

## 알루미늄 7075 복합압출재에 대한 공정해석 및 설계

김진복\* · 변상규\*\* · 강범수\*\*

(1997년 5월 2일 접수)

### Analysis and Design of a Forming Process for Combined Extrusion with Aluminum Alloy 7075

J.B. Kim, S.K. Byun and B.S. Kang

#### Abstract

A combined extrusion operation consists of forward and backward extrusion forming and it is possible to make the process be simple by employing it. But the metal flow pattern induced by the operation is hard to analyze accurately because the flows are non-steady, which have at least two directions dependent upon each other. So engineers in the industrial factories had conducted the two extrusion operations separately. A new process was designed by the industrial expert for forming of an aluminum preform using the combined extrusion operation. In this study, experiments and finite element analysis was carried out to determine the process parameters. Through the preliminary experiment, it was shown that warm forming condition was more desirable than cold or hot ones. And optimal shape of initial billet could be also determined. From the compatibility test, bonde-lube was chosen as the optimal lubricant and 200°C as the material temperature by the inspection of micro-structure. The operation was simulated by the rigid-plastic finite element method to examine the metal flow. Disappearing of dead metal zone was observed as the punch fell down and desirable shape was obtained from the one operation. As a result of this study, 7 operations could be reduced and 225% of material saved.

**Key Words** : Combined Extrusion, Expert System, Finite Element Method, Dead Metal Zone, Lubricant, Grain Growth.

#### 1. 서 론

복합압출(combined extrusion)은 전방압출과 후방압출을 조합한 것으로 단일공정으로 완제품의 성형이 가능

하며, 양 방향으로 소성유동이 형성됨에 따라 유동성이 좋고, 가공중도 각각의 압출로 하는 경우보다 작다. 그리고 우수한 기계적 성질 및 표면조도를 얻을 수 있어 정형(net shape) 가공하기에 적합한 공법이다. 그러나 이

\* (주)풍산기술연구소

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

러한 장점에도 불구하고 이 분야에 대한 연구가 미흡하고, 현장에서도 유동해석이 어려워 실제로는 그 이용도가 빈약한 편이다. 예를 들어 상하 컵형의 전후방 압출공정에 있어서 압출되어 나오는 소재의 유동이 두 방향 이상이며, 이들은 상호 구속되어 있는 비정상 상태의 유동이어서 해석이 어렵다. 그래서 실제 현장에서는 전방압출과 후방압출로 각각 나누어 작업하여 왔다.

복합압출에 대한 연구결과를 살펴보면, H. Kudo<sup>(1)</sup>가 냉간 전·후방압출에 대한 금속유동 조절에 대한 이론연구를 발표하였고, J.Y. Lee와 T. Altan<sup>(2)</sup>이 상·하 단면 감소율이 동일한 복합압출에서의 상·하 유동높이차에 따른 마찰상수와 윤활의 특성에 대해 해석과 실험을 비교하였다. 또한 B. Avitzur<sup>(3)</sup>이 전·후방 압출에 대한 해석을, A.K. Tayal<sup>(4)</sup>이 유한요소법으로 전·후방 복합압출에 대한 해석을 각각 발표하였다. 최근에는 Wu, Shichun과 Li, Wenyu<sup>(5)</sup>가 전·후방압출 봉재형태에 대한 소성유동과 압력에 대한 연구를 Li, Miaoquan과 Wu, Shichun<sup>(6)</sup>

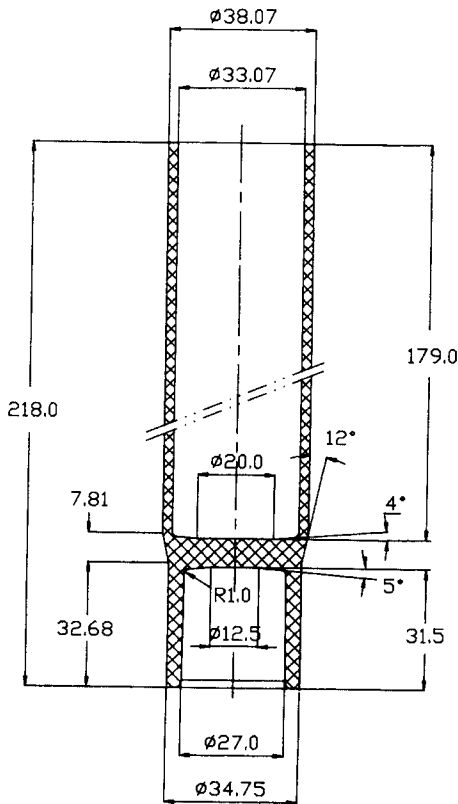


Fig. 1 Sectional configuration and dimensions of the product

이 상계해법으로 상·하컵형인 축대칭 복합압출에서의 각종 결점에 대한 해석을 하였다. 국내에서는 상계법으로 축대칭 후방압출에 대한 연구<sup>(7)</sup>가 수행되었으며, 최근에는 알루미늄 2024 및 동(commercial pure copper)의 전후방압출에 대한 실험적인 연구<sup>(8)</sup>가 수행되었다.

