

금속복합재료의 열간압출에 관한 금형설계의 최적화기법(I)

강 충 길* · 김 남 환** · 김 병 민*

(1997년 7월 1일 접수)

Optimization Techniques of Die Design on Hot Extrusion Process of Metal Matrix Composites

C. G. Kang, N. H. Kim and B. M. Kim

Abstract

The fiber orientation distribution and interface bonding in hot extrusion process have an effect on the mechanical properties of metal matrix composites(MMC's). Aluminium alloy matrix composites reinforced with alumina short fibers are fabricated by comocasting method. MMC's billets are extruded at high temperature through conical and curved shaped dies with various extrusion ratios and temperature. This present study was directed to describe the systematic correlation between extrusion die shape and subsequent results such as fiber breakage, fiber orientation and tensile strength to hot extruded MMC's billet. Extrusion load, tensile strength and hardness for variation of extrusion ratios and temperature are investigated to examine mechanical properties of extruded MMC's. SEM fractographs of tensile specimens are observed to analyze the fracture mechanism.

Key Words : Metal matrix composites, Curved shaped die, Hot extrusion, Die design, Fiber breakage, Fiber prientation.

1. 서 론

액상법으로 제조된 금속복합재료는 기지재에 강화재가 균일하게 분산되어 있더라도 계면 접합강도의 저하 및 가공 때문에 기계적 성질이 오히려 기지재보다 감소하는 경향이 있다. 형상이 복잡하고 고정밀도를 요구하는 기계 부품은 1차가공만으로는 불가능하다. 따라서 압출,⁽¹⁻⁴⁾ 압연⁽⁵⁾ 및 단조⁽⁶⁾ 등과 같은 소성 가공법으로 2차 가공하여 최종 형상에 가까운 제품을 성형하는 것이 1차가공의 단점을 해결하는 측면에서 바람직하다. 단섬유 강화 금속복합

재료는 비강성, 비탄성, 내열성, 내마모성 및 열적 안정성이 우수한 재료로서 장섬유나 휘스커에 비해 가격이 저렴하고 기지재와의 혼합 및 제조 과정도 간단할 뿐만 아니라 2차 가공이 가능하다는 장점이 있다.

최근 금속복합재료의 압출공정에 대한 연구로써 Kiuchi⁽⁷⁾ 등은 SiC 섬유와 A5056 알루미늄 분말을 점성 용매에 균일 분산시킨후 압출을 하여 섬유의 배향성, 계면 관찰 및 기계적 특성 등 관하여 조사하였다. Suganuma⁽⁸⁾ 등은 AA7178에 알루미늄 단섬유를 균일 분산시킨 복합재료와 이 재료에 피복재로서 Al6061을 입힌 재료를

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원

반응용 온도 영역에서 압출하여 압출재의 온도에 따른 표면 크랙, 섬유유와 파단 정도 및 기계적 특성에 관하여 조사하였다. Imai⁽⁹⁾ 등은 AC8A와 알루미늄 단섬유를 사용하여 용탕 단조법으로 제조한 복합재료의 압출 가공성에 대하여 제시하였으며, 또한 압출재의 온도에 따른 인장 강도, 평균 변형 저항과 온도와의 관계를 조사하였다. Okumiyama⁽¹⁰⁾ 등은 δ -Al₂O₃ 섬유와 Al-Mg-Si(JIS 6063) 합금으로 제작 분율이 서로 다른 복합재료를 가압 용침법으로 제조한 후 원추형 다이를 사용하여 열간 압출하여 기지재의 소성 유동이 섬유 길이, 섬유 배향성, 표면 균열 발생 정도 및 인장 강도에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. Watanabe⁽¹¹⁾ 등은 β -SiC 휘스커와 Al₂O₃ 섬유를 강화재로 사용하여 가압 용침법으로 여러 가지 알루미늄합금 복합재료 빌렛을 제조한 후 열간 압출하여 압출시 전단 변형 저항, 압출재의 강화재 길이 및 표면 크랙에 대해 조사하였다. Brusethaug,⁽¹²⁾ Jeffery,⁽¹³⁾ Greefield⁽¹⁴⁾ 및 Hains⁽¹⁵⁾는 각각 용융교반법에 의하여 기지재의 SiC, Al₂O₃ 입자 및 휘스커 등을 분산시켜 MMC를 제조한 후 압출공정에서 발생하는 다이의 마모현상, 기계적 성질 및 계면 반응 등을 관찰하였다. 강등⁽¹⁵⁾은 섬유와 기지재간의 계면 접합 강도와 섬유 배향성을 개선시키기 위해 원추형 다이를 이용하여 압출 가공함으로써 압출비의 변화에 따라 섬유가 파단되는 현상을 규명하였다. Kang⁽¹⁶⁾ 등은 단섬유강화 금속복합재료의 열간압출공정에서 섬유의 배향성이 기계적성질에 미치는 영향을 조사하였으나, 기계적 성질이 우수한 최적형상의 다이는 제안하지 못하였다.

이상의 연구내용에서 살펴본 바와 같이 금속복합재료에 대한 압출연구로써는 기지재와 강화재의 혼합 방법, 분산 상태, 압출후 강화재의 체적 함유율에 따른 인장 강도 및 강화 기구 등이 대부분이며, 다이의 형상이 섬유의 배향성과 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 결과는 아직 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 단섬유 금속복합재료에 대한 신뢰성 향상과 압출 가공에 의한 강화재의 배향성 개선을 위해 용탕 단조 공정으로 압출용 빌렛을 제조하였다. 열간압출가공에서 금형설계의 최적화를 실험적으로 규명하기 위하여 곡면 다이와 원추형 다이를 사용하였다. 압출비에 따른 섬유의 거동 상태와 기계적 특성을 개선시키는데 주안점을 두었다. 압출 전후에 있어서 강화재의 분산 상태, 파단 정도 및 배향성을 광학 현미경으로 관찰하였으며 압출품 단면내에서 단섬유의 유동상태를 조사하였다. 그리고 압출품에 있어서 섬유의 파단과 배향성이 기계적 성질에

미치는 영향을 파악하기 위하여 인장시험과 경도 시험을 하였으며, 섬유와 기지재간의 계면 접합 상태가 인장 강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 인장 시험편의 파단면을 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 금속복합재료의 제조

반응용 가공법을 사용하여 금속복합재료를 제조하는 경우에는 접합성과 혼합성의 개선으로 인하여 강화재의 침전이나 부상이 방지되어 기지재에 강화재를 균일하게 분산시키는 것이 가능하다. 합금은 정확한 상태도가 불분명하므로 본 연구에서는 고상용을 온도의 2차원 분포로 가정하여 다음과 같은 식으로 정의하였다.⁽¹⁷⁾

$$S_f = \left[\frac{T_L - T}{T_L - T_S} \right]^{1/2} \times 100\% \quad (1)$$

여기서 S_f , T , T_L 및 T_S 는 각각 고상율(%), 용탕의 온도(°C), 액상선 온도(652°C), 고상선 온도(582°C)이다.

