

## 입자분산강화 알루미늄 복합재의 압출가공특성에 관한 연구

權赫天·尹義博

한양대학교 금속공학과

### A Study on Hot Extrusion Characteristics of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composite.

Hyuk-chon Kwon, and Eui-pak Yoon

Dept. of Metallurgical Eng., Hanyang University, Seoul 133-791

**초 록** 분말야금법으로 제조된 A6061기 입자분산강화 복합재의 열간압출가공에 있어서 압출특성에 미치는 강화입자의 종류, 빌렛특성 및 압출조건의 영향에 대하여 조사하였다. A6061기 복합재료의 열간 압출 전단 변형저항에 미치는 강화입자종류의 영향은  $SiC_w > Al_2O_{3f} > Al_2O_{3p} > SiC_p$ 의 순으로 되었으며, 모든 강화입자에서 부피분율이 증가함에 따라서  $K_w$ 값도 증가하였다. 압출조건, 강화입자의 첨가량 및 첨가입자의 평균입도에 관계없이  $Al_2O_{3p}$ 가 첨가된 복합재의 열간압출가공에 필요한 소요압력은  $SiC_p$ 의 경우보다 컸다. 압출압력은 압출 다이스 반각이 커질수록 감소하는 경향은 나타났다. 이것은 다이스 반각에 의해 생성되는 빌렛과의 접촉면적이 증가하여 전단마찰응력( $mk_s$ )이 상승하기 때문이다. 압출시 압출온도 상승은 저온에서  $\sim 50^\circ C$  정도 증가하였으며, 압출온도가  $500^\circ C$  이상이 되면 압출재 표면에 극심한 tearing이 발생하였다. 강화입자의 첨가량이 증가할수록 이 현상은 더 심하게 되었다.

**Abstract** It was investigated that reinforced species, billet condition and extrusion variation in Al 6061 composite material effected on extrusion process of particulate reinforced composite material. The strength of composite material with reinforcement species revealed  $SiC_w > Al_2O_{3f} > Al_2O_{3p} > SiC_p$ , orderly.  $K_w$  increased as volume fraction increased in all composite material. The composite materials reinforced by  $Al_2O_3$  required the larger pressure in hot extrusion process than those by  $SiC_p$  at all condition. Extrusion process tended to decrease as the semi-angle of extrusion dies increased because larger contact area caused larger shear friction. Extrusion temperature went up about  $50^\circ C$  in low elevated deformation temperature. In extrusion temperature above  $500^\circ C$ , severe tearing occurred on extrusion surface. More reinforcement in volume fraction, more hot tearing.

### 1. 서 론

압출가공은 한 단계의 변형만으로도 복잡한 형상의 제품을 얻을 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에, 폭넓게 응용되고 있는 공법중의 하나이다. 그러나 비교적 소성가공성이 어려운 금속기복합재료와 같은 소재를 압출할 경우에는 압출성에 미치는 요인 즉, 합금의 조성, 다이스 구조, 압출온도, 압출속도, 압출압력 등에 관해서 충분한 연구가 선행되어야 할

것이다. 그러나, 금속기 복합재료를 대상으로 하는 압출가공에 있어서 대부분의 연구가 역학적 또는 조직적 특성을 규명하는데 그치고 있으며<sup>1-4)</sup>, 복합재료를 실용화하는데 요구되는 압출가공기술에 관련한 연구는 별로 없다. 본 연구에서는 A6061기 분말합금에  $SiC_p$ 와  $Al_2O_{3p}$ 를 분산강화재를 첨가하여 이들 강화입자가 최고 압출압력에 미치는 영향과 압출성에 미치는 요인, 즉, 압출온도, 금형의 구조, 다이스 각도, Bearing 길이, 압출속도, 빌렛

크기, 압출비 등에 관하여 조사함으로써 분산 강화형 복합재가 강화입자를 달리 할 경우에 따른 열간 가공성에 대한 기본적인 자료를 제시하고 또한 금속기 복합재가 가공재로서의 활용가능성을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 지지금속은 A6061알루미늄 합금 분말을 이용하였으며 Table 1은 합금 분말의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical Composition of Matrix Alloy A 6061

Element	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn	Al
wt. %	0.76	0.38	0.20	0.83	0.18	0.70	0.01	0.07	Bal.

