

## Al-Si 합금의 열간압출에 있어서 압출압력에 관한 연구

조 형 호

생산기술연구원

### A Study on Extrusion Forces in Hot Extrusion of Al-Si Alloys

Hyung-Ho Jo

Korea Academy of Industrial Technology

초 록 현재까지 잘 알려진 압출이론식이 생산현장에 응용될 수 있는가를 조사하기 위하여, Al-Si 합금을 대상소재로 하여 각 압출이론식에 나타난 유동응력  $K_1$ , 변형저항  $K_n$ , Dead Metal Zone(DMZ)의 경각( $\alpha$ )등을 측정하였으며, 이들 값을 이용하여 최대압출력을 계산하였다. 550 ton의 압출기를 이용하여 측정된 최대 압출력과 비교분석을 행하였으며, 그 결과 이론식에 의해 최대압출력을 계산하기 위해 측정된 유동응력 및 변형저항 값은 신뢰할 수 있을 것으로 사료되었는데, 이것은 0.5이하에서 결정된 변형효율  $\eta_1$ 로서 판단 할 수 있었다. 최대 압출력은 Si함량이 증가할 수록 증가하게 되나, 압출온도가 증가할 수록 감소하고 있음을 알 수 있었다. Siebel식으로부터 계산된 최대압출력은 본 실험을 통하여 얻어진 최대압출력에 비교적 근접하고 있으나, Geleji식으로부터 계산된 최대압출력은 DMZ의 경각  $\alpha$ 가  $50^\circ$ 일 경우, 본 실험에 의해 얻어진 실제의 최대압출력에 근접하고 있었다. Geleji의 식은 DMZ의 경각에 매우 민감하고, 대상재료마다 DMZ를 일일이 측정해야 하는 번거로움 때문에 생산현장에서는 Siebel의 식을 이용하는 것이 보다 편리할 것으로 사료되었다.

**Abstract** To investigate that the theoretical formulas for extrusion forces are applicable to the manufacturing plant, the maximum extrusion forces were calculated from Siebel's and Geleji's formulas and also measured using 550 ton extrusion press. Parameters such as flow stress,  $K_1$ , angle of dead metal zone,  $\alpha$  were obtained experimentally in order to calculate the maximum extrusion forces by the theoretical formulas, and it was showed that the results were reliable as the deformation efficient factor,  $\eta_1$  was determined to be less than 0.5. The maximum extrusion forces calculated from Siebel's formula and Geleji's formula for the angle of dead metal zone,  $\alpha=50^\circ$  were approached to the experimental results. However, it was found that Siebel's formula is more useful to apply to the manufacturing plant.

### 1. 서 론

압출가공은 다른 소성가공법에 비하여 제조공정이 비교적 간단할 뿐 아니라, 한 단계의 변형만으로도 복잡한 형상의 제품을 얻을 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에, 폭 넓게 응용되고 있는 가공법중의 하나이다. 최근, 수송기계 경량화 추세에 부응하여 자동차의 범퍼보강재 등에 Al 합금의 압출가공재의 채택을 시도하고 있으며, Al 합금기 복합재료, 반응용금속, 난가공성 Al 합금 등의 압출가공에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>1-3)</sup>

압출가공성에 영향을 미치는 요인으로서는

합금조성, 다이스구조, 압출온도, 압출압력, 압출속도 등을 들 수 있다. 생산성 향상을 시키기 위해서는 압출속도가 우선적으로 고려되어야 할 사항이지만, 합금조성이 달라지거나 제품의 크기 또는 형상이 복잡한 새로운 압출재를 개발하기 위해서는 최적의 압출력을 예측할 수 있어야 한다. 그러나, 생산현장에서는 이들 변수에 대한 경험적인 자료만으로 압출 제품을 생산하고 있는 실정이므로, 새로운 압출재를 개발하기 위해서는 수많은 시행착오를 겪게 된다. Al 합금의 열간압출에 관한 연구<sup>4-6)</sup>의 대부분은 빌렛내의 온도분포나 역학적 거동을 규명하는 정도에 그치고 있으며, 복합

재료와 같은 난가공소재의 실용화에 요구되는 압출가공 기술에 관한 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 현재까지 잘 알려진 압출에 관한 이론식에 나타난 각 parameter를 측정된 후, 이들 값을 이용하여 계산한 최대압출력과 압출실험을 통하여 얻어진 실제의 최대압출력과 비교분석을 통하여, 이론식들에 대한 타당성을 규명하고, 동시에 생산현장에서의 응용

가능성을 검토하고자 하였다.

