

## 축대칭소성가공에 있어서의 변형가시화법의 응용에 대한 연구

배 덕 한\* · 양 동 열\*\*

### Application of the Visioplasticity Method to the Axisymmetric Bulk Deformation Processes

Duck-Han Bai · Dong-Yol Yang

#### ABSTRACT

The metal flow and the strain distribution is investigated for the steady state and non-steady state bulk deformation processes by using an improved visioplasticity method which includes the effective smoothing scheme. The comparison of various smoothing schemes leads to the selection of the five-point least square smoothing method which is employed to reduce the measurement errors. As a steady state forming process experiments are carried out for axisymmetric forward extrusion through conical and curved dies of various area reductions using Aluminum and steel billets. Axisymmetric backward extrusion is chosen for a nonsteady state forming process. In axisymmetric forward extrusion the results from visioplasticity show that the curved die of a fourth-order polynomial renders more uniform distribution of strain rates and strains. Higher reduction leads to greater strain rates at the outer side of the billet. The visioplastic observation for axisymmetric backward extrusion as a non-steady state deformation process shows the concentration of higher strain at the inner wall of the extruded product. The visioplastic results in forward extrusion are in agreement with the computed results by the finite element method. It is thus shown that the visioplasticity combined with a smoothing technique is an effective method to determine the pattern and the distribution of strain rates and strains.

---

\* 한국과학기술원 생산공학과 ( 현, 현대자동차 엔진개발실 )

\*\* 한국과학기술원 생산공학과 부교수, 정회원

1. 서 론

소성변형을 해석하기 위해 실제공정을 이상화시킨 모델을 이용한 근사적인 해석방법으로 실험적으로 해석하는 변형가시화법 (Visioplasticity Method)이 있다.

변형가시화법은 A. Shabaik, Thomsen and Kobayashi<sup>(1,2,3)</sup> 등에 의해 주로 체제화 되었으며 이들은 소재에서 측정에 의해 구한 속도장을 토대로 가정된 유동함수를 구하고 이렇게 구한 유동함수로부터 소성변형된 소재의 변형도 및 응력분포를 구했다.

H. Wilhelm<sup>(4)</sup> 등은 축대칭 압출공정에서 형상행렬을 속도장위에 설정하여 차분방식으로 변형도 분포를 구했다.

P. Boissoneau<sup>(5)</sup> 는 금속절단시 발생하는 비정상상태 소성변형을 해석하였다.

본 논문에서는 변형가시화법을 이용하여 정상상태인 냉간전방압출과 비정상상태인 냉간후방압출을 해석하였으며 또한 시편상의 찍그러진 선그물을 측정할 때에 발생하는 측정오차는 어느정도는 줄일 수 있으나 불가피한 것이므로 측정오차를 줄이기 위해 Smoothing 방법을 도입하게 되었는데, 여러가지 Smoothing 방법을 적용하여 계산한 결과 5-point 최소자승법<sup>(6)</sup>이 적당하다고 판단되어 이 방법을 채택하였다.

또한 축대칭 전방압출에서 금형의 형상 및 단면 감소율이 소재의 변형도 분포 및 속도장에 미치는 영향을 검토하며 Al-2024의 경우에 F.E.M에 의한 결과와 비교한다.

비정상상태인 후방압출에서 소재의 변형이 진행함에 따라 소재에서의 속도분포 및 변형도분포를 검토하여 변형특성을 고찰하기로 한다.

2. 변형가시화법 (Visioplasticity Method)

2-1. 정상상태 변형가시화법 (Steady-state Visioplasticity Method)

속도장은 소재 각 요소의 변형속도의 크기와 방

향을 전체적으로 나타낸다. 속도장을 실험적으로 구하기 위해서는 다음과 같은 절차가 필요하게 된다.

시편을 종축을 포함하는 면에서 종축에 평행하게 정확하게 반으로 분리시켜 그 분리된 면상에 미세한 선그물을 갖는데 이 선그물은 동일한 간격을 가진 장방형그물(1×1mm)<sup>(7)</sup>로써 시편종축에 평행하고 수직하게 갖는다. 선을 갖는 방법으로 광화학적인 부식방법(photoetching)을 사용하였다. 이 선그물은 소성변형이 발생함에 따라 찍그러지는데 이 변형과정은 정상상태이므로 종축에 평행한 선들은 유선(Stream line)들을 나타내고 또한 pathline 과도 일치한다.

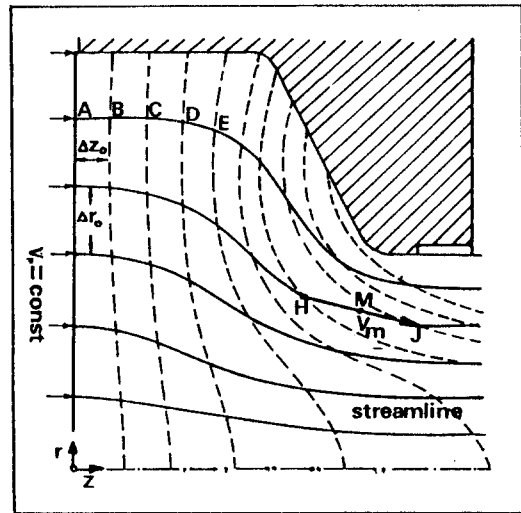


Fig. 1. Experimental determination of velocity field in forward extrusion

Fig. 1에서 시간간격  $\Delta t = \Delta Z_0 / V_p$  동안 펀치는 A→B로 이동하고 동일한 시간간격  $\Delta t$  동안 소재는 A→B, B→C, H→J로 이동함을 알 수 있다. 이렇게 이동한 거리는 소재 각 요소의 속도의 척도가 되는데 변형영역에서 동일한 유선상에서 한계자점과 다음점에서의 실제속도는 다르기 때문에 속도의 근사값으로 두점의 연결선의 중간점 M에서의 평균화된 속도값  $V_m$ 을 고려한다.