강화입자는  $\text{SiC}_p$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  두 종류로, 평균 입도  $4\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  및  $40\mu\text{m}$ 의 입자형 분말을 이용하였다. A6061분말과 강화입자를 부피분율 10%, 20% 및 30%가 되도록 내부에 브레이드가 부착된 V-형 혼합기로 기계적 교반을 행하였다. 혼합된 복합분말은 6000계열의 알루미늄 합금 튜브에 봉입하여 약  $600^\circ\text{C}$ 에서 가열한 후 600Ton급 수직형 프레스를 이용하여  $100\text{Kgf}/\text{mm}^2$  압력으로 30sec 가압성형하여 직경 70mm, 길이 145mm의 압출용 빌렛을 제조하였다. 열간압출실험에는 400ton급 수평식 압출기를 이용하였으며, 컨테이너는 내경 73mm, 길이 350mm의 크기였으며, 빌렛은 빌렛 길이에 따른 압출압력의 변화를 관찰하기 위하여 길이가 50mm, 75mm, 100mm, 145mm가 되도록 준비하였다.

각도가  $2\alpha=60, 120, 180^\circ$ 인 금형을 사용했으며, 특히  $2\alpha=180^\circ$ 인 평 다이스인 경우에는 다이스 베어링 길이의 영향을 평가할 목적으로  $d=2, 4, 6, 10\text{mm}$ 의 4종류의 다이스를 이용하였다.

빌렛의 가열에는 칸탈전기로를 이용하였고, 로내의 온도편차는  $\pm 5^\circ\text{C}$ 였다.  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $550^\circ\text{C}$  및  $600^\circ\text{C}$ 에서 60min 가열된 빌렛온도를 압출온도로 하였다. 압출압력의 측정에는 strain gauge가 내장된 압력변환기(Model PT3000)를 압출기의 램에 부착하여 X축에 램의 변위가, Y축에 유압의 변화가

표시되는 XY기록계로부터 최대압출력을 읽어 내었다. 램의 속도는 압출에 소요되는 시간을 램의 변위와 동시에 측정하므로써 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

압출가공에 있어서 빌렛의 압출하중은 빌렛 크기(길이, 직경), 빌렛 특성(조성, 조직), 압출온도, 압출속도, 다이스 형상, bearing 형상, 압출비 등에 의해 영향을 받는다. 이 관계를 알루미늄 합금에 대하여 실험적으로 구하면 (1)식과 같이 나타낼 수 있다<sup>5)</sup>.

$$F = 3K_w \cdot A \cdot \log_e R + k_w \left( \frac{4LA}{D} + Rc_0 l_0 \right) \quad (1)$$

F : 압출하중

k : 빌렛의 압출전단변형저항

R : 압출비(A/a)

L : 빌렛 길이(mm)

D : 빌렛 직경(mm)

$c_0$  : 다이스 원주 길이

$l_0$  : 다이스 bearing 길이(mm)

A : 빌렛의 단면적

식 (1)에서와 같이 빌렛의 압출하중을 복합재의 변형에 관계되는 부분과 컨테이너, 다이스 등 공구와의 마찰에 기인한 부분으로 구성되지만 이들 모두 빌렛의 압출전단변형저항  $K_w$ 에 비례한다. 복합재료를 압출하기 위한 압출기의 능력을 포함하여 압출조건을 설정하기 위해서는 빌렛의 k값을 파악하는 것이 중요하다.

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}_p$ 가 첨가된 복합재료에 대해 여러가지 조건하에서 압출하중을 측정하여 1) 식에 의해 변형저항값  $K_w$ 를 구하였다.

Fig. 1은 A6061 합금을 matrix로 할때 강화섬유( $\text{SiC}$ -Whisker,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Shot fiber,  $\text{SiC}$ -particle,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -particle)의 종류와 함유량에 따른 복합재료의 변형저항값  $K_w$ 와의 관계를 나타내었다. 전단변형저항은 강화재의 종류와 함유량에 따라서 뚜렷한 차이를 보여주고 있다.