## 2. 실험방법

99.9%의 순 Al과 Al-20%Si, 모합금을 이용하여 순 Al, Al-1%Si, Al-5%Si 및 Al-10%Si 합금을 각각 용해 주조한 후, 주괴표면의 면삭에 의해 직경 79mm, 길이 230mm의 압출용 빌렛을 제작하였다. Table 1은 각 합

Table 1. Chemical composition of specimens(wt%)

Specimens	Si	Mn	Fe	Mg	Al
Pure Al	0.06	0.015	0.10	0.001	Bal.
Al-1wt% Si alloy	0.90	0.075	0.13	0.005	"
Al-5wt% Si alloy	4.67	0.033	0.21	0.067	"
Al-10wt% Si alloy	9.40	0.064	0.27	0.070	"

금의 화학성분을 표시한 것이다. 열간압출 실험에는 550 ton급 수평식 압출기를 이용하였으며, 내경 80mm, 길이 350mm의 컨테이너와 내경 8mm, 다이스 각 45°, 다이스 베어링 길이 8mm의 압출용 다이스를 사용하였다. 빌렛의 가열에는 연속식 고주파가열장치를 이용하였고, 로내의 온도 편차는  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 였다. 300°C, 350°C, 400°C, 및 450°C에서 20min 가열된 빌렛 온도를 압출온도로 하였다. 압출압력의 측정에는 strain gauge가 내장된 압력변환기 (Model PT 3000)를 압출기의 램에 부착하여,

X축에 램의 변위가, Y축에 유압의 변화가 표시되는 XY기록계로 부터 최대 압출력을 읽어 내었다. 램의 속도는 압출에 소요되는 시간을 램의 변위와 동시에 측정하므로써 구하였다. Fig. 1은 압출압력을 측정하기 위한 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 압출속도는 0.24~0.42 m/min였으며, 램속도는 0.1 m/min로 일정하게 하였다. 이론식에 의해 압출력을 도출하기 위해서는 유동응력 등의 변수에 대한 자료가 필요하게 된다. 유동응력을 결정하기 위하여 고온인장시험을 행하였다. 압출실험에서 사용되는 빌렛과 동일한 조건의 주괴에 대하여 길이방향으로 인장시편을 채취하여 칸탈로에 의해 300°C, 350°C, 400°C, 및 450°C의 온도에서  $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형속도로 고온인장시험을 행하여 진변형률 및 진응력으로 유동응

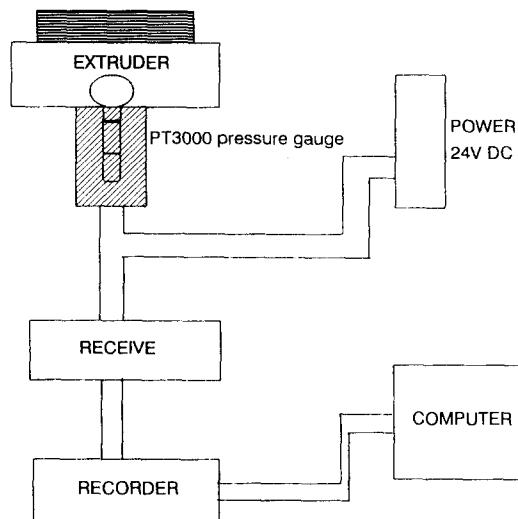


Fig. 1 Schematic diagram of pressure measuring system for extrusion forces

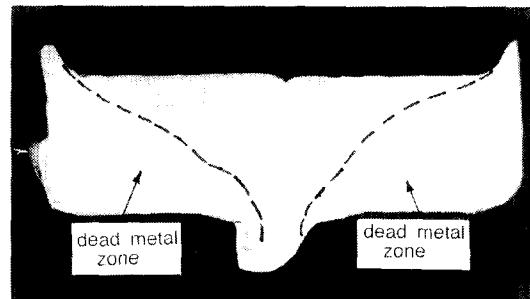


Fig. 2 Macrostructure of metal flow and dead metal zone after extruded at 300°C in pure Al