본 연구에 적용된 부품은 방산부품의 중간 제품으로 사용되는 알루미늄 압출재로, 복합압출 공법을 도입하여 기존 공정을 개선하고자 하였으며, 이를 위하여 금형설계, 예비실험, 적합성실험, 유한요소해석 등의 과정을 거쳤다.

Fig. 1에 보이는 바와 같이 알루미늄 압출재는 외부가 이단형태로 되어 있는 상·하컵형의 형상을 하고 있으며, 이는 최종 완제품이 아니라 후공정인 금속 유동성형(metal flow forming)을 위한 예비성형체이다. 그러므로 공정설계시 몇가지의 제약조건을 가지고 있다. 첫째, 전부위에 걸쳐 결정립이 미세하여야 하며 둘째, 불필요한 열처리 공정을 배제하고 셋째, 표면상태 및 치수정밀도가 우수해야 한다. Fig. 2에서는 알루미늄 압출재를 성형하기

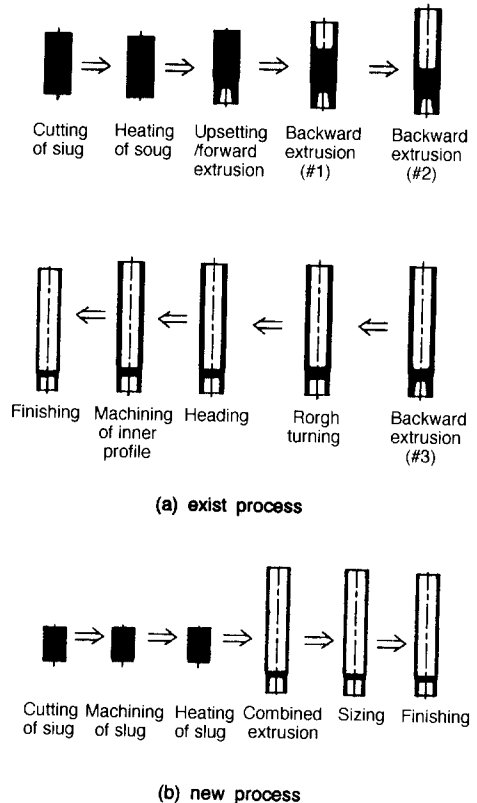


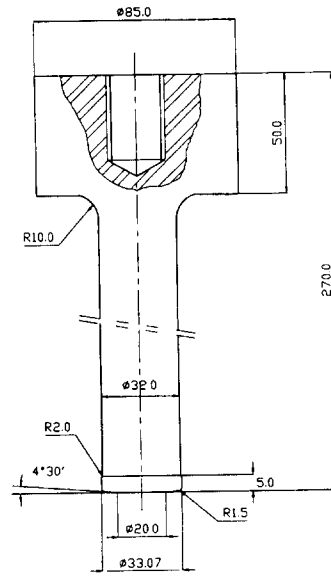
Fig. 2 Comparison in processes for before/after improvement

위한 기존공정 및 개선공정을 비교하여 보여주고 있다. 기존 공정도에 따르면, 절단된 소재를 450℃로 가열한 후 업셋팅펀치(upsetting punch)를 하강시켜 전방압출을 우선 실시하게 된다. 다음으로 후방압출 펀치를 이용하여 후방압출을 수행하게 되는데, 이때 압출 스트로크(stroke)가 커서 윤활공급이 제대로 이루어지지 않으므로 3회로 나누어 수행한다. 압출이 완료되면 내, 외부를 선반 가공하고, 압출시 유동이 없어 조직이 조대하게 형성된 바닥 칸막이(bulk-head)부위는 냉간헤딩(cold-heading)을 실시하여, 금속조직을 파괴시켜 재결정을 형성하도록 함으로서 새로운 미세한 조직을 만든다. 그리고 마지막으로 내·외부 선반가공을 하여 완성한다. 이러한 공정에는 1) 많은 공정수로 인한 인원 및 장비가 과다하게 소요되고, 2) 과다한 선반가공으로 인한 생산량 저하, 3) 제품대비 소재투입량 과다(소재손실 과다), 4) 내부가공을 위한 불필요한 열처리공정 추가, 5) 바닥 칸막이부위 결정립 미세화를 위한 냉간헤딩공정 추가, 6) 불량률 과다, 7) 품질저하(표면조도, 치수공차, 금속조직 및 기계적 성질 등)의 문제점이 있다.

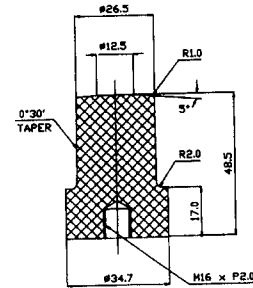
그러므로 개선된 공정에는 복합압출 공법을 적용하여 단일공정으로 완제품 형상을 성형하고, 제품 추출시나 취급시 뒤틀린 부위를 교정하기 위해 사이징(sizing)을 하여 마무리 가공하는 공정형태를 취했다. 본 연구에서는 이 중에서 가장 핵심적인 복합압출 공정에 대한 실험 및 해석을 수행하였다. 금형의 설계에는 전문가시스템(expert system)을 도입하였으며, 유한요소법(finite element method)으로 공정해석을 수행하여 가능성을 검증하였다. 그리고 실제 실험을 통하여 얻어진 결과들과 비교하여 연구의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 실험에 사용된 소재는 단조성이 다른 알루미늄 합금보다 떨어지는 7075합금 열간압출재를 사용하였다.

