

(論 文)

금속복합재료의 열간압출공정에 있어서 압출비가 섬유의 파단 및 배향에 미치는 영향

강충길* · 강성수** · 김봉항***

(1993년 1월 9일 접수)

Effect of the Extrusion Ratios on Fiber Breakage and Orientation in Hot Extrusion process in Metal Matrix Composites

C.G.Kang, S.S.Kang and B.H.Kim

Key Words : Semi-Solid Stirring Method(반용용 교반법), Metal Matrix Composites(금속복합재료), Fiber Orientation(섬유배향), Squeeze Casting(용탕단조)

Abstract

The aluminar short fiber reinforced composite materials for hot extrusion were fabricated by semi-solid stirring method, and extruded at extrusion temperature 400°C with various extrusion ratio. The hot extrusion load of volume fraction 15% metal matrix composites and base alloy Al7075 has been compared. The fiber length distribution, fiber breakage and fiber orientation are investigated to know the fiber behaviour in before and after hot extrusion. The tensile strength of the hot extruded billet are experimentally determined for different of extrusion ratios, and compared with theoretically calculated strength.

기 호 설 명	$l_i + dl_i$
A : 다이내의 임의점에서의 단면적	n : 측정횟수 ($i=1\sim n$)
dA : 다이내의 임의점에서의 미소단면적	N_i : 섬유길이 l_f 가 $l_i \leq l_f \leq l_i + dl_i$ 인 섬유의 수
A_0 : 압출전 단면적	N_f : 섬유의 측정 횟수에 대한 섬유의 길이분포
A_f : 압출후 단면적	P : 가압력
C : 적분상수	R : 압출비
d_f : 섬유의 직경	r : 다이의 중심에서 표면까지의 거리
D_1 : 다이 입구직경	r_0 : 다이 입구의 반경
D_2 : 다이 출구 직경	s_1, s_2, s_3 : 기울기
dr : 다이내에서 반경방향의 미소거리	t_m : 교반시간
l_a : 섬유의 평균길이	T_e : 압출온도
l_c : 섬유의 임계길이	V_f, V_m : 섬유와 기지재의 체적함유율
l_f : i 번째의 측정에 의한 섬유의 길이 ($l_i \leq l_f \leq$	V : 다이내의 임의위치에서의 압출속도
	V_0 : 입구에서의 압출속도(램속도)
	Z : 다이입구로부터의 거리
	Z_1 : 기울기 s_1 을 가지는 구간

*정회원, 부산대학교 정밀기계공학과

**정회원, 부산대학교 기계공학과

***부산대학교 대학원

- Z_2 : 기울기 s_2 를 가지는 구간
- α : 다이 반각
- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도
- σ_{uf} : 섬유의 파단응력
- σ_{um} : 기지재의 인장강도
- σ_c : 복합재료의 인장강도
- σ_Y : 기지재의 항복응력
- τ_Y : 계면 전단응력 ($\sigma_Y/2$)

1. 서 론

단섬유 및 입자분산강화형 금속복합재료는 비강도, 비탄성 이외에 내열성, 내마모성, 열적 안정성이 우수한 동시에 압출, 압연, 단조등과 같은 2차가공이 가능한 복합재료이다. 또한 단섬유는 강화재 가격이 장섬유에 비하여 저렴하고, 기지재와의 혼합과정이 장섬유에 비하여 용이하기 때문에 소성가공뿐만 아니라 연비효율의 향상을 위한 경량화 부품의 제조 측면에서 용탕단조, 다이캐스팅 및 원심주조등에 이용되고 있다.

내마모성, 내열특성등을 만족하는 경량화 부품의 개발에 있어서 기지재에 SiC, Gr, Al_2O_3 의 입자 및 단섬유등을 첨가하여 기계적 특성을 부여하고 있다. 금속복합재료의 성형공정에 관한 연구 내용은 기지재의 종류에 미치는 강화재의 배향상태, 인장강도가 온도 및 강화재의 체적 함유율에 미치는 영향, 계면조직의 관찰, 섬유와 기지재의 혼합방법, 복합재료의 열간가공성 및 강화기구등을 주 내용으로 하고 있다. 소성가공이 가능한 금속복합재료는 압출, 압연 및 단조등과 같은 2차가공 공정의 응용에 의하여 강화재의 배향상과 계면접합강도등을 향상시키고 있다. 최근, 압출공정에 관한 연구동향으로서 Kaimer⁽¹⁾은 Mg분말과 Al_2O_3 의 단섬유를 혼합하여 빌렛을 제조한 후 압출실험을 하여 섬유의 배향성 및 기계적 성질을 조사하였다. Imai⁽²⁾는 용탕단조법에 의하여 제조되어진 $Al_2O_3/AC8A$ 의 복합재료에 대한 열간압출가공의 가능성을 제시하여 2차가공에 의한 복합재료의 성질변화에 대하여 검토하였다. 위의 방법외에 Brusethaug⁽³⁾, Jeffery⁽⁴⁾, Greefield⁽⁵⁾ 및 Hains⁽⁶⁾는 각각 용융교반법(melt stirring method)에 의하여 기지재에 Sic, Al_2O_3 입자 및 위스카등을 분산시켜 복합재를 제조한 후 압출가공공정에서 발생하는 다이의 마모현상,

기계적 성질 및 계면반응등을 관찰하였다. M. Kiuchi⁽⁷⁾ 등은 SiC입자와 세라믹단섬유등을 분말상태인 Al5056기지재에 혼합한 수 압출공정에 의하여 섬유의 배향을 제어한 후 반응용영역온도에서 단조 및 압출공정을 행하여 섬유의 배향 및 파단, 계면관찰 및 기계적 성질등을 조사하였다. 위에서 열거한 바와 같이 단섬유를 이용한 금속복합재료의 제조공정은 대부분 용탕단조법에 의하여 제조하고 있으나, 섬유의 배향을 완전히 1차원으로만 제어할 수 없으며, 또한 용융금속이 섬유 및 입자사이를 침투할 수 있는 거리가 제한되어 있기때문에 제품의 형상이 복잡하고 제품의 두께가 두꺼운 경우는 응용이 불가능하다. 용융교반법은 교반중 강화재와 기지재사이의 밀도차이로 인한 입자의 침전및 부상 때문에 제품제조공정중 입자의 균일분산이 어렵다. 반응용상태의 기지재에 강화재를 분산시키는 방법은 기지재의 결정립미세화, 내부결함 및 편석의 감소, 양호한 접합성때문에 압출용 빌렛제조에 적합하나 기지재와 강화재의 분산실험중 섬유가 파단되며, 또한 계면접합 및 배향성의 개선을 위하여 압출가공을 행할때도 압출비에 따라서 섬유가 파단되기 때문에 1차가공과 2차가공의 공정중 섬유의 파단 및 배향성등을 공정변수와 관련지어 검토하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 반응용가공법에 의한 빌렛제조공정과 제조되어진 단섬유금속복합재료의 압출가공에 있어서 압출비가 기계적성질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 압출전후에 있어서 압출비가 섬유의 파단, 배향성 및 기계적 성질등과의 상호관계를 정량적으로 검토하고자 한다.

