

(논 문)

## 모델재를 이용한 축대칭 평금형 압출공정의 변형가시화 해석

한 철 호\* · 엄 태 복\*\*

(1996년 2월 13일 접수)

### A Visioplasticity Analysis for Axisymmetric Extrusion through Square Dies Using Model Material

Chul-Ho Han and Tae-Bok Um

#### Abstract

To investigate the behavior of plastic deformation in axisymmetric extrusion through square dies, experimental works with the plasticine as a model material are carried out at the room temperature. Some mechanical properties of the model material are determined by compression and ring compression tests. Visioplasticity method using experimental grid distortion in extrusion is introduced to analyze the plastic flow, strain rate and strain distribution. In spite of severe deformation during the extrusion through square die the visioplasticity method shows good results for the distribution of effective strain rate and effective strain.

**Key Words :** Visioplasticity (변형가시화), Extrusion (압출), Square Dies (평금형), Model Material (모델재)

#### 1. 서 론

다양한 형상의 단면형상재들이 열간의 평금형 (square or flat die)을 통해 제작되고 있으며 경량화와 내부식성이 요구되는 각종의 자동차·항공기용 부품, 열교환기류, 건축용 샤프트 등 구조 형상재들이 이 가공법에 의해 생산되고 있다. 평금형 압출은 원하는 최종 단면형상을 금형의 입구부에 편평하게 설치하고 밀폐된 용기에 구속된 소재를 밀어 성형하는 방법으로 금형형상이 간단하고 제작이 용이하므로 알루미늄과 동합금 등은 열간에서 무운할 상태로 성형이 가능하며 생산성이 높기 때문에 경금속형상재 제조공정으로 널리 사용된다.<sup>(1-3)</sup> 그러나 금형의 개발은 경험에 의존하며 따라서 설계

실수에 의한 금형 파손과 설비의 손상 등이 있을 수 있고 경제적, 시간적 손실이 많다. 실제의 금형과 공정을 설계하기 위해서는 이론적 수치해석법이나 상사조건하의 모사실험을 통한 실험적 해석법을 이용할 수 있다.

최근 유한요소법에 의한 평금형을 통한 열간 축대칭 압출에 대한 해석들<sup>(4,5)</sup>이 발표되고 있으나 온도 영향을 고려해야 하며 연속금형과는 달리 변형이 너무 급격하게 이루어지기 때문에 빈번한 격자재구성이 필요하고 입출력의 준비에 어려움이 있다. 또한 수치해석 결과의 타당성을 얻기 위해서는 실험적인 확인이 필요하나 해석의 여러 결과에 대한 실제 실험수행이 어렵기 때문에 해의 신뢰성에 문제가 있을 수 있다.

모사실험은 실제 소재와 거동이 비슷한 플라스틱인, 왁스 또는 납과 같은 모델재료를 사용하기 때문에 실제 금속에 비해 성형하중이 대단히 작고 소성유동을 가시적으로 볼 수 있다. 또한 실험실적

\*금오공과대학교 생산기계공학과

\*\*금오공과대학교 산업대학원

환경에서 실제 공정과 연관된 공정변수를 변화시켜 가며 실험할 수 있기 때문에 실제 공정상태에서의 실규모 실험에 비해 시간과 경비가 적게 들며, 이 결과를 토대로 실제 금형설계에 필요한 소성유동 및 변형특성을 실험적으로 예측할 수 있는 장점이 있다.

모델링재료에 의한 실험적 연구는 특히 열간의 단조, 압연, 압출과 같은 벌크성형공정을 중심으로 연구<sup>(6-8)</sup>되어 왔으며 평금형 압출분야에도 여러 연구결과가 발표된 바 있다.<sup>(9-10)</sup> 대부분의 연구결과들은 열간 평금형 압출공정시 소성유동의 가시화에 관점을 두었으며 변형률속도나 변형분포등의 표현은 미흡하였다. 이것은 평금형 압출시 입구부의 심한 소성변형으로 명확한 변형양상을 얻기 힘들고 실험적 변형해석을 적용하는데 난점이 있기 때문이다.

본 연구에서는 플라스틱인 모델재를 사용하여 축대칭 평금형 압출공정에서 대칭면의 격자변형을 이용하여 소성유동을 가시화하고 이들 격자 변형 데이터를 이용한 실험적 변형가시화 해석(visioplasticity method)을 수행하고자 한다.

