

후방압출에서 펀치형상에 따른 접촉경계면의 표면부하상태

노정훈¹ · 김민태¹ · 비스아라¹ · 황병복[#]

Surface Stress Profiles at the Contact Boundary in Backward Extrusion Processes for Various Punch Shapes

J. H. Noh, M. T. Kim, R. J. Vishara, B. B. Hwang

(Received October 12, 2009 / Revised October 22, 2009 / Accepted October 23, 2009)

Abstract

This paper is concerned with the analysis on the surface stress profiles of perfectly plastic material in backward extrusion process. Due to heavy surface expansion appeared usually in the backward extrusion process, the tribological conditions along the interface between the material and the punch land are very severe. In the present study, the analyses have focused to reveal the surface conditions at the contact boundary for various punch shapes in terms of surface expansion, contact pressure, and relative movement between punch and workpiece which consists of sliding velocity and distance, respectively. Punch geometries adopted in the analysis include concave, hemispherical, pointed and ICFG recommended shapes. Extensive simulation has been conducted by applying the rigid-plastic finite element method to the backward extrusion process under different punch geometries. The simulation results are summarized in terms of surface expansion, contact pressure, sliding velocity and sliding distance at different reduction in height, deformation patterns, and load-stroke relationship, respectively.

Key Words : Stress Profile, Perfectly Plastic Material, Surface Expansion, Contact Pressure, ICFG Recommended Punch

1. 서론

후방압출에 의한 성형공정에서는 캔의 내부 벽면을 따라 매우 큰 표면확장(surface expansion)이 발생하면서 펀치면(punch face)과 소재가 접한 부분의 윤활 상태가 극도로 열악해지기 때문에 여러 가지 냉간 단조공정 중에서도 가장 어려운 것으로 알려져 있다. 매우 높은 접촉압력(contact pressure)과 더불어 표면확장에 의한 열악한 윤활상태로 인하여 종종 윤활막(lubricant film)이 파괴되면서 소재가 금형 또는 펀치에 용착되어 가공물의 표면에 손상을 준다. 비교적 낮은 단면감소율을 갖는 캔 압출공정에서도 국부적으로 매우

높은 표면확장이 발생되기 때문에 공작물이 손상을 입는 경우가 종종 있다[1].

냉간 압출은 공정 중에 발생하는 두 가지의 매우 가혹한 성형조건으로 인하여 냉간 단조공정 중에서도 가장 어려운 것으로 알려져 왔다. 첫 번째 어려운 점은 공구와 소재 사이의 접촉 압력이 매우 높다는 점이고, 두 번째 문제는 소재의 특정 부분 표면에서의 극심한 변형으로 인하여 국부적으로 재료 표면의 면적이 초기 상태와 비교하여 10 배 또는 20 배 이상으로 늘어난다는 점이다. 이렇게 소재의 표면이 증가하게 되면 소재와 공구 사이의 윤활막도 거의 같은 비율로 넓어 지면서 또한 얇아지게 되는 것이다. 윤활막이 어느 정도

1. 인하대학교 대학원 기계공학과
교신저자 : 인하대학교 기계공학과
E-mail: bbhwang@inha.ac.kr

이상으로 얇아지게 되면 소재와 공구 사이의 분리막 역할을 함으로서 공작물 및 공구를 보호할 목적으로 사용되는 윤활제의 막 두께가 너무 얇아져 분리 보호막의 역할을 할 수가 없다. 만약 냉간 단조공정 중 소재의 표면 특정 부분에서 접촉압력과 표면확장이 매우 크면, 공작물 및 공구를 보호하기 위하여 소재와 공구 사이의 분리 성능과 용착방지 특성이 매우 좋은 윤활제를 선택해서 사용해야 할 것이다. 윤활막이 파열되었을 시 예측되는 손해는 단순히 어느 한 제품에 긁힘 자국(scratch)이 발생하는 정도가 아니라 금형이 손상되면서 생산공정 전체가 멈추는 결과를 초래한다[2].

ICFG(International Cold Forging Group)에서는 캔 압출 공정을 성공적으로 수행하기 위하여 금형설계에 대한 여러 가지 지침을 만들어 권장하고 있다[3]. 하지만, 이러한 금형설계에 대한 지침들은 낮은 단면 감소율을 갖는 캔의 후방압출공정에는 성공적으로 적용될 수 없다. 왜냐하면 낮은 단면 감소율의 캔 후방압출공정에서는 표면확장에 의한 것으로 의심되는 윤활막 파열에 의하여 공작물이 손상되는 경우가 종종 있기 때문이다[4].