$\text{SiC}$  휘스커와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  단섬유를 강화재로 첨가한 경우가 입자분산형 강화복합재보다 월등히 높은 변형저항 값을 나타내고 있으며, 특히  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 첨가한 복합재의 변형저항값이  $\text{SiC}_p$ 의 경우보다 높게 나타났는데, 이것은 고온압축 유동응력 실험에서 측정된 변형에 필

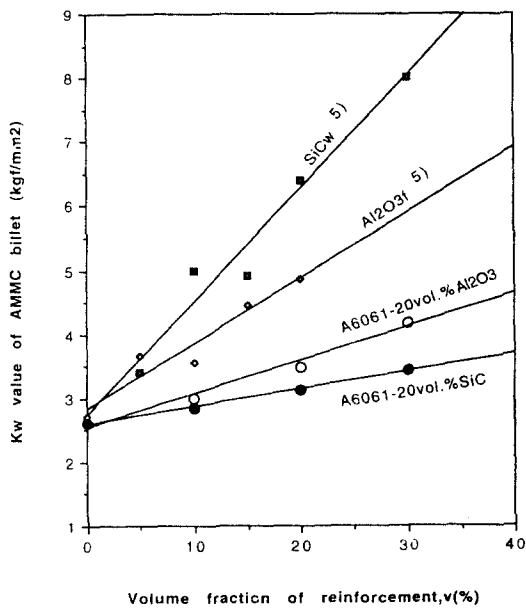


Fig. 1.  $K_w$  value of MMC billet vs. volume fraction of reinforcement. Extrusion condition : present work, Matrix alloy 6061, extrusion temperature 450°C, extrusion ratio 12.5, reinforcement  $Al_2O_3$ ,  $SiC_p$  particulate, Reference : A6061,  $T_w$  : 400°C, R : 16

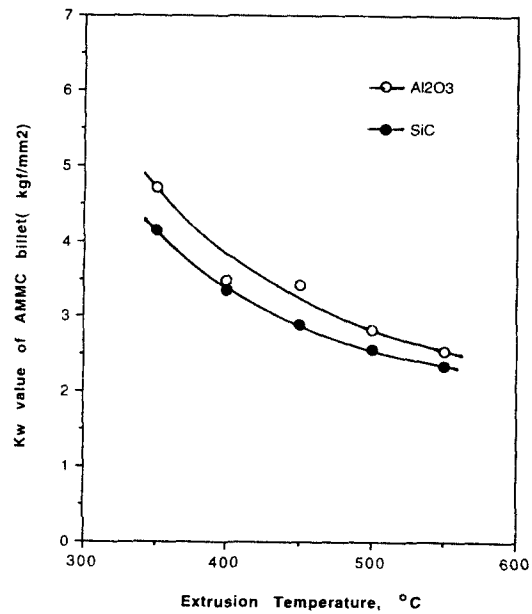


Fig. 2.  $K_w$  value of AMMC billet vs. extrusion temperature. Extrusion condition : Matrix alloy 6061, extrusion ratio 12.5, reinforcement  $Al_2O_3$ ,  $SiC$  particulate, volume fraction 20%

요한 활성화 에너지 값이  $Al_2O_3$ 가 첨가된 복합재 (513kJ/mol)가  $SiC_p$ 가 첨가된 복합재 (315kJ/mol) 보다 높게 나타난 결과와도 일치하고 있다. 즉  $Al_2O_3$ 가 첨가된 복합재의 변형기구가  $SiC_p$ 인 경우보다 복잡하게 나타나고 있음을 의미한다.

Fig. 2는 A6061 합금기 복합재료 빌렛의 변형저항 값( $K_w$ )과 압출온도와의 영향을 나타낸 것이다. 복합재 압출전단변형저항 값은 강화재의 종류에 관계없이 압출온도가 상승함에 따라서 감소하였다. 그 감소 경향은  $Al_2O_3$ 로 강화된 복합재가  $SiC_p$ 의 경우보다 크게 되었다.

Fig. 3은 강화재  $SiC_p$ ,  $Al_2O_3$ 의 입자크기에 따른  $K_w$ 의 변화를 나타낸 것으로 20 $\mu m$ 까지는  $K_w$ 가 급격한 감소를 나타내고 있으나, 그 이상의 입자크기에서는 완만한 감소를 보여 주고 있다. 이 경향은 강화재가  $SiC_p$ 나  $Al_2O_3$ 인 경우 모두 동일한 특성을 보여주었다.

