

# 펀치 노우즈의 곡률반경이 표면확장에 미치는 영향

민경호<sup>1</sup> · 비스라<sup>1</sup> · 황병복<sup>2</sup> · 장동환<sup>#</sup>

## Influence of Punch Nose Radius on the Surface Expansion

K. H. Min, V. R. Jayasekara, B. B. Hwang, D. H. Jang

(Received July 9, 2007)

### Abstract

This paper is related to an analysis on the surface expansion in backward can extrusion process using spherical punches. It is generally known that the backward can extrusion process usually experiences severe normal pressure and heavy surface expansion. This is a reason why the backward can extrusion process is one of most difficult operations among many forging processes. Different punch nose radii have been applied to the simulation to investigate the effect of punch nose radius on the surface expansion, which is a major effort in this study. AA 2024 aluminum alloy is selected as a model material for investigation. Different frictional conditions have also been selected as a process parameter. The pressure applied on the punch has been also investigated since heavy surface expansion as well as high normal pressure on the tool usually leads to severe tribological conditions along the interface between material and tool. The simulation results are summarized in terms of surface expansion at different reduction in height, deformation patterns including strain distributions and maximum pressure exerted on the workpiece and punch, the effect of punch nose radius and the frictional condition on the surface expansion and the location and magnitude of maximum pressure exerted, respectively.

**Key Words** : AA 2024 Aluminum Alloys, Surface Expansion, Hemispherical Punch, Punch Nose Radii

### 1. 서론

제조생산분야에서 냉간단조의 활용은 재료의 절약, 생산성의 증가, 강도 개선 및 완성제품의 치수 정밀도 향상에 따른 장점 때문에 안정적으로 증가하고 있다. 또한 냉간단조 과정은 대개 단 공정으로 이루어 지지 않으며 공정의 결합이나 연속적 적용을 통하여 복잡한 최종형상을 갖는 제품을 생산할 수 있다. 특히 후방 캔 압출은 펀치에 작용하는 일상적인 높은 압력 및 펀치랜드(punch land)와 캔의 내벽(inner can wall) 사이의 접촉에 있어서 심각한 마찰상태를 초래할 수 있는 공정 중의 하나이다. 최근 들어 높은 단면감소율

의 후방 캔 압출공정에서 국부적 표면확장과 윤활막의 두께에 대한 연구가 시작되었다[1]. 표면확장과 관련하여 Danno 등[2]은 단면감소율이 큰 경우에 캔의 내부 벽면의 표면확장과 윤활막 두께에 대한 연구를 통해 상관관계를 규명하였다. Mizuno 등 [3~4]은 비교적 높은 단면감소율을 발생하는 공정에서 펀치 노우즈 직경(punch nose diameter), 노우즈 각(nose angle)과 같은 기하학적인 펀치 형상이 국부적인 표면확장에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구를 수행하였다.

일반적으로 후방압출에 의한 캔 성형은 공구와 소재사이의 높은 접촉압력과 소재표면의 극심한 확장이 발생한다. 이러한 표면확장은 소재와 공구

1. 인하대학교 대학원

2. 인하대학교 기계공학과

# 교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과

E-mail: dhjang@inhac.ac.kr

의 보호 목적으로 사용되는 윤활막에 영향을 주어 윤활제의 막두께를 얇게 함으로서 성형불량을 유발하는 주된 원인이 된다[1].

본 논문에서는 반구형(hemispherical) 형태의 편치를 적용하여 후방압출에 대한 캔의 성형공정에 대해 적합한 윤활조건을 제공하기 위한 목적으로 표면확장과 성형조건에 대한 상관관계를 수치해석 하였다. 강소성 유한요소법[5]을 기반으로 상용 프로그램인 Deform 2-D™[6]를 사용하였으며 크게 두 가지 성형조건에 초점을 두고 수행하였다. 첫 번째는 반구형 편치의 형상적 특징이 소재의 표면확장과 접촉압력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 편치면의 곡률반경을 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. 두 번째는 소성가공 공정에서 가장 중요한 공정 변수의 하나인 윤활상태의 영향을 알아보기 위하여 두 가지의 마찰 조건을 수치해석에 적용하여 이들 변수가 표면확장 등에 미치는 영향을 알아 보았다.