이런 방법으로 구한 근사화된 속도장을 근거로

변형도 분포를 구해 보면 여기서는 최대칭 문제를 취급하므로 원통좌표계 ( r , θ , Z )를 택한다. 그리고 속도-변형도를 관계식은 아래와 같다.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial V_z}{\partial Z} \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \frac{V_r}{r} & : r \neq 0 \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \dot{\epsilon}_r & : r = 0 \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_r}{\partial Z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

앞에서 구한 근사적인 속도장은 개별적으로 분리된 곳에서 속도값을 가지므로 연속장에 대한 (1)식을 이용하여 변형도율을 구할 수 없기 때문에 다음과 같은 차분방식으로 구해야 한다. 즉, 충분히 작은 Δr, ΔZ에 대해서 (1)식에서의  $\frac{\partial V_r}{\partial r}$ ,

$\frac{\partial V_z}{\partial Z}$  등은  $\frac{\Delta V_r}{\Delta r}$ ,  $\frac{\Delta V_z}{\Delta Z}$  등으로 바뀌질 수 있기 때문

이다. 차분방식으로 계산하는 방법을 설명하면, 찌그러진 선그물위에 규격화된 새로운 선그물을 설정하고 각 교점에서의 속도값을 구한다. 본 논문은 규격화된 (normalized) 선그물은 동일한 간격을 가지며 변형되지 않은 시편상의 선그물부분과 일치되도록 주었다.

새로이 설정된 규격화된 선그물상에서의 각 교점에서의 속도값은 다음과 같이 구한다. 시편내부에 놓이고 시편상의 선그물의 교점과 일치하는 규격화된 선그물의 교점에서의 속도값은 측정에 의한 속도값과 동일하게 두고 시편내부에 존재하면서 시편상의 선그물의 교점과 일치하지 않는 점의 속도값은 내삽법 (interpolation)에 의해 구한다.

본 논문에서는 내삽법을 위해 규격화된 선그물의 교점을 둘러싸고 있는 한정된 4상한에서 측정점을 끌어와서 아래와 같이 주어진 내삽법식에 의해 규격화된 선그물상의 교점에서의 속도값을 구한다.

$$V = \frac{\sum_{k=1}^i \frac{V_k}{a_k^2}}{\sum_{k=1}^i \frac{1}{a_k^2}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 i는 주위에 존재하는 측정점의 갯수이고 a<sub>k</sub>는 내삽장소와 측정점 사이의 거리이다.

이렇게 구한 규격화된 선그물상의 속도장을 근거로 수치계산을 하기 위해서는 각 교점이 시편상의 어떤 위치에 존재하는지를 나타내 주는 형상행렬 (Formmatrix)을 규격화된 선그물위에 설정한다. 형상행렬은 형상지수 (Formnumber) 0 ~ 9까지로 나누는데 형상지수 0은 시편밖에 존재하는 것을 나타내 주며 형상지수 1 ~ 9의 특징은 Fig. 2에서 설명되어 있다.

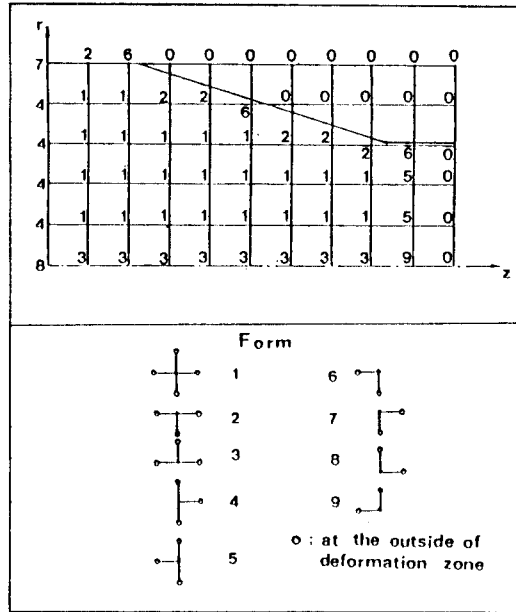


Fig. 2. Normalized net with form matrix

각 형상지수에 따라 차분계산하는 방식이 다르며 이렇게 하여 구한  $\dot{\epsilon}_r$ ,  $\dot{\epsilon}_\theta$ ,  $\dot{\epsilon}_z$ ,  $\dot{\epsilon}_{rz}$ 을 근거로 유효변형도율  $\dot{\epsilon}$ 을 구하면

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

이 된다.

그리고 유효변형도 또는  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형도를  $\dot{\epsilon}$ 을 시간에 대해 적분함으로써 구할 수 있는데 여기서는 정상상태이므로 변형이 진행되는 경로를 따라  $\dot{\epsilon}$ 을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \int \dot{\epsilon} dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(\bar{\epsilon})_{k,j} \approx \sum_{L=2}^j \{ (\dot{\epsilon}(K,L) + \dot{\epsilon}(K,L-1)) / 2 \times \{ (Z(K,L) - Z(K,L-1)) / \frac{1}{2} \cdot (V_z(K,L) + V_z(K,L-1)) \} \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$(\bar{\epsilon})_{k,j}$ : k 번째 유선상에서 유동방향으로 j 번째 점에서의  $\bar{\epsilon}$

2-2. 비정상상태 변형가시화법 (Unsteady state Visioplasticity Method)

정상상태에서와 마찬가지로 변형상태는 속도장을 통해서 설명될 수 있으며 변형이 비정상상태로 일어나므로 정상상태와는 다르게 속도장을 구한다. 시편제작과 시편표면에 선그물을 긋는 방법은 정상상태와 동일하나 원하는 변형상태까지 여러단계로 조금씩 소성변형시켜 가면서 각 단계마다 속도장을 구한다.

