

## SiC<sub>p</sub>/6061 Al 복합재료의 압출가공에 있어서 압출특성

조 형 호

생산기술연구원

### The Extrusion Characteristics in Hot Extrusion of SiC<sub>p</sub>/6061 Al Composite

Hyung-Ho Jo

Korea Academy of Industrial Technology

**초 록** 분말야금법으로 제조된 SiC<sub>p</sub>/6061 Al 복합재료의 열간 압출가공에 있어서 압출성에 미치는 빌렛의 특성과 압출조건의 영향에 대하여 조사하였다. 압출가공성의 난이도를 판단 할 수 있는 기준이 되는 최대압출력과 변형저항 값(K<sub>w</sub>)은 350ton 압출기를 이용한 압출압력의 측정과 Watanabe 등의 경험식에 의해 도출되었다. 6061Al합금기 복합재료 빌렛의 전단변형저항과 압출압력은 강화재(SiC<sub>p</sub>)의 부피분율이 증가함에 따라 증가하고 있으나, 증가되는 비율은 SiC<sub>p</sub>인 경우가 SiC<sub>w</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 작았다. 강화입자 크기가 작을 수록 변형저항 값이 증가하였고 압출성도 양호하였다. 변형저항 값의 증가는 기지금속의 가공경화에 기인하며, 최대압출력을 나타내는 피크는 강화재의 입자가 미세할 수록, 즉 가공경화가 클 수록 뾰족한 형상을 나타내었다. 압출온도가 증가할 수록 변형저항 값이 낮아져서 작은 압출력으로도 복합재료의 압출이 가능하나, 500°C 이상인 경우 압출재 표면에 극심한 tearing현상이 발생하였다.

**Abstract** In order to elucidate the extrusion characteristics of SiC<sub>p</sub>/6061 Al composite, deformation resistance, K<sub>w</sub> was determined using the empirical formula suggested by Watanabe et al, and also extrusion pressure was measured using the extrusion press with a capacity of 350 ton. The K<sub>w</sub>, which are proportional to extrudability, was increased with increasing volume fraction of reinforcement, SiC<sub>p</sub>, but decreased with increasing the particle size. The peaks of maximum extrusion pressure in curves of extrusion force vs ram stroke were changed sharply with decreasing the particle size. The elevated extrusion temperature resulted in the decreased K<sub>w</sub> and extrusion pressure, but caused the surface tearing of extrusion composite bars. The results showed that extrudability of the composite billets is depend on the extrusion conditions as well as the characteristics of reinforcement, SiC<sub>p</sub>.

## 1. 서 론

압출가공은 한 단계의 변형만으로도 복잡한 형상의 제품을 얻을 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에, 폭 넓게 응용되고 있는 소성가공법중의 하나이다. 그러나 비교적 소성가공성이 어려운 금속기 복합재료와 같은 소재를 압출할 경우에는 압출성에 미치는 요인 즉, 합금의 조성, 다이스구조, 압출온도, 압출속도, 압출압력등에 관해서 충분한 연구가 선행되어야 할 것이다. 그러나, 금속기 복합재료를 대상으로하는 압출가공에 있어서 대부분의 연구가 역학적 또는 조직적 특성을 규명하는 데

그치고 있으며<sup>1~4)</sup>, 복합재료를 실용화하는 데 요구되는 압출가공기술에 관련한 연구는 별로 없다. 본 연구에서는 SiC<sub>p</sub>/Al 합금기복합재료를 대상으로하여, 이들 빌렛이 가지고 있는 여러가지 특성이 압출 전단변형저항, 최대압출력등에 어떠한 영향을 미치는가를 조사함으로써 금속기 복합재료가 가공재로서의 활용가능성을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

SiC<sub>p</sub>/6061 Al 합금복합재료의 강화재료는 평균입도 4, 10, 20 및 40 $\mu$ m의 SiC분말을, 기지합금으로는 6061Al합금분말이 이용되었다.

Table 1. Chemical composition of matrix alloy 6061 (wt%)

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

Table 1은 6061Al합금분말의 화학조성을 나타낸 것이다. SiC<sub>p</sub> 강화재분말을 6061Al합금분말에 부피분율 10, 20 및 30%가 되도록 V형 혼합기로 기계적 교반을 행하였다. 혼합된 복합분말은 6000계열의 알루미늄합금 튜브에 canning하여 600°C에서 가열소둔을 행한 후, 압출기를 이용하여 450°C에서 210 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 30sec 가압성형하여 직경 73mm, 길이 140mm의 압출 빌렛을 제작하였다.

