

## 論文

## 금형형상이 금속복합재료의 압출성에 미치는 영향

김남환\* · 이성호\*\* · 강충길\*\*\*

**The Effect of Die Shape on Hot Extrudability of  
Fiber Reinforced 6061 Al Alloy**

N. H. Kim\*, S. H. Lee\*\*, and C. G. Kang\*\*\*

**ABSTRACT**

In order to investigate the influence of die shape on the hot extrudability of the metal matrix composite (short alumina fiber reinforced 6061 aluminium alloy), the prediction of detailed informations such as the state of stress, strain and strain rate as well as metal flow in extrusion process, and the experimental study have been performed with variously shaped dies. The commercial code DEFORM is used for finite element analysis of extrusion process. Mechanical responses of the composites for the analysis are calculated on different temperature conditions with Eshelby model. In experiment, the primary products of composite billets for the extrusion are fabricated with compocasting and then the billets are extruded through conical and curved dies with various extrusion ratios. The calculated extrusion load-punch displacement behaviour is compared favourably with experimental results.

## 초 록

본 연구에서는 알루미늄 단섬유로서 강화된 6061 알루미늄기지 금속복합재료의 열간 축대칭 압출 공정에서 압출금형의 형상이 압출성에 미치는 영향을 연구하였다. 압출공정의 유한요소 해석을 통하여 제시된 몇가지 형상의 금형에 대하여 압출시의 응력, 변형을, 변형률속도, 온도 및 금속유동의 분포를 구하고 해석결과를 비교 분석하였다. 해석을 위한 복합재료의 기계적 특성은 기지재료와 강화재료의 물성으로부터 Eshelby의 이론을 이용하여 유도하였다. 실험에서는 반응용가공법에 의하여 금속기지 복합재료를 제조한 후 열간 압출을 실시하고 유한요소 해석결과와 비교 검토하였다.

## 1. 서 론

금속 기지 복합재료 (Metal Matrix Composites, 이하 MMCs)는 기존의 금속재료에 비하여 강성 및

강도면에서 우수하므로 우주항공 산업 및 군수산업 등에서 구조재료로서 사용되고 있으나 가격 및 가공성의 문제가 지적되어 왔다[1]. 그러나 단섬유 및 입자 형태의 강화재와 같은 불연속 강화재의 경우 이러한 문제

\* 부산대학교 대학원

\*\* 국방과학연구소

\*\*\* 부산대학교 정밀기계공학과

의 개선이 가능할 뿐만 아니라 기존의 소성가공법에 의하여 성형이 가능하므로 보다 많은 응용분야, 특히 자동차 산업분야에서의 적용을 기대할 수 있다[2]. MMCs를 구조재료로서 사용하기 위해서는 용탕단조법 또는 반응용가공법에 의하여 빌렛을 제조한 후 압출, 압연 및 단조 등의 소성가공에 의한 2차 가공공정에 의해 정형으로 가공할 필요가 있게 된다. MMCs는 기지재료인 주조용 알루미늄 합금이나 구조용 알루미늄 합금에 강화재료인 SiC 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자나 단섬유를 보강한 형태로 주로 제조되고 있다. 특히 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화재료는 2000, 6000, 7000 계열의 알루미늄 합금에서 용융상태 안정도(molten state stability)가 우수하다고 알려져 있다[2].

압출공정은 초기의 잉곳(ingot)에 상관없이 MMCs의 2차 가공방법으로서 가장 널리 사용되고 있는 성형법 중의 하나이다. 그러나 압출시 central bursting 및 surface tearing과 같은 결함이 보고되고 있는데, 이러한 결함은 MMCs 제품의 품질에 좋지 못한 영향을 미치게 된다[2].

최근의 MMCs 압출공정에 관한 연구동향을 살펴보면 Kaimer[3]는 Mg 분말과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단섬유를 혼합하여 빌렛을 제조한 후 압출을 실시하여 강화재료의 배향성 및 MMCs의 기계적 성질을 조사하였으며, Imai[4]는 용탕단조법에 의하여 제조되어진 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AC8A 복합재료에 대한 열간압출의 가능성을 제시하여 2차 가공에 의한 복합재료의 특성에 대하여 검토하였다. 또한 Jeffery[5] 및 Greefield[6] 등은 각각 용융교반법에 의하여 기지재료에 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 및 단섬유 등을 분산시켜 MMCs를 제조한 후 압출공정에서 발생하는 금형의 마모현상, 기계적 성질 및 계면 반응 등을 관찰하였다. 한편 Kiuchi[7] 등은 SiC와 세라믹 단섬유 등을 Al 5056 분말에 혼합한 후 압출에 의하여 섬유 방향을 제어하고, 반응용영역 온도에서 단조 및 압출을 행하여 섬유의 배향과 파단, 계면상태 및 기계적 성질 등을 조사하였다.

본 연구에서는 알루미늄 단섬유로서 강화된 6061 알루미늄합금 기지 금속복합재료의 열간 축대칭 압출공정에서 압출금형의 형상이 압출성에 미치는 영향을 연구하였다. 압출공정의 유한요소 해석을 통하여 제시된 몇가지 형상의 금형에 대하여 압출시의 응력, 변형을, 변형률속도, 온도 및 금속유동의 분포를 구하고 해석결과를 비교 분석하였다. 해석을 위한 복합재료의 기계적 특성은 기지재료와 강화재료의 물성으로부터

Eshelby의 이론을 이용하여 유도하였다. 실험에서는 반응용가공법에 의하여 금속기지 복합재료를 제조한 후 열간 압출을 실시하고 유한요소 해석결과와 비교 검토하였다.