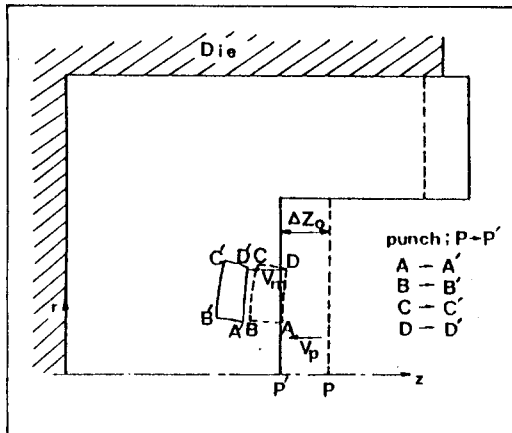


Fig. 3. Experimental determination of velocity field in backward extrusion

Fig.3에서 알 수 있듯이 펀치속도  $V_p$ , 각 변형 단계마다 걸린 시간  $\Delta t$ 와 펀치의 변위량 ( $\Delta Z_0$ )을 토대로 하여 각 변형단계의 중간점에서의 근사화된 속도값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t = | \Delta Z_0 / V_p | \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(V_z)_N = \frac{(Z)_N - (Z)_{N-1}}{(\Delta t)_N}$$

$$(V_r)_N = \frac{(r)_N - (r)_{N-1}}{(\Delta t)_N} \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서  $(r)_N, (Z)_N$ 는 N번째 변형단계에서의 측정점의 좌표이다.  $(V_z)_N, (V_r)_N$ 는 N, N-1 번째 변형단계의 중간점  $(RM)_N, (ZM)_N$ 에서 근사된 속도이다.

$$(RM)_N = ((r)_N + (r)_{N-1}) / 2, \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$(ZM)_N = ((Z)_N + (Z)_{N-1}) / 2$$

이와같이 하여 선그물 전체에서 전변형단계에서 근사된 속도장을 구할 수 있으며, 각 단계에서 근사된 속도장으로부터 변형도를 분포를 구할 수 있는데 구하는 방법은 정상상태에서와 동일하다. 이렇게 하여  $\dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_\theta, \dot{\epsilon}_z, \dot{\epsilon}_{rz}, \dot{\epsilon}$ 을 구한다.

그리고 유효변형도를  $\dot{\epsilon}$ 을 시간에 대해 적분하면 유효변형도  $\bar{\epsilon}$ 을 구할 수 있는데 여기서는 비정상상태이므로 각 변형단계마다 각 점이 움직인 궤적을 따라 적분하면 된다.

$$\bar{\epsilon} = \int_0^{t_N} \dot{\epsilon} dt$$

$$\approx \sum_{T=2}^N \{ \{ (\dot{\epsilon})_T + (\dot{\epsilon})_{T-1} \} / 2 \} \cdot \Delta t_T \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $\Delta t_T$ 는 각 변형단계에서의 변형시간이다.

2-3. 5-point 최소자승법에 의한 Smoothing 방법

측정오차를 줄이는 방법으로서 유선을 따라 존재하는 인접한 5점 ( $k=j-2, j-1, j, j+1, j+2$ )

을 이용하여 측정오차를 줄이는 Smoothing 방법인데 경계영역에 수정된 5-Point 최소자승법을 이용하면 전 변형영역에 대해서 측정오차를 줄일 수 있다. 이 방법을 적용시켜 측정오차를 줄일 때 만약 한점의 오차값이 다른점에 비해 상당히 클 때 이 오차가 다른점들에 미치는 영향을 줄이기 위해서 감쇠계수(0.729)를 곱한다.

i)  $j=1$  or  $isz$  인 점들에서

$$\begin{aligned} \bar{f}_1 &= f_1 - 0.01 \delta^4 f_3, \\ \bar{f}_{isz} &= f_{isz} - 0.01 \delta^4 f_{isz-2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ii)  $j=2$  or  $isz-1$  인 점들에서

$$\begin{aligned} \bar{f}_2 &= f_2 + 0.041 \delta^4 f_3, \\ \bar{f}_{isz-1} &= f_{isz-1} + 0.041 \delta^4 f_{isz-2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

iii)  $2 < j < isz-1$  인 점들에서

$$\begin{aligned} \bar{f}_j &= f_j - \frac{1}{16} \delta^4 f_j \quad \dots\dots\dots (12) \\ (\delta^4 f_j &= f_{j-2} - 4 f_{j-1} + 6 f_j - 4 f_{j+1} \\ &\quad + f_{j+2}) \end{aligned}$$

여기서  $j=1$  은 유선상의 시작점,  $j=isz$  는 유선상의 끝점이고,  $f_j$  는 측정값이고  $\bar{f}_j$  는 수정된 값이다.

3. 수치해석

3-1. 정상상태 변형가시화법에 대한 수치해석  
 측정좌표값을 입력하고 입력된 측정값들은 Smoothing Subroutine 에 의해 수정되며 수정된 좌표값들로부터 규격화된 선그물이 설정된다. 그 다음에는 유선을 따라 근사화된 속도장을 구하고 변형지역의 형상을 설명하는 형상행렬을 규격화된 선그물상에 설정한다. 그리고 변형된 선그물상의 속도장을 내삽법에 의해 규격화된 선그물상으로 옮기고 이렇게 하여 구한 속도장으로부터 유효 변형도율분포를 구한다.

변형된 선그물상에서 유선을 따라  $\dot{\epsilon}$  을 시간에 대해 적분함으로써  $\bar{\epsilon}$  를 구할 수 있다.

3-2. 비정상상태 변형가시화법에 대한 수치해석  
 변형된 선그물상의 속도장을 규격화된 선그물위

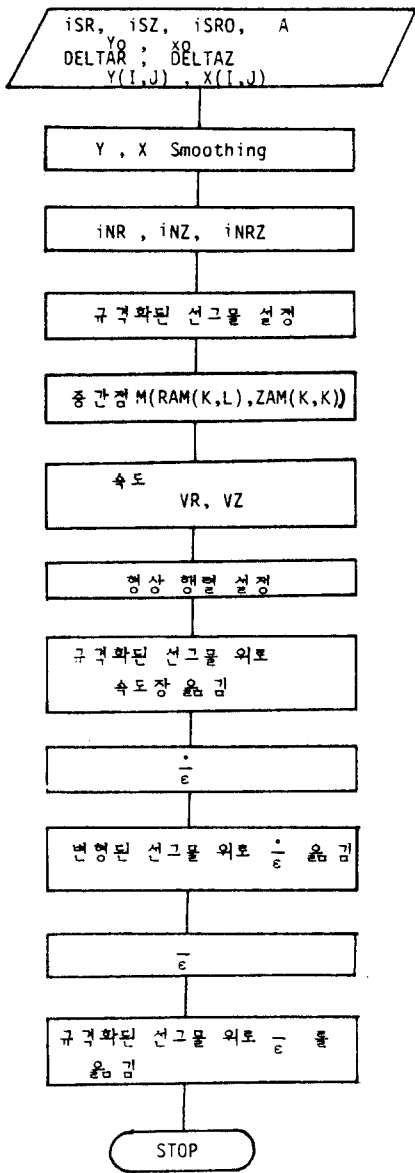


Fig. 4. Flow chart for numerical procedure in the steady-state viscoplasticity method