## 2. 변형가시화법의 응용

### 2.1 속도장 및 변형률 속도장

변형가시화법을 적용하기 위해서는 일차적으로 속도장의 구성이 필요하며 변형단계 전후의 변위를 이용하여 그 표현이 가능하다.

Fig. 1과 같이 z방향으로 편차램이 Δz 만큼 V<sub>p</sub> 속도로 진행하였을 때 변형 전의 임의의 한 점 A가 B로 이동했다면, 변형을 하는데 소요된 시간 Δt는 다음과 같다.

$$\Delta t = \Delta z / V_p \quad (1)$$

A점이 B점으로 이동할 때 이 점의 이동속도 및 방향은 A, B점의 중간점(M)에 아래 식으로 표시할 수 있다.

$$M(r, z) = M((B_r + A_r)/2, (B_z + A_z)/2) \quad (2a)$$

$$V_r = (B_r - A_r) / \Delta t \quad (2b)$$

$$V_z = (B_z - A_z) / \Delta t \quad (2c)$$

여기서 첨자 r, z는 반경방향과 축방향을 나타내고, M, A, B는 좌표값을, V<sub>r</sub>, V<sub>z</sub>는 반경방향의 속도, 축방향의 속도를 나타낸다.

변형률속도는 앞의 속도장을 이용하면 다음과 같이 간단히 계산될 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_r \doteq \frac{\Delta V_r}{\Delta r} = \frac{(V_r)_{j,i+1} - (V_r)_{j,i-1}}{2\Delta r} \quad (3a)$$

$$\dot{\epsilon}_z \doteq \frac{\Delta V_z}{\Delta z} = \frac{(V_z)_{j+1,i} - (V_z)_{j-1,i}}{2\Delta z} \quad (3b)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta \doteq \frac{(V_r)_{j,i}}{r} \quad (3c)$$

$$\dot{\gamma}_{rz} \doteq \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_z}{\Delta r} + \frac{\Delta V_r}{\Delta z} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{(V_z)_{j,i+1} - (V_z)_{j,i-1}}{2\Delta r} + \frac{(V_r)_{j+1,i} - (V_r)_{j-1,i}}{2\Delta z} \right) \quad (3d)$$

여기서 첨자 r, z는 반경방향과 축방향을 나타내고 i와 j는 각각 r방향과 z방향의 격자점 순서를 나타낸다. 유효 변형률 속도는 각 방향의 변형률 속도에서 아래식으로부터 구한다.

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + \dot{\gamma}_{rz}^2)} \quad (4)$$

유효 변형률은 유효 변형률 속도를 이용하여 계산하며, 유선을 따라 시간에 대해 변형률 속도를 적분하여 계산하여야 하나 Δt가 작으면 다음과 같이 근사화하여 산정할 수 있다.

$$\epsilon_r = \int \dot{\epsilon}_r dt \doteq \dot{\epsilon}_r \Delta t, \quad \epsilon_\theta = \int \dot{\epsilon}_\theta dt \doteq \dot{\epsilon}_\theta \Delta t \quad (5a)$$

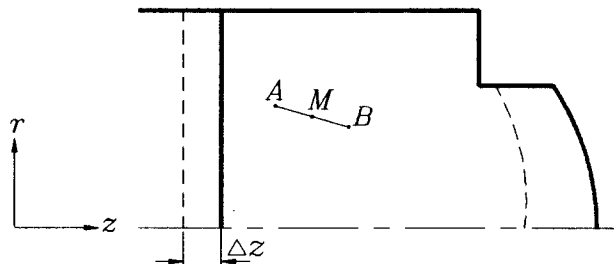


Fig. 1 Description of a grid point

$$\epsilon_z = \int \dot{\epsilon}_z dt \doteq \dot{\epsilon}_z \Delta t, \quad \gamma_{rz} = \int \dot{\gamma}_{rz} dt \doteq \dot{\gamma}_{rz} \Delta t \quad (5b)$$

$$\bar{\epsilon} = \int \bar{\dot{\epsilon}} dt \doteq \bar{\dot{\epsilon}} \Delta t \quad (6)$$

2.2 측정 격자점의 교정

변형된 격자점의 위치를 광학 투영기로 측정할 때 발생하는 오차는 측정값에 대한 교정(smoothing) 방법을 사용하면 줄일 수 있다. 본 시험 데이터에 적용한 방법은 격자점을 중심으로 전후, 상하의 데이터를 이용하는 방법이다.