Fig. 1 및 Fig. 3에서 보는 바와 같이 강화 입자의 종류에 관계없이 입자분산강화 복합재의 입자반경의 크기 및 체적율에 따라서 변형

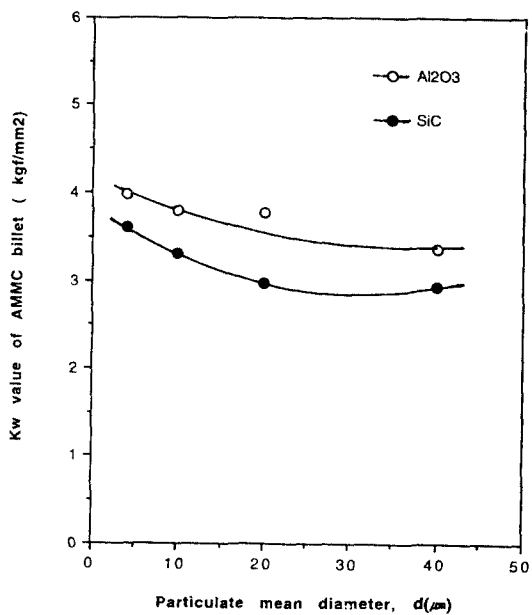


Fig. 3. Relationship between deformation resistance( $K_w$ ) and reinforcement particle diameter.

저항값이 변화하고 있음을 알 수 있다. 기지 금속중에  $SiC_p$ 나  $Al_2O_3$ 와 같은 경한 입자가 분산된 복합재에 있어서, 입자의 크기 및 체

적용에 따른 변형저항은 다음과 같이 해석할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$\Delta\sigma_0 = K_c \cdot E_2 \sqrt{\frac{f}{1-f} \cdot \frac{b}{d} \cdot \epsilon_0^p} = K_w \sqrt{\epsilon_0^p} \quad (2)$$

여기서  $K_c$ ,  $K_w$ 는 정수,  $E_2$ 는 복합재의 종탄성 계수,  $f$ 는 입자의 체적율,  $d$ 는 입자의 직경,  $b$ 는 버거스 벡터,  $\epsilon_0^p$ 는 기지금속의 변형량이다.

즉, 이 식으로부터 입자가 미세할수록 기지금속의 변형저항이 증가하게 되고, 따라서 압출가공은 어려워진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 여러가지 Al 재료 및 Al기 분산강화 복합재의 압출 빌렛길이에 따른 압출압력의 변화를 나타낸 것으로 복합재, 기지금속 모두 빌렛길이가 증가함에 따라서 직선적으로 증가하였다. 이것은 식 (1)에서 보는 바와 같이 컨테이너와 빌렛간의 마찰저항의 급격한 증가에 기인하고 있다.

일반적으로 열간압출에서의 마찰저항은 Fig. 5에 나타낸 것처럼 주로 컨테이너와 빌렛의 마찰( $mk_1$ ) 및 다이스 베어링과의 마찰( $mk_2$ )과 형성된 DMZ(Dead Metal Zone)을 유동하기에 필요한 재료내부의 마찰력으로 형성된다. 이들 마찰저항의 총합( $mk = mk_1 + mk_2 + mk_3$ )이 압출압력의 증가 원인으로 작용한다.  $mk_3$ 를 평가하기 위해 다이스 각도에 따른 압출압력의 변화를 조사한 결과를 Fig. 6에 나타내었으며  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우가 원추형 다이스( $2\alpha = 120^\circ, 60^\circ$ )보다도 낮은 변형저항값으로 나타나고 있음을 알 수 있었다. Depierre<sup>7)</sup>는 상계법과 Columb 마찰이론을 이용하여 열간압출에서의 실험결과 금형에 미치는 압출압력을 식 (3)와 같이 나타내었다.

