

## 論文

입자강화형 금속복합재료의 열간압출시  
강화재의 거동이 기계적 성질에 미치는 영향

강충길\* · 서영호\*\*

**The Effect of Reinforcement Behavior on Mechanical Properties  
in Hot Extrusion Process of Particles Reinforced  
Metal Matrix Composites**

C. G. Kang\* and Y. H. Seo\*\*

**ABSTRACT**

The  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles reinforced aluminum composites was fabricated by the compocasting method, and hot extruded at various extrusion ratios and temperature. The fabrication process of particles reinforced composites has been studied under two solid fractions for volume fractions 10 and 20%.

The metal matrix composites billet was extruded at temperature in the range of 400°C to 550°C at constant extrusion velocity defined as ram speed  $V_e=2\text{mm/min}$ . The extrusion processing improved the bonding between reinforcement and matrix. The effect of the lubrication conditions between composites and extrusion die on the surface phenomena of extruded metal matrix composites has been also investigated. Theoretical investigation performed by metal forming theory was adopted to understand a friction coefficient in the hot extrusion with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles reinforced composite materials. The experiments results between the extrusion load and ram displacement at hot extrusion show that the extrusion load decreased with increasing temperature and decreasing die angle.

The reinforcement distribution, their breakage and orientation have been investigated as a function of the variation of extrusion process parameters. The mechanical properties of composites were tested at room temperature to determine the effect of a hot extrusion.

**Key words :** Particles Reinforced Metal Matrix Composites(입자강화형 금속복합재료), Surface Crack(표면결함), Reinforcement Behaviour(강화재의 거동), Lubrication Condition(윤활조건), Die Design(다이설계)

\* 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 대학원

## 초 록

컴포캐스팅법을 이용하여 입자의 체적함유율이 각각 10%와 20%인  $Al_2O_3$  입자강화형 알루미늄 복합재료를 제조하였으며, 압출비와 압출온도의 변화에 따라서 열간압출실험을 하였다.

금속기지복합재료 빌렛은 램속도  $V_e = 2mm/min$ 의 일정한 압축속도는  $400 \sim 550^\circ C$ 의 온도범위에서 실험을 하였다. 압출된 금속기지복합재료의 표면 상태를 통해서 금속복합재료와 압축다이 사이의 윤활상태를 관찰하였다.  $Al_2O_3$  입자강화형 복합재료를 이용한 열간압출에서의 마찰계수를 알기 위하여 이론적인 고찰이 적용되었다. 열간압출에서 압출하중과 램 변위 사이의 실험결과를 압출온도가 증가할수록 그리고 다이각도가 감소할수록 압출하중이 감소하는 것으로 나타났다.

압출공정변수의 변화에 따른 강화재의 분산, 파단 및 회전 등을 관찰하였다. 복합재료의 기계적 성질에 대한 열간압출의 영향을 파악하기 위하여 상온에서 인장시험을 행하였다.

## 기 호 설 명

A	: 압출전 빌렛단면적( $mm^2$ )	$T_e$	: 압출온도( $^\circ C$ )
$A_0$	: 압출 전후의 빌렛단면적( $mm^2$ )	$T_L$	: 액상선 온도( $^\circ C$ )
$D_f$	: 압출후 빌렛직경(mm)	$T_S$	: 고상선 온도( $^\circ C$ )
$D_i$	: 압출전 빌렛직경(mm)	$V_e$	: 램 속도로 정의된 압출속도( $mm/s$ )
F	: 형상계수	$\bar{\sigma}_m$	: 평균변형저항(MPa)
P	: 압출력(kN)	$\bar{\epsilon}_m$	: 평균변형율
R	: 압출비( $A_0/A$ )	$\bar{\mu}$	: 마찰계수
$S_f$	: 고상율(%)	$\alpha$	: 압출다이반각

## 1. 서 론

강화재인 단섬유와 입자는 장섬유에 비하여 가격이 싸고, 비강도, 비탄성율, 내열성 및 내마모성이 우수할 뿐만 아니라 압연, 압출, 단조등의 2차가공이 가능하기 때문에 최종 부품의 모양에 가까운 금속복합재료의 부품을 제조할 수 있다. 2차가공을 하기 위한 금속복합재료의 제조방법은 휘스커나 단섬유등의 강화재를 금속분말과 균일하게 혼합하여 냉간 또는 열간 압축한 후 일정시간 동안 소결 성형하는 분말야금법과 유기 및 무기성형체를 사용하여 강화재를 예비성형체로 제조하여 용융된 금속을 침투시킨 다음 응고함으로써 제조하는 용탕단조법, 반응고 상태의 기지금속을 교반하면서 입자나 섬유를 첨가하여 분산된 조직을 얻는 반응용 가공법 등이 있다. 특히 반응용가공법은 응고중의

반응고상태의 기지금속을 강제 교반하면서 강화재를 첨가하므로, 기지금속과 젖음성이 좋지 못한 세라믹 강화재도 용이하게 첨가 및 분산시킬 수 있으며, 반응용 상태의 유동성을 이용하여 최종부품에 가까운 제품을 대량생산할 수 있다. 결정립의 미세화, 내부결함 및 편석의 감소, 공정단축, 금형의 수명연장 및 우수한 접합성 등을 얻을 수 있어 금속복합재료의 제조와 가공을 동시에 할 수 있는 성형방법이다. 소성가공이 가능한 금속복합재료는 압출, 압연 및 단조등과 같은 2차가공공정의 응용에 의하여 강화재의 제면접합강도와 금속복합재료의 인장강도를 향상시키고 있다. 최근, 압출공정에 관한 연구동향으로서 Kaimeia[1]은 Mg 분말과  $Al_2O_3$ 의 단섬유를 혼합하여 빌렛를 제조한 후 압출실험을 하여 섬유의 배향성 및 기계적 성질을 조사하였다. Imai[2]는 용탕단조법에 의하여 제조

되어진  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AC8A}$ 의 복합재료에 대한 열간압출 가공의 가능성을 제시하여 2차가공에 의한 복합재료의 성질변화에 대하여 검토하였다. Brusethaug [3], Jeffery [4], Greenfield [5], Hains [6] 및 Seo [7]는 각각 용융교반법(melt stirring method)에 의하여 기지재의  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자 및 휘스커 등을 분산시켜 복합재를 제조한 후 압출가공공정에서 발생하는 다이의 마모현상, 기계적 성질 및 계면 반응등을 관찰하였다. Kiuchi [8] 등은  $\text{SiC}$ 입자와 세라믹단섬유등을 분말상태인  $\text{Al5056}$ 기지재에 혼합한 후 압출공정에 의하여 섬유의 방향을 제어한 후 반응용영역 온도에서 단조 및 압출공정을 행하여 섬유의 배향 및 파단, 계면관찰 및 기계적 성질등을 조사하였다.