Fig. 2는  $r$ 방향의 불연속을 교정하는 과정을 도시한 것이다. 격자선 상의 한 격자점의  $r$ 좌표를  $P_j$ 라 하면,  $P_{j-1}$  점과  $P_{j+1}$  점의 중심점  $n_1$ 과  $P_{j+1}$  점과  $P_j$  점의 중심점  $n_2$ 를 연결하는 선이  $z$ 에서  $r$ 방향의 평행선과 만나는 교점  $S_j$ 가 교정된  $P_j$ 점의  $r$ 좌표값으로 된다.  $z$ 방향의 불연속도 같은 방법으로 수행하면 교정된  $P_j$ 점의  $z$ 좌표가 결정되고, 측정 한 점을 둘러싼 4점의 영향을 고려할 수가 있다.<sup>(11)</sup> 본 연구에서는 이러한 알고리즘을 이용한 프로그램을 작성·활용하여 측정오차를 감소 시켰다.

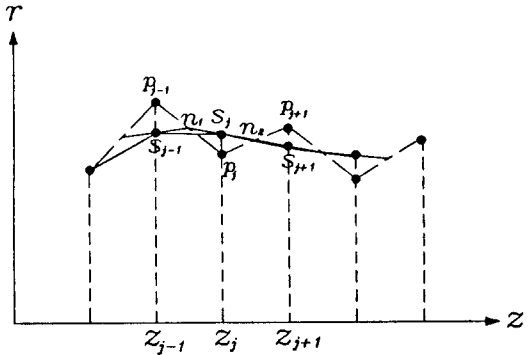


Fig. 2 Smoothing for the measured points

Fig. 3은 변형가시화해석을 위한 프로그램의 흐름도이다. 광학 투영기로 측정된 변형 전과 변형 후의 좌표가 입력되면 측정오차를 줄이기 위한 교정이 이루어지며 각 격자점에서의 속도성분과 변형률 속도 및 유효변형률을 구하여 저장하는 과정으로 되어 있다. 만일 다음 단계의 격자 변형 좌표값이 있으면 다시 처음 상태로 돌아가 측정데이터가 입력되어 반복 수행되고 추가 단계가 없으면 종료된다.

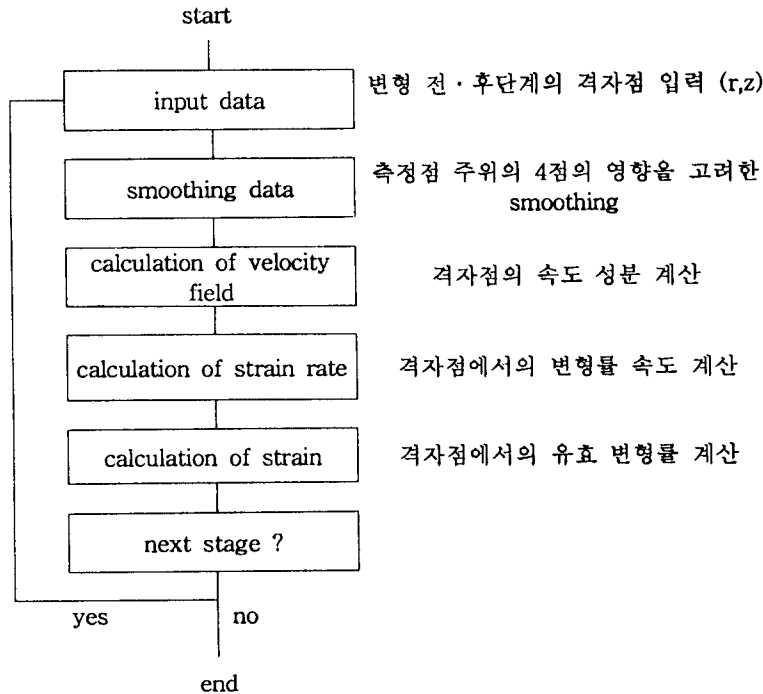


Fig. 3 Flow chart for viscoplasticity analysis

### 3. 실험

실험에 사용된 소재는 모델재인 하버트사의 흑색 플라스틱이며 소재의 기계적 성질을 알아내기 위한 압축 및 링 압축실험용 실험 장치와 평금형 압출실험용 장치를 별도로 설계 제작하였다. 이들 실험장치를 Fig. 4와 같은 1톤 용량의 모사실험을 위한 전용 실험기에 장착하여 실험을 수행하였다. 이 실험기는 위치에 따른 속도의 제어가 가능하며 실험 중 하중과 변위 등의 계측이 가능하도록 센서가 부착되어 있다.