$$P_d = \sigma_d (a + b \ln R) + mk \cot a \ln R \quad (3)$$

여기서  $m = \tau_i/k$ ,  $a$ 와  $b$ 는 상수,  $\sigma_0$ 는 유동응력,  $\alpha$ 는 다이스반각,  $R = \text{압출비}$ 이다. 식 (3)에서  $a$ 가 커지면, 즉, 금형의 출구 각도가 증가할수록 감소하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 Pugh<sup>7)</sup> 등은 열간 직접 압출에서 금형출구 각도  $2\alpha$ 가  $30^\circ$ 를 기준으로 커질수록 압출압력이 증가하고 있다는 실험 결과와는 상반된 것으로 나타나나 Tokizawa<sup>8)</sup> 등이 A6063 합금

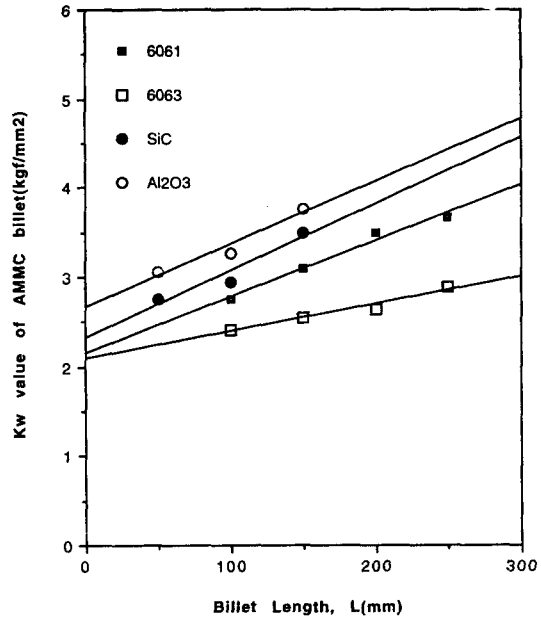


Fig. 4. Relationship between deformation resistance( $K_w$ ) and billet length.

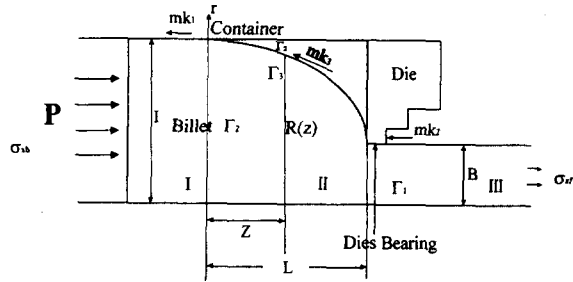


Fig. 5. Schematic diagram of friction between Al composite and container, dies.

을 가지고 간접 압출에서의 실험결과와는 비교적 잘 일치하고 있었다. 이것은 재료와 공구간의 마찰 특성과 재료의 유동특성에 기인한 것으로 본 연구에서 사용한 A6063으로 봉입된 복합재료의 압출용 빌렛의 유동특성 때문이라고 판단된다. 향후 이에 대한 보다 상세한 검토를 수행 해야 할 것이다.

Fig. 7은 강화입자의 첨가부피분율에 따른 마찰변형저항의 차(dp)를 검토하기 위하여 20vol. SiC<sub>0</sub>복합재의 길이를 달리하여 실험한 결과로 강화입자의 첨가량에 관계없이 길이에 따른 마찰변형저항, 즉 컨테이너와 빌렛간의 마찰전단변형저항은 증가하였다. 특히 부피분율이 증가할수록 압출변형저항의 차(dp)는

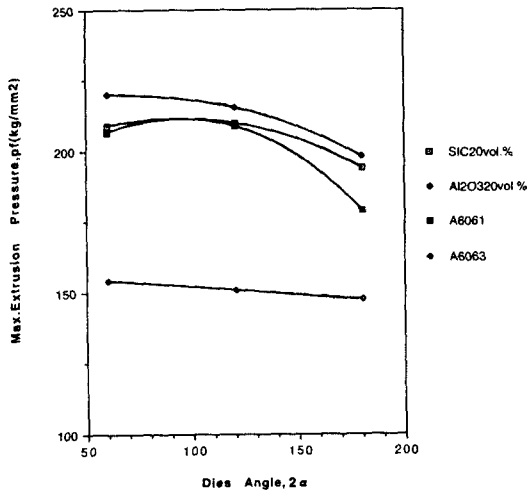


Fig. 6. Relationship between deformation resistance( $K_w$ ) and dies angle.