력곡선을 구하였다. 압출시의 금속유동(Metal Flow)과 Dead Metal Zone(이하 DMZ라고 한다)의 관찰에는 압출 잔재부를 Tucker's 시약으로 부식 후, 40%의 질산용액으로 표면세척한 시편을 이용하였다. Fig. 2는 압출 잔재부에 나타난 금속유동과 DMZ를 관찰한 결과이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 이론식의 검토

Table. 2는 압출력에 관련된 각각의 이론식을 나타낸 것이다.

E.Siebel<sup>7)</sup>, W.Johnson<sup>8)</sup> 등에 의해 도출된 압출력에 관한 식 (1)은 다이스 구멍 근방의 저항에 기인하는 압력과 콘테이너 근방에 작용하는 단순 전단압력으로 구성되어 있으며, 구성요소로서의 각각의 압력은 분리될 수 있기 때문에 해석이 매우 간단하며, 실제 압출압력을 예측하는 데 널리 이용되고 있는 식이다. 초등해석(elementary analysis)법을 기초

Table 2. Formulas for total extrusion force ( $F_t$ )

Author	Formula
E. Siebel et al	$F_t = A \cdot \omega \cdot K_w + \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot \mu_f \cdot K_f$ .....(1)
A. Geleji et al	$F_t = (2K_m - K_f) \cdot A \left\{ 1 + C^4 \sqrt{\frac{v}{L-b}} \cdot (L-b) \right\}$ .....(2)
G. Sacks et al	$F_t = K_f \left[ A \cdot \omega + d_1' \cdot \pi(L-b) + \frac{\pi \cdot b \cdot (d_1' + d_2)}{2 \sin \alpha} \right]$ .....(3)

Where, A = cross sectional area of billet (or container)  
 a = cross sectional area of the extruded product  
 $\omega$  = natural logarithm of the extrusion ratio (= ln A/a)  
 $\mu_f$  = coefficient of friction between billet surface and container wall  
 $K_w$  = deformation resistance  
 $K_f$  = flow stress  
 $K_m$  = mean deformation resistance  
 C = constant involving deformation resistance  
 v = ram speed  
 $d_1$  = diameter of billet  
 L = length of container (or billet)  
 $d_1' = d_1 - 2t_s$  ( $t_s$  = thickness of shell)  
 L-b = length of deformation zone  
 $\alpha$  = angle of dead metal zone

로 하여 도출된 식이다. A.Geleji 등<sup>9)</sup>에 의해 도출된 압출력에 관한 식 (2)는 Fig. 3의 봉상압출시의 압출압력상태를 나타낸 모식도에서 DMZ가 압축을 받지 않는 영역까지 가압판이 이동한다고 가정하여, 콘테이너내에 있는 빌렛이 램에 의해 압축응력을 받을 때, 횡단면 I에 작용하는 압출력 [ $F_1 = (2K_m - K_f) \cdot A$ ] 과 횡단면 I과 가압판사이의 길이 (L-b)내의 전 영역에서 소성변형을 일으킬 때, 램을 움직이는데 요하는 힘 [ $F_2 = (2K_m - K_f) \cdot \varphi \cdot V$ ,  $V = (L-b)A$ ,  $\varphi = C^4 \sqrt{(1/L-b)}$ ], C는 정수이며, 통상의 압출온도에서 0.025로 주어진다]의 합으로 구성된다. 이 식에서는 DMZ의 경각  $\alpha$ 의 의존도가 클 뿐만 아니라, 대상재료마다 일일이 DMZ의 경각을 측정해야 하는 번거로움이