위에서 열거한 바와 같이 금속복합재료의 압출공정은 섬유의 배향성 제어, 2차가공후 기계적 성질 및 계면관찰 등에 관한 내용이 대부분이다. 압출공정에 있어서 복합재료의 표면과 기계적 성질에 결정적 영향을 주는 윤활 조건 및 압출온도 등이 강화재의 거동에 미치는 영향에 대해서는 거의 언급되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 반응용가공법에 의하여 첨가되어진 입자강화형 금속복합재료의 슬러리를 이용하여 압출용 빌렛트를 제조하고, 또한 제조되어진 금속복합재료의 압출공정의 변화에 따른 입자의 거동이 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압출전후에 있어서 입자의 분산상태를 관찰하였으며, 압출시 윤활조건에 따른 제품의 표면 특성 및 마찰계수를 예측하였다. 압출비와 압출온도의 변화에 따른 압출재의 유동상태와 압출력의 관계 및 기계적 성질등을 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 기지재의 금속은  $\text{Al-Si-Mg}$  합금으로써  $\text{Mg}$ 이 1% 이상으로써 알루미늄과 반응하여  $\text{Mg}$ 화합물( $\text{MgAl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_4$ )을 생성하여 젖음성이 향상되므로 금속복합재료의 제조가 용이한  $\text{Al6061}$ 을 사용하였다. 강화재는 직경이  $67\mu\text{m}$ 인  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 입자를 사용하였다.

기지재료내에 입자를 균일하게 분산시켜 금속복합재료를 제조하기 위한 실험 장치는 전기로 내에서 도가니로의 온도를 일정하게 제어하면서 교반을 할 수 있도록 제작된 장치를 이용하였다[9]. 교반기의 위치가 입자의 균일분산에 미치는 영향을 고려하여 교반기가 상하운동을 하도록 교반용 모터를 수직 이송장치에 부착하였다. 그리고 아르곤가스의 주입구와 관찰구를 각각 설치하여 산화방지 및 교반시 내부를 관찰할 수 있게 하였다. 입자주입은  $\text{SUS304}$ 로 제작한 경사진 깔대기형의 주입구를 통하여 입자를 주입하였으며, 흑연도가니로의 중심에 주입될 수 있도록 하였다. 기지재에 강화재를 균일하게 분산시키기 위한 교반용 임펠러는 직경 50 mm의  $\text{SUS316}$ 으로 제작하였으며, 날개각은  $30^\circ$ , 날개수는 3개로 하였다. 교반중 임펠러와 용탕사이의 마찰에 기인한 임펠러의 손상 및 마모현상을 방지하기 위하여 세라믹코팅재를 사용하여 임펠러의 손상을 보호하였다.

기지재인  $\text{Al6061}$ 을 아세톤으로 세척하여 불순물을 제거하고, 기지재를 전기로내에 설치한 도가니에 용해( $700^\circ\text{C}$ )한 후 아르곤가스를 주입하여 산화가 발생되지 않는 분위기를 형성하고, 임펠러의 회전수를 200 rpm부터 시작하여 점차 속도를 증가시켜 600 rpm까지 증가시켜 교반하였다. 교반을 시키면서 용탕의 온도를 액상선 온도이하로 하여  $S_f=10$ 과 17%의 고상율을 유지시키면서 반응용상태의 금속복합재료를 제조하였다. 이때, 고상율  $S_f$ 은 다음과 같이 정의하였다[10].

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

입자투입시 내열도가니에서 입자내의 습기를 제거하고 기지재의 온도변화를 방지하기 위하여  $650^\circ\text{C}$ 로 알루미늄 입자를 예열하였다. 적정한 고상율에 해당하는 온도로 용탕을 유지하고, 예열한 알루미늄 입자를 투입하면서 임펠러로 10분정도 교반하였다. 교반중에는 교반기를 상하운동시켜 알루미늄 입자가 균일하게 분산되도록 하였다. 이후 슬러리상태의 복합재를  $700^\circ\text{C}$ 로 재용해하여, 슬러리의 온도를 기지재의 용점 이상으로 상승시켜 유동성을 좋게

한 후, 10분 정도 재교반하여 200℃로 예열한 금형내에 주입한 후 40 MPa로 가압하면서 20초간 가압력을 유지하였다. 제조된 입자강화형 금속복합재료의 빌렛은  $\phi 44\text{mm}$ 의 원통형이고 높이는 부피에 따라 80~90mm이다. 제조되어진 빌렛을  $\phi 35 \times L60\text{mm}$ 로 절삭가공하여 열간압출실험을 하였다. 압출빌렛의 변수로서는 압출온도  $T_e=400\sim 550^\circ\text{C}$ 와 압출비  $R=1.8\sim 11.9$ 로 하였다.

압출시 복합재료의 표면이 윤활상태에 미치는 영향을 파악하기 위하여 압출윤활제는 보론 나이트라이드(Boron Nitride Spray)와 그리스오일(Grease Oil)에 흑연 분말(Graphite Power)을 체적비 1 : 1로 동일하게 섞어서 각각 사용하였다.

Fig. 1은 인장시험기에 설치한 열간압출 실험장치의 외관 사진이다. 압출실험은 먼저 윤활제를 빌렛, 다이 및 콘테이너에 골고루 바른 후, 전기로에서 다이 및 콘테이너의 온도를 실험온도까지 올린다. 펀치의 열에 의한 로드셀의 손상을 방지하기 위하여 냉각수를 흐르게 하였다. 실험시간의 단축을 위하여 다른 전기로에서 빌렛을 예열한 후 실험온도로 항상 일정하게 제어된 분위기 속에서 20분간 유지한후 압출실험을 하였다. 압출중 램의 속도(압출속도)를 2mm/min으로 하였으며, 압출가공이 끝날때까지 항온 유지가 되도록 온도를 제어하였다. 압출에 필요한 다이의 치수는 랜드부와 경사진 다이부의 길이를 각각 4, 15mm로 설계 제작하였다.