2. 단섬유와 기지재의 분산실험

2.1 기지재와 강화재의 실험재료

본 실험에서 사용한 기지재의 금속조성은 Al-Zn-Mg-Cu에 Si가 0.4 wt% 첨가되어 있고, 액상선 온도 T_L 및 고상선온도 T_S 가 각각 635°C, 477°C인 Al7075를 사용하였다. 강화재로 사용된 단섬유는 평균입경이 약 3 μm , 길이가 70 μm 인 RF Grade로서 SAFFIL제의 $\delta-Al_2O_3$ 을 사용하였다.

2.2 교반법에 의한 균일분산 실험장치

단섬유강화형 금속복합재료를 제조하는 데는 기지재료내에 강화재를 균일하게 분산시키는 것이 제일 중요하다. 따라서 본 연구에서는 기지재료내에

강화재를 균일하게 분산시켜 금속복합재료를 제조하는 실험장치를 Fig.1과 같이 설계 제작하였다.

이 실험장치는 전기로 내에서 도가니로의 온도를 일정하게 제어하면서 교반을 할 수 있도록 제작되어 있다.

교반기(agitator)의 위치가 입자의 균일분산에 미치는 영향을 고려하여 교반기가 상하 운동을하도록 하였다. 그리고 Ar가스의 주입구와 관찰구를 각각 설치하여 산화방지 및 교반시 내부를 관찰할 수 있도록 하였다. 섬유주입은 SUS304으로 제작한 경사진 깔대기형의 주입구를 통하여 섬유를 주입하였으며 흑연도가니로의 중심에 주입될 수 있도록 하였다. 그리고 교반용 임펠라는 직경 50 mm의 SUS316으로 제작했으며, 날개각은 30°, 날개수는 2개로 하였다.

기지재에 단섬유를 포함하고 있는 반응용상태의 금속복합재료를 전기로로 부터 탈거하여 압출용 빌렛트를 제조하기 위하여 도가니로를 전기로 하부로 부터 분리시킬 수 있도록 하부에도 이송장치를 부착하였다.

2.3 실험방법 및 결과

적정량의 기지재료를 전기로 내에 설치한 도가니로에서 용해한 후, 전기로에서 임펠라를 도가니로에 삽입함과 동시에 아르곤가스를 주입하면서 교반기를 400rpm으로 회전 시켰다.

교반중 도가니내의 기지재의 온도 T_L 은 용융온도를 기준으로 하여 $\pm 5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였으며, 기지재가 실험온도로 조정되면 $600 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 예열한 알루미나를 Fig.1에 표시한 알루미나 주입구(alumina injection chamber)에 넣은 다음 Ar가스의 압력으로 교반중인 기지재료의 내부에 균일 분산시킨다. 균일하게 분산시키기 위하여 3~5분간 임펠터를 상하로 이동시키면서 강화재를 기지재료 내에 주입하는 방법을 이용하였다. 3~5분 동안에 강화재를 기지재에 주입한 후 균일분산을 위하여 교반시간은 13 min 정도로 하였다.⁽⁸⁾ 이때 반응용상태의 금속복합재료내에 있는 가스 및 기공을 제거하기 위하여 용융점까지 재용융한 후 가스주입구를 도가니속에 2~3분간 주입하여 가스 및 기공이 소멸되도록 하였다.

Fig.2은 단섬유가 기지재내에 분산되어진 반응용상태의 금속복합재료를 이용하여 압출용 빌렛트를 제조하는 실험장치이다. 이때, 사용된 금형은 직경

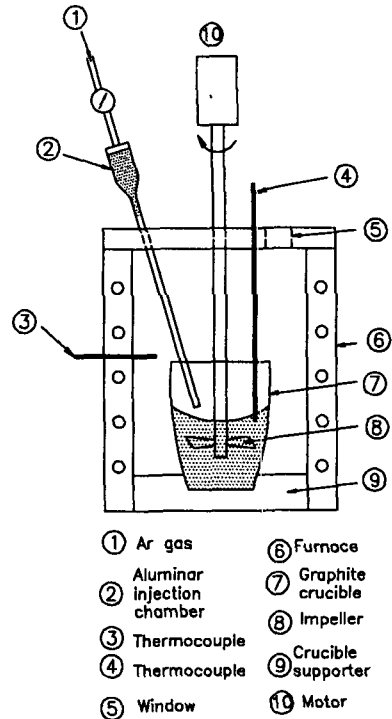


Fig. 1 Schematic diagram showing experimental apparatus stirring method used for homogeneous dispersion of Al_2O_3 short fiber in molten metal