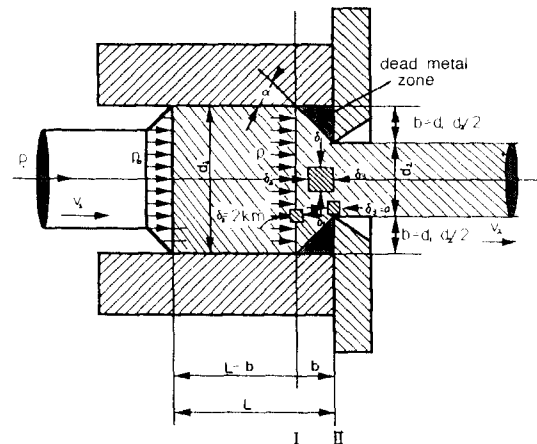


Fig. 3 Schematic illustration of forward extrusion forces

있다. G.Sachs와 W.Eisbein<sup>(9)</sup>에 의해 도출된 식(3)은 가압판이 빌렛의 직경보다 적을 경우 셀을 남기면서 압출한다고 가정하여, 빌렛내의 총체적을 변형시키는데 요하는 압출력 ( $F_1 = A \cdot K_f \cdot \ln A/a$ ,  $K_f$ 는 변형저항,  $A$ 는 빌렛의 단면적  $a$ 는 압출재의 단면적을 각각 표시한다), 셀을 형성하는데 요하는 힘 ( $F_2 = K_f \cdot d_1' \cdot \pi \cdot (L-b)$ ,  $d_1' = d_1 - 2t_s$ ) 및 금속의 유동층과 DMZ사이의 경계층에서 일어나는 마찰저항을 극복하는데 필요한 압출력과의 합으로 이루어진다. 이 식은 압출재의 표면결함을 최소화하기 위해 셀을 남기면서 압출하는 경우에 적

용가능할 것으로 생각되지만, 실험결과와는 상당한 오차를 나타내는 단점이 있다. 그러나, 이 이론은 압출과정을 보다 깊게 이해할 수 있는 수단이 된다는 데 의의가 있다. Table 2에 표시한 식 이외에도 竹内 등<sup>(5)</sup>에 의해 제안된 식을 포함하여 많은 이론식<sup>(11-12)</sup>이 발표되고 있으나, 본 연구에서는 비교적 잘 알려진 식(1)과 (2)만을 이용하여 실험치와 비교 검토하였다.