## 2. 공정변수 및 해석조건

### 2.1 표면확장의 정의

본 논문에서 표면확장(surface expansion)은 영역의 경계 절점에서 각각 계산된다. Fig. 1 은 변형 전후의 이러한 표면적의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 (i) 번째 절점(node)의 표면확장( $SE_{Ai}$ )은 절점을 포함하는 인접한 경계요소(boundary element)의 변형 전후 표면적의 변화를 측정하여 두 요소의 표면확장의 평균( $SE_i$ )을 (i)번째 절점의 표면확장으로 정의한다. 대부분의 압출공정이 축대칭 형상의 재료를 대상으로 하기 때문에 본 논문에서도 일반적인 축대칭 형상의 표면확장에 대하여 서술하였다. (i) 번째 절점의 표면확장을 계산하기 위한 과정은 다음식과 같다.

$$SE_{Ai} = \frac{A'_i - A_i}{A_i} \quad (1)$$

$$A_i = (x_i + x_{i-1})\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (2)$$

$$A'_i = (x'_i + x'_{i-1})\sqrt{(x'_i - x'_{i-1})^2 + (y'_i - y'_{i-1})^2} \quad (3)$$

$$SE_i = \frac{1}{2}(SE_{Ai} + SE_{Ai+1}) \quad (4)$$

여기에서  $A_i$ 와  $A'_i$ 는 각각 변형전후의 요소의 표면적을 나타낸다

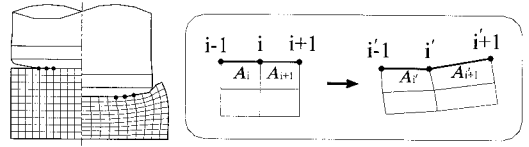


Fig. 1 Surface area before and after deformation

### 2.2 해석조건

Fig. 2 는 본 논문에서 적용된 편치에 대한 형상과 설계변수들을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 적용된 편치 형상은 일반적으로 무한대의 곡률반경을 가지는 평면 형태의 편치노우즈 대신 반구형 형태의 편치노우즈를 채택하였다. 그 이외에 후방 여유각(relief angle) 등 편치의 기타 제원은 ICFG(International Cold Forging Group)[8]에서 원활한 압출공정을 수행하기 위하여 제시한 형상으로 결정하였다.

Table 1 에 수치해석에 적용된 모든 공정변수들이 정리되었다. 표에 나타난 바와 같이 초기 빌렛의 높이와 직경은 각각 20mm 와 28mm 이고, 편치의 직경은 모든 경우에 20mm 로 동일하게 적용하였다. 또한 후방 여유각은 모든 수치해석에 대해 5°로 일정하게 적용하였으며 단면감소율은 51%이다.

마찰조건이 표면확장에 미치는 영향을 알아보기 위하여 두 가지의 마찰인자(friction factor)조건

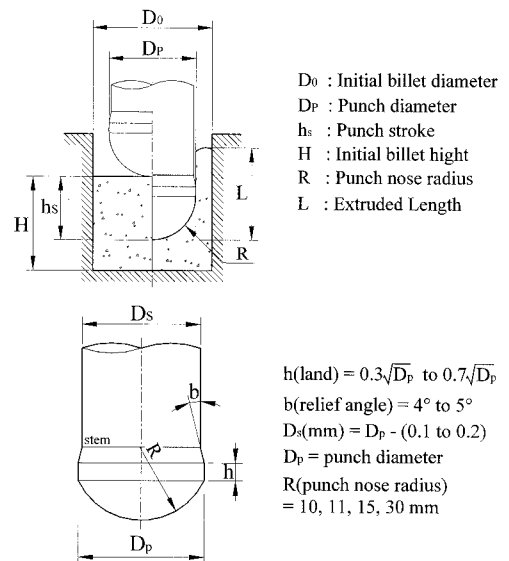


Fig. 2 Die and punch geometry used in analysis

**Table 1 Parameters used in simulation**

Parameters	Values
Initial billet height (H)	20mm
Billet diameter (D <sub>0</sub> )	28mm
Punch diameter (D <sub>p</sub> )	20mm
Punch stroke (h <sub>st</sub> )	15mm
Land length (h)	2.24mm
Radius of curvature (R)	10, 11, 15, 30mm
Friction factor (m)	0.1, 0.2
Reduction in area	51%