열간압출실험에는 350 ton급 수평식 압출기를 이용하였으며 내경 73mm, 길이 350mm의 컨테이너와 다이스각 90°, 다이스베어링 길이 8mm의 압출용 다이스를 사용하였다. 빌렛의 가열에는 칸달전기로를 이용하였고, 로내의 온도편차는 ±5°C였다. 300°C, 350°C, 400°C 및 450°C에서 20min 가열된 빌렛온도를 압출온도로 하였다. 압출압력의 측정에는 strain gauge가 내장된 압력변환기(Model PT 3000)를 압출기의 램에 부착하여, X축에 램의 변위가, Y축에 유압의 변화가 표시되는 XY기록계로부터 최대압출력을 읽어내었다. 램의 속도는 압출에 소요되는 시간을 램의 변위와 동시에 측정하므로써 구하였다. 램속도는 5~12mm/sec로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압출전단변형저항

압출변형저항은 압출가공성의 난이도를 판단하는 기준이 되고있으며, 이러한 값의 도출에는 압출력과 변형저항과의 관계를 나타내고 있는 A.Geleji<sup>5)</sup>, E.Siebel<sup>6)</sup>에 의한 식이 외에도 많은 이론식들<sup>7~10)</sup>이 이용되고 있다. 그러나, 이들 이론식의 대부분은 유동응력, Dead Metal Zone의 경각등이 parameter로 작용하기 때문에, 압출력의 측정만으로 전단변형저항 값을 구할 수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 여러가지 압출조건 및 복합재료 빌렛의 특성에 따라 압출력을 측정하여 경험적인 식(1)<sup>11)</sup>에 의해 변형저항 값, K<sub>w</sub>를 구하였다.

$$F = 3 \cdot K_w \cdot A \cdot \log \frac{R}{C_0} + K_w \left( \frac{4L \cdot A}{D} + R \cdot C_0 \cdot L_0 \right) \dots\dots\dots(1)$$

여기서, F=압출력(kgf), K<sub>w</sub>=빌렛의 압출 전단변형저항(kgf/mm<sup>2</sup>), R=압출비, L=빌렛 길이(mm), D=빌렛 직경(mm), C<sub>0</sub>=다이스원주길이(mm), L<sub>0</sub>=다이스베어링의 길이(mm), A=빌렛 단면적을 표시한다. 식(1)에서 알 수 있듯이 빌렛의 압출력은 빌렛 변형저항에 관계되는 항과 컨테이너 및 다이스와의 마찰에 기인한 항의 합으로 구성되어 있으며, 빌렛 압출 전단변형저항 K<sub>w</sub>에 비례하고 있다.

Fig. 1은 6061Al합금을 기지로 하는 복합재료에 있어서 강화재의 종류와 강화재의 부피분율에 따른 빌렛의 전단변형저항 값(K<sub>w</sub>)의 변화를 나타낸 것이다. 복합재료 빌렛의 전단변형저항은 강화재의 부피분율이 증가할 수록 증가하고 있으나, 본 실험에서 사용된 SiC<sub>p</sub> 강화 복합재료의 K<sub>w</sub>가 SiC<sub>w</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 강화재로 하는 복합재료의 K<sub>w</sub>보다 증가 폭이 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 강화재 SiC<sub>p</sub>의 입자크기에 따른 K<sub>w</sub>의 변화를 나타낸 것으로 20μm까지는 K<sub>w</sub>가 급격한 감소를 나타내고 있

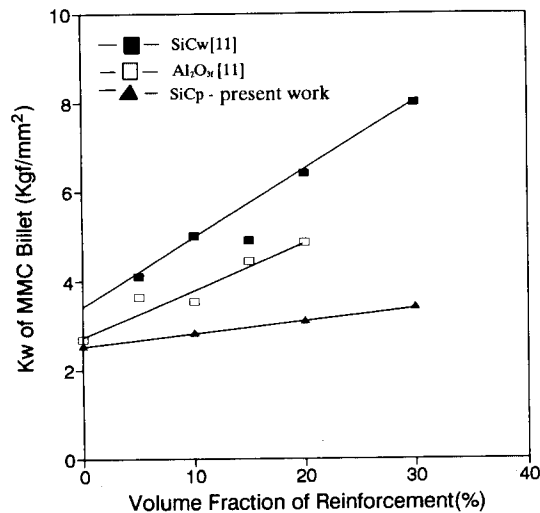


Fig. 1. Relationship between deformation resistance(K<sub>w</sub>) and reinforcement volume fraction -present work : extrusion temperature ; 450°C, extrusion ratio ; 12 -Watanabe et al<sup>11)</sup> : matrix alloy ; 6061, extrusion temperature ; 400°C, extrusion ratio ; 16