### 3.2 유동응력과 변형저항

압출압력에 관한 이론식을 계산하기 위해서는 유동응력, 변형저항, 마찰계수 등의 pa-

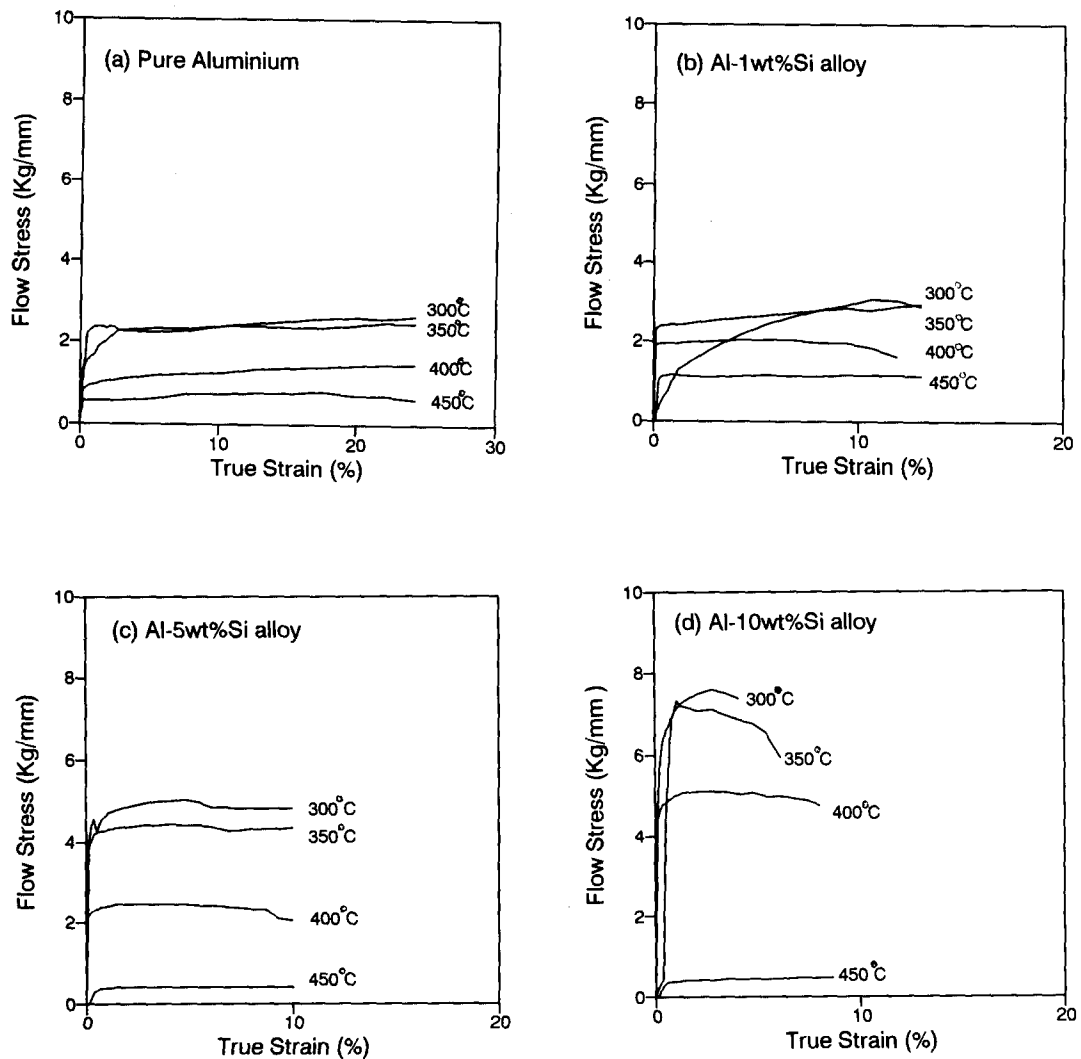


Fig. 4 Variation of flow stress with true strain in (a) pure Al, (b) Al-1wt%Si alloy, (c) Al-5wt%Si alloy and (d) Al-10wt%Si alloy, respectively.

parameter가 우선적으로 결정되어야 한다. Fig. 4는 순 Al(a), Al-1%Si(b), Al-5%Si(c) 및 Al-10%Si(d) 합금에 대하여 고온인장시험을 통하여 얻은 유동응력-변형률과의 관계를 각각의 온도에 따라 나타낸 것이다. Si의 함량이 증가할 수록 유동응력이 더욱 증가하고 있으며, 순 Al의 경우, 400°C 이하에서는, 변형률에 따라 유동응력이 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 400°C 이상에서는 변형률에 관계없이 거의 일정한 값을 유지하는 정상상태를 나타내고 있다. Si을 1% 첨가한 Al-1%Si 합금의 경우, 순 Al과 거의 같은 경향을 나타내고 있으나, Si이 5%이상 첨가된 합금의 경우는 약간 다른 경향을 표시하고 있다. 즉, 300°C에서부터 비교적 높은 유동응력을 나타내며, 극히 낮은 변형영역에서 최대의 유동응력을 나타내고 있다. 그리고, 유동응력의 감소폭은 Si 함량이 높을 수록 커지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 콘테이너와 빌렛 사이의 마찰을 무시할 경우, 변형 중에 일어

나는 내부전단의 소멸 및 다이스의 마찰에 의한 소멸을 고려한 변형저항은 E.Siebel등에 의해 제안된 식 (1)로 부터 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$K_w = \frac{F_i}{A_i \cdot \omega} \quad (4)$$

그러나, A.Geleji등은 평균변형저항  $K_m$ 을 도입하였으며, DMZ과 내부마찰계수를 고려한 다음과 같은 식으로 주어지며, 식 (2)의 우변 첫항에 포함되어 있다.

$$K_m = \frac{K_i}{1 - \left[ \frac{A-a}{2A} \left( \frac{1+\mu_f}{\sin \alpha} \right) \right]} \quad (5)$$

Table 3은 각각의 합금에 대하여, 고온인장 시험에 의한 유동응력값  $K_i$ , 식(4)에 의한 변형저항  $K_w$ , 변형효율( $\eta_i = K_i/K_w$ ) 및 E.Siebel 등에 의한 식 (1)에 따라 계산된 압출력을 각각 나타낸 것이다. 변형효율은 압출가공의 난이도 뿐 아니라, 변형저항과 유동응력 값의

Table 3.  $K_w$ ,  $K_i$ ,  $\eta_i$  and  $F_i$  calculated by Siebel's formula at different extrusion temperatures in pure Al and Al-Si alloys