## 2. 유한요소 해석

본 연구의 금속기지 복합재료 압출공정의 유한요소 해석에는 금속 성형 해석용 코드인 DEFORM(Ver. 4.0, SFTC)을 사용하였으며, 이 코드는 flow formulation approach에 기초하고 있다[8]. 압출공정에서는 가공재료에 큰 소성변형이 발생하므로 가공재료의 기계적 특성으로서는 강-점소성 재료 모델을 사용한다. 이 때, 가상일의 원리로부터 다음의 변분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\delta\Phi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV + \int_V K \delta\epsilon_v \delta\epsilon_v dV - \int_S F_i \delta u_i dS = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $V$ 와  $S$ 는 각각 가공물의 체적과 표면적이며,  $K$ 는 일정 체적을 보장하기 위한 벌칙상수(penalty constant)이다. 위 방정식은 이산화과정 후 절점변수 형태로 변환되어 절점속도가 기본변수가 되며, 속도해는 반복과정을 통하여 구하게 된다.

그리고 다음의 열전달 지배방정식도 마찬가지로 유한요소 과정에 의하여 이산화된다.

$$kT_{,i,i} + \dot{q} - \rho c_p \dot{T} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $k$ 는 열전도도,  $kT_{,i,i}$ 는 열전달율,  $\rho c_p \dot{T}$ 는 내부에너지 변화율을 나타낸다. 그리고  $\dot{q}$ 는 열발생율이며 다음 식으로부터 구한다.

$$\dot{q} = \eta \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\eta$ 는 소성변형 에너지가 열로 변환되는 효율로서 가공재료에 의존하며 대개의 재료에서 0.9~0.95의 값을 가진다. 그리고  $\bar{\sigma}$ 와  $\dot{\bar{\epsilon}}$ 은 각각 가공재료의 등가응력과 등가변형률속도를 나타낸다.

Fig. 1은 열간압출 장치의 개략도를 나타낸다. 그리고 Fig. 2는 유한요소 해석에 사용한 압출 금형의 형상을 나타내는데 압출비( $\lambda$ )가 3.06인 원추형 금형과 압출비가 3.06, 5.44 및 8.51인 세종류의 곡면 금형을

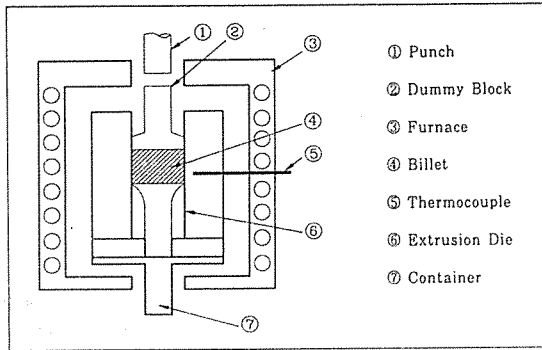
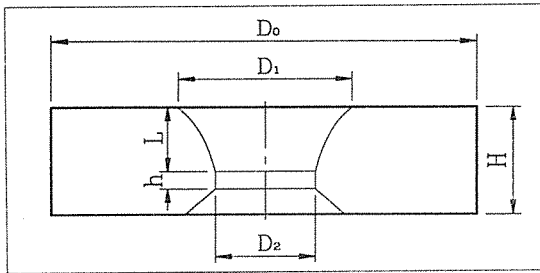
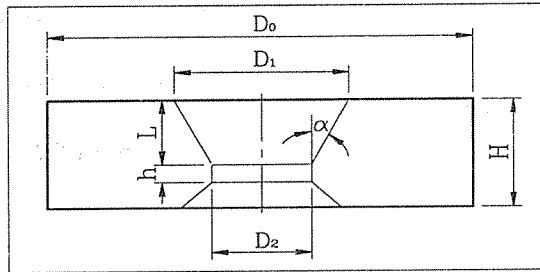


Fig. 1. Schematic diagram of hot extrusion apparatus



(a) curved die



(b) conical die

Fig. 2 Shapes of dies for axisymmetric hot extrusion

사용하였다. 압출 빌렛의 초기 형상은 지름 35mm, 길이 60mm의 원통형이며, 유한요소 해석은 각 압출 금형에 대하여 가압 펀치의 변위가 45mm일 때까지의 압출공정에 대하여 수행하였다. 이 경우 압출공정이 축대칭(axisymmetric)이므로 대칭성에 의하여 전체의 1/2을 해석대상으로 하였다.