로 내삽법에 의해 옮긴 다음 다시 규격화된 선그물상에 형상행렬을 설정한다. 그리고나서  $\dot{\epsilon}$  을 구하고 규격화된 선그물위의  $\dot{\epsilon}$  을 변형된 선그물

위로 내삽법에 의해 옮긴다. 여기서 다음 단계의 측정값을 입력시켜 동일한 계산과정을 거친 후 다음단계로 넘어가는 형태로 되풀이 계산한다. 전체 단계가 끝나면 각 단계에서의 변형된 선그물상의  $\dot{\epsilon}$  을 토대로 변형이 일어나는 경로를 따라 시간에 대해 적분하여  $\bar{\epsilon}$  를 구한다.

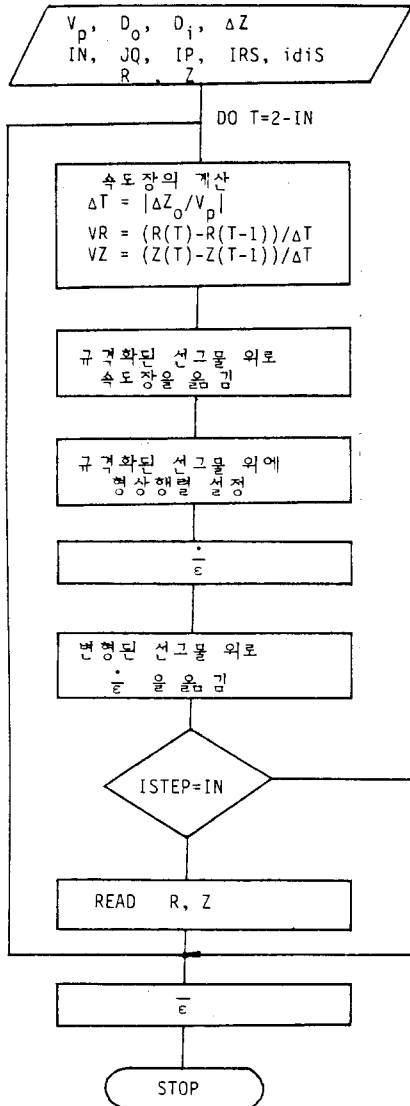
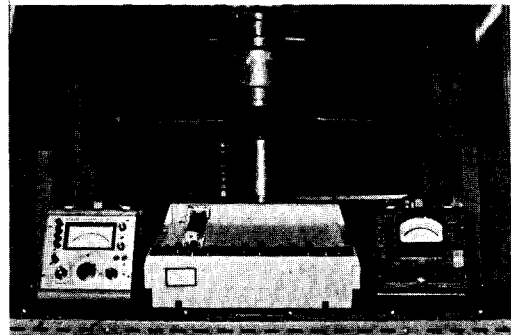


Fig. 5. Flow chart for numerical procedure in the nonsteady-state viscoplasticity method

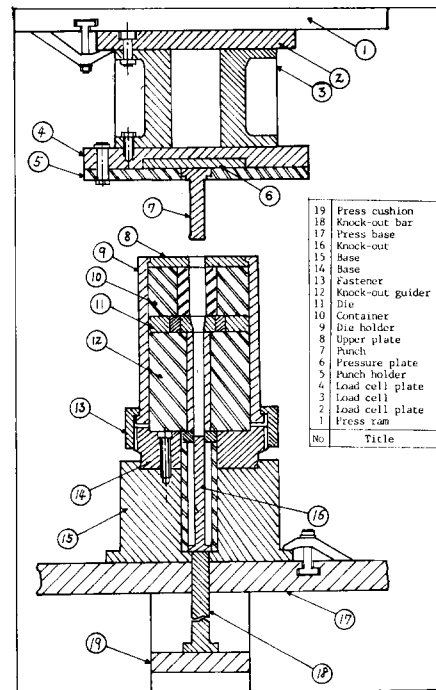
#### 4. 실험

##### 4-1. 전방압출 실험

알루미늄합금 및 합금강소재의 전방압출을 위해 실험장치들을 설계 제작하였는데 Fig.6(a)와 Fig.6(b)에 장치사진과 조립도를 보였다.



(a)



(b)

Fig. 6. Experimental setup for forward extrusion

펀치의 재질은 SKD11로 하고 금형내측의 재질은 SKD11, 금형외측의 재질은 SCM4로 하여 열박을 하였다. 재료의 절감 및 보강을 위해 단면감소율 40%인 금형에서는 단중열박을, 단면감소율 60%에서는 이중열박을 하였다. 또한 콘테이너는 소재가 충분히 정상상태에 도달하도록 길이 80mm로 설계하였다. 시편은 프레스의 유압구선을 이용하여 분리시켰다.

시편의 소재로서는 SM15C 및 Al-2024의 봉재를 선택하여 풀림열처리하여 알루미늄, 강을 각각  $\phi 24.5\text{mm} \times 60\text{mm}$ 로 가공하였으며 정상상태에 빨리 도달하도록 시편 끝부분에  $30^\circ$ 경사를 주었다. 이렇게 제작된 시편을 종축을 포함하는 면에서 정확히 2등분하여 그면상에 종축에 평행하고 수직하는 정사각형 형상의 선그물(1×1mm)을 긋는다. 긋는 방법으로 포토에칭방법을 이용하였다.

측정장치로서는 로드셀, 선형변위측정기, 변형도 증폭기 2대, X-Y레코더를 사용하여 하중과 변위를 동시에 측정하면서 충분히 정상상태에 도달할 때까지 실험하였다.