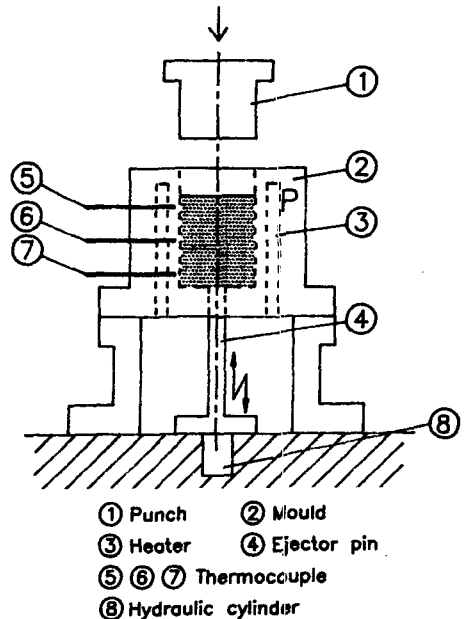
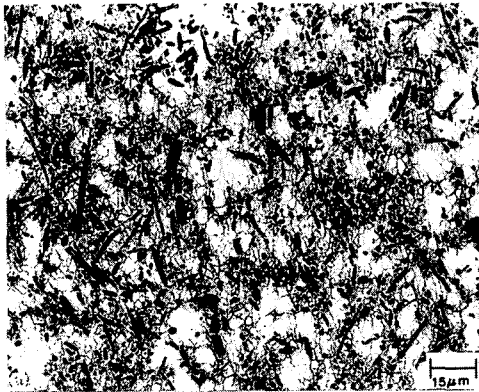
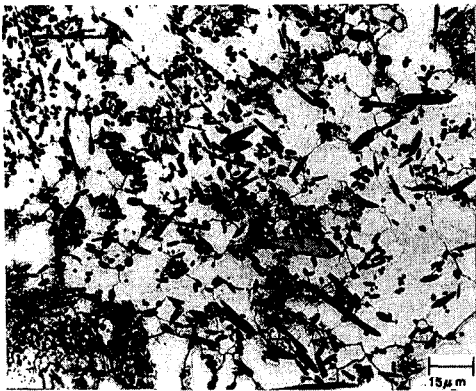


Fig. 2 Schematic diagram showing experimental apparatus stirring method used fabrication of hot extrusion billet by squeeze casting



(a) Central portion of cross section area ($r=0$ mm)



(b) Edge portion of cross section area ($r=17$ mm)

Fig. 3 Dispersion state of Al_2O_3 short fiber in each cross section of hot extrusion billet produced by stirring method and squeeze casting

과 길이가 각각 40 mm, 100 mm SKD 61로 제작했으며 내면 2 mm의 위치에서 3개의 $\phi 1.6$ mm의 CA열전대에 의하여 온도를 측정했다. 이때 금형온도가 모듈더 전체에 걸쳐서 일정하게 유지되도록 6개의 카트릿지형 히터가 금형태에 균일한 간격으로 설치되어 있다.

Fig.3(a) (b)는 교반시간 $t_m=13$ min, 섬유유 함유율 $V_f=15\%$, 가압력 $P=10$ MPa, 금형온도 $T_M=200^\circ C$ 인 경우 빌렛트의 횡단면과 종단면부분에서의 섬유유 분산상태이다. 발표되어진 분산상태⁽⁶⁾와 비교한 결과 빌렛트의 중심으로부터 17.0 mm의 위치인 횡단면의 끝단부분을 제외하고는 전체적으로 비교적 균일하게 분산되어 실험의 재현성이 확인되었다. 기공(porosity) 등이 관찰되지 않았는데, 이

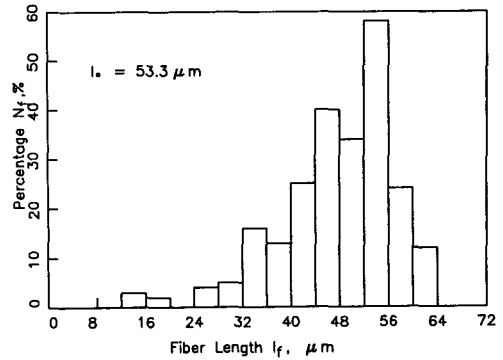


Fig. 4 Histogram of length alumina fiber extracted from hot extrusion billet by stirring method and squeeze casting

것은 재용해후 2~3분간 주입한 Ar가스가 기공을 방출시켰기 때문으로 생각된다.

압출전후에 있어서 섬유유의 길이를 측정하기 위하여 빌렛트 및 압출품을 직경과 길이가 각각 5 mm 가 되도록 기계가공한 후 염산과 질산의 비율 3:1로 한 수용액에서 6시간정도 보관한 후 기지재를 추출한 후 시료를 자연건조시킨 다음 SEM관찰에 의하여 섬유유의 길이를 측정하였다. 이때 기지재내에 섬유유를 완전히 추출할 수 없었지만, 기지재와 섬유유가 혼합되어 있는 분말상태의 모양으로 되어 SEM관찰에 의하여 섬유유의 길이를 측정하는데는 큰 어려움이 없었다. 이때 본 논문에서 사용한 섬유유의 평균길이 l_a 를 다음과 같이 정의하였다.

$$l_a = \frac{\sum_{i=1}^n (l_i \sim l_i + dl_i) N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

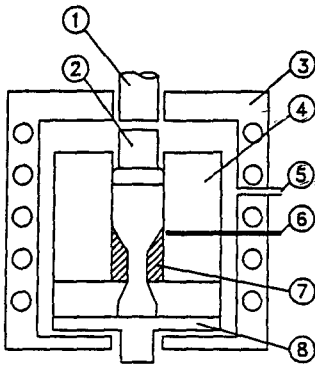
$$(l_i \leq l_r \leq l_i + dl_i) \tag{1}$$

Fig.4는 시편의 중앙부분에서 채취한 직경×길이 (5×5 mm)의 시료에서 측정되어진 섬유유의 길이를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 교반전 70 μm 의 단섬유가 교반중 파단되어 섬유유의 길이 분포는 12~64 μm 정도이며, 평균길이 l_a 는 53.3 μm 로 측정되었다.