펀치의 하강속도는 4.5mm/sec였으며 소재와 컨테이너, 금형 사이의 마찰계수( $\mu$ )는 0.1로 설정하였다. 한편, 초기의 빌렛 온도는 500℃이며 소재와 공구 사이에 열전달은 일어나지 않는다고 가정하였다. Fig. 3은 강화재료의 체적분율( $V_f$ )이 15%일 때의 온도변화에 따른 복합재료의 응력-변형을 선도를 나타낸다. 이 때

Table 1. Mechanical properties of matrix, reinforcement and composite

Materials	Matrix (Al 6061)					Reinforcement (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Composite (V <sub>f</sub> =15%)				
	25℃	100℃	200℃	300℃	500℃		25℃	100℃	200℃	300℃	500℃
Temperature (℃)											
Young's modulus (GPa)	71	67.7	64.5	53.4	33.7	300	87.5	83.8	80.3	67.8	44.5
Density(kg m <sup>-3</sup> )	2700					3300	2790				
Poisson's ratio	0.33					0.24	0.317				

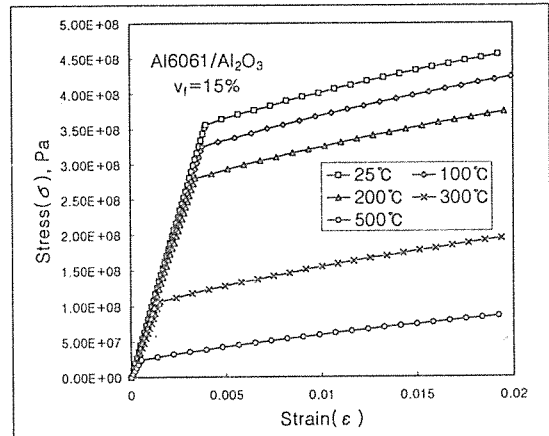
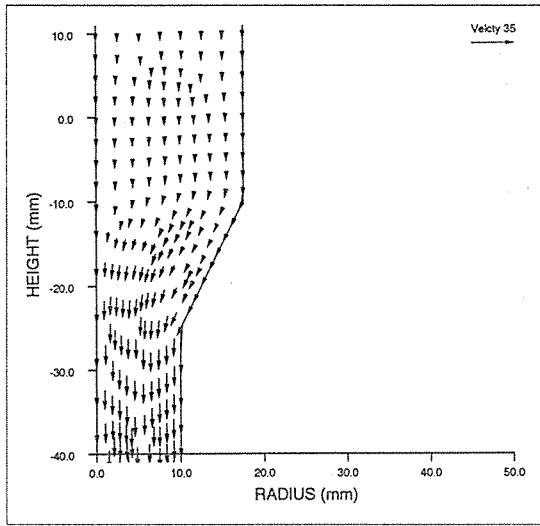


Fig. 3. Stress-strain behaviour of the composites with variation of temperatures

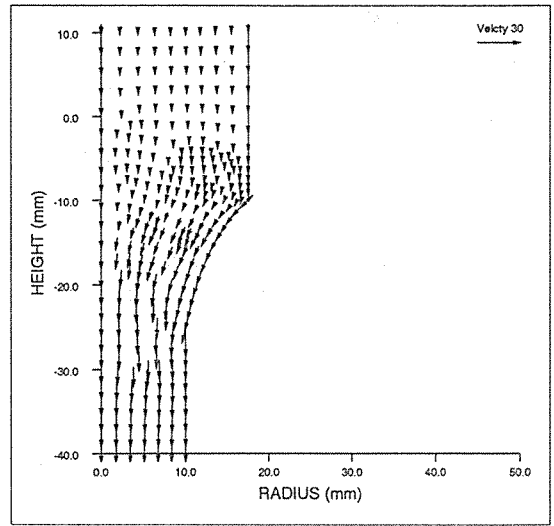
복합재료의 기계적 특성은 인장시험으로부터 구한 기지재료인 Al 6061의 온도별 응력-변형율과 강화재료의 물성 관계로부터 Eshelby의 이론을 이용하여 유도하였다[9]. Table 1은 기지재료와 강화재료 및 이들 값으로부터 유도한 금속복합재료의 기계적 성질을 정리한 것이다. DEFORM을 이용한 유한요소 해석에서는 복합재료의 기계적 특성을 감소성 거동을 하는 단일재료로서 취급하였다.

### 3. 금속복합재료의 제조 및 압출실험

압출실험에 사용하기 위한 금속복합재료는 반응용 유동상태를 이용하는 반응용가공법(compocasting)으로 제조하였다[10]. 이때 반응용 상태의 기지재료 금속을 강제 교반하면서 강화재료를 첨가한 후 균일하게 분산시켰다. 실험에 사용한 기지재료는 Al-Si-Mg계



(a) conical die



(b) curved die

Fig. 4. Velocity profile in hot extrusion with extrusion ratio of 3.06

Al6061 합금을 사용하였으며, 강화재로는 고온에서 인장강도, 압축강도, 강성, 피로저항 및 경도를 증가시키고 열팽창이 적은 SAFFIL RF grade인  $\delta$ - $Al_2O_3$  단섬유를 사용하였는데, 단섬유의 평균 입경은  $3\mu m$  이고 평균길이는  $50\mu m$  이다.

본 연구의 열간 압출 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 압출 금형(Fig. 2)은 유한요소 해석에서의 경우와 동일한 원추형 및 곡면 금형으로서, 이때 곡면금형의 형상은 변형 영역 내에서 변형율의 분포가 보다 균일하도록 다음의 식을 적용하여 제작하였다[10][11].