열간 압출실험한 입자강화복합재료는 열처리한

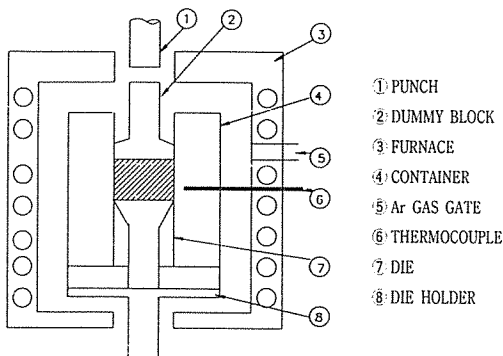


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for hot extrusion

후 1mm/min의 속도제어로 인장시험을 실시하였다. 인장시험을 한 후, 시편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

열간 압출한 금속복합재료를 T6 처리한 후 Rockwell 경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 입자강화금속복합재료에서 불균일한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자분포의 영향으로 인한 오차를 줄이기 위하여 Rockwell B-scale( $\phi 3.175\text{mm}$ 인 hard steel ball indenter)을 이용하여 주하중 100kgf를 가하여 5회의 경도를 측정하여 평균값을 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 금속복합재료의 제조

Fig. 2(a)(b)는 교반시간  $t_m=10\text{min}$ , 교반속도  $r=400\text{rpm}$ , 입자체적함유율  $V_f=10\%$ , 가압력  $P=40\text{MPa}$ , 금형온도  $T_M=200^\circ\text{C}$ 인 경우, 고상율  $S_f=10\%$ 와 17%에서 반응용가공법에 의해 제조한 금속복합재료의 횡단면 중앙부분의 분산상태를 비교한 것이다. 고상율이  $S_f=10\%$ 인 Fig. 2(a)의 경우는 복합재료의 분산이 횡단면에 완전히 균일분산이 되지 않았고, Fig. 2(b)의  $S_f=17\%$ 인 경우는 분산이 균일한 상태이다. 고상율이 증가하면, 용탕의 점성이 증가하여 입자의 부상과 침전이 일어나지 않아 복합화가 잘되어진 것으로 생각된다.

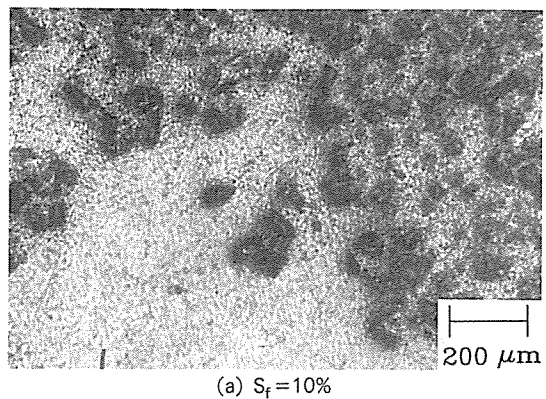


Fig. 2. (a)(b) Effect of solid fraction on homogeneous dispersion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reinforcement with  $V_f=10\%$

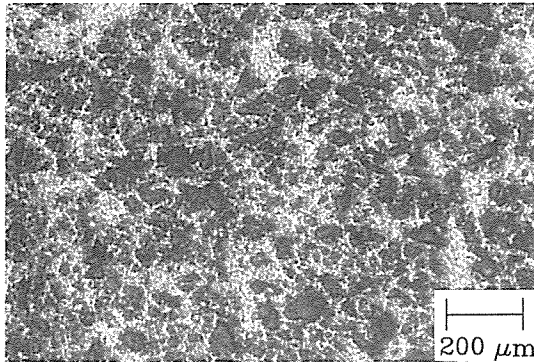
(b)  $S_f = 17\%$ 

Fig. 2. (Continued)

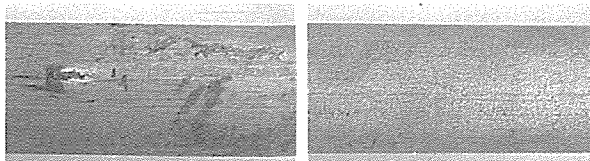
### 3-2. 열간 압출 실험결과

Fig. 3(a)(b)는  $V_f=10\%$ ,  $T_e=500^\circ\text{C}$ ,  $V_e=2\text{mm/min}$ ,  $R=3.0$ 인 경우, 윤활재의 종류에 따른 압출 빌렛의 표면사진이다. 붕소계 윤활재를 사용한 Fig. 3(a)의 경우 압출 빌렛의 표면에 크랙이 관찰되었으나 흑연과 그리스를 혼합한 윤활재를 사용한 Fig. 3(b)의 경우가 표면 크랙이 발생하지 않아 본 연구에서는 그리스 윤활에 의하여 압출실험한 복합재의 기계적 성질을 조사하였다.

Fig. 4(a)(b)는  $T_e=500^\circ\text{C}$ ,  $V_e=2\text{mm/min}$ ,  $R=3.0$ 인 경우, 체적함유율  $V_f$ 에 따른 압출빌렛의 표면 상태를 나타낸 것이다. Fig. 4(b)의  $V_f=20\%$ 인 경

우는 표면에 크랙이 관찰되었다. 위의 원인은 빌렛에 입자함유량이 많아 압출공정시 다이클 빠져 나올 때 입자간의 유동이 불균일하게 되고, 빌렛과 다이벽면사이의 유동저항과 전단응력이 증가하여 표면에 크랙이 발생한 것으로 생각된다[11,12]. 또한, 체적함유율이 증가되면 기지금속의 유동저항이 증가되어 압출재가 컨테이너 및 다이벽면으로부터 받는 마찰력이 상승되어 다이 벽면부 근방에서 유동이 감소된다. 따라서 압출재료의 중심부와 다이 벽면부 근방의 유동차이가 커지게 되어 다이 표면 근방에서 재료가 주로 인장응력을 받기 때문에 표면에 크랙이 발생되었다고 생각한다.

Fig. 5는  $V_f=10\%$ ,  $V_e=2\text{mm/min}$ ,  $R=3.0$ 일때, 압출온도의 변화에 따른 램의 변위  $\delta$ 와 압출력  $P$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 압출온도  $T_e=400^\circ\text{C}$ 인 경우 압출력은 최대  $165\text{kN}$ 이고  $T_e=550^\circ\text{C}$ 인 경우의  $82.5\text{kN}$ 보다 약 50% 정도 높게 측정되었다. 압출력은 빌렛이 다이에 채워질 때까지 급격히 상승하여 다이출구부터 복합재료가 압출되는 위치에 대응하는 최대 압출력에 도달한 이후부터는 변위의 증가와 더불어 감소하고 있다. 위의 원인은 압출빌렛과 컨테이너 벽면사이의 마찰력이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.  $T_e=500^\circ\text{C}$ 일때 최대압출력에 도달한 이후 램의 증가에 따른 압출력의 감소 폭은 압출온도 400, 450 및  $550^\circ\text{C}$ 에서의 감소 폭보다 큼을



(a) Boron-Nitride

(b) Graphite

Fig. 3 (a)(b) Comparison surface appearance of extruded billet with various lubricants at extrusion conditions for  $T_e=500^\circ\text{C}$ ,  $V_e=2\text{mm/min}$  and  $V_f=10\%$