단면감소율은 40%, 60%를 선택하였고, 직선 및 곡선금형에서 실험하였으며 프레스는 400톤 프레스를 사용하였다. 윤활제로는 칼슘그리스에 MoS<sub>2</sub>를 중량비 10%를 섞은 것을 사용하였다. 실험에 의해 소성변형된 시편상의 선그물은 확대장치(optical projector)를 이용하여 10배로 확대하여 측정했다.

#### 4-2. 후방압출

알루미늄합금소재의 냉간후방압출을 위한 실험 장치의 전체 사진과 조립도가 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 각각 나와 있다.

펀치는  $\phi 15\text{mm}$ 인 것을 선택하였으며, 펀치의 재질은 SKD11이며 열처리된 것이다. 콘테이너의 직경은  $\phi 25\text{mm}$ 로 하고 금형의 재질은 내측에는 SKD11, 금형외측에는 SCM4를 택하여 열처리하여 열박을 하였다. 시편의 분리는 knockout bar를 이용하였으며 프레스는 150톤 프레스를 이용하였다.

시편은 Al-2024 봉재를 선택하여 풀림열처리를 하였다. 그다음에 이 봉재를  $\phi 24.8\text{mm} \times 30\text{mm}$ 로

가공하였으며 대칭축을 포함하는 면상에서 기계가공에 의해 정확히 반쪽시편을 가공하였다. 이 반쪽시편에서 대칭축을 포함하는 면상에 포토에칭에 의해 전방압출과 동일한 선그물을 긋는다.

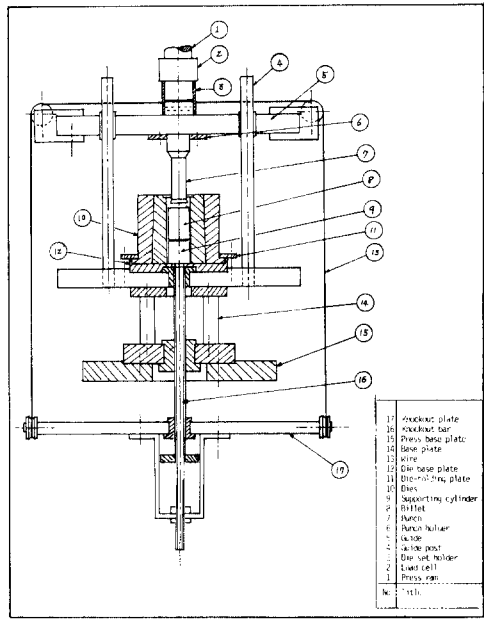
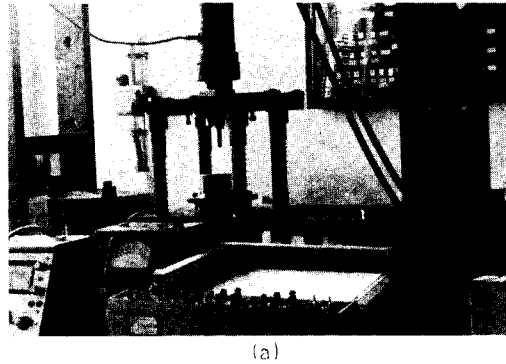


Fig. 7. Experimental setup for backward extrusion

후방압출은 전방압출과는 다르게 비정상상태이므로 펀치행정을 약간씩 주면서 여러단계로 나누어서 실험해야 한다. 이 실험에서는 펀치행정을

약 1 mm씩, 11 개의 시편을 이용하여 11 단계까지 늘렸는데 11 단계에서 하중-시간 관계그래프를 고찰하면 하중이 정상상태에 도달했음을 알 수 있다 (Fig. 8). 전방압출에서 설명된 측정장치를 이용하여 변위-하중-시간 관계그래프를 그렸으며, 이 그래프를 이용하여 각 단계들을 조정할 수 있었으며, 편치속도를 구할 수 있었다.

윤활제는 전방압출과 동일하며, 측정방법도 동일하게 하였다.

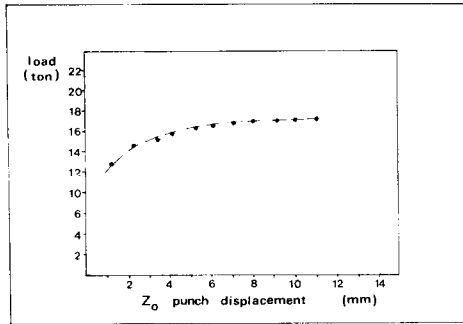


Fig. 8. Load vs. displacement diagram for backward extrusion (11 time steps)

### 5. 결과 및 토론

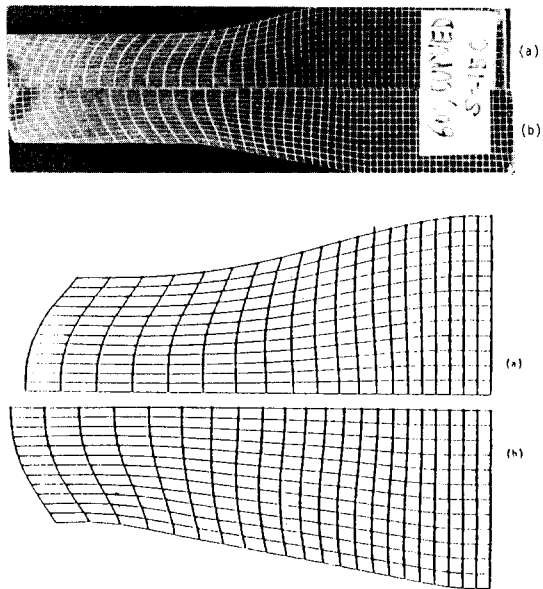
#### 5-1. 축대칭 전방압출 (정상상태)

축대칭 전방압출 실험장치를 이용하여 Al-2024 및 SM15C를 소재로 단면 감소율 40%, 60%에서 곡선 및 직선금형에서 실험한 것을 토대로 계산한 결과를 고찰해보자.