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{A_0}{(\lambda - 1)Z/L + 1}} \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $A_0$ ,  $\lambda$ ,  $L$  및  $Z$ 는 각각 빌렛의 초기 단면적 ( $mm^2$ ), 압출비 ( $D_1^2/D_2^2$ ), 금형의 길이 및 압출 방향의 좌표값을 나타낸다.

압출용 빌렛은 반응용 가공법으로 제조한 금속기지 복합재료를 직경35mm, 길이 60mm의 원통형상으로 기계가공하여 제작하였다. 열간 압출공정은, 압출용 빌렛, 압출 금형 및 더미 블록에 윤활제를 바른 후 상부 컨테이너에 넣고서 전기로를 사용하여 금형, 펀치 및 컨테이너를 실험 온도까지 가열한다. 가열시 빌렛의 온도를 실험 온도로 정확히 제어하기 위해 상부 컨테이

너 속에 직경이 1.6mm인 CA열전대를 내부 측벽에서 2mm 떨어진 위치에 설치하여 압출이 끝날 때까지 온도를 일정하게 제어하였다. 실험 온도에 도달하면 이 온도에서 균일한 온도 분포가 이루어지도록 10분 동안 온도를 유지시킨 후 압출 실험을 수행하였다. 열간압출시 윤활제는 표면경도에 상당한 영향을 미치며 본 실험에서는 그리스 오일과 흑연 분말을 1:1의 체적비로 혼합하여 사용하였다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

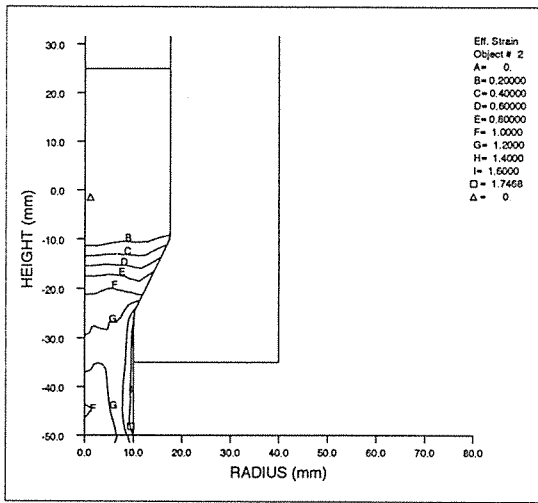
Al6061 합금기지 금속복합재료(이하 '복합재료')의 열간 압출 특성을 조사하기 위한 유한요소 해석결과와 가압펀치의 변위가 45mm일 때이다.

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 압출비 3.06의 원추형 및 곡면 금형을 통한 압출시의 속도 분포를 나타낸다. 여기서 벡터의 길이는 압출동안 각 절점에서의 속도의 크기를 나타내는데, 두 금형에서 유사한 속도분포를 보이고 있다. 금형 감소부 영역에서의 속도의 크기는 유동 단면적에 반비례하며 표면부로부터 중심부로 갈수록 증가함을 나타내며, 모든 영역에서의 재료유동은 금형의 출구방향을 향하고 있으며 재료유동이 잘 발달해 있음을 볼 수 있다.

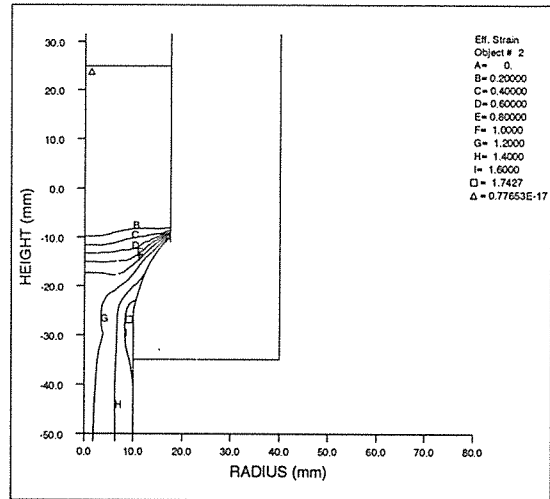
Fig. 5(a)는 압출비 3.06의 원추형 금형을 통한 복

합재료의 압출시 가공물에 발생하는 등가변형을 (equivalent strain)의 분포를 나타내는데, 압출 전의 영역에서는 가공물의 상당 부분이 비변형영역으로 존재하며 변형율은 압출 방향을 따라 증가함을 알 수 있다. 금형 출구 통과 후의 압출재 부분에서의 등가변형율의 크기는 1.0 이상의 크기를 가지며 중심부로부터 표면으로 갈수록 증가한다. Fig. 5(b)~(d)는 압출비가 각각 3.06, 5.44 및 8.51인 곡면 금형을 통한 압출시의 변형율 분포를 나타내는데 압출비가 클수록 변형율