압출용 콘테이너는 실험 중에 변형과정을 볼 수 있도록 투명한 아크릴로 제작하였으며 금형재질은 SM45C로 단면감소율이 80%이고 금형 랜드는 4mm로 하였다. Fig. 5는 실험에 사용된 금형조 및

편지류의 사진이다.

압축 시험용 시편은 직경 40mm×길이 40mm로 하고 변형률 속도를 0.01~0.4(/s)로 변화시켜가며 실험하였으며 시편의 별칭을 줄이기 위해 높이 감소율 15%마다 실링페이퍼와 바셀린을 상하면에 도포 하였다. 재료의 유동응력을 변형률속도만의 함수로 하여 다음과 같은 유동응력식으로 표현하고 최소자승법에 의해 각 계수를 구하였다.

$$\bar{\sigma} = K\dot{\epsilon}^n \quad (7)$$

여기서  $K$ 는 소성계수,  $n$ 은 변형률 속도 민감도 지수이다.

공구 접촉면의 마찰 상수를 얻기 위한 링 압축용 시편은 외경:내경:높이비는 6:3:2로 하고 베이비 파우더와 바셀린 2종에 대하여 실험하였다. 압축속도는 10mm/s로 하고 매 높이 감소율 10%마

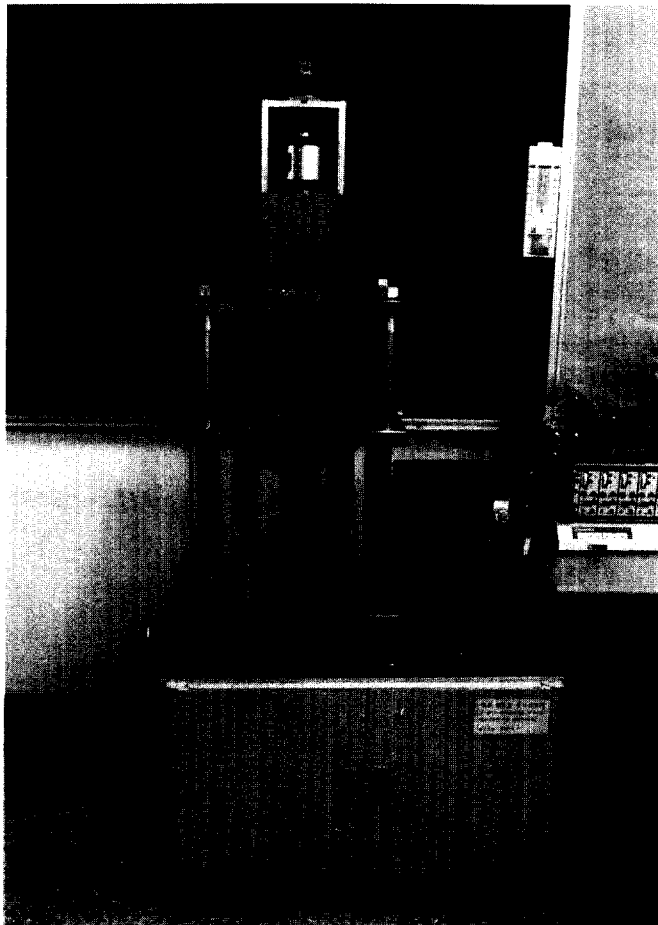


Fig. 4 Experimental set-up for physical modelling

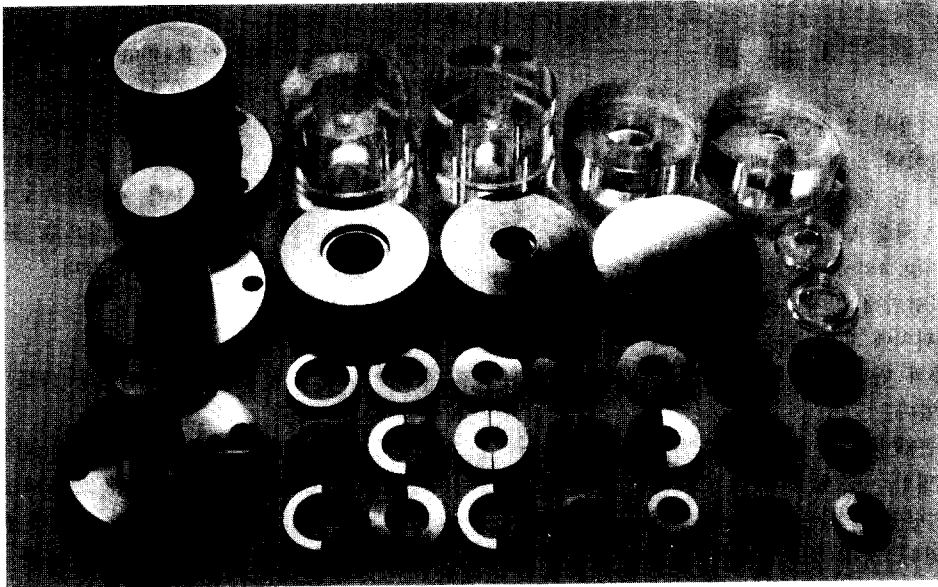


Fig. 5 Die and Punch set for experiments



Fig. 6 Specimens for compression and ring compression tests