을 설정하여 수치해석에 적용하였다. 공정이 완성되는 시점에서의 펀치의 행정거리는 압출공정이 완전히 정상상태에 도달할 때의 행정거리로 설정하여 모든 경우에 12mm 로 동일하게 적용되었다. 본 논문에서 초점을 맞춘 분석 내용은 여러 가지 반구형 펀치노우즈 면의 곡률반경이 표면확장에 미치는 영향을 정량적으로 알아보고자 하였다. 수치해석에는 가공경화 특성이 비교적 약한 AA 2024 알루미늄합금이 모델재료로 사용되었으며 강소성 유한요소법에 의한 유동응력과 유효변형율의 관계는 Power Law 에 따라 다음식과 같다[7].

$$\bar{\sigma} = 386.55\bar{\epsilon}^{0.154} \text{ (MPa) for AA2024} \quad (5)$$

### 3. 해석결과 및 분석

#### 3.1 펀치노우즈 곡률반경의 영향

Fig. 3(a)~(d)는 다양한 펀치노우즈 곡률반경에 대해 수치해석 결과를 각각의 행정거리 단계별로 변형형태, 최대 접촉압력의 크기 및 작용위치를 현재(current configuration) 및 초기 좌표계(original configuration)로 구분하여 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 성형공정에 대해 전체 행정거리를 4 등분하여 행정거리가 3mm 진행할 때마다 수치해석 결과를 표현했다. 각 그림의 마지막단계는 압출공정 중 펀치와 접촉된 초기상태에서의 빌렛 표면의 위치와 변형 후 이에 대응되는 위치를 각각 나타낸 것이다. 변형율은 각 공정별로 0.5 증가할 때 마다 등간격으로 분포선을 표현하였다. 전체적인 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 반구형 펀치를 사용한 후방압출 공정 중 최대 접촉압력이 발생하는 위치는 항상 펀치코너 부근인 것으로 나타났다. 또한 초기 빌렛의 표면을 기

준으로 보았을 때 대부분 최대 압력이 작용하는 위치가 공정 초기에는, 즉 정상상태의 압출공정으로 전환되는 시점까지는, 중심축에서 반경방향으로 멀어지다가 정상상태의 압출이 시작되면서 다시 축 중심 방향으로 이동하는 경향을 나타낸다.

Fig. 3(a)에서 곡률반경이 10mm 일 때 최대 접촉압력의 크기는 대략적으로 비정상상태의 압출에서 더 큰 것을 알 수 있으나, 정상상태 압출이 시작되는 시점(행정거리 9mm)에서 약간 커지는 경향을 나타냈다. 그러나 정상상태 압출이 충분히 진행되면서 최대접촉압력은 비정상상태에서 보다 현저히 작은 경향을 보인다. 압출이 진행되면서 변형율의 크기는 펀치노우즈면을 따라 고르게 증가 하였다.

Fig. 3(b)에서 곡률반경이 11mm 일 때 최대 접촉압력의 위치가 반경방향에서 축방향으로 전환되는 경향이 곡률반경이 10mm 일 때(Fig. 3(a))와 비교하여 상대적으로 약화된 것을 볼 수 있다. 최대 접촉압력의 크기는 정상상태 압출 초기(행정거리 9mm)일 때 가장 크게 나타났다. 전체적으로 볼 때 곡률반경이 10mm 일 때와 비교하면 정상상태 압출에서의 최대 접촉압력이 현저히 큰 것을 제외하고는 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 압출이 진행되면서 변형율의 크기는 펀치면을 따라 비교적 고르게 증가하는 것을 볼 수 있으나, 펀치면의 곡률반경이 10mm 일 때와 비교하면 펀치의 중심부에서의 변형이 약간 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 점은 최대 표면확장의 위치가 중심축에서 반경방향으로 조금 더 멀어진다는 것을 의미한다.

Fig. 3(c)에서 곡률반경이 15mm 일 때 펀치코너 부근에서 최대접촉압력이 발생하는 경향은 펀치면의 곡률반경이 작을 때(Fig. 3(a), (b))와 동일하다. 그러나 앞에서의 경우와는 다르게 최대압력이 작용하는 위치는 성형초기에 축 중심에서 상대적으로 가장 먼 거리에 있다가 공정이 진행됨에 따라 점차적으로 축 중심쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 공정이 진행되면서 최대압력의 크기가 변화하는 경향은 공정초기에 증가하다가 정상상태 압출이 시작되면서 급격하게 감소하고 이후에는 일정한 크기를 유지한다. 변형율의 분포는 공정이 진행되면서 펀치코너 부분과 벽면을 따라 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 펀치면의 곡률반경이 작은 경우(Fig. 3(a), (b))와는 명확하게 차별화된 형태이다. 따라서 이러한 변형율 분포로