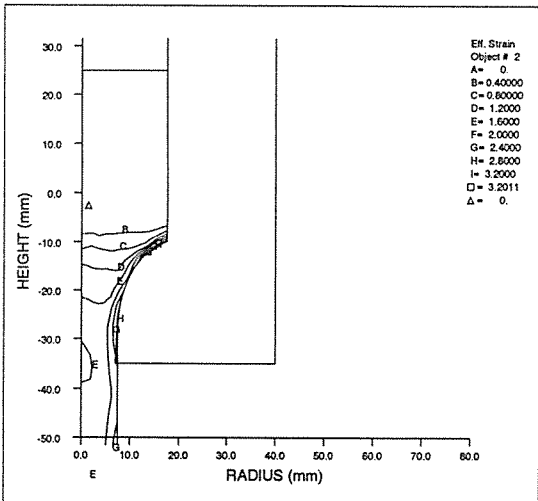
의 크기가 증가함을 나타낸다. 압출비 3.06인 곡면 금형에 의한 압출시의 변형율은 동일 압출비의 원추형 금형(Fig. 5(a))에서와 비교하여 최대변형율은 약 1.7로서 유사한 수준이지만, 변형율 분포는 보다 균일하게 나타났으며, 이는 곡면 금형의 형상이 앞에서 설명한 것처럼 변형영역에서의 균일 변형을 목적으로 설계되었기 때문이다. 그리고 Fig. 5의 비교로부터 곡면에서의 압출비가 증가할수록 변형율의 분포상태가 보다 균일해짐을 알 수 있다.



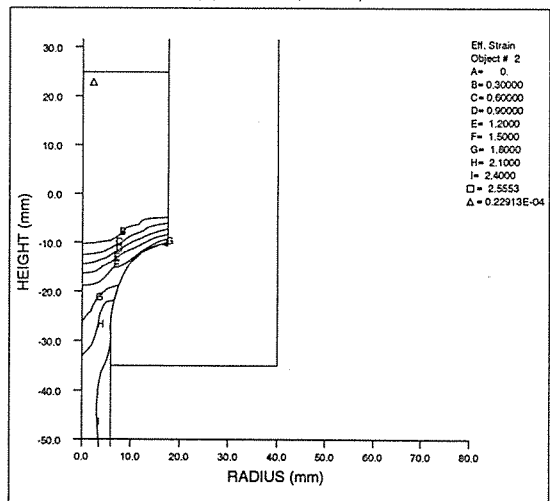
(a)  $\lambda=3.06$  (conical)



(b)  $\lambda=3.06$  (curved)



(c)  $\lambda=5.44$  (curved)



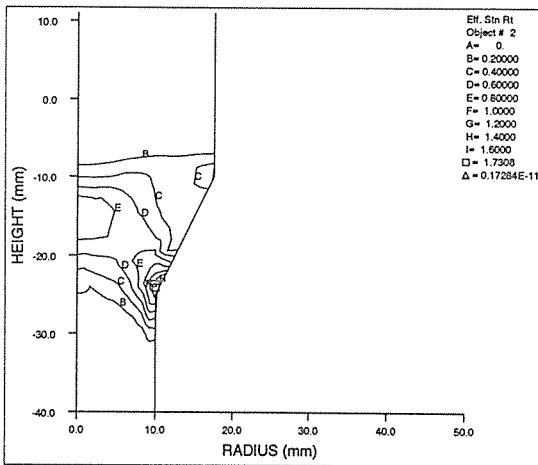
(d)  $\lambda=8.51$  (curved)

Fig. 5. Equivalent strain distribution in hot extrusion with various extrusion ratios,  $\lambda$

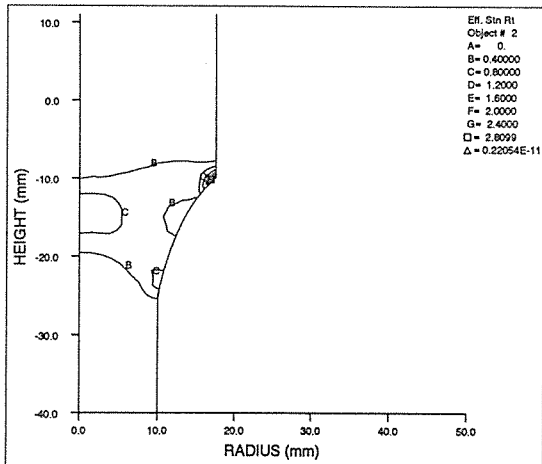
Fig. 6(a), (b)는 압출비가 3.06인 원추형 및 곡면 금형을 통한 압출시의 변형율속도(strain rate) 분포를 나타낸다. 원추형 금형의 경우 변형영역에서의 변형율속도는 최대 1.7 s<sup>-1</sup>의 크기를 가지며 변형은 금형 출구의 모서리에 집중되고 있음을 나타낸다. 반면에 곡면 금형의 경우의 변형율속도는 최대 2.8 s<sup>-1</sup>의 크기이며 변형은 금형 감소부 입구의 모서리 근방에 집중됨을 알 수 있다. 그리고 금형 감소부에서의 변형율속도 크기는 중심부로부터 표면부로 갈수록 작은 값을 보이고 있다. 이것은 중심부로부터 표면부로 갈수록 Fig. 4에 나타난 바와 같이 재료의 유동속도의 크기가

상대적으로 더욱 감소하기 때문이다. 또한 Fig. 6(a), (b)의 비교로부터 동일 압출비의 경우 원추형 금형의 경우에 비하여 곡면 금형에 의한 압출시의 변형율속도가 보다 균일해짐을 알 수 있다.