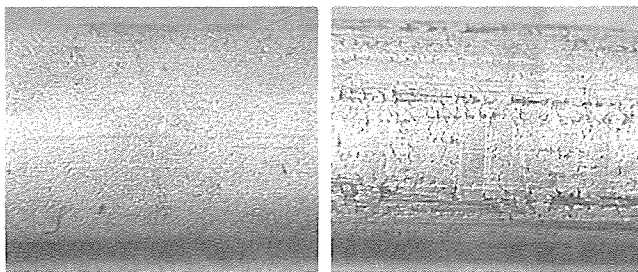
(a)  $V_f = 10\%$ (b)  $V_f = 20\%$ 

Fig. 4 (a)(b) Comparison surface appearance of extruded billet at different volume fraction at  $T_e=500^\circ\text{C}$ ,  $R=300$  and  $V_e=2\text{mm/min}$

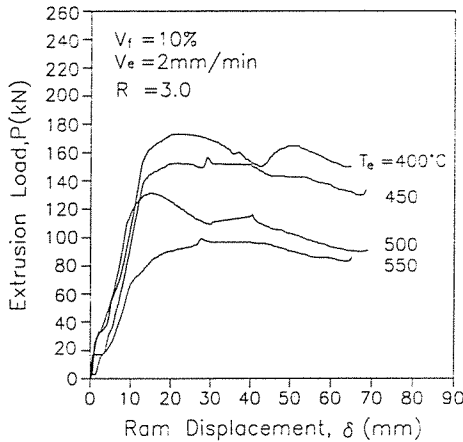


Fig. 5. Relationship between extrusion load and ram displacement according to extrusion temperature at  $V_f=10\%$

알 수 있다. 압출온도에 관계없이 압출력은 최대 압출력까지의 완만한 증가는 입자가 유동하면서 입자사이의 간격이 감소되고, 또한 기지재가 유동하여 공공의 자리를 채우기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은  $V_f=20\%$ ,  $V_e=2 \text{ mm/min}$ ,  $R=3.0$ 일 때, 압출온도의 변화에 따른 램의 변위  $\delta$ 와 압출력  $P$ 와의 관계를 나타낸 것이다.  $V_f=20\%$ 인 경우 압출력  $P$ 는  $T_e=400^\circ\text{C}$ 에서 최대 240kN,  $T_e=550^\circ\text{C}$ 에서 120kN정도이다.  $V_f=10\%$ 와 비교해서 30~50%정도 압출력이 높게 나타났다. 강화제의 체적 함유율의

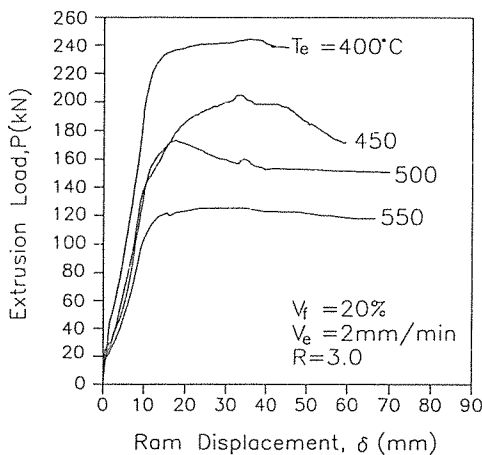


Fig. 6. Relationship between extrusion load and ram displacement according to extrusion temperature at  $V_f=20\%$

변화에 따른 압출력의 차이는 기지재의 분산강화 효과 때문인 것으로 사료된다. 최대 압출력에 도달한 후의 압출력의 변화는  $V_f=10\%$ 와 같은 변화를 보이지 않고 있다. 위의 원인은 변형유동과정에서 입자의 변형, 회전 및 파단등이 입자체적함유율에 따라 똑같은 방식으로 유동하지 않기 때문이다[13].

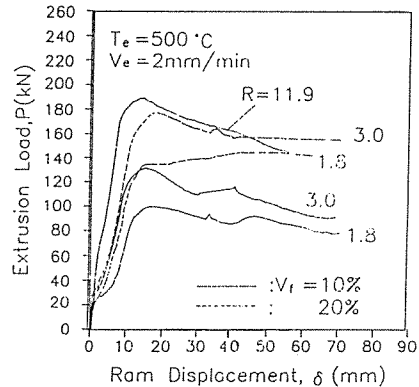


Fig. 7. Relationship between extrusion load and ram displacement according to extrusion ratio at constant extrusion temperature

Fig. 7은  $V_f=10\%$ ,  $V_e=2 \text{ mm/min}$ ,  $T_e=500^\circ\text{C}$ 일때, 압출비의 변화에 따른 램의 변위  $\delta$ 와 압출력  $P$ 와의 관계를 나타낸 것이다.  $R=1.8, 11.9$ 인 경우 압출력  $P$ 는 각각 100kN, 190kN 정도가 측정되었다.  $R=1.8, 3.0$ 에 있어서 체적함유율이 적은 10%의 경우가 20%에 비하여 압출력이 완만히 최대 압출력에 도달하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 압출비가 증가할수록 최대 압출력에 도달하는 램의 변위가 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 다이 입구부터 출구까지 체적에 차이가 있기 때문이다. Fig. 5~Fig. 7에서 온도가 감소할수록, 입자의 체적함유율과 압출비가 증가할수록 압출력이 증가함을 알 수 있다. 강화제의 체적함유율의 변화에 의한 압출력의 차이는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자의 분산에 의한 강화효과 이외에 입자와 입자사이의 간격이 적어지면 전위의 이동에 대한 저항이 증가된다는 Orowan의 강화기구에 기인한 것으로 생각된다[14].