## 2. 금형 설계 및 구조

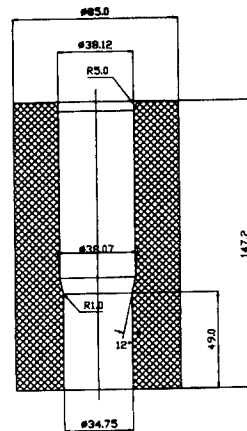
새로이 설계된 공정에서 사용될 금형의 형상은 Fig. 3에서 보여지고 있으며, 복합압출의 단일 공정을 통해 제품이 성형될 수 있도록 금형의 형상을 결정하였다. 가동부 펀치(forming punch)는 중공형 후방압출 펀치의 설계기준에 맞춰 제품 내부형상이 성형되도록 설계하였다(Fig. 3a). 고정부 펀치(stationary punch)는 녹아웃 헤드(knock-out head) 형태를 택하여(Fig. 3b) 원하는 길이만큼 성형 후 유동을 구속시켜 정형가공이 되도록 하였



(a) punch



(b) knock-out head



(c) die

Fig. 3 Dimensions and configurations of die components

으며, 성형 후 제품의 추출과 유동속도를 조절하기 위해 내부공차의 범위 내에서 0° 30'의 테이퍼를 적용하였다. 다이는 제품 외부형상과 일치시켰다(Fig. 3c).

설계된 금형의 가능성을 알아보기 위하여 전문가시스템을 도입하여 가공한계를 고려하였다. Table 1<sup>(9)</sup>에 나타나 있는 각 기준에 적용해 볼 때, 후방압출의 압출비( $\beta_{rb}$ )가 75.5%로 임계치(75%)를 조금 초과하고, 후방압출 성형반경( $d_1$ ) 역시 임계치를 조금 초과하고 있다. 그리고 후방압출 길이( $l_1$ )가 기준치를 매우 초과하고 있음도 알 수 있다. 그러나 경험적으로 볼 때 알루미늄 소재의 경우 성형성이 좋으므로 미소한 초과는 별 문제가 없을 것으로 판단하였다. 그리고 후방압출 길이 역시 가공하중이 임계점에 도달할 때까지 압출이 연속적으로 이루어지는 알루미늄의 특성 때문에 문제가 되지 않는다고 판단하였다. 제품 성형동안의 소재 유동경향 등은 유한요소 해석을 통하여 검증하였다.

Fig. 4에는 금형의 구조가 나타나 있으며, 이 중에서 다이, 펀치, 녹아웃 헤드와 다이 플레이트는 압출시 응력이 집중되는 곳이므로, 공구강 SKD 61종 소재를 사용하여 경도가 로크웰경도 기준("C" scale)으로 58~62가 되도록 열처리하여 형상 가공하였다. 압출작업은 소재를 다이 안에 넣고 펀치를 스트립퍼 세트의 안내경을 따라 하강시킨 후 펀치가 제품에 닿을 때 120 mm/min의 속도로 가

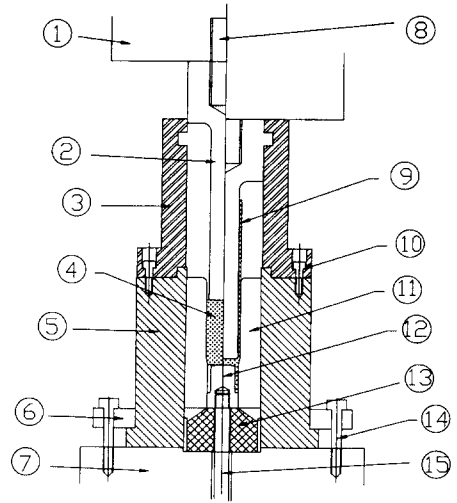


Fig. 4 Structure of die set

- ①ram, ②punch, ③stripper holder, ④billet, ⑤die holder, ⑥clamp, ⑦base plate, ⑧adjust bolt, ⑨product, ⑩bolt, ⑪die, ⑫knock-out head, ⑬die plate, ⑭hex bolt, ⑮knock-out bar

압하였으며, 펀치의 하한점 조절은 리미트 스위치로 하였다. 성형이 끝난 후 하부실린더를 이용하여 녹아웃 헤드를 밀어 올려 제품을 추출하고, 만일 펀치에 제품이 부착될 경우 스트립퍼를 이용하여 분리시켰다.