Fig. 7(a)와 (b)는 압출비가 3.06로서 동일한 경우의 원추형 및 곡면 금형을 통한 복합재료 압출시의 등가응력(equivalent stress) 분포의 해석결과를 나타내는데, 등가응력의 크기 및 분포 양상은 두 금형에서 유사한 결과를 보인다. 그림으로부터 복합재료 가공물에 작용하는 등가응력은 전 영역에서 거의 균일한 분포를 보이며 대략 38 MPa의 크기를 갖는다.

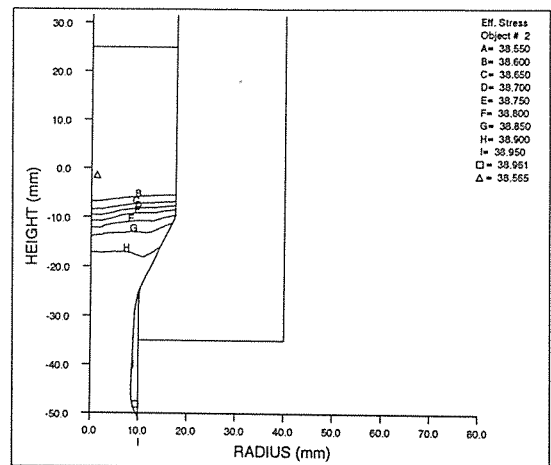


(a) conical die

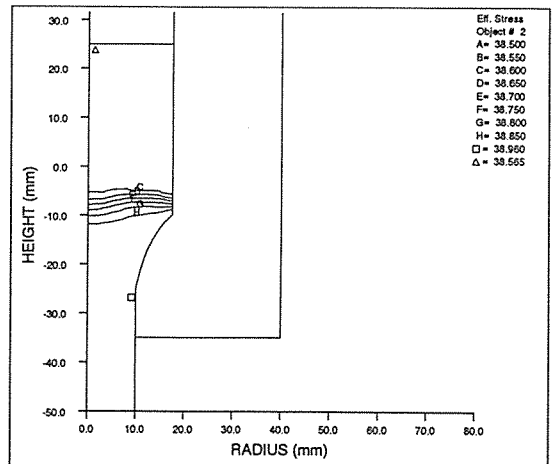


(b) curved die

Fig. 6. Equivalent strain rate distribution in hot extrusion with extrusion ratio of 3.06



(a)



(b)

Fig. 7. Equivalent stress distributions in hot extrusion with extrusion ratio of 3.06

압출과정에서의 응력상태를 조사하기 위해서는 가공 재료에 발생하는 평균응력(mean stress) 분포를 조사해 볼 필요가 있으며, Fig. 8은 압출비 3.06인 곡면 금형에서의 압출에서의 평균응력 분포를 나타낸다. 그림으로부터 금형 출구 부분의 가공재료의 표면 근방의 일부에는 양(陽)의 평균응력 즉, 인장응력이 존재함을 알 수 있다. 이러한 인장응력은 압출재 표면부의 균열 발생의 원인이 되며 압출재와 금형사이의 마찰 때문에 발생한 것으로 생각되며 같은 현상이 원추형 금형 및 다른 모든 곡면 금형을 통한 압출과정에서도 관찰되었다.

Fig. 9는 압출비 8.51의 곡면 금형에 의한 압출시 가공재료에 나타나는 온도 분포이며 압출비에 상관없이 유사한 경향을 볼 수 있다. 온도는 가공재료의 전 영역에서 초기온도(500℃) 이상의 값을 보이며 이것은 압출과정에서의 소성변형에 의한 열발생에 기인한다. 또한 온도는 응력 및 변형률 분포와 마찬가지로 압출 진행 방향을 따라 압출재의 표면쪽으로 갈수록, 그리고 압출비가 증가할수록 상승하며 압출비 8.51의 곡면 금형의 경우의 최대 온도는 약 550℃로 나타났다.

Fig. 10(a)와 (b)는 원추형 금형과 압출비가 서로 다른 세종류의 곡면 금형을 통한 복합재료의 압출변위-압출하중 관계에 대한 유한요소 해석결과와 실험결과를 각각 도시한 것이다. Fig. 10(a)의 해석결과로부터 압출변위 증가에 따른 압출하중은 압출비에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 압출비가 3.06

으로서 동일한 경우에는, 압출초기 과정에서는 곡면 금형에서의 압출하중이 원추형 금형에서 보다 크게 나타났지만, 최대 압출하중의 크기와 최대 압출하중 도달 후의 하중-변위 거동은 두 금형의 경우에서 유사함을 보이고 있다. 그리고 Fig. 10(b)의 실험결과에서도 압출비가 증가할수록 최대 압출 하중도 증가하는 경향을 나타낸다. 한편 Fig. 10(c)는 압출비가 5.44인 곡면 금형의 경우의 압출변위-압출하중 선도를 나타내는데, 실험에서의 최대 압출하중이 해석결과에서보다 작게 나타났다. 이러한 현상은 다른 압출비의 경우에서도 나타났다으며, 최대하중의 측정치와 해석결과와의 차이는 압출비가 증가함에 따라 증가하고 있다. 그러나 최대하중 이후의 정상 압출에서는 압출하중의 크기에서는 측정치와 해석결과가 잘 일치하고 있다. 실험과 해석에서의 차이가 발생하는 이유는 실제의 압출과정에서 발생하는 강화재료의 파단 및 계면의 분리 등에 의한 복합재료의 강도 저하 현상에 기인하는 것으로 생각된다. 그리고 최대 하중에 도달하는 압출변위에 있어서는 실험치가 해석결과에서 보다 크게 나타났는데 이것은 실제 압출시 빌렛이 컨테이너에 잠입된 후 컨테이너 내부를 채우는 초기과정이 수반되며, 또한 해석에서는 압출 프레스 및 공구가 완전한 강체로 묘사되는 반면에 실제에서는 이들이 유한한 강성을 갖고 있어서 탄성 변형이 일어나기 때문이다[12].