실험에 사용한 기지재는 Al-Si-Mg계 Al6061 합금을 사용하였으며 화학 조성을 Table.1에 표시하였다.

Table 1 Chemical composition of Al6061 alloy (wt %)

| Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| bal | 0.65 | 0.23 | 0.22 | 0.03 | 0.84 | 0.22 | 0.10 | 0.01 |

강화재는 고온에서 인장 강도, 압축 강도, 강성, 피로 저항 및 경도를 증가시키고 열팽창이 적은 SAFFIL RF grade인 δ -Al₂O₃ 단섬유를 사용하였으며 단섬유의 평균 입자 직경은 약 3 μ m, 평균 길이는 50 μ m이다.

Fig.1은 금속복합재료를 제조하는데 사용된 실험 장치를 나타낸 것이다. 주요 장치는 밀폐식 분위기 전기로, 도가니, 교반기로서 전기로 내부와 도가니 내부의 온도를 일정하게 제어하기 위해 CA열전대를 설치하였다. 도가니 내의 용탕을 교반하는 경우에 임펠러의 위치는 강화재의 분산 정도에 상당한 영향을 미치므로 강화재를 균일하게 분산시키기 위해 교반용 모터의 상하 운동이 가능하게 하였다. 전기로 상단부에 아르곤 가스 주입구, 강화재 투입용 주입구 및 관찰구를 만들어 강화재 투입시 전기로 내부를 관찰할 수 있도록 하였으며, 임펠러는 직경 27 mm,

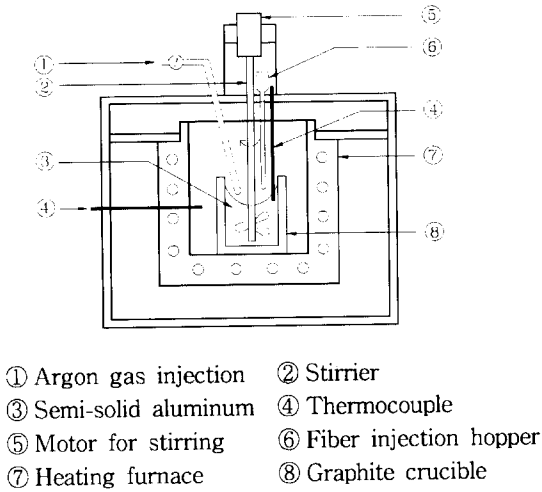


Fig. 1 Schematic diagram showing experimental apparatus to fabrication of short fiber reinforced metal matrix composites

날개각 30°, 날개수 3개로 하였다. 기지재와 단섬유가 혼합된 반응용 상태의 슬러리를 400°C로 예열된 금형에 주입한후 가압력 50MPa, 16 mm/sec의 속도로 30초간 가압하여 지름이 40 mm, 높이 70~80 mm의 빌렛을 제조하였다.

금속복합재료 빌렛의 제조 공정은 적절한 용량(470~480g)의 기지재를 아세톤으로 세척하여 전기로 내부의 도가니에 넣고 기지재의 액상선 이상의 온도(700°C)로 가열하여 용해시킨후 아르곤 가스를 실험이 완료될 때까지 투입하여 전기로의 내부를 아르곤 분위기로 만들어 기지재와 단섬유가 혼합된 반응용 슬러리에 산화가 일어나지 않게 하였다. 기지재의 액상선 온도이상(660°C)에서 교반기를 용탕에 삽입한 후 임펠러의 회전수를 서서히 증가시켜 600rpm으로 맞추었다. 이때 교반기를 기지재의 액상선 온도 이상으로 가열한 후 용탕에 삽입하여 용탕의 급속한 냉각을 방지하였다. 또한 상온의 단섬유는 투입시 열전달에 의해 용탕의 온도를 급속하게 떨어뜨릴 수 있으며 습기로 인해 뭉쳐진 단섬유는 투입후 재료 내에서 덩어리로 존재하여 불균일하게 분산되므로 단섬유를 내열도가니에서 650°C로 예열하였다. 교반기의 임펠러는 장시간 동안 용탕과 접촉되어 손상되기 쉬우므로 세라믹 재료로 사용하였다. 교반을 하면서 단섬유의 투입이 완료될 때까지 기지재의 온도를 일정하게 유지시키고 투입봉을 사용하여 용탕의 와류 중심에 단섬유를 25분 동안 연속적

으로 투입하였다. 용탕내의 교반기 위치는 단섬유의 분산 정도에 영향을 미치므로 기지재와의 밀도 차이에 의해 부상하거나 침전되는 단섬유를 균일하게 분산시키기 위해서 교반을 하면서 5분 간격으로 교반기를 상하로 왕복 운동시켜 균일 분산 시키고자 하였다. 단섬유의 투입후 혼합된 반응용 상태의 슬러리는 유동성이 매우 저하되어 있으므로 다시 액상선 이상의 온도로 슬러리를 재가열하여 유동성을 개선시켰으며 이때 밀도 차이에 의해 침전된 단섬유를 균일 분산시키기 위해 3분 정도 재교반하면서 교반기를 다시 상하로 왕복 운동시켰다.

2.2 실험 장치

Fig.2는 재료 시험기에 설치한 압출용 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 압출 다이는 압출비가 서로 다른 3가지 종류의 곡면 다이와 압출비가 동일한 1개의 원추형 다이를 사용하였다. 압출시 사용되는 곡면다이의 형상은 하중이 가해짐에 따라 변형 영역 내에서 변형률이 일정하다고 보고되고 있는 다이의 곡면을 다음과 같은 식을 적용하여 제작하였다.¹⁸⁾

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{A_o}{(\lambda - 1) Z/L + 1}} \tag{2}$$