3. 열간압출실험

3.1 실험 방법

Fig.5은 최대하중 25TON의 인장시험기(TEN-SILON)에 설치한 열간압출용 실험장치의 개략도



- ① PUNCH ② DUMMY BLOCK
- ③ FURNACE ④ CONTAINER
- ⑤ Ar GAS GATE ⑥ THERMOCOUPLE
- ⑦ DIE ⑧ DIE HOLDER

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental apparatus for hot extrusion

이다. 고압응고법에 의하여 제조되어진 빌렛트를 $\phi 35 \times 60$ mm로 절삭하여 사용하였으며, 콘테이너 속에 직경 1.6 mm의 CA열전대를 내부벽면에서 2 mm까지 깊이삽어, 압출종료때까지 연속적으로 온도를 기록 제어하였다. 실험온도에서 20분간 유지한다음 Ar가스의 주입과 동시에 압출실험을 하였다. 압출온도는 다이반각, 압출속도 및 장치의 최대용량의 측면에서 $400 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 일정하게 하였다. Fig.6은 압출다이의 외경을 나타내고 있으며, Table 1은 다이의 치수와 압출비를 나타낸것이며, 압출비 R 을 다음과 같이 정의하였다.

$$R = \frac{A_0}{A_f} \quad (2)$$

압출속도는 강화재의 분산상태가 표면결함에 미치는 영향을 파악하고, 또한 압출재료의 표면에 결함이 나타나지않은 예비 실험결과에 의하여 구하였으며, 사용된 윤활재는 Grease oil에 흑연분말을 1:1 체적비로 동일하게 섞어서 사용하였다.

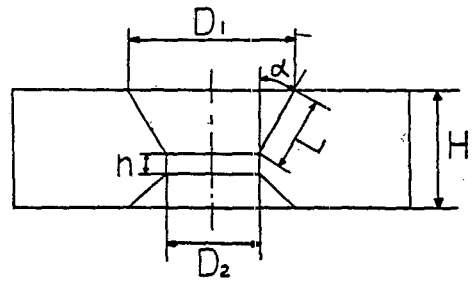


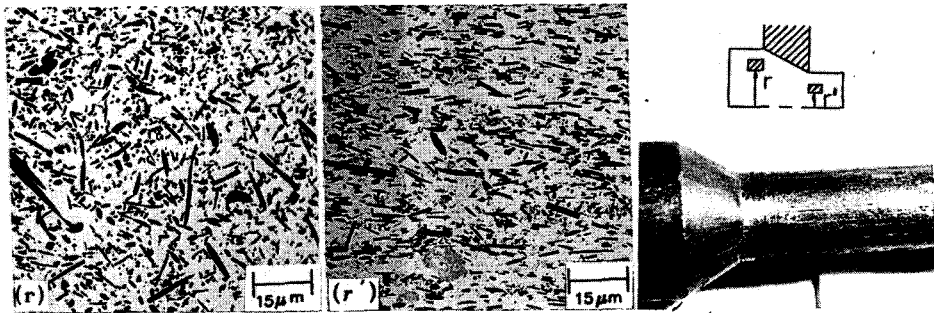
Fig. 6 The die shape and dimension of hot extrusion for metal matrix composites

3.2 실험결과 및 고찰

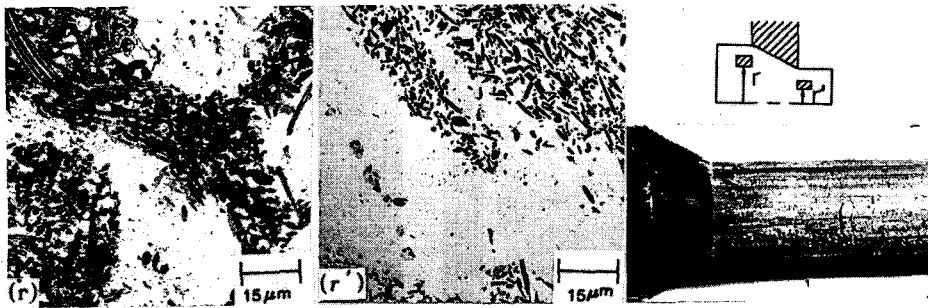
Fig.7(a) ~ (b)는 압출온도 $T_e = 400 \pm 3^\circ\text{C}$, 섬유 함유율 $V_f = 15\%$, 압출비 $R = 3.0$, 압출속도 $V_o = 2$ mm/min로 일정할 때 압출전 기지재내에서 강화재의 분산상태가 표면결함에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압출품의 외관과 압출전후에 있어서 강화재의 분산상태를 나타낸 것이다. Fig.7(a)의 경우는 Fig.3(a) (b)의 조건에서 제조하였으며, Fig.7 (b)는 Fig.7(a)에 비하여 교반시간이 부족하여 충분히 분산이 되지 않는 $t_m = 5 \sim 8$ min 정도로 하였을 때 제조한 빌렛트이다. 강화재가 균일하게 분산되지 않은 빌렛트의 경우가 표면에 미소한 균열현상을 보이고 있다. 표면결함의 원인은 섬유의 응집현상때문에 섬유와 기지재사이에서의 결합력의 저하가 표면결함의 원인이 됨을 알 수 있었다. 강화재가 균일하게 분산된 상태에서도 표면에 결함이 나타나는 임계압출속도가 존재할 것으로 생각되지만 본 연구에서는 Fig.3(a) (b)와 Fig.7(b)의 제조 조건에서 제조한 빌렛트를 압출속도 $V_o = 0.5$ mm/min으로 하였을 때는 강화재의 분산상태와는 관계없이 표면에 결함이 관찰되지 않았다. $V_f = 0\%$ 인 경우, 압출조건을 똑같이하고, $V_o = 0.5 \sim 200$ mm/min의 범위내에서도 표면결함이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 따라서 복합재료의 압출공정에서 표면결함의 주원인은 압출속도보다 강화재의 분산상태가 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

Table 1 Die dimension for hot extrusion of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ metal matrix composites

Die No	α (°)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	L (mm)	h (mm)	H (mm)	Extrusion Ratio (R)
1	20	35	26.1	15	4	25	1.8
2	30	35	20.2	15	4	25	3.0
3	40	35	10.2	15	4	25	11.9

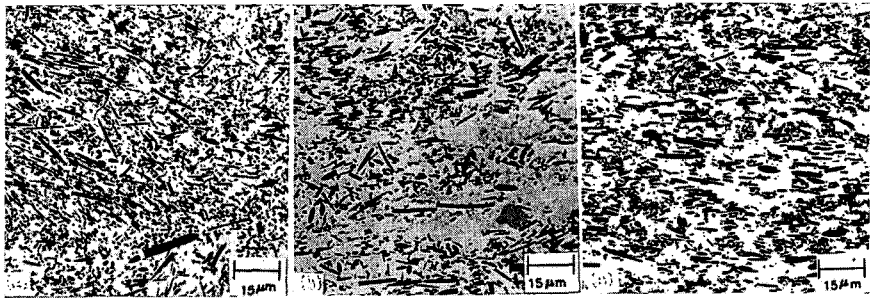


(a) optical micrograph structural at the $r = 17.0 \text{ mm}$, $r' = 5 \text{ mm}$



