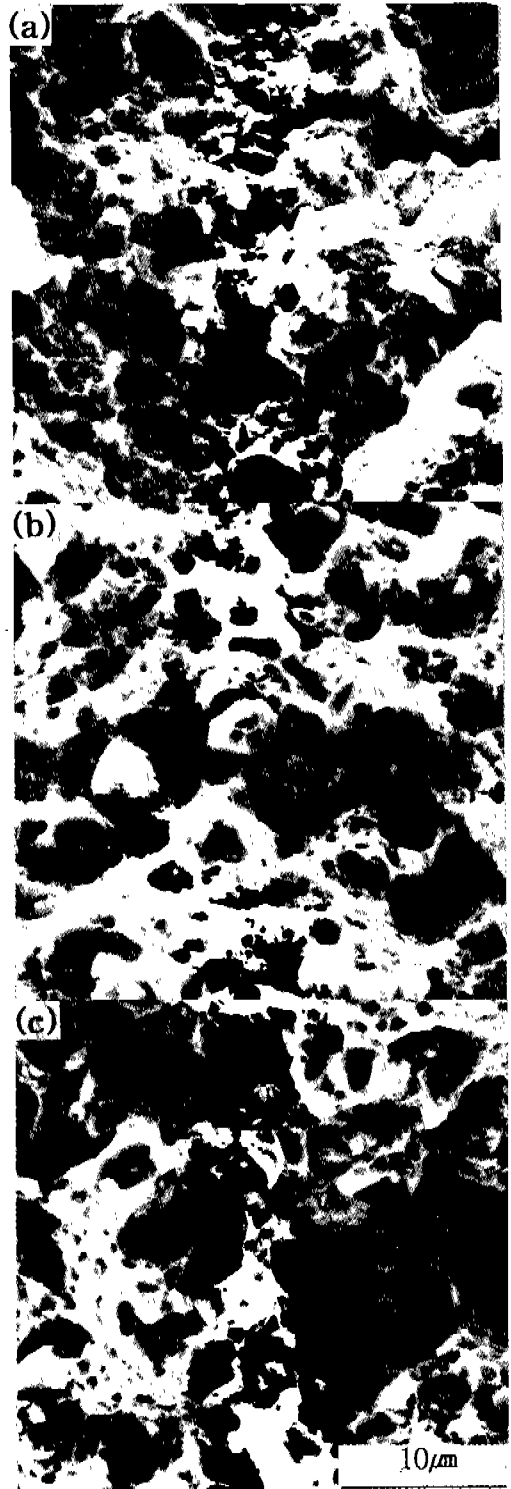


Fig. 13. SEM fractographs of 10 vol% SiC_p/2024Al composites with various die angles; (a) 60°, (b) 120° and (c) 180°, respectively.

사려된다.

3) 압출강도 500°C, 다이각이 $2\theta=60^\circ$ 일 경우에 최대의 인장강도 및 상대밀도를 얻었다. SiC 입자 강화 알루미늄기 복합재료를 분말압출할 경우 완전한 분말간의 성형을 위하여서는 압출온도가 상대적으로 높으면서 또한 압출압력이 높아야 가능하다. 다이각이 $2\theta=60^\circ$ 의 경우가 압출압력이 가장 크기 때문에 분말이 미세결합없이 성형될 수 있어 높은 인장강도 및 연신율을 얻을 수 있다고 생각된다.

4) SiC_p/2024Al기 복합재료를 분말압출하여 기계적 특성을 평가한 결과 최적의 압출온도는 500°C이며, 최적의 압출다이각 조건은 60°이다.

감사의 글

본 연구는 93년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 대하여 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Tsujimura, K. Takao, A. Watanabe, Y. Sugai,

- E. Nishii : Proc. of an Inter. Sym. on Light Materials for Transportation Systems (LiMAT-93), N. J. Kim (Ed.), 1993, p. 847
2. R. J. Arsenault and S. B. Wu : Scr. Metall., **22** (1988) 767
3. I. Dutta and D. L. Bourell : Acta Metall., **38** (1990) 2041
4. Y. Sugimura and S. Suresh : Metal. Trans. A, **23** (1992) 2231
5. T. Fujita and F. Kiyota : 輕金屬, **38**(10) (1988) 653
6. T. Fujita and F. Kiyota : 輕金屬, **38**(10) (1988) 640
7. 조동철 : 석사논문, 인하대학교 (1993)
8. 이정환 : 석사논문, 인하대학교 (1994)
9. K. Sugauma and T. Fujita : Mater. Sci. and Technology, **5** (1989) 249
10. K. Laue and H. Sienger : Extrusion, ASM, Metal Park (1981) 27
11. 이동녕 : 소성가공학, 문운당 (1993) 370
12. C. Y. Barlow and N. Hansen : Acta Metall., **39**(1) (1991) 73
13. C. Y. Nachtrab and P. R. Roberts : Proceedings of the 1992 Powder Metallurgy World Congress, **4** (1992) 321