Table 1 Criteria of design from the expert system

Dimension	Criteria	Result	Remarks
b	$\geq 0.8s$	3.03s	
$l_1$	$\leq 2.5 \sim 3.0d_1$	5.4 $d_1$	
$l_2$	$\leq 2.5 \sim 3.0d_2$	1.07 $d_2$	
$d_1$	$\leq 0.86D$	0.868D	
$d_2$	$\geq 0.45D$	0.76D	
$\beta_{rf}$	$\leq 75\%$	60.4	
$\beta_{rb}$	$\leq 75\%$	75.5	

### 3. 유한요소 모델링

금속성형 공정의 해석에 널리 사용되고 있는 유한요소 해석을 수행하여 성형중의 소재유동 경향, 유효 변형을 및 응력의 분포 등을 파악하여 복합압출 공정의 가능성 여부를 확인하고자 하였다. 해석은 소재의 대칭성을 고려하여 축대칭기법으로 수행되었으며, 소재의 탄성거동을 배제한 강소성 유한요소법을 적용하였다. 이에 대한 수식화 및 계산기법은 이미 잘 정립되어 있으며,<sup>(10)</sup> 비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙상수(penalty constant) K를 도입한 강소성 재료에 대한 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta u_i dS = 0$$

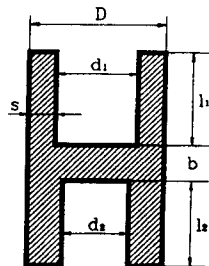
여기서  $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}$ ,  $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$ ,  $\sigma'_{ij}$ 는 편차응력,  $f_i$ 는 표면력,  $u_i$ 는 속도성분,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속

$$\beta_r = \frac{A_0 - (A_0 - a_1)}{A_0} * 100$$

$$= \frac{a_1}{A_0} * 100(\%)$$

$A_0$ : cross-section of die

$a_1$ : cross-section of punch



도,  $\dot{\epsilon}_p$  는 체적 변형률 속도이다. 윗식은 유한요소 이산화 과정을 거치면 절점의 속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 이를 풀기 위하여 초기속도장을 가정하여 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법으로 해를 구했다. 이때 자동적인 초기속도장의 발생을 위하여  $Oh^{(1)}$ 가 제안한 방법에 따라 초기속도장을 구하였다.

#### 4. 실험 및 고찰

##### 4.1 예비 실험

실험을 통하여 열간, 온간 및 냉간 중에서 적합한 작업 조건을 선정하고, 적절한 소재형상을 결정하기 위하여 예비실험을 수행하였다. 소재형상은 Fig. 5와 같이 두 가지를 설정하였으며, 각각은 다음과 같은 장단점들이 예상되었다. (a)의 실린더형인 경우는 소재가공 없이 압출재를 소요길이만큼 절단하여 바로 사용할 수 있고, 성형 초기에 반경방향으로 팽창하게 되므로 비유동구역(dead metal zone)이 발생할 가능성이 낮은 장점이 있는 반면, 다이내에 소재를 지지하는 부위가 작아 불완전하게 고정되어 제품성형시에 동심도가 맞지 않을 우려가 있다. (b)의 테이퍼형인 경우는 동심도에는 문제가 없어 균일한 제품을 얻을 수 있으나, 소재가공이라는 공정추가와 칸막이 부위에 비유동구역이 발생할 가능성이 높다. 본 실험에서는 각 조건에 따른 실험결과를 내·외면 표면상태, 치수정밀도, 금속조직 및 결합상태, 작업성 등을 고려하여 적합한 작업조건과 소재형상을 결정하고자 하였다.

실험전 소재는 전기로에서 열간의 경우 450℃, 온간은

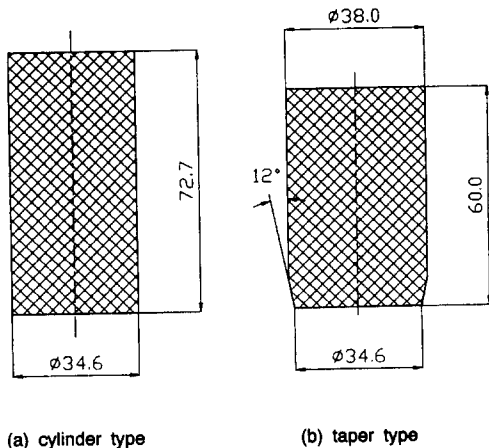
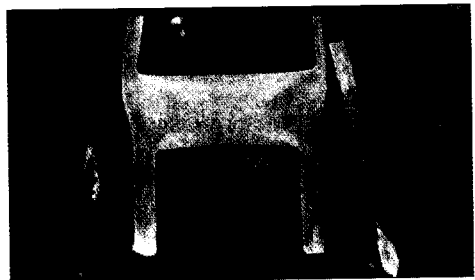


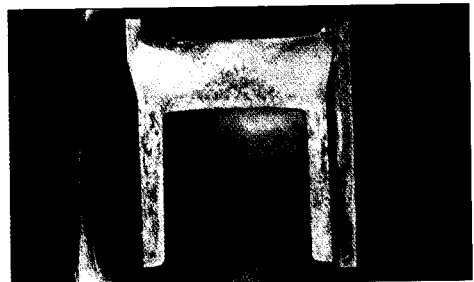
Fig. 5 Two types of initial workpieces

250℃로 가열하고, 냉간은 상온의 상태로 준비하였다. 금형은 열간은 300℃, 온간은 150℃로 예열하였다. 윤활(lubricant)은 기름(미강유)에 흑연을 혼합하여 금형에 도포하여 처리하였다. 실험이 끝난 제품은 금속조직 및 유동을 관찰하기 위해 용체화처리(465℃에서 30분 유지)하여 켈러(Keller)시약으로 부식시켰다.