Fig. 8(a)~(c)는  $V_f=20\%$ ,  $T_e=500^\circ\text{C}$ ,  $V_e=2 \text{ mm/min}$ ,  $R=3.0$ 일때, 입자의 거동상태를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서의 입자는 2차원배열을 하고

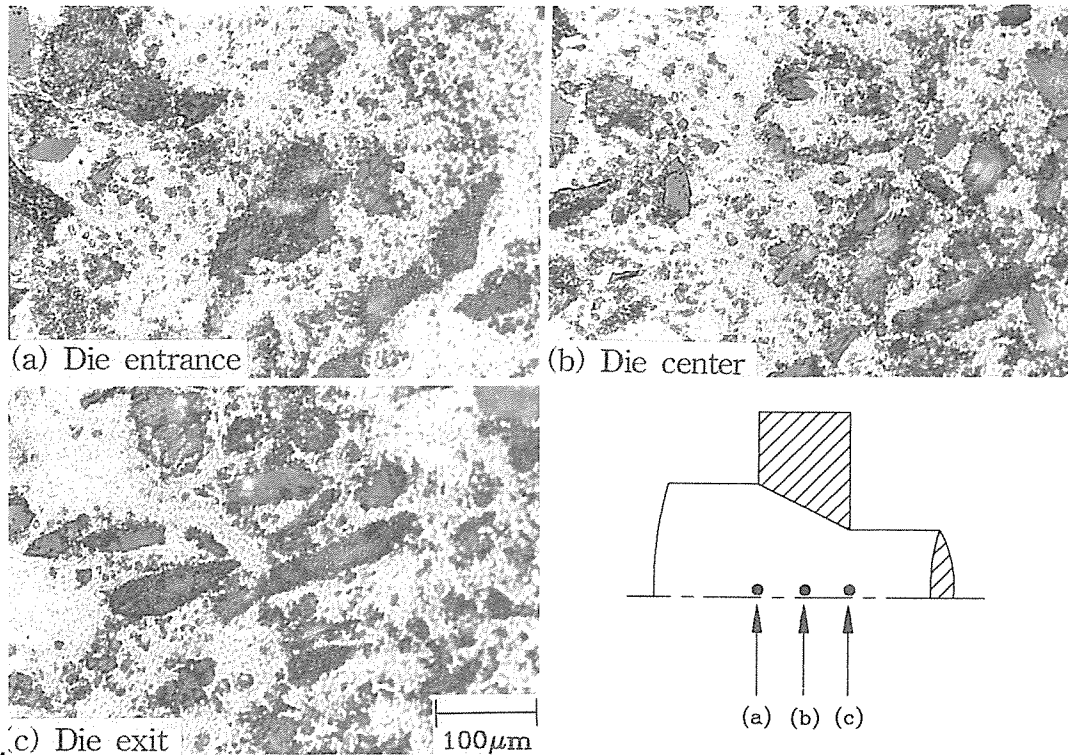


Fig. 8 (a)(b)(c) Variation of particles orientation in cross section extruded billet at  $V_f=10\%$ ,  $T_e=500^\circ\text{C}$ ,  $R=3.0$  and  $V_e=2\text{mm/min}$

있고, Fig.8(b)의 다이 중앙부분에서는 기지재의 소성변형에 의하여 강화재의 일부가 1차원 배열을 하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig.8(c)의 다이출구 부분에서는 입자가 거의 1차원적으로 배향하고 있음을 알 수 있다. 이것은 다이출구에서는 다이 벽면으로부터 받는 압출력에 대해 유동저항을 크게 하기 위한 방향으로 입자가 변형된 결과라고 생각된다.

Fig.9(a)~(d)는  $V_f=20\%$ ,  $V_e=2\text{mm/min}$ ,  $R=3.0$ 인 경우, 압출온도의 변화에 따른 다이 출구 방향의 중심부분에서 입자의 거동상태를 나타낸 것이다. 압출온도  $T_e=400^\circ\text{C}$ 에서는 기지재의 소성변형에 대한 저항이 크기 때문에 입자가 파단되어 있으며 배향도 개선되지 않음을 알 수 있다. 압출온도가 낮을 경우는 기지재의 유동성이 떨어져서 다이출구부분의 중심부와 금형표면부 사이의 변형률 속도차이가 작아 복합재 단면전체에 걸쳐서 입

자의 배향성이 균일할 것으로 생각되나, 오히려  $T_e=500^\circ\text{C}$ 보다 높은 경우가 입자의 파단이 적고, 또한 기지재의 연화로 인한 소성변형의 증가때문에 알루미늄 입자의 배향성도 개선되어진 것을 알 수 있다. 따라서 강화재의 배향성은 변형률 속도보다 압출온도에 더 민감함을 알 수 있다.

Fig.10(a)~(c)는  $V_f=20\%$ ,  $V_e=2\text{mm/min}$ ,  $T_e=500^\circ\text{C}$ 인 경우, 압출비의 변화에 따른 입자의 거동상태를 나타낸 것이다.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 배향성은 기지재의 소성변형에 크게 의존하며, 또한 압출비의 증가와 더불어 다이내에서 소성 변형의 증가로 인한 유선(stream line)의 길이가 증가되어  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 강제적으로 압출방향으로 배향된 것으로 생각된다. 압출비가 증가함에 따라서 입자의 배향성이 좋으나, 오히려 다이내에서 기지재의 소성변형이 증가하기 때문에 입자의 변형이 증가한 것을 알 수 있었다. 압출비가 증가할수록 다이 표면부분과 압출제품

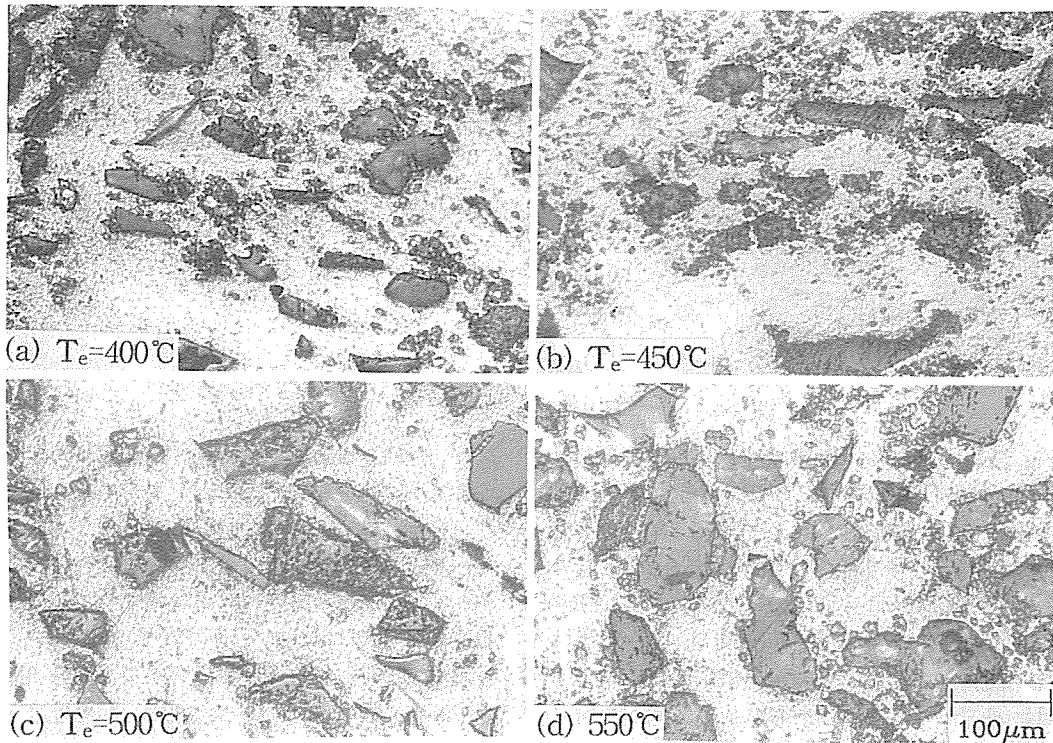


Fig.9 (a)(b)(c)(d) Microstructure of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles deformation characteristics at cross section a billet according to extrusion temp.  $T_e$  for volume fraction 20% composites

단면의 중심 부분에서 변형을 속도차이가 작아 배향성이 단면 전체에 걸쳐 개선됨을 현미경 관찰을 통하여 알 수 있었다.