여기서 A_o, λ, L 및 Z 는 각각 빌렛의 초기 단면적(mm²),

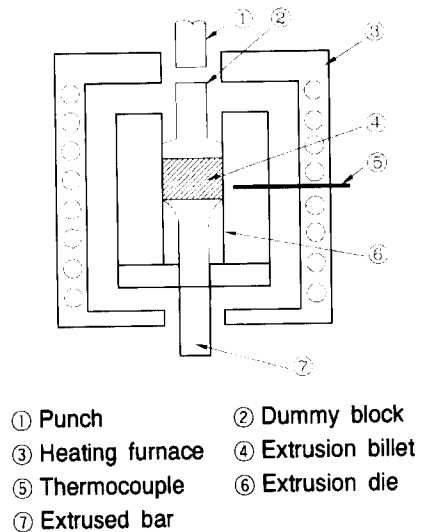
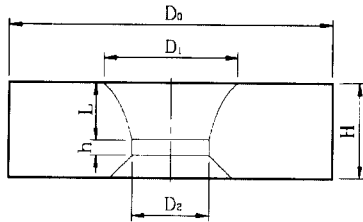
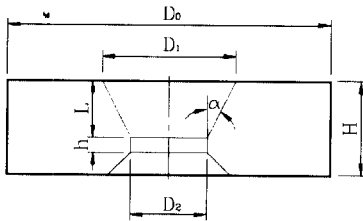


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for hot extrusion

압출비 (D_1^2/D_2^2), 다이 길이 (mm) 및 압출 방향의 좌표 값을 나타낸다. Fig.3은 실험에 사용된 압출 다이의 형상을 나타낸 것이며 Table.2는 압출 다이의 치수 및 압출비를 나타낸 것이다.



(a) Curved shape die



(b) Conical shape die

Fig. 3(a)(b) Shape of a various dies used for hot extrusion of short fiber reinforced metal matrix composites

Fig.4는 압출비의 변화에 따른 압출다이의 외관을 나타낸 것이다. 압출비 $\lambda_s = 3.06, 5.44, 8.51$ 이 되도록 설계하였으며 $\lambda = 3.06$ 인 경우는 직선형(λ_c)과 곡률형(λ_s)으로 각각 가공하였다. 금속복합재료에 이용되는 강화재는 취성이 커서 열간 압출시 윤활제는 제품의 표면 정도에 상당한 영향을 미치게 되므로 본 실험에서는 일반적으로 고온에서 사용할 수 있는 그리스 오일과 흑연 분말을 1:1의 체적비로 혼합하여 사용하였다.

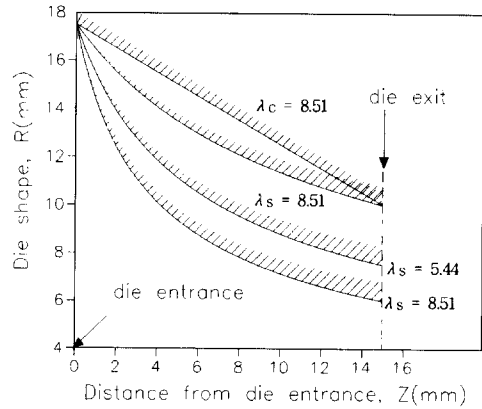


Fig. 4 Die profile for hot extrusion

2.3 실험 방법

금속복합재료를 $\phi 35 \text{ mm} \times L60 \text{ mm}$ 로 절삭 가공하여 압출용 빌렛으로 이용하였다. 실험을 위하여 압출용 빌렛, 압출 다이 및 더미 블럭에 윤활제를 바른 후 상부 컨테이너에 넣고 전기로를 사용하여 다이, 펀치 및 컨테이너를 실험 온도까지 가열하였다. 가열시 빌렛의 온도를 실험 온도로 정확히 제어하기 위해 상부 컨테이너 속에 직경이 1.6 mm인 CA열전대를 내부 측벽에서 2 mm 떨어진 위치에 설치하여 압출이 끝날 때까지 온도를 일정하게 제어하였다. 실험 온도 $T_e = 500^\circ\text{C}$ 에 이르르면 이 온도에서 균일한 온도 분포가 이루어지도록 10분 동안 온도를 유지시킨 후 압출 실험을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 금속복합재료의 제조

Fig.5(a),(b)는 강화재 체적 분율 $V_f = 15\%$ 인 복합재료의 가압력 방향에 수직한 평면 부분의 분산 상태를 나타낸 것이다. 가장자리 Fig.5(b)에 비해 중앙 부분 Fig.5(a)이 비교

Table 2 Die dimensions used for hot extrusion

| Die Shape | D_0 (mm) | D_1 (mm) | D_2 (mm) | L (mm) | h (mm) | H (mm) | λ (D_1^2/D_2^2) |
|-----------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|
| 1 | 84 | 35 | 20 | 15 | 4 | 25 | 3.06 |
| 2 | 84 | 35 | 15 | 15 | 4 | 25 | 5.44 |
| 3 | 84 | 35 | 12 | 15 | 4 | 25 | 8.51 |
| 4 | 84 | 35 | 20 | 15 | 4 | 25 | 3.06 |

적 조밀하게 균일 분산되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 기지재와 강화재가 혼합된 슬러리를 금형에 주입한



Fig. 5 (a)(b) Optical micrographs for dispersion of Al_2O_3 short fiber on transvse section of hot extruded billet ($S_f=15\%$, $V_f=15\%$)

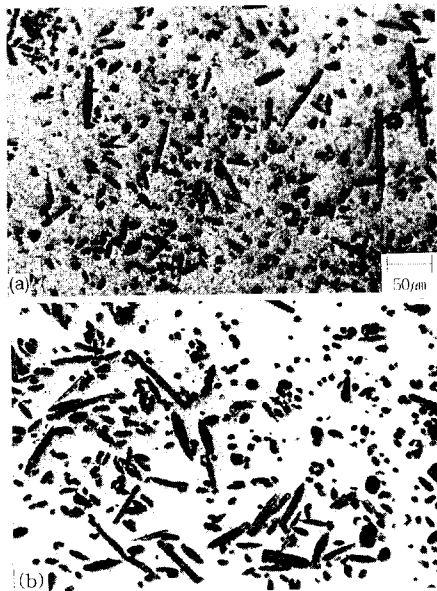
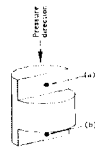
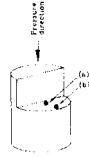


Fig. 6 (a)(b) Optical micrographs for dispersion of Al_2O_3 short fiber on longitudinal section of hot extrusion billet. (a) Upper portion (b) Lower portion



후 가압할때 액상 부분은 모든 방향에서 정수압을 받음과 동시에 금형에 접촉하는 부분에서 먼저 응고가 일어나 수축이 일어남과 동시에 액상과 단섬유의 밀도차이로 인한 유동속도의 불균일한 현상 때문에 단섬유가 균일하게 분산되어 있지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 6(a),(b)는 Fig. 5(a),(b)와 동일한 조건으로 제조한 복합재료의 가압력 방향에 평행한 부분의 분산 상태를 나타내는 것으로 상하 부분에서 단섬유가 균일하게 분산되어 있음을 알 수 있다. 이러한 상하 부분의 균일한 분산 상태는 재가열한 후 교반기에 교반기를 상하로 이동시킴으로써 밀도 차이에 의해 침전된 단섬유가 균일하게 분산되었기 때문이라고 생각된다.