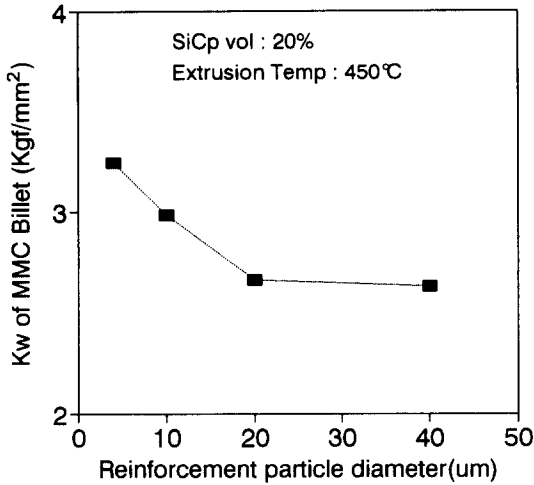


Fig. 2. Relationship between deformation resistance( $K_w$ ) and reinforcement particle diameter

으나, 그 이상의 크기에서는 완만한 감소를 보여주고 있다. Fig. 1 및 2의 결과로부터 SiC<sub>p</sub> 분산강화 복합재의 압출가공에서는 분산강화재의 입자반경의 크기 및 체적율에 따라서 변형저항 값이 변화할 수 있음을 알 수 있다.

강화재의 입자의 크기 및 체적율에 따른 변형저항의 변화에 대해서는 기지금속중에 SiC<sub>p</sub>와 같은 경한 입자가 분산된 복합재료에 있어서 기지금속의 변형저항의 증가  $\Delta\sigma_0$ 를 나타내는 다음과 같은 식으로 해석가능하다<sup>12)</sup>.

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

여기서  $K_c$ ,  $K_w$ =정수,  $E_2$ =복합재료의 종탄성계수,  $f$ =입자의 체적율,  $d$ =입자의 직경,  $b$ =Burgers vector,  $\epsilon_0^p$ =기지금속의 변형을 나타낸다. 즉, 이 식으로부터, 입자가 미세할 수록, 그리고 입자의 체적율이 증가할 수록 기지금속의 변형저항이 증가하게 되고, 따라서 압출가공은 어려워 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 압출온도에 따른 SiC<sub>p</sub>/6061Al복합재료 빌렛의 변형저항 값( $K_w$ )의 변화를 나타낸 것이다. 복합재료 빌렛의  $K_w$ 는 강화재의 종류에 관계없이 압출온도가 상승함에 따라서 감소하고 있으며, SiC<sub>p</sub>로 강화된 복합재 빌렛의  $K_w$ 는 전압출온도에 걸쳐 6061Al합금 빌렛의 경우보다는 높은 값을 나타내지만 SiC<sub>w</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 강화된 복합재료 빌렛의 경우보다 낮

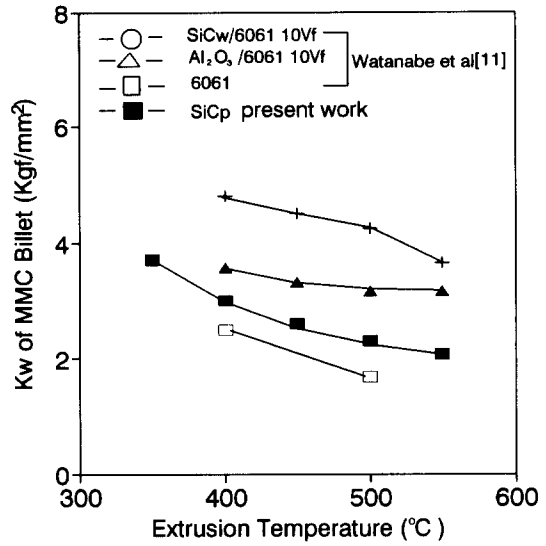


Fig. 3. Relationship between deformation resistance( $K_w$ ) and extrusion temperature

— present work : extrusion ratio ; 12, SiC<sub>p</sub>, vol ; 20 %  
 — Watanabe et al<sup>11)</sup> : matrix alloy 6061, extrusion ratio : 16, reinforcement ; SiC whisker, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> discontinuous fiber, volume fraction ; 20 %

은 값을 가지고 있다. 이것으로, SiC<sub>p</sub>로 강화된 복합재료가 SiC<sub>w</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 강화된 복합재료에 비하여 압출가공이 용이할 것으로 사료된다.