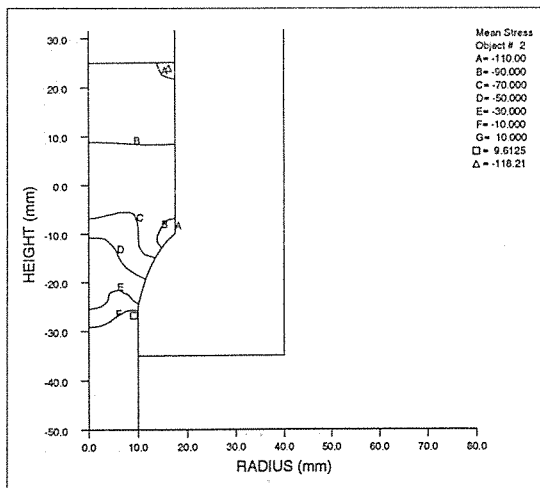


Fig. 8. Mean stress distribution in extrusion through curved die with extrusion ratio of 3.06

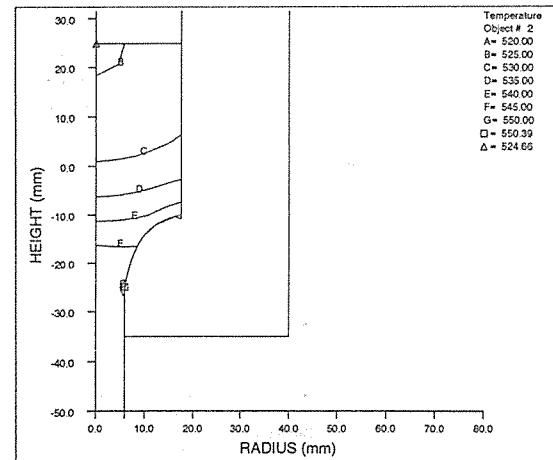
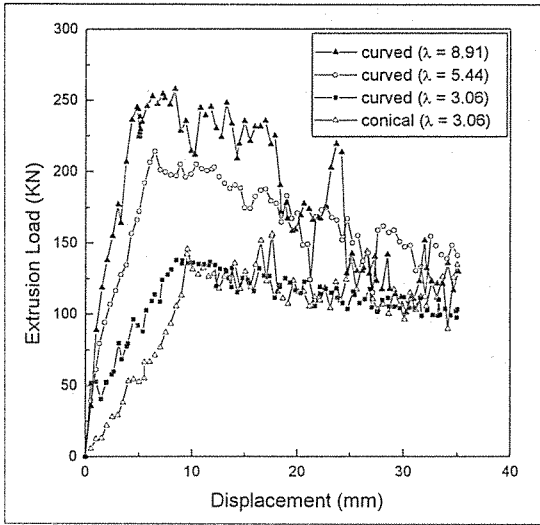
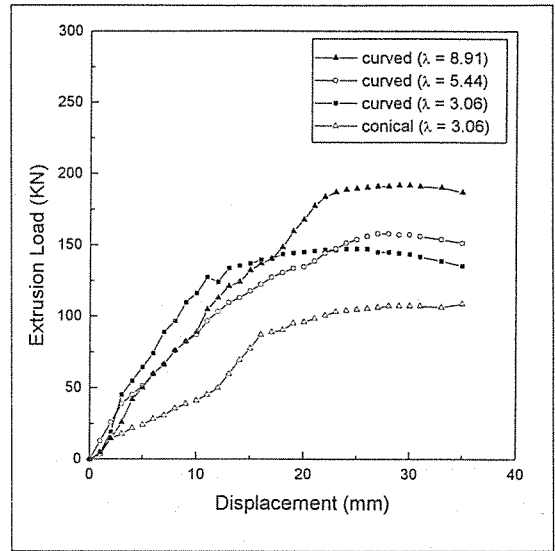


Fig. 9. Temperature distributions in hot extrusion through curved die with extrusion ratio of 8.51  
(a)  $\lambda=3.06$  (b)  $\lambda=5.44$  (c)  $\lambda=8.51$