(b) optical micrograph structural at the $r = 17.0 \text{ mm}$, $r' = 5 \text{ mm}$

Fig. 7 (a) (b) The effect of distribution condition of Al_2O_3 short fiber on surface crack on extruded billet



(a) $R = 1.8$

(b) $R = 3.0$

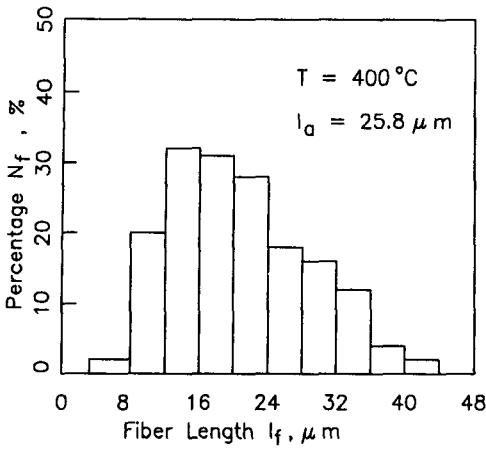
(c) $R = 11.9$

Fig. 8 (a) (b) (c) Variation of fiber orientation in longitudinal cross section extruded billet with increasing of extrusion ratios in $V_0 = 0.5 \text{ mm/min}$

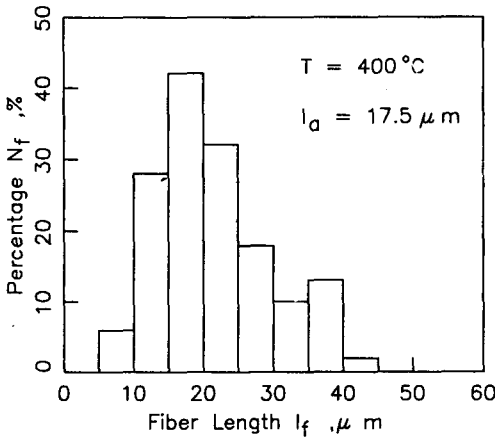
Fig.3(a) (b)의 균일분산조건에서 제조한 빌렛트를 직경 35 mm까지 기계가공한 후 압출비의 변화에 대한 압출실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig.8(a) (b) (c)는 압출온도 $T_e = 400 \pm 3^\circ\text{C}$, 압출속도 $V = 0.5 \text{ mm/min}$, 섬유함유율 $V_f = 15\%$ 인 경우 압출품 단면의 중앙부분($r = 0 \text{ mm}$)에서 압출비 R 의 변화에 따른 섬유의 배향성을 나타내고 있다.

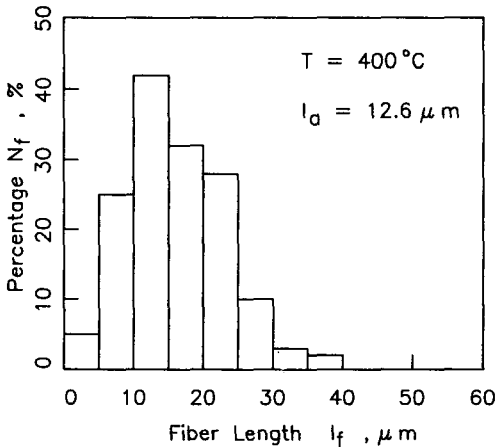
압출비가 클수록 섬유의 배향성이 향상됨을 볼 수 있었다. 위의 원인은 압출비의 증가함에 소성영역 내에서 기지재의 소성변형률이 증가하기 때문이다. Fig.9(a) (b) (c)는 압출조건이 $T_e = 400^\circ\text{C}$, $V_0 = 0.5 \text{ mm/min}$ 인 경우 압출비의 변화에 대한 섬유의 파단상태에 관한 히스토그램을 나타낸 것이다. 여기서 y 축의 N_f 는 섬유의 측정횟수에 대한 섬유의 길이 분포를 나타낸 것이다. 압출비의 증가에 따라



(a) $R=1.8$



(b) $R=3.0$



(c) $R=11.9$

Fig. 9 (a)(b)(c) Histograms of length of aluminar short fiber extracted form extruded billet with various extrusion ratio

섬유의 파단현상이 증가됨을 알 수 있었다. 압출비가 최대인 11.9인 경우는 섬유의 평균길이 l_a 가 12.6 μm 정도로 측정되어 섬유파단율이 82%에 달하였다.

압출비의 변화에 따른 섬유의 파단이 금속복합재료의 강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 섬유의 임계길이 l_c 를 기준으로한 복합재료의 강도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$l_c = \frac{\sigma_{ur} d_f}{2\tau_y} \tag{3}$$

$$\sigma_c = V_f \sigma_{ur} \left(1 - \frac{l_c}{2l_a}\right) + V_m \sigma_{um} \tag{4}$$

: $l_a \geq l_c$

$$\sigma_c = V_f \frac{\tau_y l_a}{d_f} + (1 - V_f) \sigma_{um} \tag{5}$$

: $l_a < l_c$

$\sigma_{ur} = 2000 \text{ MPa}$, $d_f = 3.0 \mu\text{m}$ 및 $\tau_y = 165 \text{ MPa}$ ($\sigma_y/2$)일 때 l_c 는 18.2 μm 이므로 $R=1.8$ 일 때는 식(4)에 의하여 강도를 계산할 수 있다. σ_{um} 은 $V_f = 0\%$ 인 경우 Fig. 7(a)의 압출조건에서 구한 압출품을 인장시험에서 구한 강도 553 MPa을 이용하였다. 이때 시편의 초기는 표점거리 25 mm이고, 직경은 35 mm인 인장시편을 이용하여 MTS에서 구하였다. σ_{ur} 의 값은 측정이 어려워 SAFFIL의 섬유의 데이터⁽¹⁰⁾를 이용하였다.