3.2 압출 압력

Fig. 7은 압출시 다이 형상과 압출비에 따른 램의 변위 δ 과 압출력 P와의 관계를 나타낸 것이다. 원추형 다이의 압출비 λ_s 가 3.06, 곡면 다이의 압출비 λ_s 가 3.06, 5.44 및 8.51인 경우에 각각의 최대 압출력 P는 115kN, 145kN, 160kN 그리고 190kN로 측정되었다. 압출비 λ_s 와 λ_c 가 3.06인 경우에 있어서 곡면다이의 압출력이 직선형다이보다 증가한 것은 다이와 접촉하는 빌렛의 표면적이 원추형 다이보다 커지므로 마찰력이 더욱 크게 작용하게 되기 때문이라고 생각된다. 또한 곡면 다이의 경우에도 압출비가 클수록 빌렛의 표면적과 다이와의 접촉 면적이 Fig. 4에서 보여주는 바와같이 넓어져 압출력이 증가되었다고 생각된다.

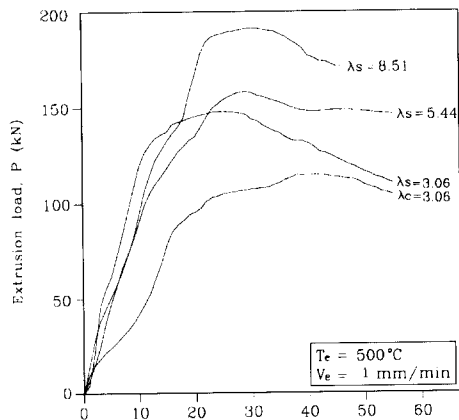


Fig. 7 Relationship between extrusion load and ram displacement of short fiber reinforced Al_{6061} metal matrix composites ($V_f=15\%$) for the variations of extrusion ratio and die shape

3.3 압출 전후의 섬유 배향성 및 파단

Fig.8(a)~(f)은 $V_f=15\%$, $\lambda_s=3.06$, 다이 반각 $\alpha=30^\circ$ 인 원추형 다이를 사용하여 압출한 것으로 압출시 압출재 단면의 가장자리 부분과 중앙 부분에 있어서 다이의 입구 부분(Fig.8(a),(d)), 다이의 중간 부분(Fig.8(b),(e)) 및 다이의 출구 부분(Fig.8(c),(f))에서 섬유 배향 상태를 나타낸 것이다. 다이의 가장자리 부분(Fig.8(a),(b),(c))과 중앙 부분(Fig.8(d),(e),(f))는 압출이 진행됨에 따라 섬유가 압출 방향으로 재배열되어 방향성을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 압출시에는 섬유가 기지재의 유동에 영향을 받기 때문에 다이 벽면으로부터 받게 되는 기지재의 소성 유동에 의해 섬유가 압출 방향으로 회전하게 되어 섬유의 배향성이 개선된 것으로 생각된다. 그러나 중앙 부분의 Fig.8(d)와 Fig.8(f)에 나타난 것처럼 압출 초기에는 섬유가 무작위한 분산 상태로 되어있다가 압출이 진행되어감에 따라 방향성은 나타나지만 압출력에 의한 굽힘 응력을 받아 출구 부분 Fig.8(f)에서 섬유가 많이 파단되어 있음을 알 수 있다.

Fig.9(a)~(c)는 압출온도가 500°C , $V_f=15\%$ 인 경우 압출비가 $\lambda_s=3.06, 5.44, 8.51$ 인 곡면 다이를 사용하여 압출한 것으로 압출시 다이의 입구 부분(Fig.9(a)), 다이의 중간 부분 (Fig.9(b)) 및 다이의 출구 부분 (Fig.9(c))

에서 섬유의 배향 상태를 나타낸 것이다.

Fig.9에서 보여주는 바와 같이 다이의 입출구 부분에서는 압출비가 증가함에 따라 변형률 속도가 커지기 때문에 다이 벽면으로부터 받게 되는 기지재의 소성 유동은 응력이 커지므로 취성인 섬유는 압출 방향으로 회전하게 되어 배향성이 개선된 것으로 생각된다. 출구 부분에서 섬유 배향성은 Fig.8(f)와 Fig.9(c)에 나타난 것처럼 다이의 형태에는 상관없이 섬유가 압출 방향으로 재배열된다는 것을 알 수 있다.

그러나 직선다이보다 곡면다이가 소성흐름이 양호하기 때문에 배향성이 Fig.8(d)~(f)보다 Fig.9의 $\lambda_s=3.06$ 의 (a)~(c)가 전반적으로 개선되어 있음을 알 수 있다. Fig.10(a)~(c)는 압출온도가 500°C , $V_f=15\%$ 인 경우 압출비가 $\lambda_s=3.06, 5.44, 8.51$ 인 곡면 다이를 사용하여 압출한 것으로 압출재 가장자리 부분에 있어서 다이 입구 부분(Fig.10(a)), 다이 중간부분(Fig.10(b)) 및 다이 출구부분(Fig.10(c))에서 섬유의 배향상태를 나타낸 것이다. Fig.10(c)에 나타난 것처럼 출구 부분의 가장 자리에서도 압출이 진행됨에 따라 섬유가 제어되어 압출비가 증가할수록 배향성이 향상된 것을 알 수 있다. 이것은 압출시 다이 벽면으로부터 받게 되는 기지재의 소성 유동에 의해 섬유가 회전하여 압출 방향으로 변형하기 때문이라고