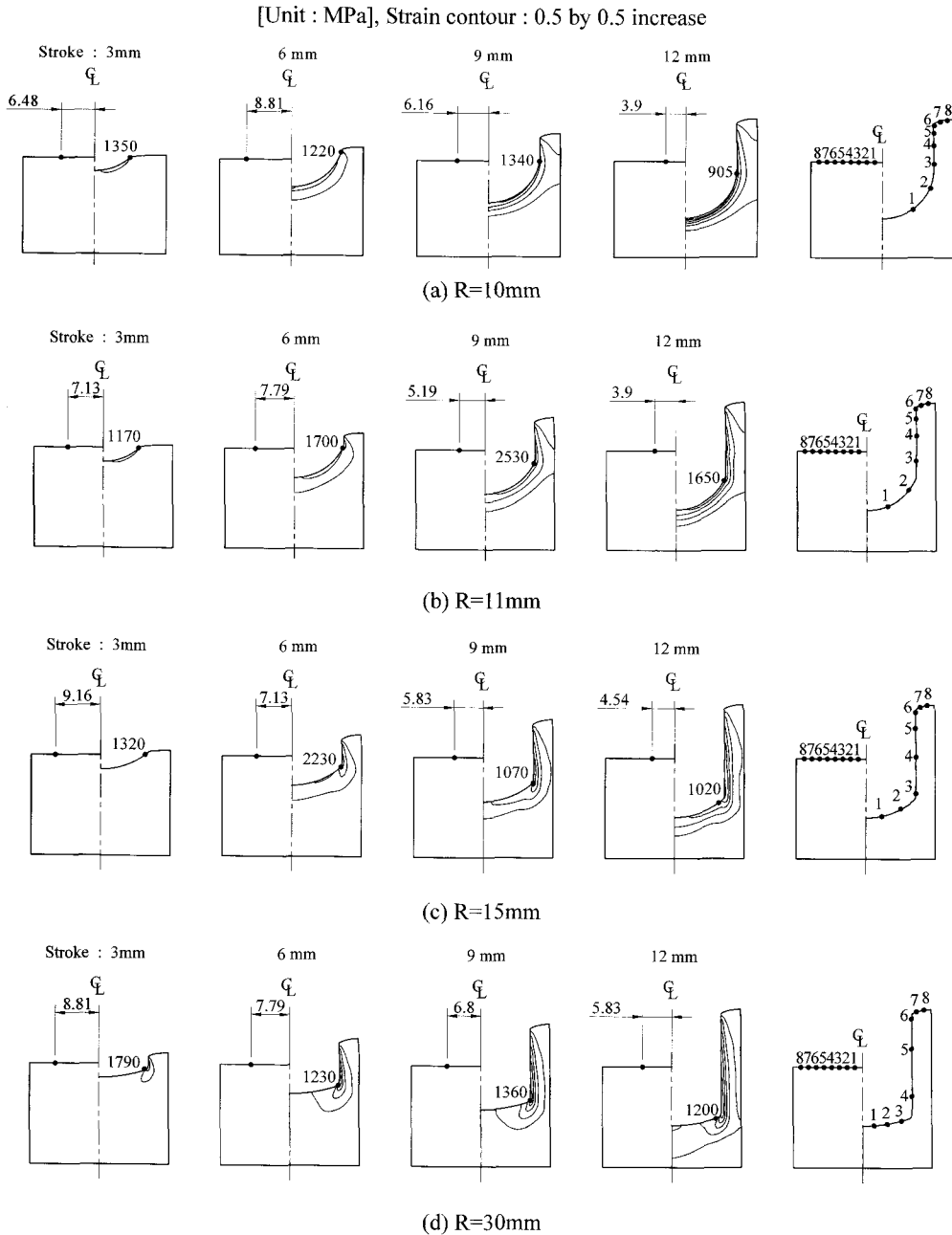


Fig. 3 Deformation patterns for various radius of curvature at different reductions in height ( $m=0.1$ )

부터 표면확장이 축 중심으로부터 상당히 떨어진 위치에서 많이 발생하고 있다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 3(d)에서 곡률반경이 30mm 일 때 최대접촉압력의 위치는 펀치면의 곡률반경이 15mm(Fig. 3(c))

일 때와 거의 유사한 경향을 보인다. 그러나 최대 접촉압력의 크기는 공정 초기에 가장 크고 공정이 진행되어 정상상태가 시작할 때까지 급격하게 감소한다. 공정이 진행되면서 정상상태 압출에서는 최대 접촉압력의 크기가 거의 일정한 수치값을 나타낸다.