Fig. 6에서는 두가지 형상의 소재에 대한 열간 성형실험 결과가 나타나 있으며, 조직검사 결과 두 경우 모두 전방압출과 후방압출의 실린더 부위에서 결정립성장(grain growth)이 발생함을 알 수 있었다. 이는 다이와 소재사이의 마찰열, 가공열에 의한 온도차이, 변형량과 변형률 등에 기인하고 있다. 소재 성형형상에 대해 비교해 보면 (a)의 실린더형인 경우는 후방압출부 실린더 부위에서 양쪽에 벽두께 차이가 심하게 나타났으나(최대 1 mm), (b)의 테이퍼형은 균일하게 나타났다. 그리고 비유동구역의 발생이 예상되는 칸막이 부위에 대한 조직검사를 수행하였으며(Fig. 7 참조, 실린더형의 경우에는 소재의 유동에 의해 조직들이 길쭉하게 늘어났으나, 테이퍼형의 경우에는 변형이 발생하지 않아 원래의 압출조직인 동글동글한 형태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 칸막이의 가장자리 부위(Fig. 6b)에서 비유동구역이 생겼음을

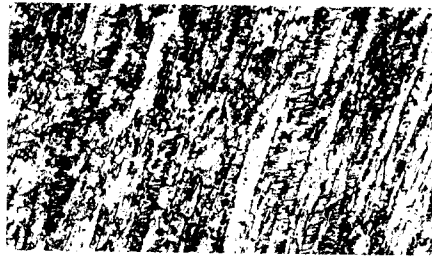


(a) cylinder type

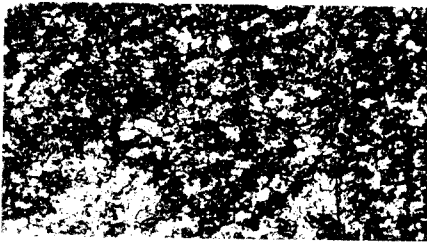


(b) taper type

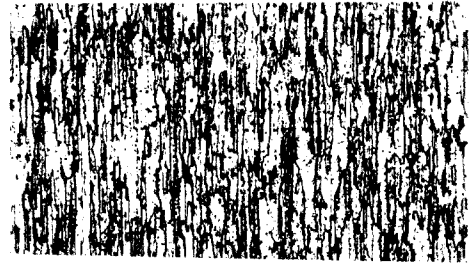
Fig. 6 Macroscopic structures of products from hot forming



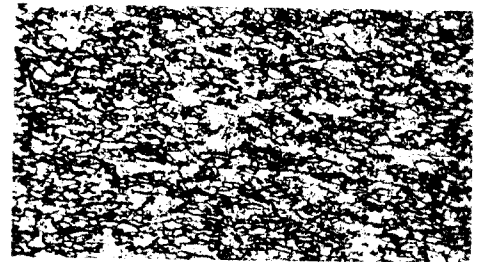
(a) cylinder type



(b) taper type

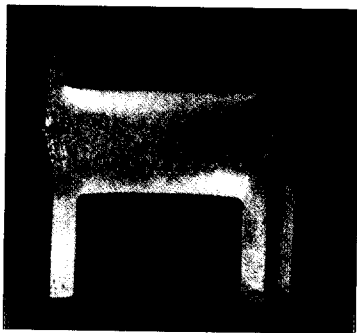


(a) backward

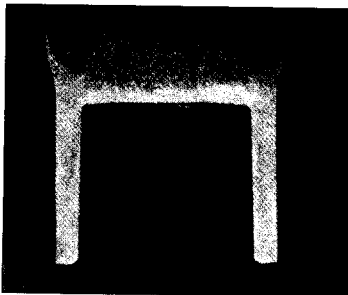


(b) bulk-head

Fig. 7 Microscopic structures of bulk-head part for the two types of initial billet

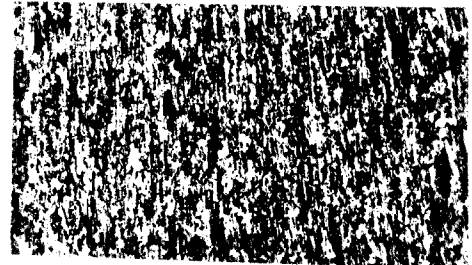


(a) warm condition



(b) cold condition

Fig.8 Macroscopic structures of products from warm and cold forming



(c) forward

Fig. 9 Microscopic structures of product from warm forming

알 수 있다. 그러나 이 부위는 지속적으로 압축응력을 받아 결정립이 미세하게 나타나 강도에는 이상이 없는 것으로 판명되었다. 따라서 초기소재의 형상을 (b)의 테이퍼 형으로 결정하였다.

온간 및 냉간 실험은 테이퍼 형태의 초기소재에 대하여 수행되었으며, 각 단면 형상에서 결정립이 미세하게 나타남을 알 수 있었다(Fig. 8 참조). 그러나 냉간에서는 심한 펀치 마모와 좌굴 현상이 발생하였으므로, 온간형태를 가장 적합한 작업조건으로 선정하였다. Fig. 9에서는 온간작업하에서 성형된 제품의 미세조직 결과를 보여주고 있다.