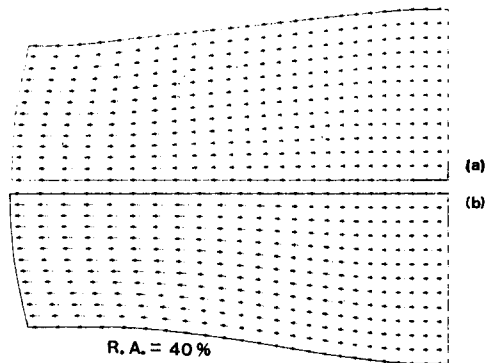
변형된 선그물을 측정하여 구한 측정값은 측정시 발생하는 측정오차가 존재하므로 측정값을 Smoothing 하였다. 이렇게 Smoothing 된 값을 캘컴플로터 (Calcomp plotter)를 이용하여 선그물을 그렸는데 이 그림에서 알 수 있듯이 측정값을 Smoothing 하여 그린 선그물과 시편상의 변형된 선그물은 거의 일치함을 알 수 있다 (Fig. 9).

측정값을 토대로 구한 시편 각 요소의 속도분포를 그림으로 나타냈는데 이 그림으로부터 소재가 전방압출에 의해 변형될때 소재 각 요소의 흐름을 관찰할 수 있다 (Fig. 10).

Fig. 11에 나타나 있는 유효변형도율분포를 살펴보면, 곡선금형이 직선금형보다 변형도율의 분포가 변형영역 전반에 걸쳐 균일하게 분포함을 알 수 있고 직선금형에서는 변형영역의 끝부분에서 변형이 많이 되며 곡선금형에서는 변형영역의 중간부분에서 변형이 많이 야기됨을 알 수 있다. Al-2024와 SM15C의 경우를 비교해 보면 변형



(a) Curved die (b) Conical die  
Fig. 9. Grid patterns (SM15C, 60% R. A.)



R. A. = 40%



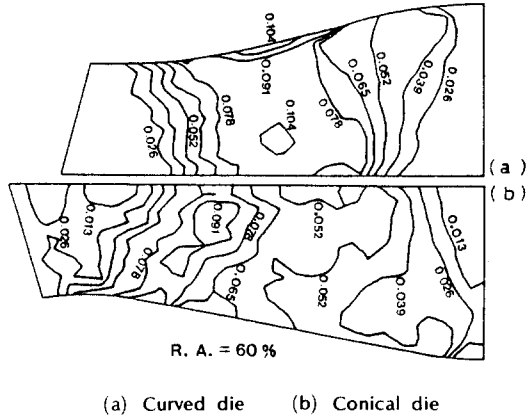
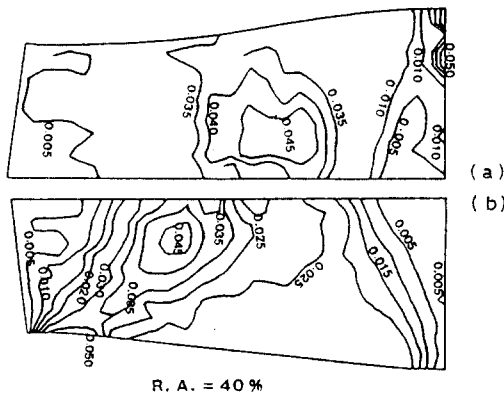
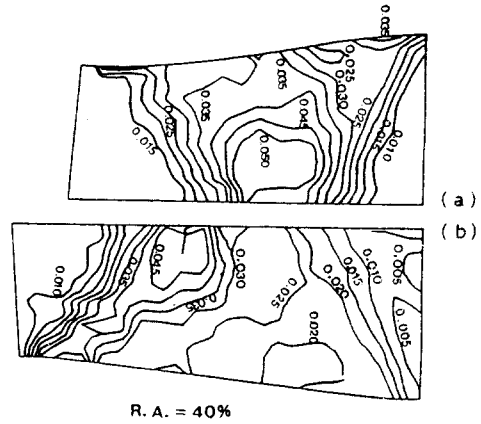
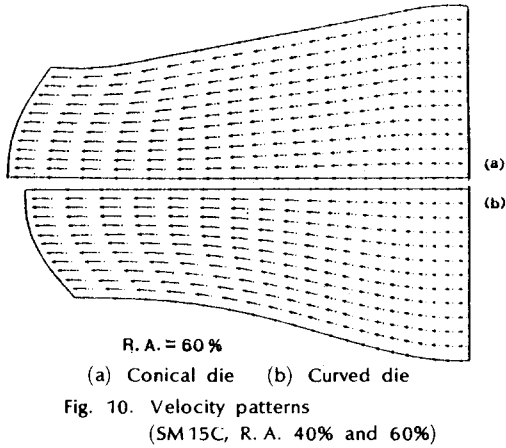


Fig. 11. (ii) Distribution of effective strain rate  
 (Al 2024)

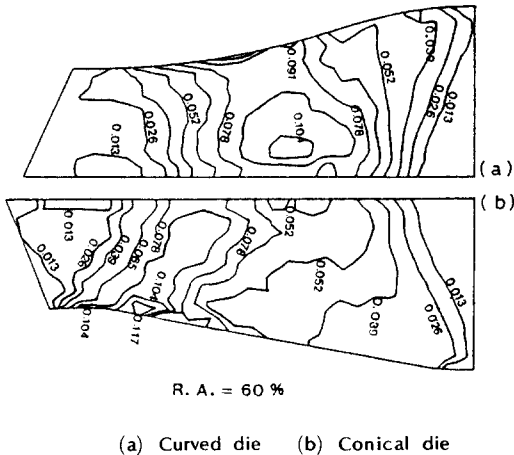
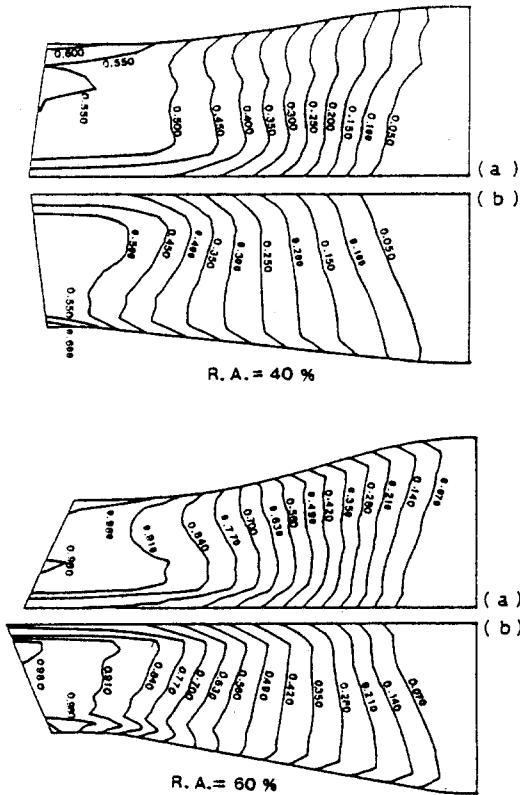