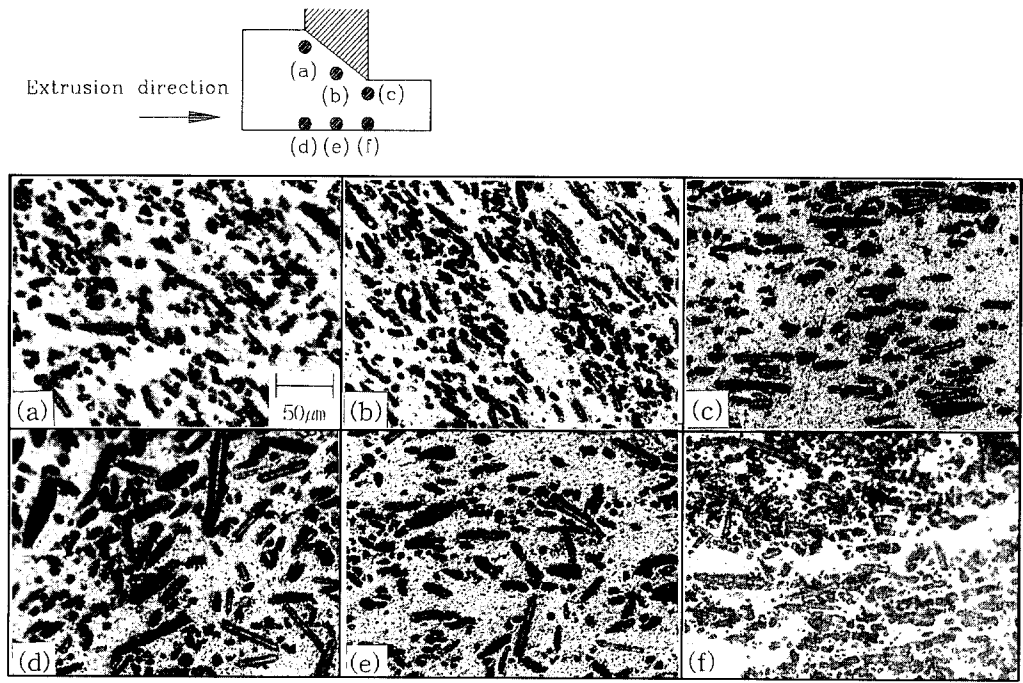


Fig. 8(a)~(c) Microstructure of fiber orientation during hot extrusion process with curved shape die.

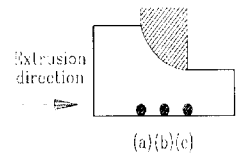
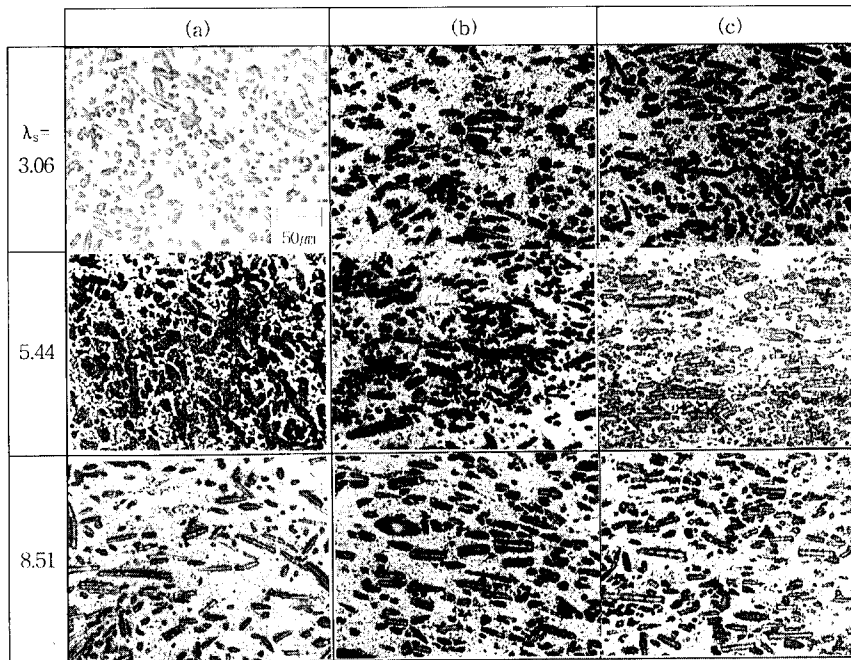


Fig. 9(a)~(c) Microstructure of fiber orientation during hot extrusion process with curved shape dies of various extrusion ratios.

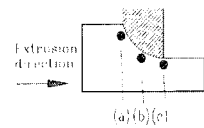
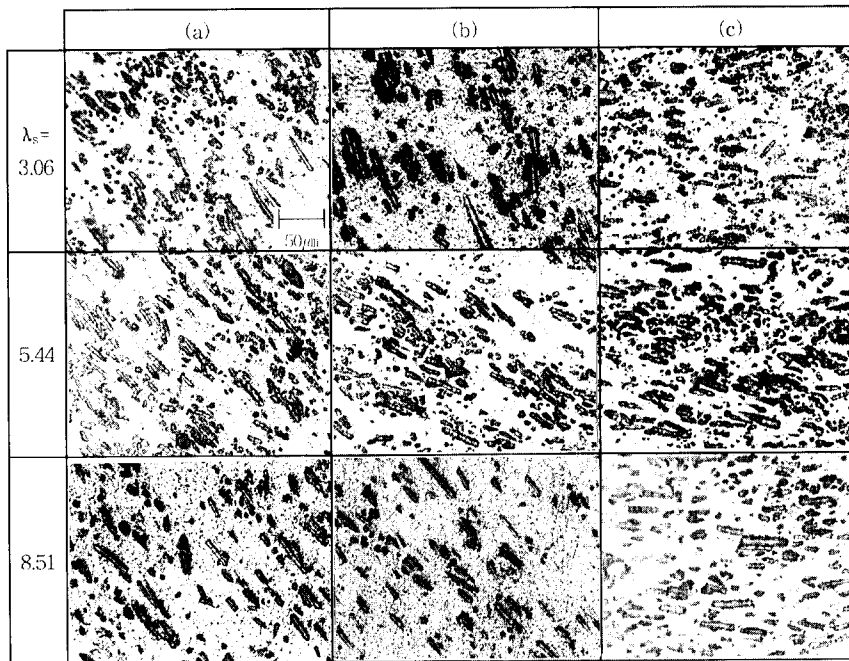


Fig. 10(a)~(c) Microstructure of fiber orientation during hot extrusion process with curved shape dies of various extrusion ratios.

생각된다. 다이 표면에서는 직선다이보다 곡률다이가 유동흐름이 양호하며 섬유 배향성 측면에서 Fig.10의 $\lambda_s = 3.06$ 의 (a)~(c)가 Fig.8(a)~(c)에 비하여 많이 개선

되어 있음을 알 수 있다. Fig.11(a)~(d)은 압출비 $\lambda_s = 5.44$ 인 경우 압출온도 $T_e = 400^\circ\text{C}$, 450°C , 500°C , 550°C 일 때 압출품단면 중앙부분에서의 조직사진을 나타

낸 것이다. 압출온도가 (500~550)℃의 범위에서 섬유유 배향성이 증가되었음을 알 수 있다. 위의 원인은 압출온도가 높을수록 기지재의 소성유동이 증가되어 섬유의 유동을 용이하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig.12(a)~(d)은 Fig.11(a)~(d)의 조건에서 압출한 압출품단면의 가장자리 부분(다이와 접촉하는 부분)에서의 조직사진이다. Fig.11(a)~(d)와 마찬가지로 배향성이 Fig.5.6의 원소재와 비교하여 배향성이 향상되었으나, 압출온도에 크게 의존하지 않음을 알 수 있다. 위의 원인은 압출공정에 있어서 가장자리부분은 단면의 중앙부분보다 기지재가 소성변형을 많이 받기 때문에 강화재가 굽힘변형을 받아 배향성이 Fig.11(a)~(d)에 비하여 개선된 것으로 사료된다.