#### 4.2 적합성 실험

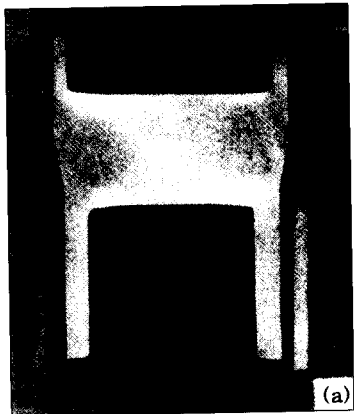
예비실험에서 선정된 온간작업 조건에 대해 세부적인

적합조건을 판단하기 위하여 가열조건을 세분하여 실험을 수행하였다. 그리고 최적의 윤활조건 및 작업운용 시스템의 문제점 등도 확인하고자 하였다.

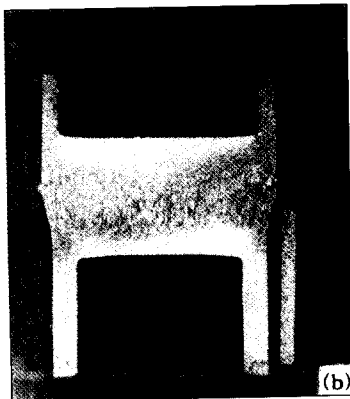
소재의 가열조건을 200℃와 250℃로 나누고, 금형은 150℃로 예열하였다. 윤활조건은 열간작업시 주로 사용하는 기름에 흑연을 혼합하여 금형에 도포하는 방식과, 냉간에 주로 사용하는 본더루베(bonder-lube)를 제품에 부착시키는 방식을 비교 분석하였다.

Fig. 10의 그림에서는 두 가지 경우의 금속조직을 보여주고 있으며, 200℃가 250℃보다 약간 더 미세하게 나타났으므로, 소재 가열조건을 200℃로 선택하였다.

윤활조건에 따른 비교는 Fig. 11에 나타나 있다. 흑연과 기름의 혼합인 경우는 실린더 외부에 터짐 현상이 발견



(a) from 200℃



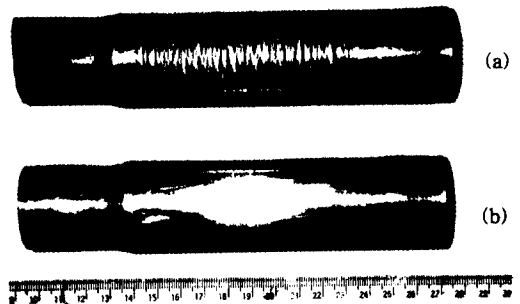
(b) from 250℃

Fig. 10 Macroscopic structures of products from the compatibility test

되었으나 본더루베의 경우에는 발생하지 않았다. 이는 흑연과 기름을 혼합한 경우에는 금형내에 윤활재가 불균일하게 도포되어 불연속 윤활막이 형성되므로, 금속유동의 불연속이 초래되어 터짐 현상이 발생하는 것으로 생각된다. Table 2에서는 각 온도 및 윤활조건에 대한 결과가 나타나 있으며, 치수정밀도와 표면조도 등에서 200℃의 본더루베 윤활조건이 가장 우수함을 알 수 있다.

Table 2 Results from the compatibility test

Heating condition	Lubricant	Result		Remarks
		Dimension	Appearance	
250℃ × 1Hr	graphite+oil	poor	poor	
250℃ × 1Hr	bonder-lube	good	good	
200℃ × 1Hr	graphite+oil	good	poor	
200℃ × 1Hr	bonder-lube	excellent	excellent	



(a) graphite + oil and (b) bonder-lube

Fig. 11 Comparison between products from the two types of lubricants

### 5. 유한요소 해석 및 고찰

실험으로부터 파악이 곤란한 금속유동의 경향을 확인하기 위하여 강소성 유한요소 해석을 수행하였다. 설계자가 요구하는 조건은 금형파손이 없는 한 냉간이며, 경험적으로 볼 때 금속유동 경향이 열간, 온간 및 냉간조건에서 상

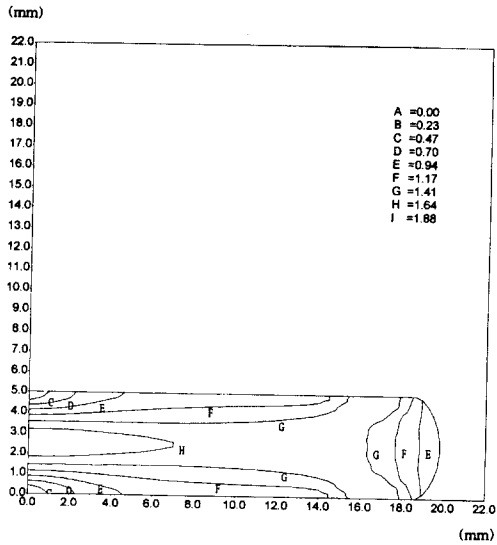


Fig. 12 Distribution of effective strain for the compression test in cold condition