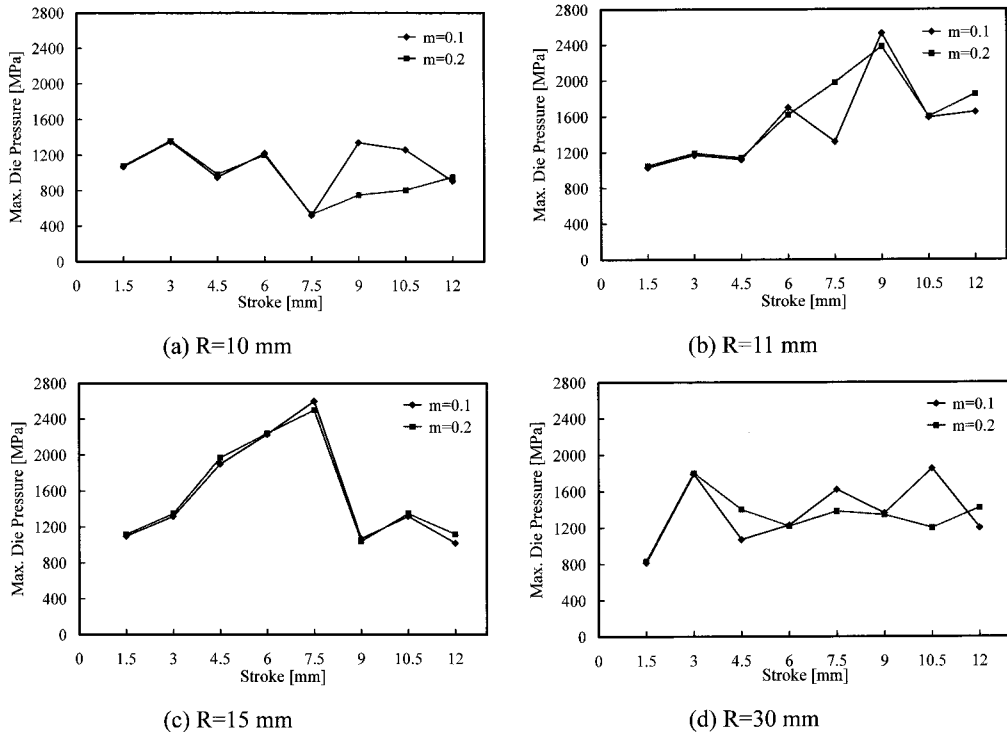


Fig. 4 Magnitude of maximum pressure for frictional condition and radius of curvature

### 3.2 마찰조건의 영향

Fig. 4(a)~(d)는 펀치노우즈 곡률반경에 대해 각각의 마찰 조건에 따라 압출이 진행되는 동안에 최대접촉압력의 크기의 변화를 나타낸 그래프이다. 본 논문에서는 해석을 위하여 마찰인자(friction factor)를 적용하였으며 두 가지 값에 대해 상대적인 결과를 비교하였다.

Fig. 4(a)에서 최대접촉압력의 크기는 대체로 비슷한 수치를 보이지만 펀치의 행정거리가 9mm 일 때 마찰인자 값이 0.1 인 경우 최대접촉압력의 크기가 더 크게 나타났다. 그러나 전체적으로 최대접촉압력의 크기는 마찰 상태에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

Fig. 4(b)에서 최대접촉압력의 크기는 펀치면의 곡률반경이 10mm(Fig. 4(a))일 때와 비교하여 상당히 큰 수치값을 보여주며, 행정거리가 9mm 일 때 최대접촉압력의 크기가 가장 크게 나타났다. 행정거리가 7.5mm 일 때 마찰인자 값이 0.2 인 경우 최대접촉압력의 크기가 0.1 인 경우보다 더 크게 나타났으나 전체적으로 앞에서와 동일하게 최대접촉압력의 크기가 마찰 상태에 큰 영향을 받지

않는 것으로 보인다.

Fig. 4(c)에서 최대접촉압력은 펀치면의 곡률반경이 11mm(Fig. 4(b))일 때와는 다르게 행정거리가 7.5mm 일 때 최대접촉압력의 크기가 가장 크게 나타났으며, 이후 급격히 감소되어 거의 일정한 수치를 유지한다. 두 가지 마찰인자에 대해 최대접촉압력의 크기나 경향이 거의 동일하여 전체적으로 마찰의 영향이 가장 작은 경우로 나타났다.