Fig. 10은 섬유의 파단이 강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 인장시험에 의하여 구한 강도를 식(4)(5)에서 구한 결과와 비교한 것이다. $R=1.8$ 와 11.9일 때에는 실험치와 이론치 사이에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 위의 원인은 Fig. 8(a)에서 보여주는 바와같이 압출비가 적으면, 섬유의 배향이 불충분하며, $R=11.9$ 인 경우는 압출비가 계면접합상태에 어느 정도 영향을 미치는가는 알 수 없지만 압출공정중 섬유의 파단이 증대되어 섬유의 평균길이 l_a 가 임계길이보다 적기 때문인 것으로 생각된다. 복합재료의 최대강도를 얻기 위해서는 압출속도, 압출온도, 압출비 및 다이의 형상등을 종합적으로 고려하여야 한다. 따라서, 위의 가공조건을 전부 하나의 변수로 나타낼 수 있는 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 를 일정하게 하면 섬유의 파단이 최소화되어 강도가 향상될 것으로 생각된다. 왜냐하면, 압출공정중 일정한 속도하에서 $\dot{\epsilon}$ 를 일정하게 하기 위해서는 다이의 형상이 원추형다이의 경우는 불가능하며, 또한 소성변형영역내에서 상당변형률분포가 꼭

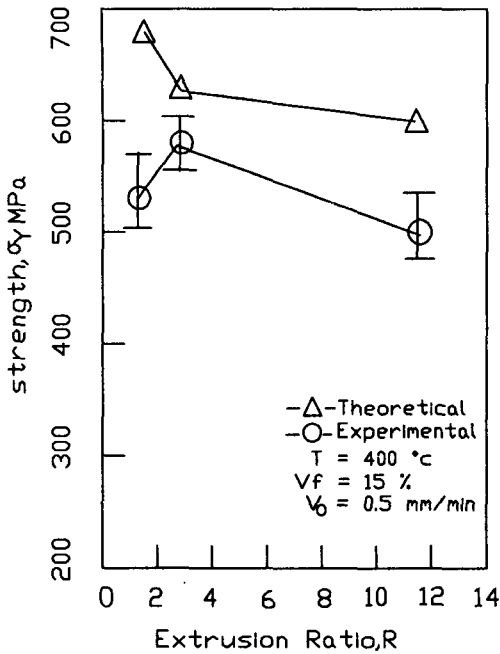


Fig. 10 Relational between extrusion ratio and pressure

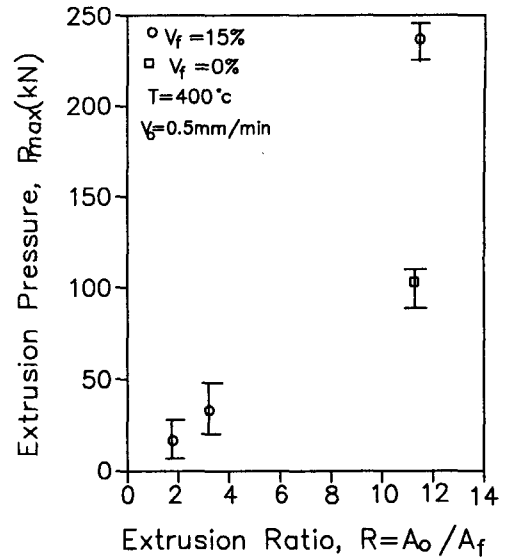


Fig. 11 Relation between extrusion ratio and extrusion pressure

면다이보다 크기 때문에 섬유유 의 손상에 크게 영향을 미치기 때문이다.⁽¹¹⁾

Fig. 11은 압출온도 $T_e=400\pm 3^\circ\text{C}$, 압출속도 $V_0=0.5\text{ mm/min}$, 섬유함유율 $V_f=15\%$ 일때 압출비 R과 최대압출력 P_{max} 는 각각 236.4 kN, 103.0 kN 정도이다. 압출비와 섬유함유율의 변화에 따른 압출력의 차이는 Al_2O_3 단섬유유 의 분산에 의한 강화효과와 열간압출시 기지재와 단섬유유 의 열팽창 차이로 오인한 전위밀도의 증가에 기인한 강화효과로 생각된다.⁽¹²⁾

Fig. 12(a)(b)는 $V_f=15\%$, $R=3.0$, $T_e=400^\circ\text{C}\pm 3$, $V_0=0.5\text{ mm/min}$ 일 때 압출되어진 빌렛의 표면부분($r=17\text{ mm}$)과 중앙부분($r=0\text{ mm}$)에서의 섬유유 의 배향 및 파단상태를 나타낸 것이다. 위의 현미경사진에서 섬유유 의 경이 동일함에도 직경의 차이가 나타나는데(섬유유 의 평균직경은 $3\ \mu\text{m}$) 이것은 섬유유 의 경이 일정하지 않기 때문으로 생각된다.⁽¹³⁾ 소성변형영역에서 동일단면에서 축중심에서 다이표면까지의 변형률속도가 증가함에도 불구하고 다이근처에 가까운 표면부($r=17.0\text{ mm}$)에서는 중앙부분($r=0\text{ mm}$)보다 섬유유 의 파단이 현저하게 감소되었다. 위의 원인은 표면부에서는 중앙



(a) die vicinity



(b) central portion

Fig. 12 (a)(b) Fiber breakage for $T_e=400^\circ\text{C}\pm 3$, $V_0=0.5\text{ mm/min}$, $R=11.9$ and $V_f=15\%$ in longitudinal cross section

부분에 비해 다이벽면에서 받은 응력은 크지만 섬유
의 배향이 압출방향과 거의 평행하기 때문에 섬유는
기지재의 금속으로부터 곁힘응력을 받기가 어려우
며, 또한 중심부에서는 기지재가 섬유에 가하는 응
력은 적으나 섬유의배향성이 표면보다 좋지 않아
섬유가 곁힘응력을 받기가 쉽기 때문에 섬유의 파단
이 현저하게 증가할 것으로 생각되기 때문이다.

3.3 고찰

압출비는 섬유의 파단과 기계적 성질에 크게 영
향을 미치며 또한, 기지재의 소성흐름과 변형률속
도를 결정하는 중요한 요소이다.