Fig. 11. (i) Distribution of effective strain rate (SM15C)

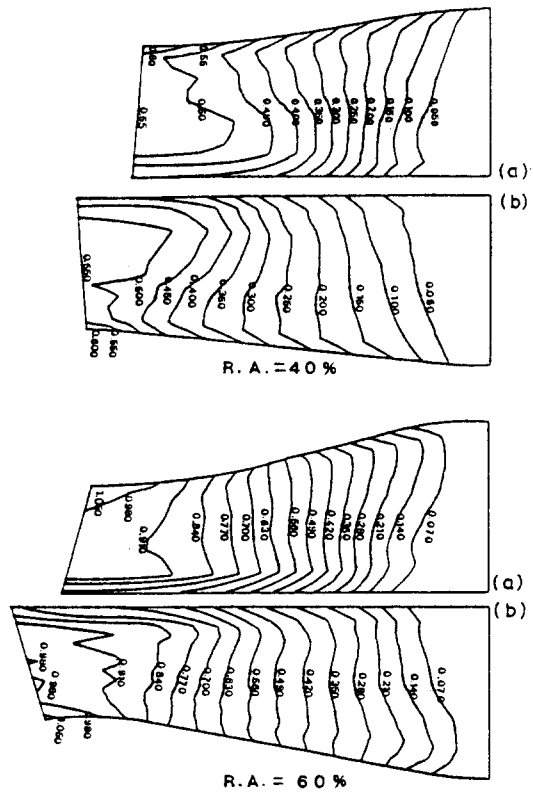
도출분포에 있어 곡선금형에서는 상당히 다르나 직선금형에서는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 12에 나타나 있는 유효변형도분포를 살펴보면, 곡선금형이 직선금형보다 변형도분포가 균일함을 알 수 있으며 또한 단면감소율이 클수록 단면에서의 유효변형도분포가 가장자리부근에 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 특성은 실제공정에 이용될 수 있는데, 즉 인장, 압축력을 받는 소재는 단면이 고르게 가공경화되는 것이 좋고, 굽힘과 비틀림을 받는 소재는 가장자리부에서 크게 가공경화되는 것이 좋기 때문이다.



(a) Curved die (b) Conical die

Fig. 12. (i) Distribution of effective strain(SM15C)



(a) Curved die (b) Conical die

Fig. 12. (ii) Distribution of effective strain(Al 2024)

Al-2024 소재에 있어 변형가시화법에 의해 구한 변형도분포와 유한요소법에 의해 구한 변형도분포<sup>(8)</sup> ( Fig. 13 )를 비교해 보면 가장자리 부분에서는 차이가 있으나 전반적으로는 유사함을 알 수 있다.

변형가시화법을 이용하여 구한 유효변형도분포에서 변형영역의 가장자리 부근에서 변형도분포의 형상이 꺾어진 형상으로 나타났는데 이것은 수치계산을 위해 설정하는 형상행렬에 의한 영향과 압출실험시 반쪽시편을 이용하여 실험할 경우 시편 가장자리 부분의 영향(즉, Edge Effect)이 크게 작용함을 알 수 있다.

### 5-2. 축대칭 후방압출 (비정상상태)

Al-2024를 소재로 11 단계로 나누어 11개의 시편으로 실험하여 각 단계의 시편을 측정하여 측정값을 토대로 속도장, 변형도분포를 구했는데 그중 4 단계, 8 단계, 11 단계만을 고찰해 본다.

Fig.14에서 나타나 있는 속도장분포를 보면 변형이 진행됨에 따라 소재 각 요소들의 흐름을 관찰할 수 있다. Fig.15에서는 유효변형도분포를 나타냈는데 이 분포를 살펴보면 변형이 편치와 소재가 밀려 나가는 부분에서 집중적으로 일어남을 알 수 있다. 또한, 뒤로 빠져나간 소재의 단면에서의 유효변형도분포를 살펴보면 안쪽에서 큰 유효변형도가 발생했음을 관찰할 수 있다. 따

라서, 후방압출로 가공된 튜브형 소재는 안쪽에서 더욱 가공경화가 많이 됨을 알 수 있다.

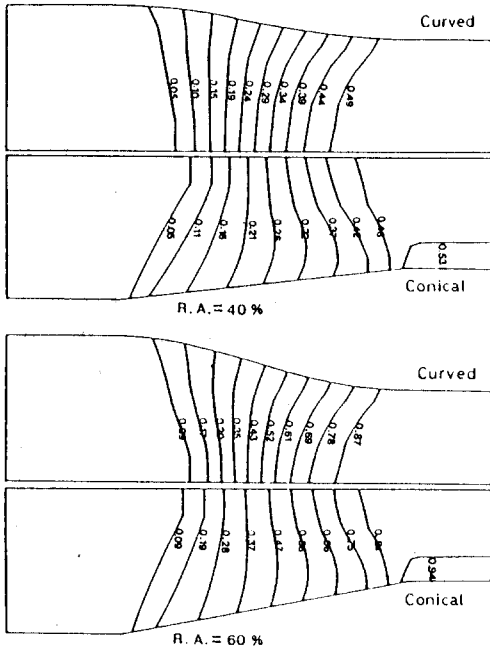


Fig. 13. Theoretical distribution of effective strain obtained by FEM (Al 2024)