渡邊等<sup>11)</sup>에 의하면, 일반적인 압출기에서의 Al 압출가공에 있어서는 빌렛의 압출전단 변형저항이 7~8kgf/mm<sup>2</sup> 이상이 되면 압출이 불가능한 것으로 보고하고 있다. 본 실험에서 이용된 SiC<sub>p</sub>/6061의 경우, 강화재의 부피분율이 30%, 입자의 크기가 4 $\mu$ m이상, 압출온도 350 $^{\circ}$ C이상에서는  $K_w$ 는 4kgf/mm<sup>2</sup> 이하를 나타내므로 압출가능한 조건임을 알 수 있다.

**3.2 압출특성**

Fig. 4는 압출비에 따른 압출압력의 변화를 나타낸 것으로 압출비가 증가함에 따라서 압출압력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 압출비가 약 12가 될 때까지는 급격히 증가하고 있으나, 그 이상이 되면 비교적 완만하게 증가하고 있다. Fig. 5는 6061/SiC/20<sub>p</sub> 복합재료 빌렛을 압출할 때 램속도에 따른 최대 압출압력의 변화를 나타낸 것이다. 램속도의 증가,

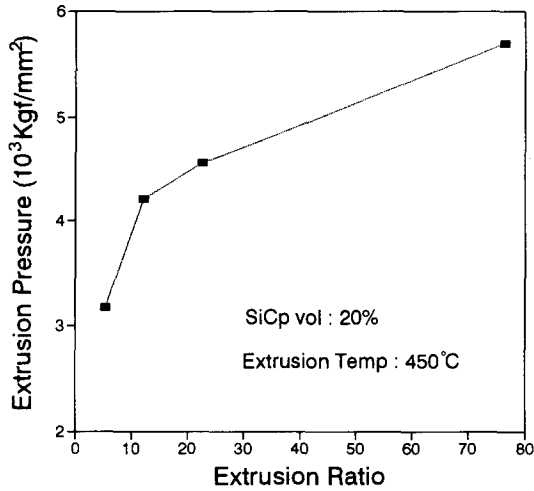


Fig. 4. Relationship between extrusion pressure and extrusion ratio for 6061/SiC/20<sub>p</sub> composite.

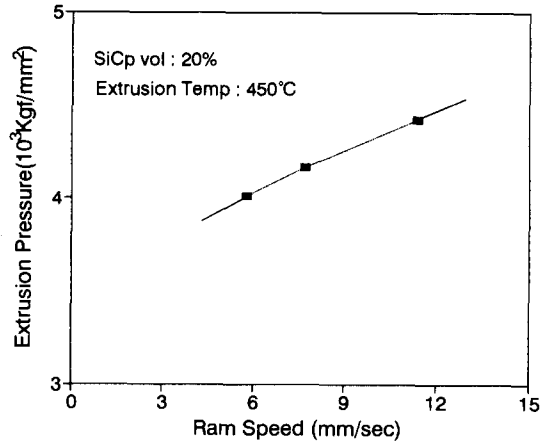


Fig. 5. Relationship between extrusion pressure and ram speed for 6061/SiC/20<sub>p</sub> composite.

즉 압출속도가 빠를 수록 최대 압출압력은 상승하고 있음을 알 수 있다.

범용적인 압출기에 있어서 압출속도와 압출

압력과의 관계는 다음과 같은 식으로 표시된다<sup>(13)</sup>.