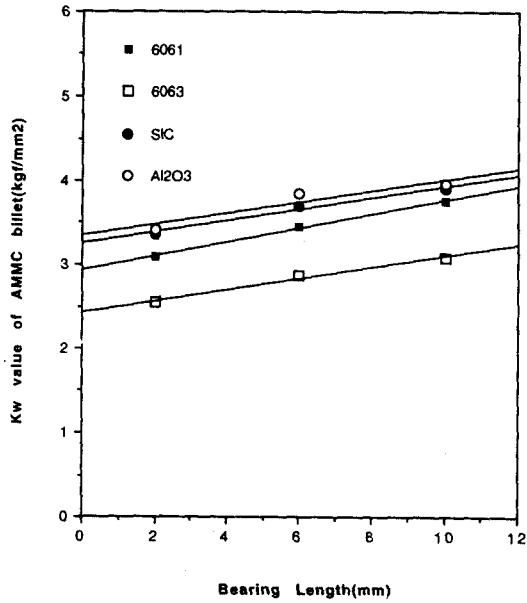


Fig. 8. Relationship between extrusion pressure and dies bearing length at different materials.

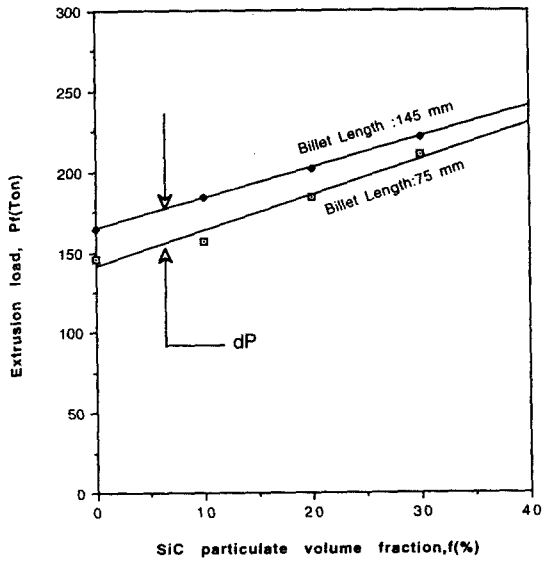


Fig. 7. The relationship between SiC particulate volume fraction and extrusion load at different billet length. a) 145mm, b) 75mm.

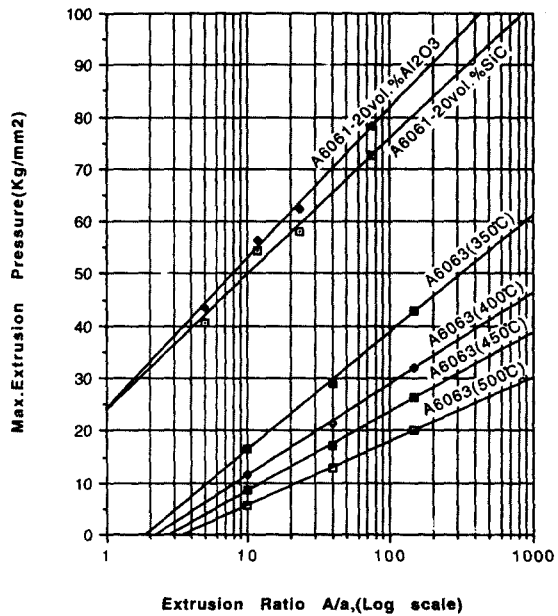


Fig. 9. Dependence of extrusion ratio on the specific extrusion pressure.

작게 된다는 것을 알 수 있었다.

금형 bearing과의 마찰 저항  $mk_2$ 의 영향을 검토하기 위하여 bearing 길이를 각각 달리한 경우에 변형저항의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 복합재의 경우 첨가 강화입자의 종류에 관계없이 거의 일정하였으며, 기지금속과 봉입재료로 쓰인 A6061과 A6063은 bearing 길이가 길어질수록 변형저항 값이 매우 작은 양이지만 서서히 증가하였다.