Materials (Specimen)	Temp. (°C)	$K_w$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$K_i$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\eta_i$	$F_i$ (Ton)
pure Al	300	11.1	2.7	0.23	301
	350	10.4	2.5	0.23	282
	400	11.4	1.5	0.12	289
	450	9.6	0.8	0.08	236
Al-1wt%Si alloy	300	15.4	3.3	0.21	412
	350	11.3	3.1	0.26	312
	400	11.4	2.0	0.17	299
	450	10.7	1.2	0.11	267
Al-5wt%Si alloy	300	15.7	5.1	0.31	450
	350	13.7	4.4	0.31	393
	400	12.5	2.5	0.19	333
	450	11.8	0.1	0.03	272
Al-10wt%Si alloy	300	16.1	7.6	0.46	502
	350	14.2	5.1	0.35	418
	400	13.5	4.4	0.32	389
	450	12.1	0.5	0.04	287

신뢰성을 판단하는 기초자료가 된다. 즉, 변형효율이 클 수록 압출가공이 어렵다는 것을 보여 주고 있다. M.Vater 등<sup>(13)</sup>의 실험결과에 의

하면, 합금의 종류, 압출온도, 윤활제의 사용 여부 등에 관계없이 변형효율  $\eta_i$ 는 0.5이하의 값에서 결정된다고 하였다. 본 연구에서 계산

된 변형효율도 대부분 0.4이하에서 존재하므로, 유동응력 및 변형저항 값은 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다. 변형저항의 경우, 온도의 상승에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 그 감소폭은 유동응력의 변화에 비하여 매우 작다는 것을 알 수 있다. 또, 동일한 압출온도에서는 1wt% 이상 함유한 Al-Si 합금의 변형저항이 순Al에 비하여 큰 값을 나타내고 있으나, Si 증가에 따른 변형저항 값의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 주조 중에 생성된 공정 Si이 변형을 저지하기 때문이라

고 사료되지만, 공정 Si이 일정량 이상이 되면 변형저지 효과는 거의 나타나지 않음을 보여주고 있다. A.Geleji 등에 의한 식(2)를 이용하여 압출력을 구하기 위해서는 유동응력 뿐만 아니라, DMZ의 경각  $\alpha$ 를 구해야 한다. 본 실험에서 측정된 DMZ의 경각  $\alpha$ 는 45°에서 60°의 범위에 있었다. Table 4는 각 합금의 온도에 따른 평균변형저항  $K_m$ 과 Geleji 등에 의한 식(2)에 따라 계산된 압출압력을 나타낸 것이다. DMZ의 경각에 따라 압출력이 상당한 차이를 나타내고 있는 데, 이것으로

Table 4.  $K_m$  and  $F_1$  calculated by Geleji's formula at extrusion temperature 350°C in pure Al and Al-Si alloys

Materials (Specimen)	$\alpha(^{\circ})$	$K_m$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$F_1$ (Ton)
pure Al	45	29.8	281
	50	21.4	199
	60	15.4	140
Al-1wt%Si alloy	45	36.9	348
	50	26.5	245
	60	19.1	173
Al-5wt%Si alloy	45	52.4	493
	50	37.6	348
	60	27.2	246
Al-10wt%Si alloy	45	60.7	571
	50	43.5	403
	60	31.5	285

Geleji 등의 식은 DMZ의 경각  $\alpha$ 에 매우 민감함을 보여주고 있다.

### 3.3 최대압출력의 측정값과 계산 값과의 비교

Fig. 5는 (a) 300°C, (b) 350°C, (c) 400°C 및 (d) 450°C의 압출온도에 대하여 램의 변위에 따라 측정된 압출력의 변화를 나타낸 것이다. 최대압출력을 압출온도가 증가함에 따라 저하하게 되나, Si 함량이 증가함에 따라서는 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 압출실험에서 얻은 최대압출력과 Siebel의 식 및 Geleji의 식에 의해 계산된 각각의 최대압출력을 Si 함량에 따라 나타낸 것이다. Siebel의 식에 적용된 변형저항  $K_w$ 와 유동응력  $K$ 는 Table 3에 나타낸 값을 이용하였으며, Geleji 식에 적용된 변형저항  $K_m$ 은 Table 4에 나타