(a) computed load curves



(b) measured load curves

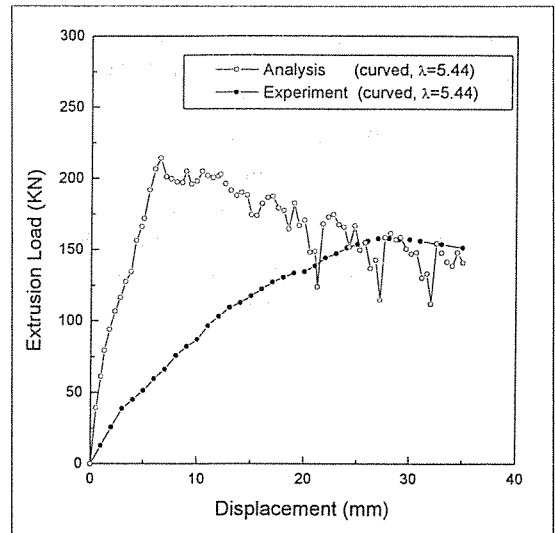
### 5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 단섬유로서 강화된 6061 알루미늄합금 기지 복합재료의 열간 축대칭 압출공정을 유한요소 해석하고, 반응용가공법에 의하여 금속기지 복합재료를 제조한 후 원추형 금형 및 압출비가 서로 다른 3종류의 곡면 금형을 통하여 열간 압출 실험을 실시하고 다음의 결론을 얻었다.

1) 가공재료에서의 속도의 크기는 표면부로부터 중심부로 갈수록 증가하고 유동 단면적에 반비례한다. 속도분포는 재료유동이 출구방향을 향하여 잘 발달해 있음을 보여준다.

2) 변형율의 크기는 금형의 압출비가 커질수록 증가하며 표면부에서 최대로 나타났다. 또한 변형은 원추형 금형에서 보다는 곡면 금형에서 압출비가 증가할수록 더욱 균일한 경향을 나타낸다. 한편 변형율 속도 분포로부터 변형의 집중부분은 원추형 금형에서는 금형 출구 모서리부인 반면에 곡면 금형에서는 금형 입구 모서리부에서 발생한다. 그리고 온도분포는 변형율 분포와 유사한 경향을 보인다.

3) 금형 출구부분의 가공재료의 표면부에 인장방향의 평균응력이 존재하며, 또한 이 부분은 변형율이 커기 때문에 압출재 표면 균열의 가능성이 존재한다. 그리고 등가응력은 가공재료의 전 영역에서 균일한 분포를 나타낸다.



(c) comparison between computed and measured load curves with extrusion ratio of 5.44

Fig. 10. Behaviour of extrusion load-displacement with variation of extrusion ratios

4) 금형의 압출비가 커질수록 압출하중이 증가하며, 해석결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있으며 보다 정확한 해석을 위해서는, 압출 프레스와 공구의 탄성 변형에 따른 실제 변위의 보정 및 강화재 파단에 의한 복합재료의 강도 저하를 고려할 필요가 있다.



## 참고 문헌

1. Ho, S. and Saigal, A., "Three-Dimensional Modeling of Thermal Residual Stresses and Mechanical Behavior of Cast SiC/Al Particulate Composites," *Acta Metall. Mater.*, Vol.42, No.10, 1994, pp. 3253-3262.
2. Chen, W.C., Davies, C.H.J., Samarasekera, I.V., and Brimacombe J.K., "Mathematical Modelling of the Extrusion Process of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites," *Advanced Technology of Plasticity*, 1993, pp.599-604.
3. Kaimer, K.U. and Tertel, A. "Extrusion of Short Fiber Reinforced Magnesium Composites," *RISO Int. Symp. on Materials Science*, N. Hansen et al (Eds), 1991, pp.435-440.
4. Imai T., Nishida Y., Matsubare H., Matsubare H., Shirayanagi I., and Mabuchi M., "Hot Extrusion of Alumina Short Fiber Reinforced Aluminium Composites", *J. of the JSTP*, Vol.30, No.346, 1989, pp.1540-1546.
5. Jeffery, P.W. and Holcomb, S., "Extrusion of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites," *Proc. of Int. Conf. on Fabrication of Particulate Reinforced Metal Composites*, Montreal, 17-19 Sept., ASM Int., 1990, pp.181-186.
6. Greefield, I.G. and Orthlieb, F.L., "Reinforced of SiC Whishers in Aluminium at Different Stage of Extrusion," 8th. Int. Conf. on Fabrication of Particulate Reinforced Metal Composites Materials, 17-E-3, 1991.
7. Kiuchi M., Sugiyama S., Kawasaki N., and Hoshino Y., "Mashy-State Process of Aluminium Alloy Composites Reinforced with Silicon Short Fibers", *J. of the JSTP*, 1989, Vol.30, No.346, 1989, pp.1540-1546.
8. DEFORM User's Manual, Ver.4.0, SFTC, Columbus, Ohio, USA, 1994.
9. 서영호, 강충길, "Eshelby model을 이용한 입자 강화형 금속복합재료의 기계적 성질 예측", *한국복합재료학회지*, 제10권, 제3호, 1997, pp.74-87.
10. Kang, C. G. and Seo, Y.H. , "Extrusion Die Design for Orientation Control of Short Fiber Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites", *Second International Conference Composites Engineering*, New Orleans, 1995, pp.21-24.
11. 강충길, 김남환, 김병민, "금속복합재료의 열간압출에 관한 금형설계의 최적화기법(I)", *한국소성가공학회지*, Vol.6, No.4, 1997, pp.346-356.
12. Chen, W.C., Davies, C.H.J., Samarasekera, I.V., Brimacombe, J.K., and Hawbolt, E.B., "Mathematical Modeling of the Extrusion of 6061/A12O3/20p Composite", *Metall. Mater. Trans.*, Vol.27A, No.12, 1996, pp.4095-4111.