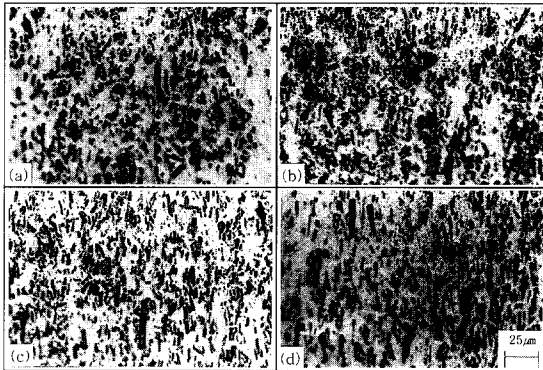


Fig. 11(a)~(d) Microstructure of fiber distribution in the center portion of cross section after hot extrusion for the variation of extrusion temperature. (a) 400 °C (b) 450 °C (c) 500 °C (d) 550 °C

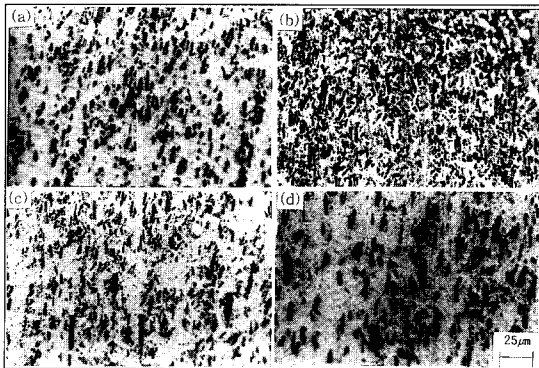


Fig. 12(a)~(d) Microstructure of fiber distribution in the edge portion of cross section after hot extrusion for the variation of extrusion temperature. (a) 400 °C (b) 450 °C (c) 500 °C (d) 550 °C

4. 압출재의 기계적 성질

평행부 길이와 직경이 각각 25 mm, 6 mm가 되도록 인장 시험편을 가공한 후 530℃에서 2시간 동안 용체화 처리한 후 175℃에서 8시간 동안 시효 처리하였다. 인장 시험은 MTS를 사용하여 크로스 헤드 속도를 1 mm/min로 하였다.

Fig.13은 $\lambda_c=3.06$ 인 원추형 다이와 $\lambda_s=3.06, 5.44, 8.51$ 인 곡면 다이의 압출재에 대한 기계적 성질 중에서 인장강도, 경도 및 연신율을 나타내고 있다. 압출재의 평균 인장 강도는 $\lambda_c=3.06$ 인 원추형 다이가 390MPa, $\lambda_s=3.06, 5.44$ 및 8.51인 곡면 다이의 경우에는 각각 430MPa, 465MPa, 410MPa로 측정되었으며 이것은 기지재의 인장 강도에 비해 각각 26%, 39%, 50%, 32% 개선되어 매우 높은 강화 효과를 나타내었다. 즉 곡면 다이의 경우 $3.06 \leq \lambda_s \leq 5.44$ 범위에서는 압출비가 증가함에 따라 인장 강도도 증가하게 되며, 또한 압출비가 3.06으로 동일한 경우에도 곡면 다이를 사용하는 것이 원추형 다이에 비해 인장 강도가 높다는 것을 알 수 있다. 다이 형상이 인장 강도에 미치는 영향은 Fig.8(c),(f)와 Fig.9(c)에 나타난 출구 부분의 섬유 배향성으로 설명할 수 있다. 즉 원추형 다이를 사용한 경우에는 곡면 다이에 비해 섬유의 배향성이 분명히 나타나지 않고 섬유의 파단이 많이 나타나기 때문에 섬유가 기지재에 충분히 강화되지 못하여 인장 강도가 낮은 것으로 생각된다. 곡면 다이의 압출시 압출비가 3.06에서 5.44의 범위에서는 압출비의 증가에 따른 인장 강도의 상승 원인은 Fig.9의 섬유 배향성으로 알 수 있다. 즉 압출비가 클수록 섬유의 배향성

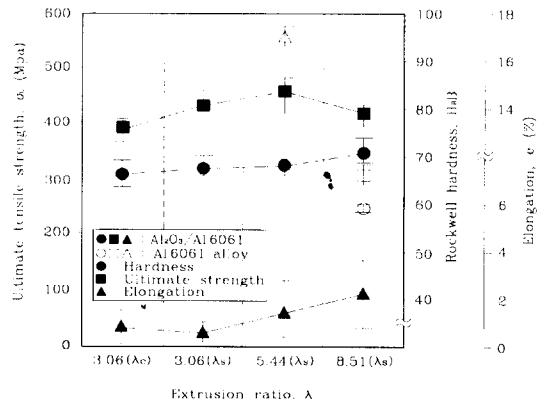


Fig. 13 The effect of die profile and extrusion ratios on mechanical properties ($T_c=500$ °C)

은 양호하지만 파단이 증가함을 알 수 있다. 그러나 압출비가 클수록 인장 강도가 증가하는 이유는 단면 감소율의 증가로 인하여 기지재가 섬유에 가하는 응력이 증가되어 섬유가 파단되는 반면에 섬유의 배향성이 우수해지고 계면 접합 강도가 개선되기 때문이라고 생각된다. λ_s 가 8.51인 곡면 다이를 사용한 경우에는 섬유의 파단 정도는 심하여 강도가 오히려 감소함을 알 수가 있다. 압출재를 열처리하여 로크웰 경도 시험기를 사용하여 측정하였다. 기지재의 경도치 58.53에 비해 원추형 다이의 압출재는 66.78, 곡면 다이의 압출재는 압출비에 따라 각각 67.75, 68.33, 70.58을 나타내었다. 즉 기지재의 경도치에 비해 원추형 다이는 13.4%, 곡면 다이는 압출비에 따라 각각 15.2%, 16%, 20%정도로 개선되었다. 따라서 압출비 λ_c 와 λ_s 가 3.06으로 동일할 때 곡면 다이를 사용한 경우가 원추형 다이에 비해서 경도가 높고 곡면 다이의 경우에도 압출비가 클수록 경도가 높아졌지만 큰 차이는 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 다이 형태와 압출비 증가에 따른 가공 경화 및 기공의 감소 등으로 조직이 치밀화된 영향도 있었지만 강화된 단섬유의 경도치가 더욱 크게 영향을 미친 것으로 생각된다. 압출재와 기지재의 연신율을 비교해 보면, 기지재의 연신율 17%에 비해서 압출재의 평균 연신율은 원추형 다이가 0.82%, 곡면 다이는 압출비에 따라 각각 0.57%, 1.36%, 2.1%를 나타내었다. 이처럼 연신율이 감소되는 것은 기지재에 취성인 섬유를 첨가하여 강화시킴으로써 복합재료가 취성 재료로 전환되었음을 의미한다. 압출비 λ_c 와 λ_s 가 3.06으로 동일할 때 연신율은 곡면 다이의 경우가 원추형 다이에 비해 다소 적으며 곡면 다이