$V_f=10\%$ 인 경우도 압출반각의 변화에 따른 다이

출구방향의 중심부분에서 입자의 배향상태가 Fig. 10(a)~(c)  $V_f=20\%$ 와 마찬가지로 압출비가 증가할수록 입자의 파단이 심하게 일어남을 알 수 있었다.

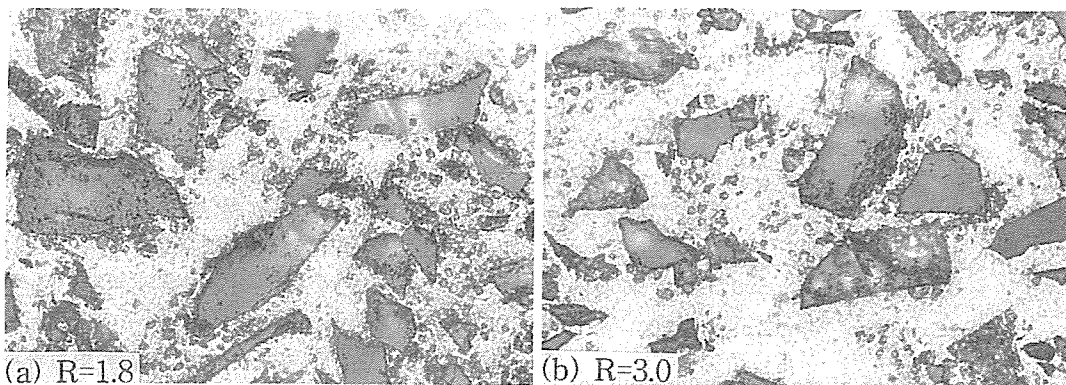


Fig. 10 (a)(b)(c) Microstructure of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles deformation characteristics at billet cross section according to extrusion ratio for volume fraction 20% composites at  $T_e=500^\circ\text{C}$



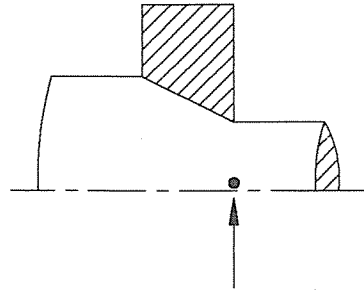
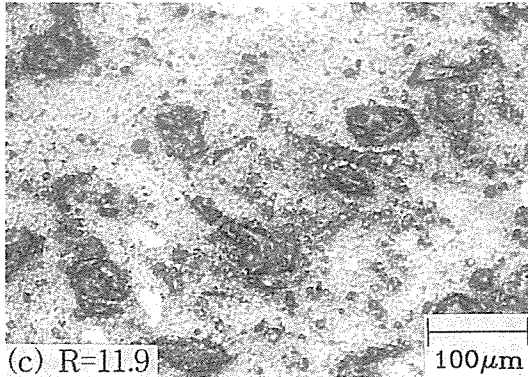


Fig. 10. (Continued)

Fig. 11은  $V_f=10\%$ ,  $R=3.0$ 인 경우 압출온도의 변화에 따라서 압출되어진 복합재료의 인장강도를 나타낸 것이다. 기지재와 비교하였을 때 열간압출한 입자강화형 금속복합재료의 경우 인장강도가 각각 300MPa, 430MPa로서 43%정도 향상되었다.  $R=3.0$ 에서 인장강도가 43%정도 증대된 것은 압출다이 치수 중 소성유동저항에 결정적으로 영향을 미치는 랜드부의 길이와 경사진 부분의 다이길이에 영향이 있다고 사료된다[15]. Fig. 9(a)~(d)에서 보여주는 바와 같이 압출온도가 낮을수록 기지재의 소성변형이 증가되어 입자의 파단으로 인하여 강

도가 저하된 것으로 생각되나  $T_e=500^\circ\text{C}$ 에서는 강화재의 방향성과 계면접합성이 향상되어 인장강도가 증가된 것으로 생각된다. 압출온도  $T_e=550^\circ\text{C}$ 일 때는 Fig. 9(d)에서 보여주고 있는 것처럼 입자의 파손이 Fig. 9(a)(b)(c)에 비하여 감소되었음에도 불구하고 오히려 강도가 증가되지 않았다.

위의 원인은 입자강화형 금속복합재료를 압출할 때, 압출온도가 고상선온도( $582^\circ\text{C}$ )에 가깝기 때문에 기지재의 연화로 인하여 압출력이 감소되어 강화재와 기지재사이의 계면 접합이 불충분하기 때문인 것으로 사료된다. 주어진 압출비에 있어서 인장강도를 증가시키기 위한 최적 압출온도가 존재함을 알 수 있었다. 복합재료의 강도향상은 위에서 열거한 요인 이외에 강화재에 의한 분산강화와 열간압출 후 냉각시에 기지재와 강화재사이의 열팽창계수의 차이에 의하여 나타나는 전위밀도의 증가에 의한 강화로 알려져 있다[16].

Fig. 12는 입자체적함유율  $V_f=10\%$ 일 때, 각각의 압출온도에 대하여 경도값을 나타낸 것이다. 압출온도  $T_e=500^\circ\text{C}$ 에서 가장 높은 값을 나타내었다. 열간압출되어진 금속복합재료의 경도분포는 인장강도의 경향과 일치함을 알 수 있다.