소성변형을 받고 있는 복합재료가 임의의 형상의
다이내에서 속도 V , 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 가 일정하다고
가정하면, Fig. 13으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$dT = \frac{dZ}{V} \tag{6}$$

$$d\epsilon = \frac{dA}{A} = -\frac{2dr}{r} \tag{7}$$

식(6), (7)로 부터 $\dot{\epsilon}$ 를 다음과 같이 표시할 수
있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{2V}{r} \frac{dr}{dZ} \tag{8}$$

비압축성재료로 가정하면, 식(8)을 다이입구의
속도 및 반경, V_0, r_0 으로 나타내면,

$$\dot{\epsilon}(z) = -\frac{2r_0^2 V_0}{r^3} \frac{dr}{dZ} \tag{9}$$

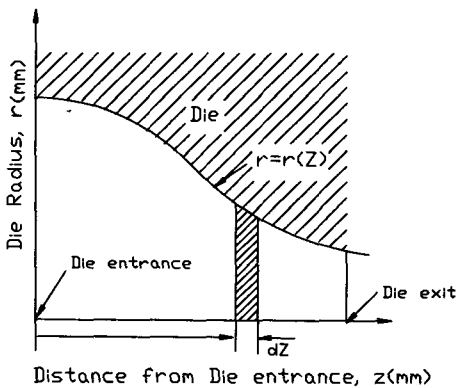


Fig. 13 Cylindrical rod being drawn through an arbitrary shape die and an element in the reduced section

본 연구에서 실험을 행한 원추형다이의 경우 Z
위치에서의 다이반경 r 과 r_0 사이의 관계는

$$r = r_0 - Z \tan \alpha \tag{10}$$

이므로 식(9), (10)으로 부터 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 는 다음
과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{2r_0^2 V_0 \tan \alpha}{(r_0 - Z \tan \alpha)^3} \tag{11}$$

Fig. 14는 식(11)을 이용하여 구한 압출비 R 의
변화에 대한 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 를 나타낸 것이다. R
이 클수록 다이 내부에서의 $\dot{\epsilon}$ 의 변화가 크게 증가
함을 알 수 있다. 특히, $Z=14.4$ mm인 출구부분
에서의 $\dot{\epsilon}$ 의 변화는 $R=11.9$ 일 때가 $R=1.8$ 에 비
하여 최대 268배 정도로 크다. 따라서, 섬유의 파

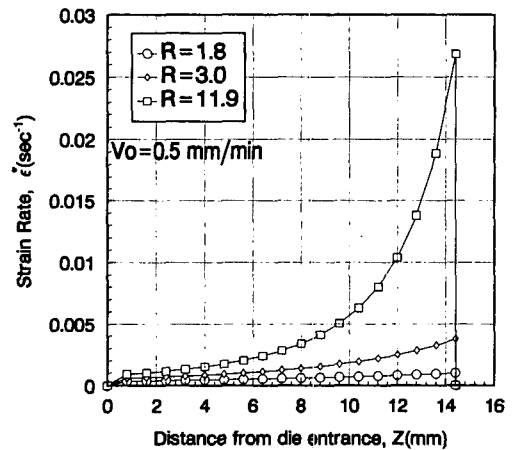


Fig. 14 Distribution of strain rate from extrusion entrance $Z=0$ mm to extrusion exit $Z=14.4$ mm

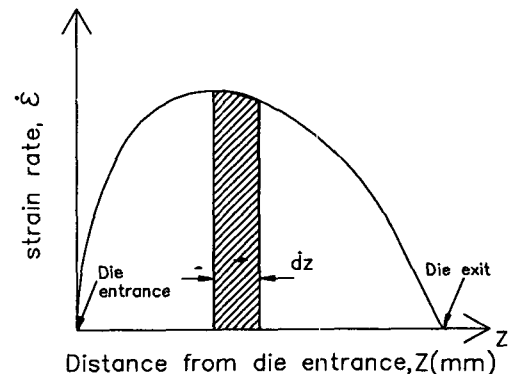


Fig. 15 Generalized strain rate distribution in extrusion process

단은 압출이 진행됨에 따라서 점차적으로 증가되어 질 것으로 생각된다.

압출공정 중 소성변형률의 분포를 Fig. 15와 같이 일반적으로 나타낼 수 있다. 섬유유 의 파단을 최소화하기 위하여 $\dot{\epsilon}$ 가 다이영역내에서 일정하게 되도록 다이형상을 설계하는 것이 중요하다. 그러나, 압출공정 중 $\dot{\epsilon}$ 의 변화를 일정하게 하기 위해서는 다이의 가공상의 어려움때문에 다이 입구, 중간 및 출구부분에서 각각 $\dot{\epsilon}$ 의 기울기를 고려하여 Fig. 16과 같이 $\dot{\epsilon}$ 의 변화를 표시할 수 있다.

소성변형 중 재료는 Fig. 16과 같이 각 영역내에서 $\dot{\epsilon}$ 의 변화를 고려한 다이형상을 결정하기 위하여 비 압축성이라고 가정하면, Fig. 16의 각영역에서 $\dot{\epsilon}$ 의 분포를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}(Z) &= S_1 Z \\ \dot{\epsilon}(Z) &= S_1 Z_1 + S_2 (Z - Z_2) \\ \dot{\epsilon}(Z) &= S_1 Z_1 + S_2 (Z_2 - Z_1) + S_3 (Z - Z_2) \\ &: 0 \leq Z \leq Z_1 \\ &: Z_1 \leq Z \leq Z_2 \\ &: Z_2 \leq Z \leq Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

식(9)를 변형하여 $\dot{\epsilon}$ 를 다이의 반경 r 로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{r_0^2 v_0} \int \dot{\epsilon} dz + C \quad (13)$$

Fig. 16의 각 영역에서 $\dot{\epsilon}$ 을 일정하게 하기 위한 다이의 직경을 (12), (13)식에 의하여 표시하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r^2} &= \frac{1}{r_0^2} \frac{Z^2(R-1)}{Z_1(1-Z_1+Z_2)} + 1 \\ &: 0 \leq Z \leq Z_1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r^2} &= \frac{1}{r_0^2} \frac{(2Z-Z_1)(R-1)}{(1-Z_1+Z_2)} + 1 \\ &: Z_1 \leq Z \leq Z_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r^2} &= \\ \frac{1}{r_0^2} &\left[\frac{[-Z_1(1-Z_2) - Z_2^2 + 2Z - Z^2](R-1)}{(1-Z_2)(1-Z_1+Z^2)} \right] + 1 \\ &: Z_2 \leq Z \leq Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

여기서, $\dot{\epsilon}$ 가 일정한 다이를 설계하기 위해서는 설계자가 Z_1, Z_2, r_0 및 R 등의 변수를 결정하여야 한다.