낸 값을 이용하였다. A.Geleji등<sup>9)</sup>에 의하면 모든 금속에 DMZ의 경각  $\alpha=45^{\circ}$ 를 적용하여 압출력을 계산하고 있으나, 본 실험에서 측정된 DMZ의 경각범위내에 있는 45, 50 및 60°를 이용하여 최대압출력을 계산하였다. Geleji의 식으로 부터 도출된 최대압출력은 DMZ의 경각에 따라 상당한 차이를 보여주고 있으나,  $\alpha=50^{\circ}$ 일 경우가 실제 압출력에 가장 근접하고 있음을 알 수 있다. 한편,  $\alpha=36^{\circ}$  이하가 되면  $K_m$ 값이 음의 값을 나타내기 때문에 Geleji식에서의 최대압출력도 음의 값을 가지는 모순이 생긴다. 이처럼, Geleji식으로 부터 구해지는 최대압출력은 DMZ의 경각에 대한 의존성이 크기 때문에, 생산현장에서는 Siebel 식을 이용하는 것이 보다 편리할 것으로 사료된다.

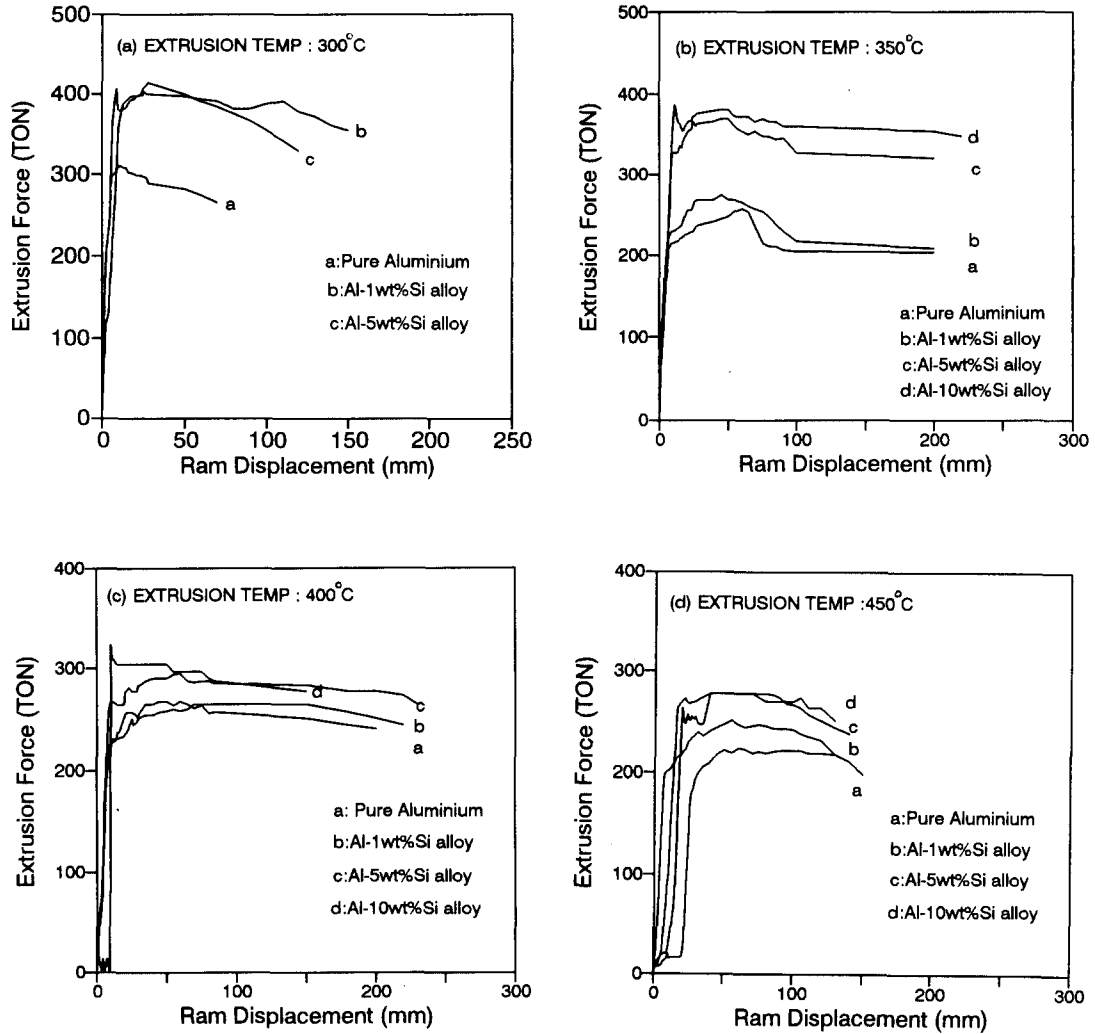


Fig. 5 Variation of extrusion forces with ram displacement at extrusion temperature (a) 300°C, (b) 350°C, (c) 400°C and (d) 450°C, respectively

#### 4. 결 론

Al-Si 합금을 대상소재로 하여, 압출에 관한 이론식에 나타난 각 parameter를 측정 한 후, 이들 값을 이용하여 계산한 최대압출력과 550 ton의 압출기를 이용하여 측정 한 결과와의 비교 분석을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 변형효율은 0.5이하에서 결정되었으므로, 압출력을 계산하기 위해 측정된 유동응력 및 변형저항값은 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.
2. 최대 압출력은 Si 함량이 증가할 수록 증가하게 되나, 압출온도가 증가할 수록 감소하고 있음을 알 수 있다.