Fig. 13(a)~(d)은 입자체적함유율  $V_f=20\%$ 일 때 압출온도의 변화에 따른 인장시편의 파단면에 대한 SEM 관찰사진이다.  $T_e=500^\circ\text{C}$ 의 경우 우수한 계면접합으로 인하여 기지재의 뒤틀림현상과 연성파괴가 발생하였다. Fig. 13(a)(b)의  $T_e=400\sim 450^\circ\text{C}$ 에서는 강화재의 파단현상이 그리고 Fig. 13(d)의  $550^\circ\text{C}$ 에

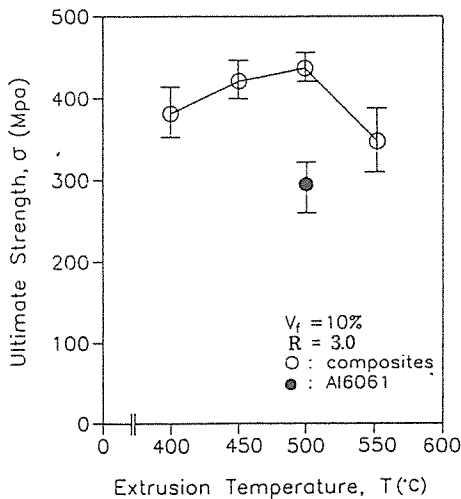


Fig. 11. Comparison of the ultimate strength according to extrusion temperature with  $V_f=10\%$  and  $R=3.0$  in room temperature

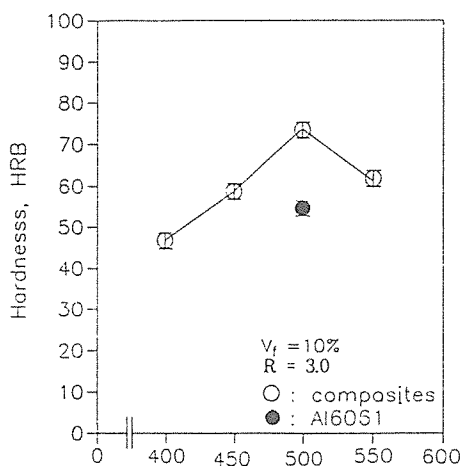


Fig. 12. Comparison to hardness according to extrusion temperature with  $V_f=10\%$  and  $R=3.0$

서는 기지재와 강화재 사이의 계면에 있어서 접합

불량이 각각 관찰되었다. Fig. 11, 12에서 보여주는 바와 같이 압출온도  $T_e=500^\circ\text{C}$ 에서 가공하는 것이 기계적 성질이 우수한 금속복합재료를 얻을 수 있는 제조조건임을 미시적 및 거시적 고찰로부터 확인할 수 있었다.

### 3-3. 고 찰

본 연구에서는 압출온도, 압출비를 주요변수로 하여 강화재의 거동과 기계적 성질 사이의 관계를 규명하였다. 실제로 금속복합재료를 압출가공하여 소재 및 부품산업에 응용하기 위해서는 강화재의 거동과 계면강도를 제어하기 위한 금형설계가 극히 중요하다. 압출가공에 있어서 강화재의 거동과 계면접합에 미치는 영향은 제품형상(중실, 중공, 축대칭 재료, 이형제), 역학적 경계조건(전방장력, 배압), 윤활상태(무윤활, 윤활) 빌레트 형상, 압

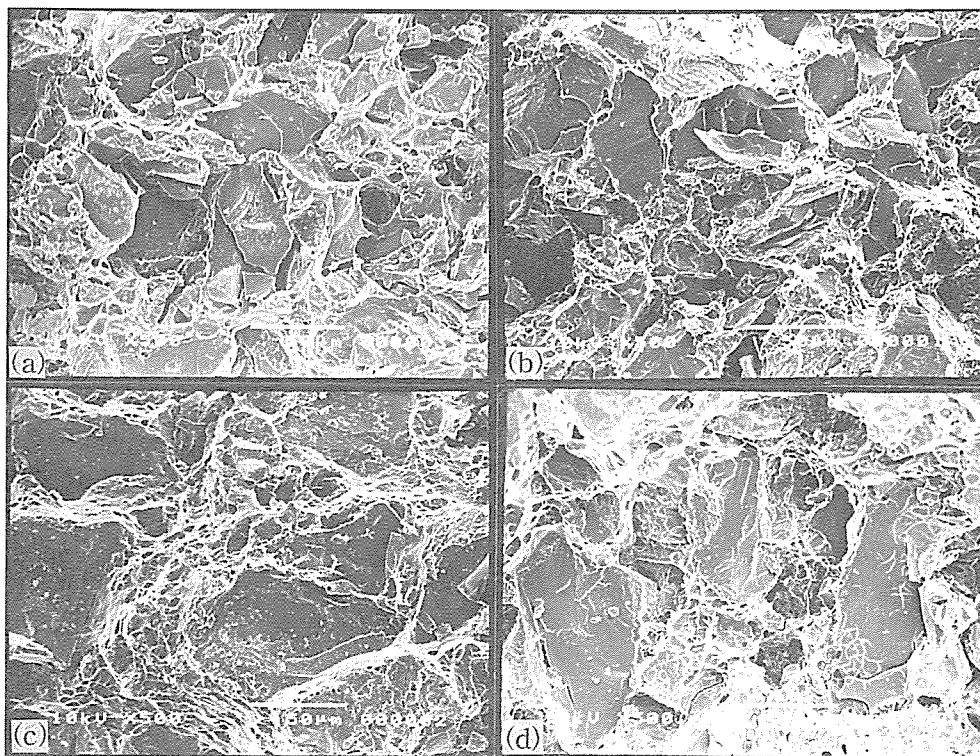


Fig. 13 (a)(b)(c)(d) SEM fractograph of fracture surface according to extrusion temperature (a)400°C (b)450°C (c)500°C (d)550°C

출방법, 콘테이너, 펀치 및 다이형상 등을 들 수 있다. 이러한 현상을 전부 고려하여 실험을 하기에는 한계성이 있다. 따라서 복합재의 소성유동을 고려한 유한요소해석법에 의하여 각종 형상의 다이설계에 필요한 소재와 금형 사이의 마찰계수의 예측은 극히 중요하다. 따라서 본 연구에서 고온 압출실험의 경우 마찰계수의 값을 조사하기 위하여 압출재의 변형을 속도  $\dot{\epsilon}$ , 평균압출 압력  $P_a$  및 평균변형률  $\bar{\epsilon}_m$ 을 각각 다음으로 정의한다[2].