의 경우에는 압출비가 증가할수록 연신율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 압출비가 증가할수록 섬유는 많이 파단되어 길이가 짧아지게 되는 반면에 배향성은 우수하게 되고 계면 접합 강도가 개선되기 때문에 기지재에서 연성 파괴가 일어나 연신율이 증가되었다고 생각된다.

Fig.14는 $V_f=15\%$, $\lambda_s=5.44$ 인 경우 압출온도의 변화에 따른 복합재료의 기계적성질을 나타낸 것이다. Fig.11(a)~(d)에서 보여주는 바와 같이 강화재의 배향성은 압출온도의 증가에 따라서 개선되었으나 기계적 성질이 급격히 증가되지는 않았다. 이러한 현상을 규정하기 위하여 파단면의 SEM관찰을 조사하였다.

5. 파단면 관찰

파단면을 관찰함으로써 다이 형태와 압출비에 따른 기지재의 소성 유동이 섬유에 미치는 영향 즉 섬유의 배향성이나 파손 정도 및 기지재와 섬유간의 계면 접합 강도가 인장 강도에 미치는 영향을 알 수 있었다. Fig.15은 다이 형태와 압출비에 따른 인장 시험편의 파단면을 나타내는 것으로 Fig.15(a)는 $\lambda_c=3.06$ 인 원추형 다이, Fig.15(b)~(d)는 $\lambda_s=3.06, 5.44, 8.51$ 인 곡면 다이의 파단면을 나타낸 것이다. Fig.15(a)(b)에 나타난 것처럼 λ_c 와 λ_s 가 3.06으로 동일한 경우에는 다이 형상에는 상관 없이 모두 압출력에 의한 굽힘 응력을 받아 섬유의 손상이 발생하였으며, 또한 섬유 사이에 기지재의 소성 유동이 균일하게 일어나지 않았음을 알 수 있다. 따라서 인장 시험 시 섬유들 중에서 가장 약한 부분에서 균열이 전파되어 파

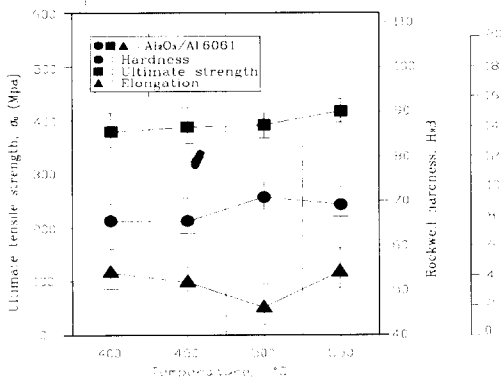


Fig. 14 The effect of temperatures on mechanical properties in hot extrusion process with extrusion ratio of 5.44

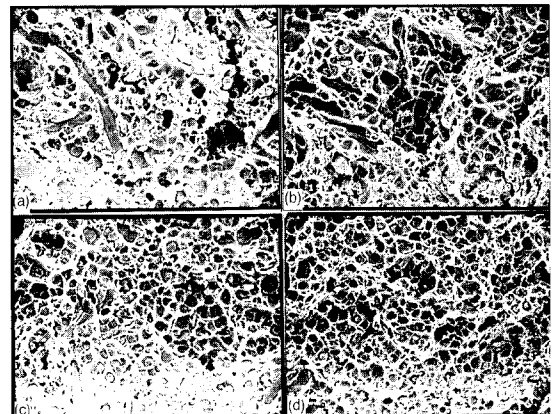


Fig. 15 SEM fractograph of tensile specimen of a fracture for the variation of die shapes and extrusion ratios. (a) $\lambda_c=3.06$ (b) $\lambda_s=3.06$ (c) $\lambda_s=5.44$ (d) $\lambda_s=8.51$

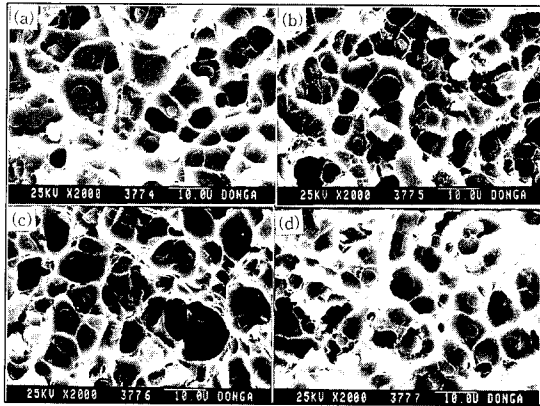


Fig. 16 SEM fractograph of fracture in tensile specimen for the variation of hot extrusion temperature.

단이 발생한 것으로 사료된다. 기지재의 불균일한 소성 유동으로 인해 계면 접합 강도가 약한 부분에서 섬유가 기지재에서 뽑혀 나가는 현상이 발생하여 인장 강도의 개선 효과를 얻을 수 없었다. 그러나 곡면 다이를 사용한 경우에는 Fig.15(b)~(d)에 나타난 것처럼 압출비가 클수록 기지재의 소성 유동이 커져 Fig.9~10에서 보여준 바와 같이 섬유와 기지재 사이의 계면 접합 강도가 향상될 뿐만 아니라 섬유가 파단 되더라도 분산 강화 효과가 나타나기 때문에 인장 강도의 충분한 개선을 기대할 수 있었다. 특히 $\lambda_s = 5.44, 8.51$ 인 Fig.15(c), (d)의 경우에는 기지재의 소성 유동이 섬유들 사이에 균일하게 분포되어 덤퐁을 형성함으로써 인장 시험시 섬유가 뽑혀 나간 부분도 다소 나타나지만 기지재와 섬유의 우수한 계면 접합 강도 때문에 기지재의 연성 파괴가 일어나 높은 강화 효과를 나타내었다고 생각된다.