Fig. 17은 $Z_1=1.49, Z_2=0.92$, 및 $2r_0=35$ mm인 경우 R 의 변화에 대하여 $\dot{\epsilon}$ 가 일정하게 되도록 설

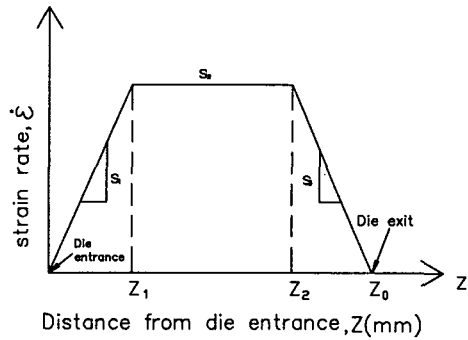


Fig. 16 Idealized strain rate distribution for each zone in extrusion process

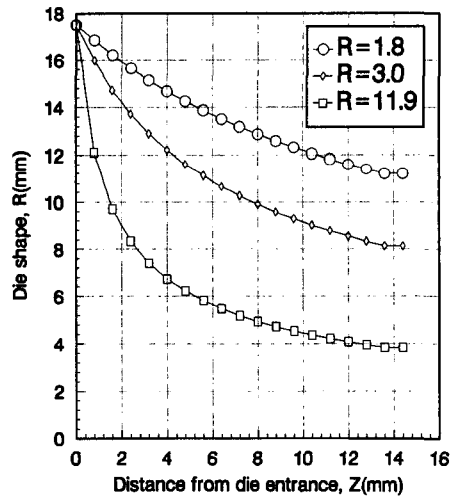


Fig. 17 Die shape for idealized strain rate distribution for $Z_1=0.1$ mm, $Z_2=14.08$ mm, $Z_0=14.4$ mm and $V_0=0.5$ mm/min

계한 다이의 형상을 나타낸 것이다. $\dot{\epsilon}$ 가 일정하게 되도록 압출가공을 하기 위해 R 이 클수록 다이의 형상변화를 크게 하여야 함을 알 수 있다. 향후 다이 형상의 변화에 따른 금속복합재료의 열간압출의 이론해석과 Fig. 17에서 보여주는 압출다이를 이용하여 변형률속도를 가능한 일정하게 되도록 하는 열간 압출의 실험을 통하여 강도를 예측하여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

(1) 용융상태의 기지재내에 길이 $70 \mu\text{m}$ 의 단섬유를 균일하게 분산시킬 수 있는 교반조건을 확립

하여 평균길이가 53.3 μm 인 압출용 빌렛트를 가압 응고법으로 제조하였다.

(2) 열간 압출공정에서 섬유 파단은 다이표면보다 단면의 중앙부분에서 더 많이 일어난다.

(3) 압출비의 증가에 따라 섬유의 배향은 향상되었으나, 오히려 섬유의 파단이 증가하여 기계적 성질이 감소함을 알 수 있었다.

(4) 복합재료의 압출공정에 있어서 표면에 나타나는 미소균열은 압출속도보다 강화재의 분산상태에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 1990년도 한국과학재단의 기초연구비(과제번호 901-0907-029-2) 지원에 의한 결과로써 이에 감사의 뜻을 포함한다.

참고문헌

- (1) Kaimer, K.U. and Tertel, A. 1991, "Extrusion of Short Fiber Reinforced Magnesium Composites," RISO Int.Symp.on Materials Science, ed. N.Hansen, et.al, pp. 435~440.
- (2) Imai, T. Nishida, Y. Matsubare, H. Shirayanagi, I. and Mabuchi, M. 1989, "Hot Extrusion of aluminar Short Fiber Reinforced Aluminar Composites," J.of the JSTP.30-346, pp. 1540~1546.
- (3) Brusethaug S. and Resio O, 1991, "Extrusion of SiCp Reinforced Al-Alloys," RISO Int. symp. on Materials Science, ed N.Hansen et al, pp. 247~254.
- (4) Jeffery, P.W. and Holcomb, S. 1990, "Extrusion of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites," Proc. of Int.Conf. on Fabrication of Particulate Reinforced Metal Composites, Montreal 17-19 sept. ASM Int. pp. 181~186.
- (5) Greenfield, I.G. Orthlieb, F.L. 1991, "Reinforced of SiC Whiskers in Aluminum at Different Stage of Extrusion," 8th. Int. Conf. Composite Materials, 17-E-3
- (6) Hains, R.W., Morris P.L. and Jeffrey, P.W. 1988, "Extrusion of Aluminum Metal Matrix Composites," Proc. of Int.Symp. Advanced Structural Materials, ed, D.S. Wilkinsor, pp. 53~60.
- (7) Kiuchi, M., Sugiyama, S., Kawasaki N. and Hoshino, Y. 1989, "Mashy-State Process of Aluminum Alloy Composites Reinforced with Silicon Short Fibers," J. of the JSTP, vol 30, No.346, pp. 1524~1531.
- (8) 강충길, 김현우, 김영도, 1990, "반응고법에 의한 금속복합재료의 제조 및 성형시스템의 개발", 대한기계학회논문집 제14권 제3호, pp.581~593.
- (9) Mallick, P.K. "Fiber-Reinforced Composites," Marcer Dekker, INC. 1988, pp. 81~84
- (10) Everett, R.K. Arsenault R.J. ed., 1991, 'Metal Matrix Composites: Processing and Interface'. Academic Press, pp. 43~45.
- (11) 日本 塑性學會編, 1992, 押出し加工, コロナ社, pp. 43~45.
- (12) Arsenault R.J, and Shi, N. 1986, "Dislocation Generation Due to Differences Between the Coefficients of Thermal Expansion," Materials Science and Engineering, 81, pp. 175~187.
- (13) SAFFIL Aluminar Fiber, 1989, Catalogue