Fig. 4(d)에서 최대접촉압력의 크기는 공정의 초기에 가장 크고 이후 정상상태가 시작할 때까지 급속히 감소하는 경향을 보였다. 정상상태 압출에서는 최대접촉압력의 크기가 거의 일정한 수치를 보여주며 앞에서와 유사하게 마찰에 의하여 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

### 3.3 표면확장

Fig. 5(a)~(d)는 펀치노우즈의 곡률반경과 마찰조건에 따라 각각의 행정거리 단계별 표면확장을 나타낸 그림이다. 그래프상에 나타나 있는 모든 표시는 초기 빌렛의 위치를 기준으로 도시하였다. 전체적으로 공정변수와 무관하게 비정상상태의

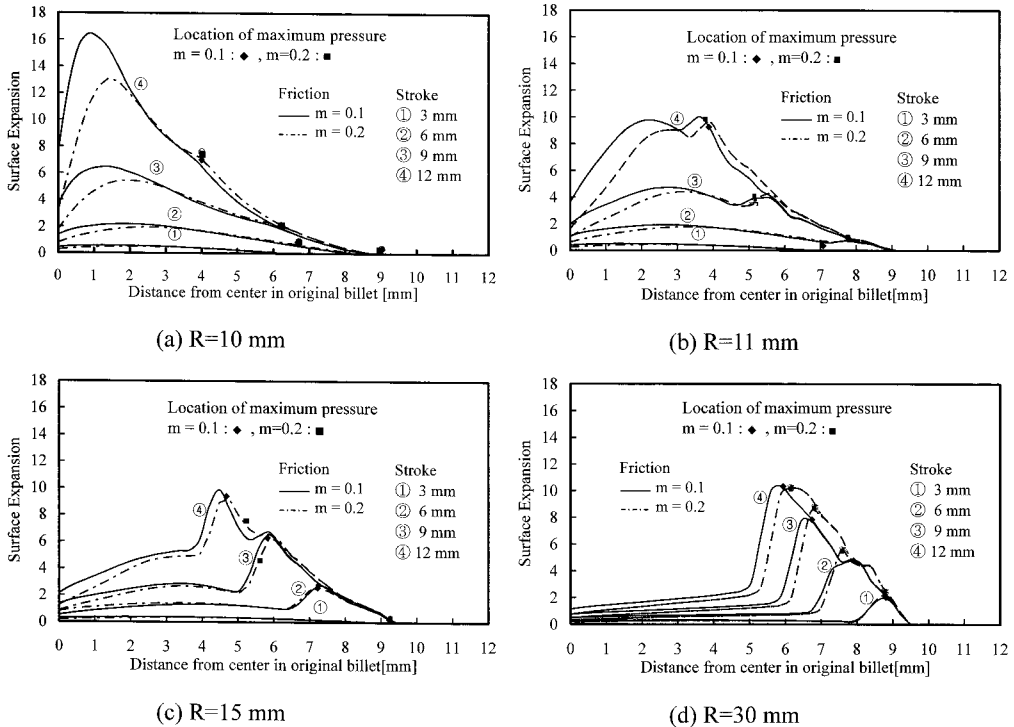


Fig. 5 Surface expansion for frictional condition and radius of curvature

압출과 마찰값이 큰 경우에 빌렛의 표면확장이 작게 나타났다. 최대표면확장은 곡률반경이 10mm 일 때이며 곡률반경이 증가할 수록 축 중심에서 멀리 떨어진 곳에 위치하는 경향을 보인다.

Fig. 5(a)에서 공정초기인 비정상상태에서는 표면확장이 크지 않으나, 정상상태(행정거리 9mm)의 압출이 진행되면서 국부적으로 표면확장이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 최대 표면확장을 나타내는 위치 또한 압출이 진행되면서 점차 축 중심 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 마찰조건에 대해서는 상대적으로 마찰인자 값이 클 때 ( $m=0.2$ ) 최대 표면확장은 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 펀치면과 소재 사이의 마찰력이 증가함으로써 반경방향으로 유동하는 것이 상대적으로 더 크게 억제 되기 때문이다. 또한 정상상태에서 최대 접촉압력이 발생하는 위치는 최대 표면확장이 일어나는 위치 보다 항상 축 중심에서 상대적으로 반경방향으로 멀리 떨어진 곳에 위치한다. 일반적으로 국부적인 표면확장의 한계가 10 에서 20 정도임을 감안하면 공정이 완료되는 시점(행정거리 12mm)에서 최대 표면확장은