Fig.16(a)~(d)은 $\lambda_s = 5.44$ 일 때 압출온도의 변화에 따른 파단면의 사진이다. Fig.16에서 보여주는 바와 같이 온도변화에 따른 파단면의 차이는 관찰되지 않았으나 계면접합이 개선되어 기지재는 연성파괴를 보여주고 있다. Fig.14에서 보여주고 있는 바와 같이 인장강도의 값은 파단면에 크게 의존함을 알 수 있다. 복합재료의 압출시 성형온도 및 다이형상의 변화에 따른 기계적 성질을 조사하였으나, 향후 복합재의 미시적 및 거시적 유한요소해석의 모델에 의하여 최적다이설계기법을 제안하고자 한다.

6. 결론

기지재 Al6061에 δ -Al₂O₃ 단섬유를 사용하여 반응용

가공법으로 금속복합재료를 제조하고 원추형 다이와 곡면 다이의 압출비와 온도를 변화시켜 실험을 행하여 다이 내에서의 섬유의 배향성과 파단 정도 및 압출재의 기계적 특성을 조사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 체적 분율 $V_f = 10\%$, 고상율 $S_f = 15\%$, 회전수 $N = 600\text{rpm}$ 및 투입 시간 25분의 조건으로 단섬유를 반응용 기지재에 첨가하여 교반기를 상하 운동 시킴으로써 균일한 분산 상태를 가진 단섬유 강화 금속복합재료를 제조할 수 있었다.

(2) 압출비 λ_c 와 λ_s 가 3.06인 원추형다이와 곡면다이를 이용한 압출에서 곡면 다이가 다이표면과 접촉하는 빌렛의 유동 단면적이 크기 때문에 원추형 다이에 비해 압출력이 증가함을 알 수 있었다.

(3) 압출비 λ_c 와 λ_s 가 3.06으로 동일한 경우에 다이 출구 부분 가장자리에서 섬유의 배향성은 거의 유사하나 전반적으로 원추형 다이보다 곡면 다이가 섬유의 파단이 적으며, 강화재의 배향성이 개선되었음을 알 수 있다.

(4) 곡면 다이의 경우에는 압출비가 증가할수록 다이의 입구 부분에서부터 출구 부분에 걸쳐서 배향성이 개선되었으며, 특히 출구 부분에 있어서는 가장자리보다 중앙 부분이 섬유의 파단이 감소되었다.

(5) 압출비 λ_c 와 λ_s 가 3.06인 경우에 인장강도와 경도는 곡면 다이가 원추형 다이보다 크지만 연신율은 감소하였으며, 곡면 다이의 경우 $3.06 \leq \lambda_s \leq 5.44$ 에서는 압출비가 증가할수록 인장 강도, 경도 및 연신율이 증가하였다.

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) J. C. Ehrstron and W. H. Kool, 1988, "Migration of Particles during Extrusion of Metal Matrix Composite", J. of Materials Science Letters 7, pp.578~580.
- (2) R. W. Hains, P. L. Murrusand P. W. Jeffrey, 1988, "Extrusion of Aluminum Metal Matrix Composites", J. of Advanced Structural Materials, pp.53~60.
- (3) C. A. Stanford-Beale and T. W. Clyne, 1989 "Extrusion and High-Temperature Deformation

- of Fiber-Reinforced Aluminum", J. of Composites Science and Technology, Vol.35, pp.121~157.
- (4) K. Sugauma, T. Okamoto, T. Hayami, Y. Oku and N. Suzuki, 1988, "Influence of High Temperature Exposure on the Properties of Alumina Short Fibre Reinforced AA6061 Alloy", J. of Materials Science, Vol.23, pp.1317~1323.
- (5) 今井 恒道, 西田 義則, 山田 守, 白柳 格, 松原 弘美, 1987, "アルミナ短纖維とアルミニウム複合材料に對する冷間壓延の効果", 輕金屬, 第37卷, 第3號, pp.179~184.
- (6) 木內 學, 杉山 澄雄, 遠藤 昇, 崎 尚哉, 1989, "半熔融加工法による粒子強化複合材料の製造および加工", 塑性と加工, 第24卷, 第272號, pp.974~980.
- (7) 木內 學, 杉山 澄雄, 崎 尚哉, 星野 祐作, 1989, "半熔融加工法による短纖維強化複合材料の製造", 塑性と加工, 第30卷, 第346號, pp.1524~1531.
- (8) K.Sugauma, T.Fujita, K.Nihara, M. Koizumi, 1989, "Hot Extrusion AA7178 Reinforced with Alumina Short Fibre", J. of the Institute of Metals, Vol.5, pp.249~254.
- (9) Imai T., Nishida Y., Matsubare H., Shirayanagi I., and Mabuchi M., 1989, "Hot Extrusion of Alumina Short Fiber Reinforced Aluminium Composites", J. of the JSTP, Vol.30, No.346, pp.1540~1546.
- (10) 奥宮 正洋, 恒川 好樹, 新美 格, 尾崎 勤, 1990, "高温押出時の塑性流動がAl₂O₃/Al複合材料の纖維配向性および纖維長に及ぼす影響", 輕金屬, 第37卷, 第4號, pp.285~290.
- (11) 渡 修一郎, 齋藤 勝義, 岡庭 茂, 1990, "不連續纖維強化アルミニウム合金複合材料 ビレットの押出し性", 輕金屬, 第40卷, 第4號, pp.278~284.
- (12) Brusethaug S. and Resio O., 1991, "Extrusion of SiCp Reinforced Al-Alloy," RISO Int. Symp. on Materials Science, ed. N. Hansen, et.al. pp.247~254.
- (13) Jeffery, P.W. and Holcomb, S., 1990, "Extrusion of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites," Proc. of Int. Conf. on Fabrication of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites, Montreal 17-19 Sept. ASM Int. pp.181~186.
- (14) Greefield, and I.G. Orthlieb, F.L., 1991, "Reinforced of SiC Whishers in Aluminium at Different Stage of Extrusion," 8th. Int. Conf. on Fabrication of Particulate Reinforced Metal Composites Materials, 17-E-3.
- (15) 강충길, 강성수, 김봉향, 1993, "금속복합재료의 열간압출공정에 있어서 압출비가 섬유 의 파단 및 배향에 미치는 영향", 대한기계학회논문집, 제17권, 제7호, pp.1740~1750.
- (16) C. G. Kang, S. S. Kang, 1994, "Effect of Extrusion on Fiber Orientation and Breakage of Alumina Short Fiber Composites", J. of Composites Materials, 29-2, pp.91~187.
- (17) 大中逸雄, 1985, "コンピ ュ-タ傳熱凝固解析 入門", p.200.
- (18) W.Xutang, J.Qijian and X.Shueisheing, 1986, "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Hydrostatic Extrusion with Various Mathematically Contoured Dies", 27th MTDR Conference, pp.51~57.