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{2V_e \ln R}{D_i - D_f} \cdot F \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P_a = \frac{P}{A} = \bar{\sigma}_m \bar{\epsilon}_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{\epsilon}_m = a \cdot \ln R + b \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$a = 1 + \mu \cot \alpha, \quad b = 4\alpha / 3\sqrt{3}$$

실험결과 P로부터 구한  $P_a$ 와 식(3)의  $\bar{\sigma}_m$ 으로부터  $\bar{\epsilon}_m$ 을 계산하기 위하여 다음과 같은 응력-변형률 사이의 관계식을 이용하였다.

$$\bar{\sigma}_m = C \dot{\epsilon}^n \quad \dots\dots\dots (5)$$

압출온도  $T_e=400^\circ\text{C}$ 에 대한  $n$ 과  $C$ 의 값 0.09, 65MPa[17]와 식(2)의  $\dot{\epsilon}$  이용하여 식(5)로부터  $\bar{\sigma}_m$ 을 계산한 후 위의 결과를 식(3)에 대입하여  $\bar{\epsilon}_m$ 을 구하였다.  $V_f=10\%$ ,  $T_e=400^\circ\text{C}$ ,  $R=3.0$ 인 경우, 흑연윤활재와 붕소윤활재의  $\bar{\epsilon}_m$ 은 각각 2.810, 3.13이다. 따라서, 이 값이 되기 위한 마찰계수  $\mu$ 를 식(4)에 의하여 계산하면, 흑연의 경우 0.65, 붕소의 경우 0.83이다. 고온시 마찰계수가 증가하는 이유는 온도상승으로 인한 휘발성분의 증발과 산화때문인 것으로 생각된다. 위 결과에서 흑연윤활재의 경우가 붕소계윤활재보다 마찰계수가 작으므로, 압출시 압출 반대방향으로 작용하는 전단응력이 작게 작용하므로 압출재의 표면 상태가 양호하다고 생각된다. 흑연윤활재를 사용한 경우  $V_f=10\%$ 에 대해 압출온도와 압출비에 관계없이 크랙이 발생하지 않았다. 일반적으로 붕소계 윤활재의 경우 상온에서 마찰계수  $\mu$ 가 0.148, 흑연윤활재의 경우 0.08로 보고되고 있다[18]. 따라서 복합재료의 압출시 표면 크랙의 방지를 위하여 마찰계수가 적은 윤활재가 바람직하다고 사료된다.

압출온도가 높은 경우는 복합재 단면의 다이중앙부와 금형에 가까운 표면부사이에 변형을 속도 차이가 크기 때문에 중앙부에서 입자가 쉽게 회전, 변형되어 배향성이 좋지 않은 것으로 생각된다. 식(2)~(5)를 이용하여 평균변형  $\bar{\epsilon}_m$ 을 구하면  $T_e=400^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ 인 경우 각각  $\bar{\epsilon}_m=4.055$ ,  $\bar{\epsilon}_m=3.101$ 이기 때문에 변형률의 값이 큰  $400^\circ\text{C}$ 인 경우가 입자의 소성변형률이 크게 되어 입자가 짧은 형태가 많은 것으로 생각된다.

$V_f=10\%$ 인 경우도 압출온도의 변화에 따른 입자의 거동특성은 현미경 관찰 결과 Fig. 9(a)~(d)의  $V_f=20\%$ 인 경우와 같은 현상을 나타내었다.

#### 4. 결 론

반용융가공법에 의한 입자강화형 금속복합재료의 제조 및 압출속도를 일정하게 한 열간압출실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입자의 균일분산을 위해서는 적절한 고상율의 제어가 필요하고,  $V_f=10\sim 20\%$ 범위에서 고상율  $S_f=17\%$ 일 때 균일분산된 금속복합재료의 제조가 가능하였다.
- (2) 열간압출시 섬유함유량이 증가할수록 입자들의 상호작용으로 인하여 유동성이 감소하여 압출력은 높고, 기지재로부터 압축응력을 많이 받아 입자의 파단이 증가되었다.
- (3) 열간압출한 입자강화형 금속복합재료의 체적함유율  $V_f=10\%$ ,  $T_e=500^\circ\text{C}$ 에서 평균 인장강도 430MPa로 기지재인 Al6061의 평균 300MPa에 비하여 약 43%의 높은 강도향상을 나타내었다.
- (4) 압출온도  $T_e=500^\circ\text{C}$ 에서 열간압출한 입자강화금속복합재료 체적함유율  $V_f=10\%$ 의 경도는  $H_{RB}=73$ 으로서 기지재인 Al6061에 비하여 약 30%의 높은 경도값을 나타내었다.
- (5) 곡면 다이 설계 및 압출온도가 압출비보다 금속복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향이 클 수 있다.

#### 5. 참고문헌

1. Kaimar, K.U. and Tertel, A. 1991, "Ex-

trusion 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., Matsubare H., Shirayanagi I., and Mabuchi M., "Hot Extrusion of Aluminar Short Fiber Reinforced Aluminar Composites", J. of the JSTP, 1989, 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, and 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. Seo, Y.H., and Kang, C.G., "Particle Dispersion Characteristics and Mechanical Properties in Metal-Stirring Squeeze Cast SiCp/Al Composites," Pro. of the Third Int. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites ed. by Kiuchi M., 1994, pp.441~450.

8. 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, 1989, Vol. 30, No.346, pp.1524~1531.

9. 강충길, 강성수, 김봉향, "금속복합재료의 열간압출공정에 있어서 압출비가 섬유의 파단 및 배향에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집, 17-7, 1993, pp.1740~1750.

10. Ohnaka I., "Introduction to Heat and Solidification Analysis by Computer (In Japanese)", Maruzen Press, Tokyo, 1985, pp.200.

11. Morooka, Kawamura C., Yuasa E., and Suzuki T., "Influence of Volume Fraction and Shape of Fiber on Tensile in the Short Strainless Steel Fiber Reinforced Aluminum Composites Prepared by Powder Extrusion", J. of Jap. Inst. Light Metal, 1984, Vol.34, No.10, pp.570~577.

12. Watanabe S., Saitoh K. and Okaniwa S., "Extrudability of Discontinuous Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites Billet", J. of Jap. Inst. Light Metal, 1990, Vol.40, No.4, pp.278~284.

13. Yuasa E. and Morooka T., "Hot Extrusion of Aluminum Composites Containing Dispersed Graphite Particles", J. of JSPT, Vol.22, No.244, pp.482~487.

14. Martin J.W., "Micromechanisms in Particle-Hardened Alloy", Cambridge University press, 1980, pp.50~61.

15. Blazynski T.Z., "Metal Forming-Tool Profiles and Flow", John Wiley & Sons, New York, 1976, pp.309~341.

16. Arsenault R.J., "The Strengthening of Aluminum Alloy 6061 by Fiber and Platelet Silicon", Materials Science and Engineering, 64, 1984, pp.171~181.

17. 金丸信夫, 豊島川淳, 律田銃, 中尾正和, アルミニウム合金熱間鍛造における温度連成變形シミュレーション, 日本第43回 塑性加工聯合講演會

18. 오박균, 오세민, "고체윤활제와 그 응용기술", 윤활관리, 1987, Vol.67, No.12, pp.4~5.