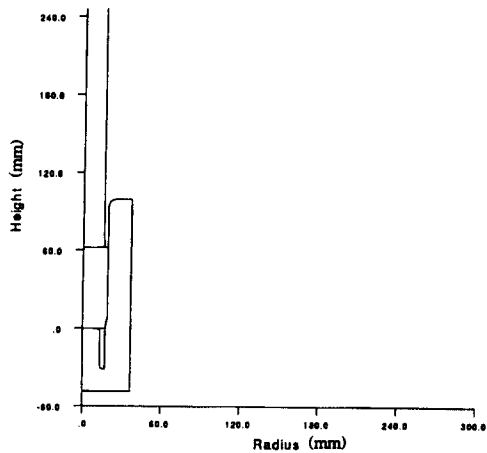


Fig. 13 Initial configurations of workpiece and die set-up for FE Analysis

호 유사하게 나타나므로 냉간조건에서 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용되는 소재의 물성 자료를 구하기 위하여 알루미늄 압출소재 7075에 대한 냉간 압축시험을 수행하였으며, 이로부터 아래의 유동응력식을 구하여 해석에 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 573.79(\bar{\epsilon})^{0.1847} (MPa)$$

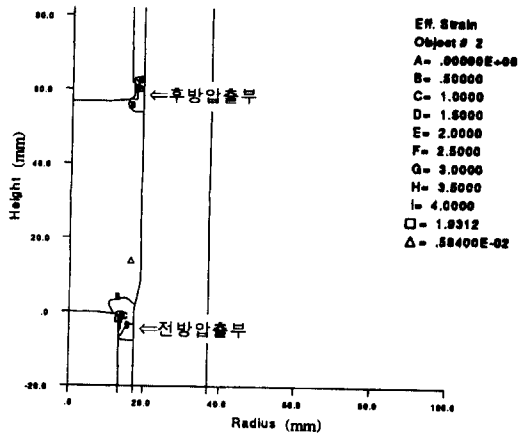


Fig. 14 Deformation and distribution of effective strain caused by 5mm punch stroke

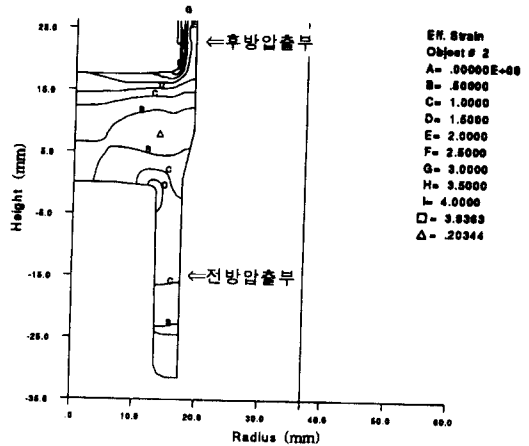
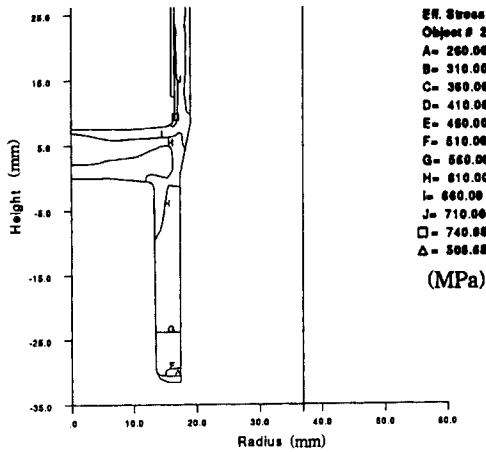


Fig. 15 Deformation and distribution of effective strain when forward extrusion is completed (punch stroke is 45mm)

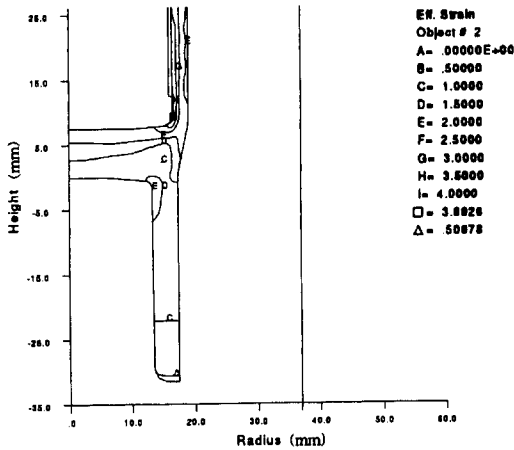
그리고 소재와 금형 사이의 마찰조건에서는 마찰상수 (m)를 사용하였으며, 그 크기는 일반적으로 냉간의 체적 성형에 많이 적용되는 0.1로 가정하였다.

해석의 결과로부터 비유동구역을 찾아내고 이를 실험에서 발견된 부분들과 비교하기 위하여, 위의 냉간 압축시험에 대한 유한요소 해석을 아울러 수행하였다(Fig. 12 참조). 또한 시험시편에 대한 조직검사를 수행하였으며, 이 결과와 해석결과를 비교하였다. 해석에서 변형률이 0.94(Fig. 12의 E선) 이하로 나타난 영역에서 원소재의 압출조직을 보이고 있었으며, 열처리(T4) 후에도 조직의





(a) distribution of effective stress



(b) distribution of effective strain

Fig. 16 Deformation and distribution of effective strain & stress caused by 54.5mm punch stroke (forming completed)

변화가 없었다. 그러므로 변형률이 0.94 이하인 부위를 비유동구역으로 간주하기로 하였다.