Fig. 9는 압출비에 따른 압출압력의 변화를 나타낸 것으로, 압출비가 증가함에 따라서 압출압력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 낮은 압출비의 경우에는  $SiC_p$ 로 강화된 복합재료나  $Al_2O_{3p}$ 로 강화된 복합재료와 거의 동일한 압

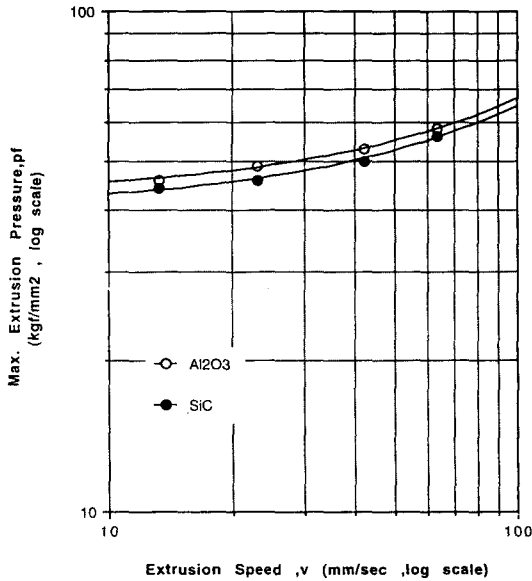


Fig. 10. Relationship between max. extrusion pressure and extrusion speed.  
a) A6061-20% vol.% SiC, b) A6061-20% vol.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

출압력을 나타내고 있지만, 압출비가 증가할수록 그 차이는 크게 되었다. A6063 합금, A6061 기지금속은 각 실험온도에서의 변형저항값의 변화를 관찰한 결과, 압출압력은 작게 되었다. 그러나 압출재의 단면적이 매우 작으면 압력이 증가하는데, 이것은 압출하중에서 다이스의 마찰과 전단에 필요한 응력이 중요한 요소로 작용하기 때문이다.

Fig. 10은 강화입자의 종류에 따라 복합재료 빌렛을 압출할때 압출속도, V에 따른 최대 압출압력을 나타낸 것이다. 압출속도의 증가, 즉 램 속도가 증가할수록 최대 압출압력은 증가하였다. 범용적인 압출기에서 압출압력과 압출속도는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$P = C_2 V^m \tag{4}$$

여기서 V=압출속도, m: 압출속도지수, C<sub>2</sub>=유동응력 및 변형저항에 관계되는 상수이다. 또한 변형속도와 압출속도는

$$\epsilon_t = \left( \frac{6V \cdot \ln R}{D} \right) \tag{5}$$

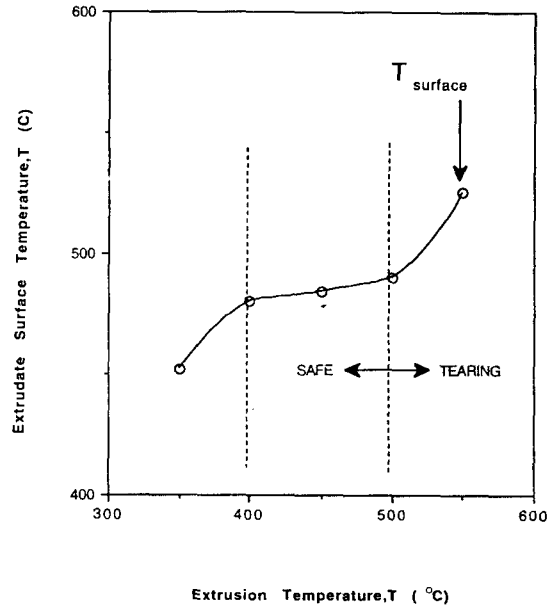


Fig. 11. Extrudate surface temperature at V<sub>max</sub> vs. billet temperature A6061-based particulate reinforced composites; particle SiC particle mean diameter 10μm, V<sub>max</sub> 63mm/sec.