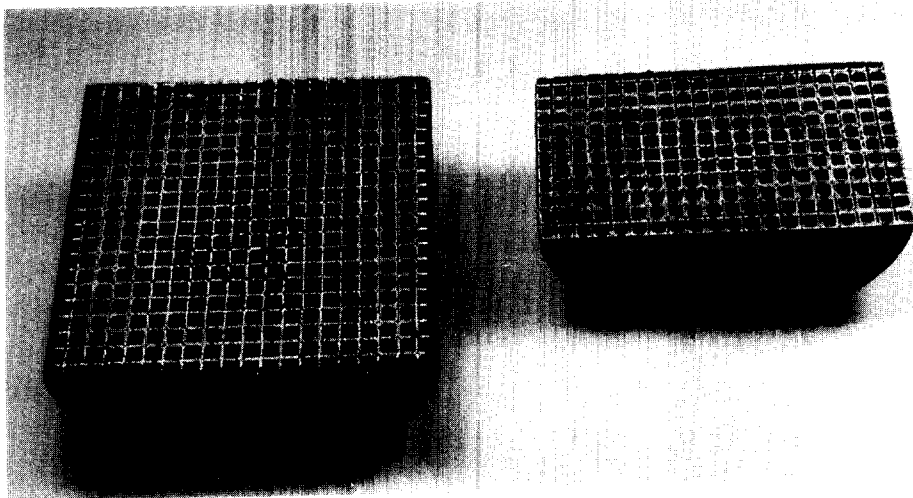


Fig. 7 Undeformed specimens with grids

다 내경과 높이를 측정하였다. Fig. 6은 실험 전후의 압축 및 링 압축 시편을 보여 준다.

압출실험용 시편은 직경 60mm×길이 60mm의 크기이며 소성유동을 가시화 하기 위해 원통시편을 반쪽으로 분할한 시편을 제작하고 그 한쪽 대칭면에 3mm×3mm의 격자를 프린팅하여 사용하였다. 압출속도는 10mm/s로 하고 윤활조건, 펀치 진행 거리를 변화시켜 가며 실험하였다. Fig. 7은 프린팅된 격자 시편을 보여주고 있다.

모든 시편은 제작후 약 21°C 정도로 유지되는 밀폐된 용기에 2~3일 이상 보관한 후 실험 6시간 전에 꺼내어 실험온도(21±1.5°C) 상태로 둔 다음 각 실험을 수행하였다.

실험중의 변위 및 하중은 시험기에 부착된 하중계와 전위차계 센서를 통해 감지되어 X-Y 기록계에 표현되고, 자료획득 시스템에 의해 컴퓨터에 저장된다. 압출후의 반쪽 시편 위의 격자점 좌표는 광학투영기로 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

압축시험 결과 얻어진 소성계수  $K$ 는 0.24(MPa) 이었고 변형률속도 민감도 지수는  $n$ 은 0.11로 결정되었다. 링압축시험에 의해 결정된 마찰 상수는 베이비 파우더의 경우 0.5~0.7, 바셀린의 경우 약 0.07이었다.