공구 및 소재의 파손을 발생할 가능성이 있는 위험한 수치로 볼 수 있다. 그러나, 최대 표면확장 위치와 최대 접촉압력의 위치가 서로 많이 떨어져 있기 때문에 매우 극심한 조건은 아닌 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)에서 비정상상태의 압출에서 빌렛의 표면확장이 크지 않은 점과 정상상태 시점에서 증가하는 경향은 곡률반경이 10mm(Fig. 5(a))일 때와 동일하다. 최대 표면확장의 크기는 곡률반경이 10mm 일 때와 비교하여 약 40% 이상 감소한 것으로 나타났다. 따라서 공구의 형상이 표면확장에 커다란 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그림에서 정상상태에서 표면확장의 분포가 특이한 점은 최대 표면확장을 나타내는 부분이 두 곳으로 쌍극점(twin extreme point)의 형태를 보이고 두 극점의 표면확장 값이 서로 거의 동일하다는 것이다. 정상상태에서 최대 접촉압력이 발생하는 위치는 최대 표면확장이 일어나는 지점 보다 항상 축 중심에서 더 멀리 위치 하지만 최대 표면확장과 최대 접촉압력의 지점이 곡률반경이 10mm 일 때와 비교하여 더 근접하게 위치하는 것을 알 수 있다.

[Unit : MPa], Strain contour : 0.5 by 0.5 increase

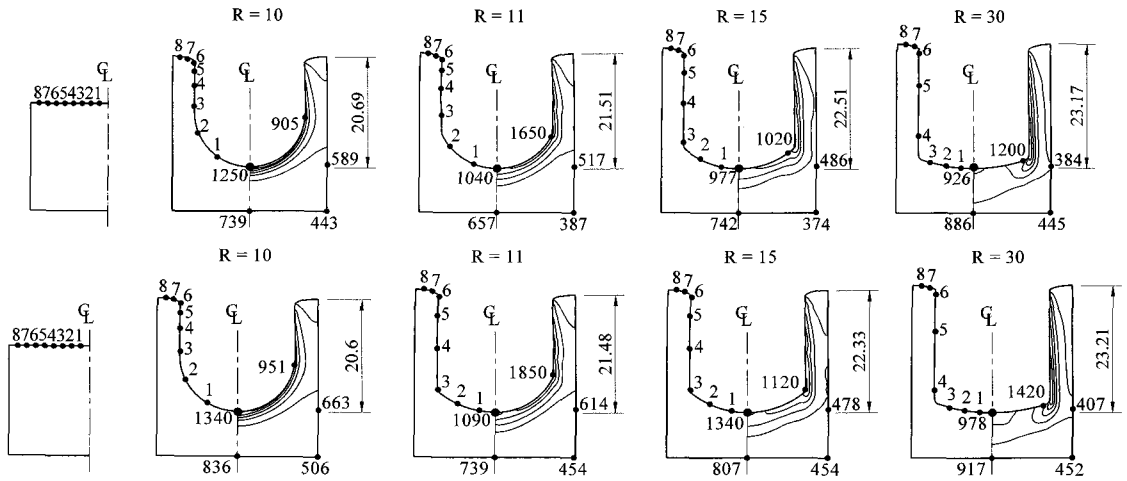


Fig. 6 Deformation patterns for various punch face radius at the punch stroke of  $m=0.1$ (top) and  $m=0.2$ (bottom)

Fig. 5(c)에서 곡률반경이 15mm 일 때 압출이 진행되면서 국부적인 최대표면확장은 행정거리와 거의 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그림으로부터 앞에서와 다르게 최대표면확장과 최대 접촉압력의 위치가 거의 일치하는 점이 보인다. 또한 정상상태에서 표면확장은 축 중심에서 반경 방향으로 완만하게 상승하다가 펀치코너 부근에서 변곡점이 형성되면서 급격히 상승하여 최대값이 나타났다.

Fig. 5(d)에서 각각의 공정 단계별로 최대표면확장의 크기는 앞에서의 경우와 유사하지만, 표면확장이 더욱 극심하게 국부적으로 발생하는 것이 나타났다. 최대표면확장의 크기는 곡률반경이 11, 15mm(Fig. 5(b), (c))일 때와 거의 비슷한 수치를 나타낸다. 그림에서 정상상태에서 표면확장은 축 중심에서 반경 방향으로 거의 변화가 없이 매우 완만하게 상승하다가 펀치코너 부근에서 변곡점이 형성되면서 급격히 상승하여 최대값이 나타났다.