Fig. 13에서는 유한요소 해석을 위한 소재 및 금형의 세팅 형상을 보여주고 있다. 소재 외경부는 다이와 밀착되어 있으며, 소재는 다이와 녹아웃 헤드에 의해 안정되게 지지되어 있다. Fig. 14에서는 펀치가 5 mm 하강했을 때 소재의 성형형상 및 이로 인해 유발된 유효 변형률 분포를 보여주고 있다. 공정 초기에는 전·후방압출이 동시

에 일어나며, 펀치와 녹아웃 헤드의 모서리 부분에 높은 유효 변형률 값이 분포하고 있다.

펀치가 하강함에 따라 전방압출의 유동이 후방압출보다 빨리 진행하나, 녹아웃 헤드의 0°30' 테이퍼로 인해 전방 압출부의 단면감소율이 점차 커지므로 후방압출이 보다 빨리 진행되었다. 그러나 전방압출부의 길이가 후방압출 보다 훨씬 짧으므로, 스트로크가 45 mm일때 전방압출부의 성형이 완료되어 설계자의 요구조건을 만족하였다. 이때의 해석 결과는 Fig. 15에 나타나 있으며, 많은 부분에서 변형이 발생하였으나 칸막이 부위에 비유동구역이 남아 있음을 알 수 있다(△, B 부위).

성형이 완료된 제품에 대한 응력 및 변형률의 분포가 Fig. 16에 나타나 있으며, 펀치의 모서리 부분에서 740.98 MPa의 집중응력(□ 부위)을 받고 있음을 알 수 있다(Fig. 16-a 참조). 이 부위의 집중응력은 펀치마모를 초래할 뿐 아니라, 다이와 펀치 중심의 불일치로 인한 편하중 작용시 좌굴이 발생할 우려가 있다. 그러므로 이를 방지하기 위하여 온간조건으로 작업하는 것이 적합함을 확인하였다. 또한 Fig. 16-b에 나타나 있는 변형률 분포 그림에서는 공정설계시 우려했던 비유동구역이 사라지고, 최소 1.0(C 부위)이상의 변형률을 나타내고 있다. 그리고 주요 부위의 치수를 측정한 결과 설계자가 요구하는 형상으로 성형됨을 확인하였다.

## 6. 결론

알루미늄 7075합금 열간압출재에 대한 공정개선을 위하여, 복합압출 공정에 대한 실험 및 유한요소 해석을 수행하였으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1)가열조건 선택에 있어서 열간에서는 결정립 성장이 발생하였고 냉간에서는 금형마모가 심하므로, 온간(200℃)이 가장 적합하였다.

(2)소재형상은 실린더형태보다 테이퍼형태가 적합하다.

(3)윤활조건은 흑연과 기름의 혼합인 경우보다 분더루베 방식이 표면조도나 치수정도 측면에서 우수하였다.

(4)유한요소 해석을 통하여 전방압출이 먼저 완료되고 후방압출이 수행됨을 알 수 있었으며, 최종적으로 비유동 구역이 사라지고 원하는 형상으로 성형됨을 확인할 수 있었다.

(5)공정개선으로 기대되는 효과는 공정수가 7개 줄었으며, 소재는 약 225%절감할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심연구(KOSEF 961-1004-037-2)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) H.H. Lin, K. Kawakami and H. Kudo, 1988, "Metal Flow Control in Cold Simultaneous Forward/ Backward Extrusion", *Annals of CIRP*, Vol. 37, pp.231~234.
- (2) J.Y. Lee and T. Altan, 1992, "Evaluation of Lubrication and Friction in Cold Forging using a Double Backward Extrusion Process", *J. of Mater. Proce. Tech.* Vol.33, pp.95~108.
- (3) B. Avitzur, W.C. Hahn and Jr., M. Mori, 1976, "Analysis of Combined Backward/ Forward Extrusion", *Trans. of the ASME*, pp.438~445.
- (4) A.K. Tayal, 1982, "Analysis of Combined Backward/ Forward Extrusion by the Finite Element Method", *Int. Conf. on Nume. Methods in Industrial Forming Process Swans, U. K.*, pp.247~255.
- (5) Wu, Shichun and Li, Wenya, 1990, "Deformation Flow and Pressure During Bar-Bar Combined Extrusion", *Journal of Northwestern Polytechnical Univ.*, Vol. 8, pp.85~94.
- (6) Li, Miaoquan and Wu, Shichun, 1990, "Analysis of Coexistence of Two Kinds of Macro-Defects in Cup-Cup Axisymmetric Combined Extrusion." *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 3, pp.58~66.
- (7) 한철호, 1989, "상계해법에 의한 축대칭 후방압출의 소성변형해석", *대한기계학회지*, 제13권 제3호, pp.330~336.
- (8) 김영득, 한철호, 1994, "상하컵형인 전후방압출 공정에 관한 실험적 연구" *한국소성가공학회지*, 제3권, 제3호, pp.291~301.
- (9) 孫 良 彦, 1988, "金型設計", *機電研究社*, pp.388~397.
- (10) S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", *Oxford University Press*.
- (11) S.I. Oh, 1982, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 24, pp.479~493.