Fig. 8은 윤활제를 각각 바셀린과 파우더로 사용

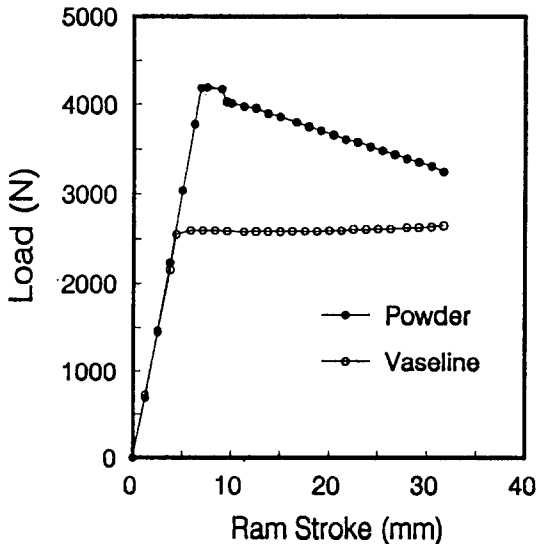
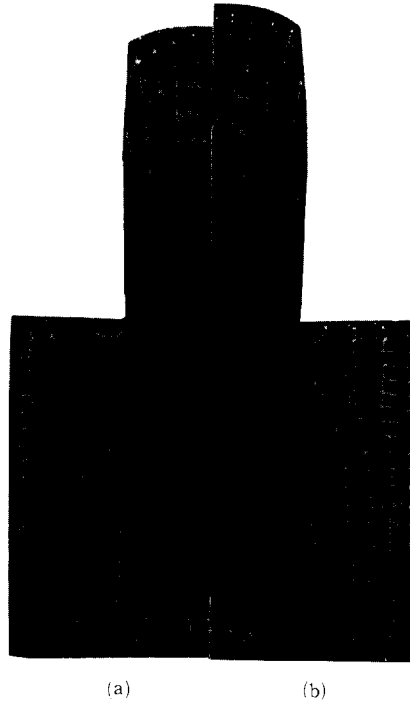


Fig. 8 Extrusion loads versus punch(ram) stroke

한 경우 동일 금형에서 초기부터 30mm 펀치 진행 거리까지 압출하중의 변화를 보여준다. 두 경우 압출하중은 초기에는 거의 직선적으로 급격히 증가하여 정점에 이른다. 파우더 윤활의 경우는 초기 압출 변형에 대한 저항이 바셀린의 경우보다 뚜렷하게 나타나며 이후 공정이 진행됨에 따라 마찰부위가 줄어들기 때문에 압출하중은 점차 감소한다. 바셀린의 경우 마찰 상수가 대단히 작기 때문에 하중 감소가 거의 없으며 정점의 압출하중은 파우더의 경우가 바셀린 경우보다 약 40%정도 크다. 이 차이는 소재와 콘테이너 접촉부의 윤활조건이 서로 달라서 마찰에 의한 손실량이 다르고 유동양상에도 영향을 주기 때문인 것으로 보인다.

대칭면 상의 최초 일정격자들은 압출 공정의 진행중에 소성변형에 의한 찌그러짐이 발생하며 Fig. 9는 그 변형양상을 촬영한 사진이다. 접촉부의 윤활조건은 하중 뿐 아니라 소성유동에 큰 영향을 주며 이 그림은 그것을 잘 나타내고 있다. (a)는 파



(a) powder, initial height 59.56mm, stroke 8.33mm  
 (b) vaseline, initial height 59.96mm, stroke 8.38mm

Fig. 9 Experimentally observed grid distortions with different lubricants

우더 윤활. (b)는 바셀린 윤활의 경우로 윤활상태가 별로 좋지 않은 파우더 윤활의 경우 콘테이너 벽면에서 마찰이 커서 유동이 어려우며 내부에 유동이 집중되고 있고 금형 상부의 콘테이너 구석에 변형이 거의 없는 비유동역이 존재함을 알 수 있다. 반면에 윤활 성능이 우수한 바셀린의 경우는 벽면에서 마찰저항이 작기 때문에 마찰면을 따른 유동이 비교적 용이하고 콘테이너 구석 부위는 비유동역이 없으며 격자의 압축이 계속 진행되고 있다.

Fig. 10은 공정 진행에 따른 격자의 변형양상을 촬영한 것이다. 공정 초기는 입구부의 소재를 중심으로 변형이 일어나며 공정이 진행됨에 따라 소재 전영역에 걸쳐 변형이 확산되고 있다. 파우더 윤활제를 사용하여 마찰상수가 비교적 크기 때문에 비유동역이 존재하고 공정진행에 따라 그 크기가 조금씩 변화하고 있다.