### 3.4 공정변수 비교

본 논문에서는 펀치노우즈의 곡률반경과 마찰값과 같은 공정변수에 대해 상대적인 비교를 위하여 압출공정이 완료된 상태인 행정거리 12mm에서 수치해석결과를 Fig. 6에 다시 정리하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최대접촉압력의 크기는 마찰인자 값이 클수록 약간 커진다. 각각의 펀치면 곡률반경에 따른 압출길이는 마찰상태와는 상

관없이 거의 동일한 수치를 보여준다. 앞에서 언급했듯이 공정변수와 무관하게 최대접촉압력은 항상 펀치코너 부근에서 발생되며, 곡률반경이 11mm 일 때 가장 큰 것으로 예측되어 곡률반경이 10mm 일 때 보다 약 2배정도가 증가된 1650MPa ( $m=0.1$ )와 1850MPa( $m=0.2$ )를 나타났다. 펀치면의 곡률 반경이 15mm 에서 최대접촉압력의 크기는 급격하게 작아지며 30mm 일 때와 거의 동일한 수치를 보여준다. 변형율의 분포는 펀치면의 곡률이 작을 때는 펀치면을 따라 고르게 변형이 발생하지만 곡률반경이 커지면서 변형이 주로 펀치의 벽면을 따라 발생하는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 반구형 펀치를 이용한 후방압출 공정에 대해 강소성 유한요소법을 적용하여 수치 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 펀치면의 곡률 반경과 마찰조건이 윤활조건에 영향을 주는 최대 표면확장의 크기, 발생위치 및 표면확장의 분포에 미치는 영향을 분석하였으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 펀치노우즈 곡률반경의 크기에 상관없이 압출공정이 진행되면서 최대접촉압력이 발생하는 위치는 펀치코너 부근이며 정상상태에서 점차 축 중심방향으로 이동하는 경향을 나타냈다.
- (2) 전반적으로 모든 곡률반경에 대하여 마찰조건은 최대접촉압력의 크기에 거의 영향을 주지

않았다.

(3) 표면확장은 마찰값이 큰 경우에 작게 나타났으며 이러한 이유는 펀치와 소재의 마찰로 인하여 반경방향으로 원활한 유동이 억제된 것으로 판단된다.

(4) 급격한 최대표면확장이 증가하는 위치에서 최대접촉압력이 동시에 발생하는 경우는 윤활막의 파괴로 인하여 성형불량이 발생할 수 있다.

(5) 전반적으로 펀치노우즈의 곡률반경은 최대 표면확장의 크기 보다 발생하는 위치에 상대적으로 더 큰 영향을 준다.

### 참 고 문 헌

- [1] American Society for Metals, 1975, Source book on cold forming (ASM, U.S.A.), p. 266.
- [2] A. Danno, K. Abe, F. Nonoyama, 1983, Evaluation of lubricating performance of Zinc Phosphate coatings by cold piercing, J. Jap. Soc. Tech. of Plasticity, Vol. 24, No. 265, pp. 213~220.
- [3] T. Mizuno, Y. Kojima, K. Kitamura. W. Zhu, 1984, Metal flow and frictional condition in cold backward extrusion of cup-Deformation and lubrication in cold cup extrusion I, J. Jap. Soc. Tech. of Plasticity Vol. 25, No. 285, p. 929~935.
- [4] T. Mizuno, W. Zhu Y. Kojima, K. Sugimoto, 1987, Effects of punch profile on deformation behavior in backward extrusion of mild steel cup-Deformation and lubrication in cold cup extrusion III, J. Jap. Soc. Tech. of Plasticity Vol 28. pp. 1060~1066.
- [5] B. D. Ko, H. J. Choi, D. H. Jang, B. B. Hwang, 2003, Material flow and surface expansion in radial-backward extrusion, KSTP, Vol. 12, No. 3, pp. 251~258.
- [6] SFTC, 2004, DEFROM-2D Ver. 8.0 Users Manual (Scientific Forming Technologies Corporation Inc., U.S.A.).
- [7] ICFG, 1983, General recommendations for design, manufacture and operational aspects of cold extrusion tools for steel components (ICFG Doc. No 6/82, Portcullis Press.).
- [8] Air Force Material Laboratory, 1973, Forming Equipment, Materials, and Practices, Metal and Ceramics Information Center, p. 164.