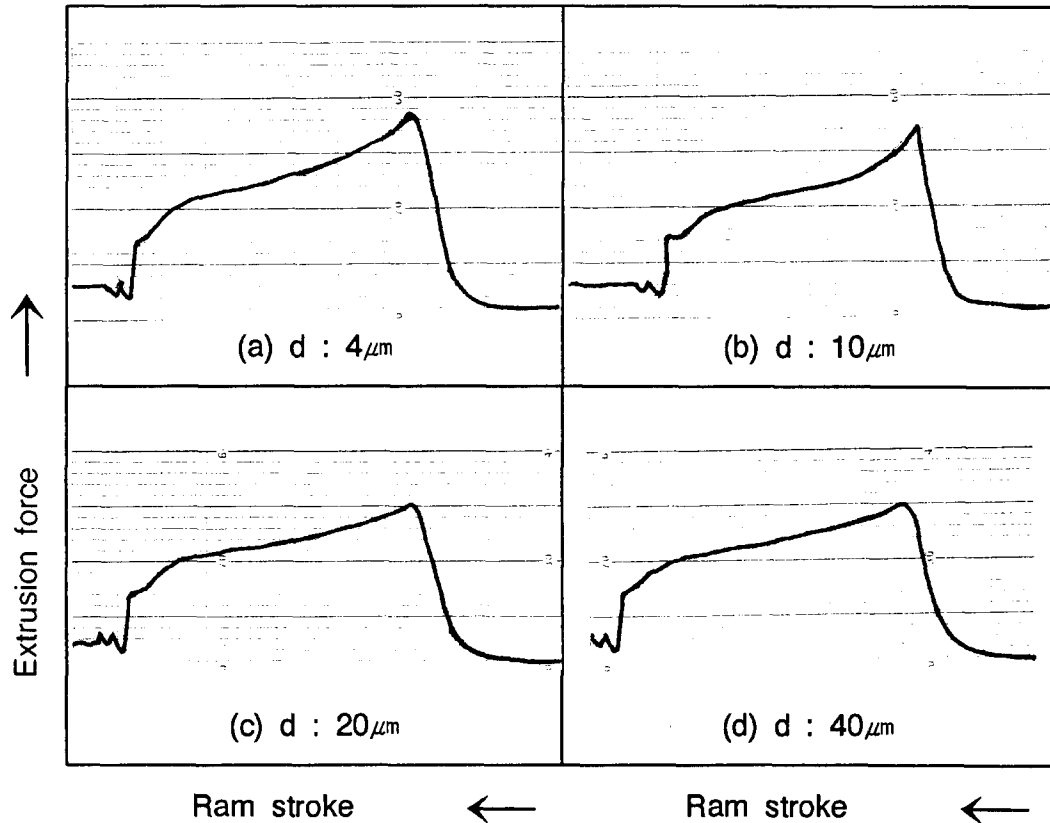


Fig. 6. Typical extrusion pressure vs ram stroke curves for 6061/SiC/20<sub>p</sub> with various reinforcement particle diameter. d ; reinforcement particle diameter, extrusion temp. ; 450°C, SiC<sub>p</sub> vol ; 20%.

$$P=C_2V^m \dots\dots\dots(3)$$

여기서, V=압출온도, m=압출속도 지수, C<sub>2</sub>=변형저항 및 유동력에 관련된 상수이다. 한편, 높은 변형속도가 요구되는 금속의 압출가공에서는 변형속도와 압출속도와의 관계를 식(4)<sup>14)</sup>와 같이 표시할 수 있으며,

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{6B \cdot \ln R}{D} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, R=압출비, D=빌렛 직경을 나타낸다. 식(4)와 재료의 변형저항(K<sub>w</sub>)과 변형속도와의 관계를 나타내는 식(5)<sup>15)</sup>를 조합하면,

$$K_w = \sigma_0 \cdot \dot{\epsilon}_t^n \dots\dots\dots(5)$$

여기서, σ<sub>0</sub>=재료의 유동응력, ε̇<sub>t</sub>=변형속도, n=온도에 따른 지수를 나타낸다.

다음과 같은 식으로 주어진다.

$$K_w = \sigma_0 \left( \frac{6V \cdot \ln R}{D} \right)^n \dots\dots\dots(6)$$

여기서, V=압출속도, R=압출비, D=빌렛 직경을 나타낸다.