3. Siebel식으로부터 계산된 최대압출력은 본 실험을 통하여 얻어진 최대압출력에 비교적 근접하고 있으나, Geleji식으로부터 계산된 최대압출력은 DMZ의 경각  $\alpha$ 가 50° 일 경우, 본 실험에 의해 얻어진 실제의 최대압출력에 근접하고 있다.
4. Geleji의 식은 DMZ의 경각에 매우 민감하고, 대상재료마다 DMZ를 일일이 측정해야 하는 번거로움 때문에 생산현장에서는

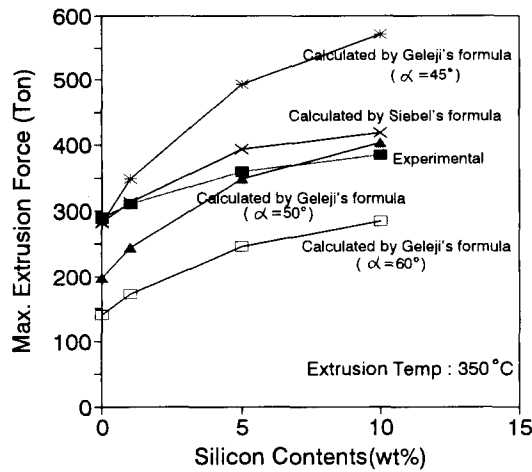


Fig. 6 Comparison of the maximum extrusion forces calculated by the theoretical formulas with the experimental results

Siebel의 식을 이용하는 것이 보다 편리할 것이다.

#### 참고 문헌

1. G.M.Pharr, S.V.Courington, J.Wadsworth, T.G.Nieh : J.Mater.Res., 6 (1991) 2653

2. 山口裕二, 磯貝光之, 村上 哲 : 輕金屬, 41 (1991) 126
3. 齊藤勝義, 渡邊悽充 : 輕金屬, 35 (1985) 297
4. R.D.Weber : The Wire Industry, Feb., (1960) 165
5. 竹内寛司, 小林啓行 : 輕金屬, 21 (1971) 628
6. 竹内寛司, 草野拓南 : 輕金屬, 22 (1972) 28
7. E.Siebel : The Extrusion of Metals, Chapman & Hall, (1960) 201
8. W.Johnson, J. Mech : Phys. Sol., 4 (1956) 191
9. A.Geleji : Acta Techn. Acad. Sci. Hung, 10 (1955) 187
10. W.Eisbein, G.Sachs : Mitt. Materialsprüf., 16 (1931) 67
11. 西原正夫 : 塑性 と 加工, 10 (1969) 149
12. B.A vitzur : Metal Forming Process and Analysis, (1986) p. 153, McGraw-Hill
13. M.Vater, C.Rathjen : Fortschrittsberichte VDI, 2 (1969) 9