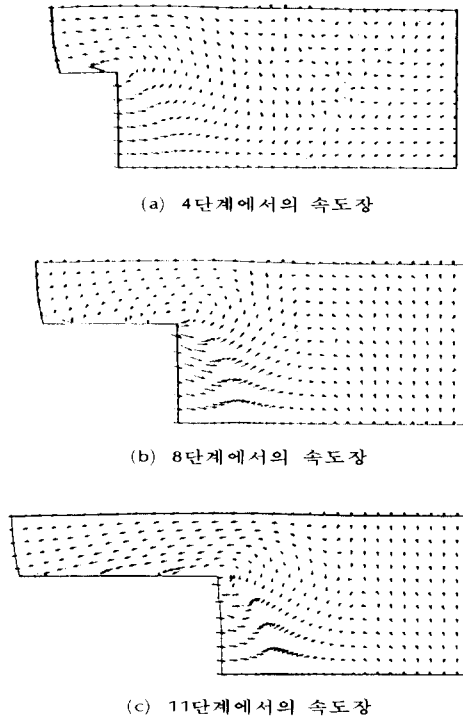


Fig. 14. (i) Velocity patterns in backward extrusion (Al 2024) determined by viscoplasticity

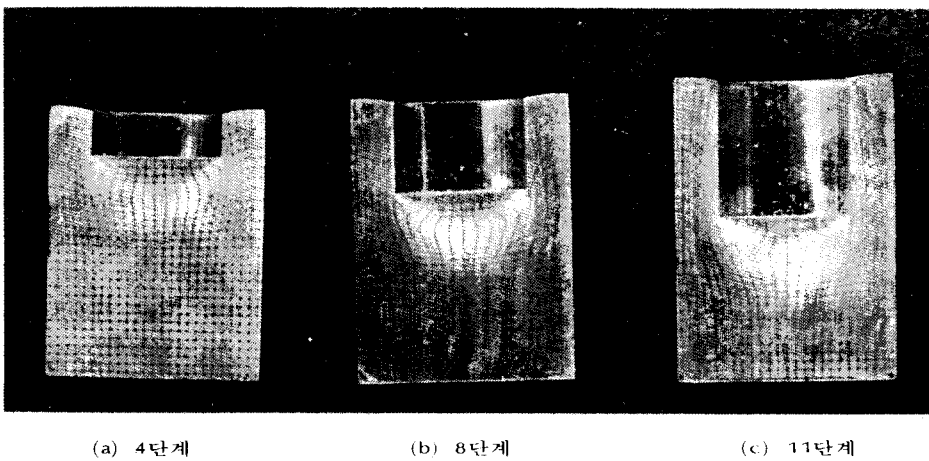


Fig. 14. (ii) Experimental grid patterns in backward extrusion (Al 2024) determined by photoetching

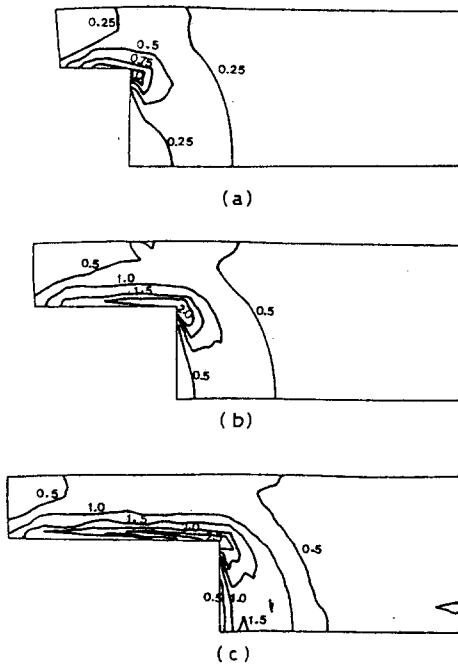


Fig. 15. Distribution of effective strain in backward extrusion (Al 2024)

### 6. 결 론

변형가시화법을 이용하여 정상상태와 비정상상태를 해석하였으며 여기서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정시 발생하는 측정오차를 수정하기 위해 도입한 Smoothing 방법으로 5-point 최소자승법이 효과적이었다.

2. 전방압출에서 공정변수의 영향을 변형가시화법을 사용하여 고찰하였다. 축대칭전방압출에서 곡선금형에서의 변형도율분포가 직선금형에서의 변형도율분포보다 변형영역에서 균일함을 알 수 있다. 변형가시화법에 의한 계산치들을 유한요소법과 비교한 결과 반쪽시편의 가장자리 부분에서 측정오차가 심한 것으로 나타났으나 대체로 변형가시화법에 의한 변형도분포도 유용한 정보를 제공해 줌을 확인할 수 있었다.

3. 비정상상태의 소성가공공정인 후방압출에 제시된 변형가시화법을 적용하여 비교적 유용한 변형도분포를 얻었다.

### 7. 참 고 문 헌

1. A. Shabaik, S. Kobayashi, and E. G. Thomsen, "Application of Potential Flow Theory to Plane-strain Extrusion", J. of Eng. for Industry, 1967.
2. A. Shabaik, C. H. Lee, S. Kobayashi, "Application of the Viscoplasticity Method to Extrusion through a Conical Die", Proceedings of the Seventh International Machine Tool Design and Research Conference, pp. 633-646, 1966.
3. A. Shabaik, S. Kobayashi, "Computer Application to the Viscoplasticity Method", J. of Eng. for Industry, 1967.
4. H. Wilhelm, "Untersuchungen über den Zusammenhang Zwischen Vickershärte und Vergleichsformänderung bei Kaltumformvorgängen", Inst. für Umformtechnik, Univ. Stuttgart, 1969.
5. P. Boissoneau, J. Oudin, and Y. Ravalard, "Optional use of Viscoplasticity Analysis", Proc. of Twenty First Inter. Mach. Tool Design and Res. Conf. Vol. I. pp. 7-12, 1981.
6. F. B. Hildebrand, "Introduction to Numerical Analysis", 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1974.
7. V. F. Bredendick, "Zur Ermittlung Von Deformationen an Verzerrten Gittern", Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 16, 1967.
8. Byung-Soo Oh, "Finite Element Analysis of Axisymmetric Forward Extrusion", M. S. Thesis, KAIST, 1984.