식(3) 및(6)으로부터 압출속도의 증가에

따른 압출압력의 증가에는 변형저항이 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 강화재 SiC<sub>p</sub>의 입자크기가 (a)4μm, (b) 10μm, (c) 20μm 및 (d) 40μm인 복합재료 대상으로 하여 램stroke에 따른 압출력의 변화를 나타낸 것으로, 최대압출력을 표시하는 정점부근에서의 피이크의 모양은 SiC<sub>p</sub>의 입자크기가 미세할 수록 피이크는 뾰족한 모양을 하고 있다. 순 Al을 대상소재로 하여 압출온도에 따른 피이크의 모양을 관찰한 竹内등<sup>16)</sup>의 결과에 의하면 압출온도가 고온이 될 수록 즉, 가공경화가 저하할 수록 최대압출력을 표시하는 피이크가 뾰족하게 된다고 하고 있다. 그러나, 본 실험에서는 강화입자 SiC<sub>p</sub>의 크기가 미세할 수록, 그리고 압출온도가 감소할 수록 변형저항이 증가하게 되고 (Fig. 2 및 3), 가공경화도 증가(식(2))하게 되므로 Fig. 6의 결과는 竹内등의 해석결과와는 상반된 것이다. 현재로서는 압출실험의 대상재료가 다르기 때문에 이와 같은 상반된 결과에 대한 규명이 어렵겠지만, 향후 연구되어야 할 과제라고 여겨진다.

Table 2. Extrudability of 6061/SiC<sub>p</sub>/X<sub>p</sub> MMC billet

Specimen No.	Billet Condition		Extrusion Condition			Surface Quality
	SiC vol % (vol %)	SiC Particle Size (μm)	Extrusion Temperature (°C)	Extrusion Ratio	Ram Speed (mm/sec)	
1	0	10	450	12.5	7.7	◎
2	10	10	450	12.5	7.7	○
3	20	10	450	12.5	7.7	△
4	30	10	450	12.5	7.7	×
5	20	10	350	12.5	7.7	◎
6	20	10	400	12.5	7.7	◎
7	20	10	450	12.5	7.7	△
8	20	10	500	12.5	7.7	×
9	20	20	550	12.5	7.7	×
10	20	4	450	12.5	7.7	△
11	20	10	450	12.5	7.7	△
12	20	15	450	12.5	7.7	△
13	20	40	450	12.5	7.7	×
14	20	10	450	76.5	7.7	○
15	20	10	450	23	7.7	○
16	20	10	450	12	7.7	○
17	20	10	450	5	7.7	◎
18	20	10	450	12.5	5.7	○
19	20	10	450	12.5	7.7	○
20	20	10	450	12.5	11.4	△

Note : Surface Quality ◎(good) > ○ > △ > × (poor)

Table 2는  $\text{SiC}_p/6061 \text{ Al}$  복합재료 빌렛의 특성(강화재  $\text{SiC}_p$  입자의 크기, 부피분율) 및 압출조건(온도, 압출비, 램속도)에 따른 압출 표면상태를 정성적으로 평가하여 나타낸 것이다. 강화재의 부피분율이 크거나 압출온도가 높으면 표면결함 발생이 용이하였으며  $\text{SiC}_p$  입자가  $40\mu\text{m}$ 인 경우에도 표면에 극심한 tearing이 발생하였다. 또, 램속도 즉, 압출속도가 빠른 경우에도 압출 후반부에서는 tearing이 발생하였다. 특히, 온도가  $550^\circ\text{C}$ 인 경우에는 다

이스와 금속과의 응착에 의해서 tearing이 더욱 심화됨을 알 수 있었다. 표면형상은 압출비에는 크게 좌우되지 않고 비교적 양호하였다. Photo. 1은  $6061/\text{SiC}/20_p$  복합재의 압출온도에 따른 표면형상을 나타낸 것이다.  $450^\circ\text{C}$ 의 압출온도에서는 미려한 표면형상을 하고 있으나  $500^\circ\text{C}$ 의 압출온도가 되면 극심한 tearing이 발생하게 된다는 것을 보여주고 있다.