Fig. 11은 변형가시화법을 적용하기 위해 압출실험후 격자점의 좌표값을 측정하고 2.2절에 기술한 격자점 방법을 이용하여 얻은 결과를 실제 변형된 격자 사진과 비교하여 놓은 그림이며 본 해석의 격자점 교정법이 양호함을 보여주고 있다.

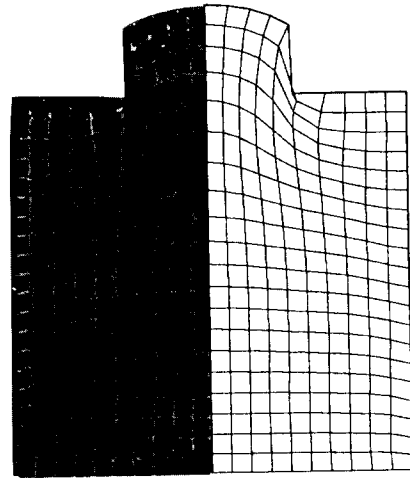


(a) 5.14mm

(b) 8.33mm

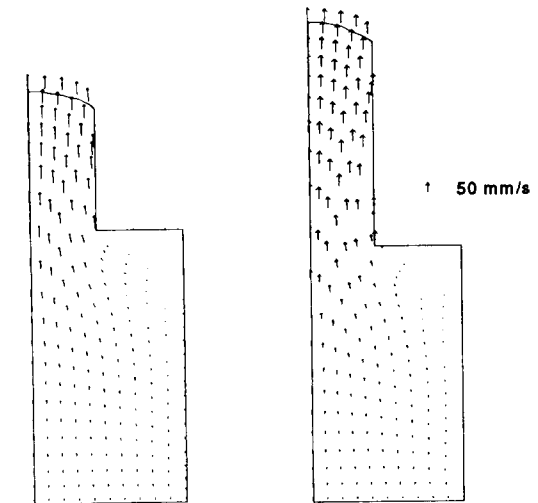
Fig. 10 Grid distortions with powder lubricant at different punch stroke

Fig. 12, Fig. 13과 Fig. 14는 파우더 윤활제를 사용하여 단면감소율 80%인 평금형 압출 실험을 수행하고 격자 변형을 측정하여 변형가시화 해석을 적용한 결과이다. 펀치 진행에 따른 속도분포가 Fig. 12(a, b)에 표현되어 있으며 이를 통해 소성 유동양상의 판단이 가능하다. 콘테이너 부위는 마찰저항 때문에 속도가 느리며 중심부로 갈수록, 그리고 출구에 가까워 질수록 속도가 빠르고 콘테이



experiment smoothing

Fig. 11 Deformed grids before and after smoothing (lubricant : powder)



(a) stroke = 5.14mm

(b) stroke = 8.33mm

Fig. 12 Velocity distributions obtained from grid distortions at different punch strokes

너 구석 부위는 소성유동이 거의 존재하지 않는다. Fig. 13(a, b)는 유효변형률 속도의 해석 결과가 나타나 있다. 그림에서 보듯이 출구 금형 입구부에 변형이 집중되고 있으며 구석부와 출구에서 멀리 떨어진 부위는 변형이 거의 없으며 공정이 진행됨에 따라 변형역이 넓어지고 있다. 유효변형률 분