의 관계가 있으며, 따라서 변형속도가 변형저항(K<sub>w</sub>)와의 관계는

$$K_w = \sigma_0 \cdot \epsilon_t^n \tag{6}$$

으로 나타내어진다. 여기서 σ<sub>0</sub>=재료의 유동응력, ε<sub>t</sub>=변형속도, n=온도에 따른 지수.

$$K_w = \sigma_0 \left( \frac{6V \cdot \ln R}{D} \right) \tag{7}$$

여기서, V=압출속도, R=압출비, D=빌렛 직경을 나타낸다. 식 (3) 및 (7)로부터 압출속도에 따른 압출압력의 증가에는 변형저항이 적용되고 있음을 알 수 있다. 입자에 따른 경향은 Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>나 SiC<sub>p</sub> 모두 동일하게 나타났다.

Fig. 11은 빌렛온도에 따른 압출특성을 평가하기 위하여 압출재 표면온도를 측정된 결과를 나타낸 것으로 빌렛 가열온도가 저온일 경우에는 압출후 표면 온도의 상승이 컸으며 이때의 온도상승은 ~50℃였으며 압출재 표면온도가 500℃ 이상이 되면 표면에 극심한 tearing 현상이 발생하였으며, 이러한 현상은 강화입자의 첨가량이 증가할수록 극심하게 나

타났다. 이로 보아 입자분산강화 복합재의 경우 입자직경  $10\mu\text{m}$ , 압출온도  $450^\circ\text{C}$ 에서 압출가공을 해야 진정한 압출복합재를 만들 수 있을 것으로 판단 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 분말야금법을 제조된 A6061기 복합재료의 열간압출가공에 있어서 압출압력에 미치는 강화입자의 종류, 빌렛 특성 및 압출조건에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) A6061기 복합재료의 전단변형저항에 미치는 강화입자종류의 영향은  $\text{SiC}_w > \text{Al}_2\text{O}_{3w} > \text{Al}_2\text{O}_{3p} > \text{SiC}_p$ 의 순으로 되었으며, 모든 강화입자에서 부피분율이 증가함에 따라서  $K_w$ 값도 증가하였다.

2) 압출조건, 강화입자의 첨가량 및 첨가입자의 평균입도에 관계없이  $\text{Al}_2\text{O}_{3p}$ 가 첨가된 복합재의 열간압출가공에 필요한 소요압력은  $\text{SiC}_p$ 의 경우보다 컸다. 이것은  $\text{Al}_2\text{O}_{3p}$  첨가 복합재가 보다 난가공성임을 알 수 있었으며, 또한 변형에 필요한 높은 활성화 에너지( $\text{SiC}$ 보다 약 1.5배)가 요구되는 고온압축 시험결과와 잘 일치하고 있다.

3) 압출압력은 압출 다이스 반각이 커질수록 압출압력은 감소하는 경향은 나타났는데, 이것은 다이스 반각에 의해 생성되는 빌렛과의 접촉면적이 증가하여 전단마찰응력( $\text{mk}_s$ )

이 상승하기 때문이다.

4) 압출시 압출온도 상승은  $\sim 50^\circ\text{C}$  정도 증가하였으며, 압출온도가  $500^\circ\text{C}$  이상이 되면 압출재 표면이 극심한 tearing이 발생하였다. 강화입자의 첨가량이 증가할수록 이 현상은 더 심하게 되었다.

#### 참 고 문 헌

1. H.J.Rack and W.Niskanen : Light Metal Afge, pp.9, Feb(1984)
2. M.H.Carvalho, T.Marcelo, H.Carvalhinhos, C.M.Sellars : J. Materials Sci., pp2101 27 (1992)
3. H. Asanuma, M.Hirohashi, E.Kawai : J. the JSTP, pp.1991, 27(1986-10)
4. 渡邊英雄, 大堀廣一 竹内 庸 : 輕金屬, pp. 633, 38(1988)
5. 渡邊修一郎 劑藤 勝義, 岡庭茂 : 輕金屬, pp.278, 40(1990)
6. M.F.Ashby : Strengthen Method in Crystals, pp131, Ed. by A. Kelly and R.B.Nicholson, Elsevier. (1971)
7. Pugh, H.L.D., and A.H. : The Hydrostatic Extrusion of Difficult Metals. J. Inst. Metals pp.201, 93(1964)
8. M.Tokizawa, N.Takatsuji : Journal of the JSTP, pp1675 vol.30 no.347 (1989-12)