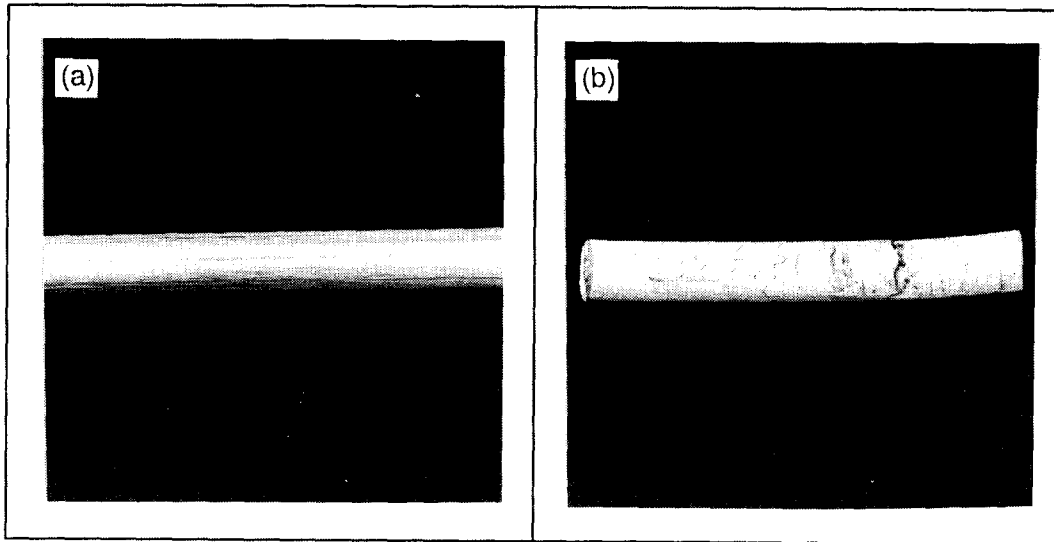


Photo 1. Surface quality of extruded 6061/SiC/20<sub>p</sub> composite.

- a) good surface : extrusion temperature ;  $450^\circ\text{C}$   
 b) surface tearing : extrusion temperature ;  $500^\circ\text{C}$

#### 4. 결 론

분말야금법으로 제조된  $6061/\text{SiC}/X_p$  복합재료의 열간 압출가공에 있어서 압출압력과 변형저항에 미치는 빌렛 특성 및 압출조건에 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $6061\text{Al}$  합금기 복합재료 빌렛의 전단 변형저항과 압출압력은 강화재( $\text{SiC}_p$ )의 부피분율이 증가함에 따라 증가하고 있으나 증가되는 비율은  $\text{SiC}_p$ 인 경우가  $\text{SC}_w$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 보다 작았다.

2. 강화 입자크기가 작을 수록 변형저항 값( $K_w$ )이 증가하였고 압출성도 양호하였다. 변형저항 값의 증가는 기지금속의 가공경화에

기인하며 최대압출력을 나타내는 피이크는 강화재의 입자가 미세할 수록, 즉 가공경화가 클 수록 뽕족한 형상을 나타내었다.

3. 압출온도가 증가할 수록 변형저항값이 낮아져서 작은 압출력으로도 복합재료의 압출이 가능하나  $500^\circ\text{C}$  이상인 경우 압출재 표면에 극심한 tearing 현상이 발생하였다.

4. 압출재 표면 특성에 미치는 압출비의 영향은 비교적 작았으나 램속도가  $12\text{mm}/\text{sec}$  이상이면 압출표면에 tearing이 발생하였다.

#### 참 고 문 헌

- H.J. Rack and W.Niskanen : Light Metal Age, Feb(1984) 9
- M.H. Carvalho, T.Marcelo, H.Carvalhinhos,

- C.M. Sellars : J. Materials Sci., 27 (1992) 2101
3. H. Asanuma, M. Hirohashi, E. Kawai : J the JSTP, 27(1986-10) 1191.
4. 渡邊英雄, 大堀廣一, 竹內 庸 : 輕金屬, 38 (1988) 633
5. A. Geleji : Acta Techn. Acad. Sci. Hung, 10 (1955) 187
6. E. Siebel : The Extrusion of Metals, Chapman & Hall, (1960) 201
7. W. Johnson, J. Mech : Phys. Sol., 4(1956) 191
8. A. Geleji : Acta Techn. Acad. Sci. Hung, 10(1955) 187
9. W. Eisbein, G. Sachs : Mitt. Materialsprü f., 16(1931) 67
10. 西原正夫 : 塑性と加工, 10(1969) 149
11. 渡邊修一郎, 齊藤勝義, 岡庭 茂 : 輕金屬, 40(1990) 278
12. M.F. Ashby : Strengthen Method in Crystals, Ed. by A. Kelly and R.B. Nicholson, Elsevier. (1971) p. 131
13. C.E. Pearson, R.M. Parkins : The Extrusion of Metals. Chapman & Hull (1960)
14. Deter ; Mechanical Metallurgy, Mcgrow-Hill (1986) p 628.
15. Vincent Depierre. : Transactions of the ASME, July (1970) 398
16. 竹內買司, 小林啓行 : 輕金屬, 21(1971) 628