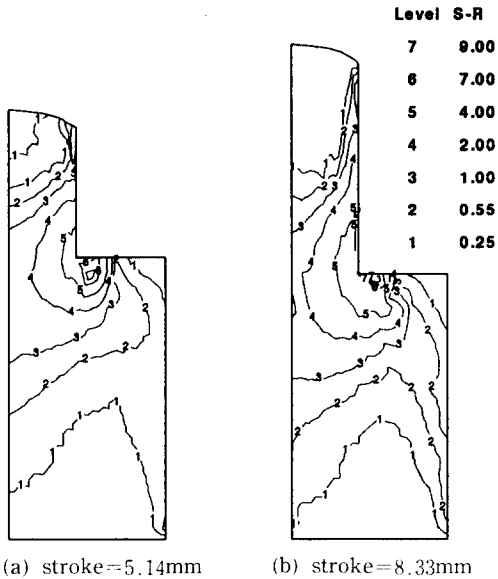


Fig. 13 Distribution of effective strain rates at different punch strokes

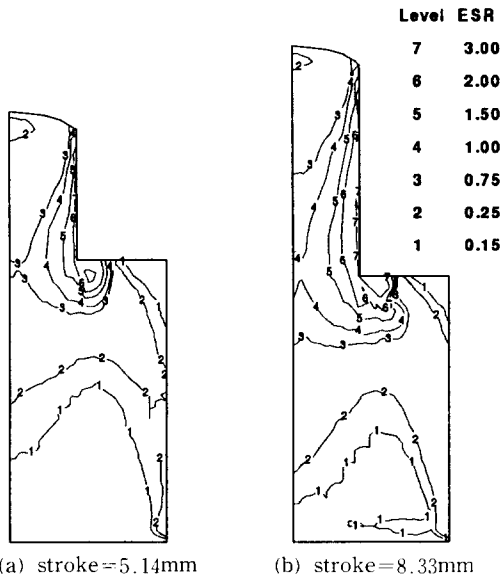


Fig. 14 Distribution of effective strains at different punch strokes

포에 대한 Fig. 14(a, b)의 해석 결과를 보면 압출된 초기부의 유효변형률이 비교적 작으며 압출된 소재의 중심부보다 외곽부가 유효변형률이 3배이상 큼을 알 수 있다. 펀치와의 접촉 부에서 유효변형률이 존재하는 것은 소재가 압출되기 전 초기 단계에서의 업셋팅 변형에 주로 기인한 것이다.

변형가시화법을 사용하기 위해서는 압출공정의 진행 단계에 따른 격자점의 좌표를 측정하여야 하는 난점이 있지만 일반적 이론해석에서는 해석적 가정등으로 인해 여러 공정변수의 영향을 정확하게 고려하기가 어려우나 이 방법은 실제 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 하기 때문에 공정변수의 종합적 효과를 고려하는데 유용하며 유한요소 해석 결과 등 이론해석의 실험적 검증법으로 활용될 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

축대칭 열간 평금형 압출공정에서 윤활조건의 변화 및 공정 진행거리에 따른 소성유동을 모델재인 플라스틱신의 대칭면 상의 격자변형을 이용하여 가시화하였으며 변형가시화법에 의한 속도, 유효변형률 속도 및 유효변형률의 분포들을 얻었다. 평금형에 의한 직접 압출의 경우 소재 출구면에 변형이 집중되며 윤활조건 및 공정진행에 따라 유동양상이 달라지며 최종제품의 유효변형률 분포는 중심부에 비해 외곽부가 훨씬 커짐이 확인되었다. 평금형 출구부의 심한 변형에도 불구하고 격자의 변형양상을 정확하게 표현될 수 있는 기법이 활용되면 변형가시화 해석은 실험실적 환경에서 금형설계에 필요한 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 한국과학기술원 특정기초 연구과제(과제 제목: 평금형을 통한 열간 압출공정의 실험적 모델링, 과제번호: 93-0200-06-01-3)에 의하여 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 時澤貢, 1987 アルミ熱間押出のトライボロジと今後の動向, 塑性と加工, Vol. 28, no. 314, pp. 213~214.



- (2) T. Altan, S. Oh and H. Gegel, 1983 Metal Forming : Fundamentals and Applications, ASM, pp. 189~229.
- (3) K. Lange, 1985 Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, pp. 16.1~16.66.
- (4) 강연식 외, 1992 "평균형을 이용한 축대칭 열간 압출의 유한요소해석", 대한기계학회논문집 16권 2호, pp. 207~225.
- (5) 강연식, 양동열, 1994 "ALE 묘사에 근거한 강-접소성 유한요소 수식화와 축대칭 평균형 압출에의 적용", 한국소성가공학회지 제3권 제2호, pp. 156~166.
- (6) T. Wanheim et al., 1984 "Physical Modelling of Plastic Working Process", Advanced Technology of Plasticity, pp. 984~996.
- (7) 이근안, "모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문 1992.
- (8) 김영호, 배원병, 이종현, 1993 "MMT를 이용한 Al-7075 열간 엷셋 단조의 가공하중 예측", 한국소성가공학회지, 제2권3호, pp. 37~50.
- (9) K. Laue and H. Strenger, 1981 "Extrusion Process, Machinery, Tooling", ASM, Metals Park, OH.
- (10) S. Glibbery and T. Wanheim, "Physical Modelling of Metal Extrusion Process", IEX-TRU Conf. 89, Ohio Univ. Dec.
- (11) A. Shabaik, S. Kobayashi, 1967 "Computer Application to the Visioplasticity Method", Journal of Engineering for Industry, pp. 339~346.