본 논문에서 해석은 주로 펀치의 형상적 특징이 소재의 표면확장과 접촉압력 등 표면변형특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 여러 가지 다양한 펀치형상을 모의실험에 적용하였다. ICFG(International Cold Forging Group)에서 압출공정에 적용이 적당하다고 추천한 펀치형상[3], 반구형 펀치, 뾰족한 펀치 및 오목펀치 등 네 가지의 펀치형상을 모의실험에 적용하여 각각의 형상적 특징을 갖는 펀치가 압출공정에서 소재 및 펀치에 미치는 표면부하상태(surface stress profile)를 분석하였다. 펀치의 형상적 다양성에 의한 분석을 주목적으로 하기 때문에 소재는 가공 경화 특성이 없는 완전소성재료(perfectly plastic material)를 적용하였으며 단면감소율도 모든 경우에 51%로 동일하게 적용하였다. 마찰조건도 모든 경우에 동일하게 적용하여 펀치형상 외에 다른 모든 가능한 공정변수를 제외하였다.

2. 공정변수 및 해석조건

2.1 공정변수(Process variables)

본 논문에서 네 가지 서로 다른 형상의 펀치를 적용하여 후방압출공정을 모의 실험하였다. 공정

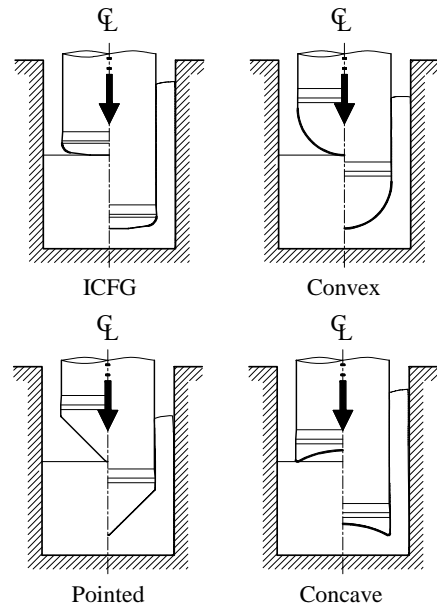


Fig. 1 Schematic configuration of punches used in simulation and deformed workpieces

의 중요한 변수로 펀치의 형상을 다르게 하여 각각의 펀치 형상이 소재의 표면 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 모의실험에는 오목펀치(concave), 볼록 또는 반구형펀치(convex or hemispherical), 뾰족한(pointed or sharp) 펀치와 ICFG 추천펀치[5,6] 등 네 가지 종류의 펀치를 적용하였다. ICFG 추천펀치의 펀치노우즈각(punch nose angle)은 165°, 반구형펀치의 곡률반경은 10.0mm, 뾰족한 펀치의 노우즈각은 90°, 그리고 오목펀치의 펀치면의 곡률반경은 20.0mm 로 하였다. Fig. 1 에 모의실험에 사용된 펀치의 형상과 압출된 소재의 형상이 도식적으로 표현되어 있다.

2.2 해석조건(Process conditions)

모의실험에 적용된 소재는 가공경화특성이 없는 완전강소성(perfectly rigid plastic) 소재를 사용하였다. 해석에 사용된 펀치의 직경은 모두 20.0mm 로 동일하게 적용하였다. 초기 소재의 직경은 28.0mm 이고 높이는 20.0mm 이다. 후방압출공정이 정상상태까지 충분히 도달하도록 펀치의 행정거리는 16.0mm 로 설정하였다. 모의실험의 결과는 주로 펀치와 공작물의 접촉면을 따라 발생하는 표면확장(surface expansion)과 접촉압력(contact pressure), 그리고 펀치와 소재 사이의 상대운동(relative movement)에 관한 것으로 미끄럼속도(sliding velocity) 및 미

Table 1 Parameters used in simulation

Parameters		Values
Materials (perfectly plastic)		Y = 100 MPa
Initial billet diameter (D_0)		28 mm
Initial billet height (H)		20 mm
Punch diameter (D_p)		20 mm
Punch stroke (h_{st})		16 mm
Friction factor (m)		0.15
Punch	ICFG (nose angle)	165°
	Convex (nose curvature)	10 mm
	Pointed (nose angle)	90°
	Concave (nose curvature)	20 mm
Reduction in area		51 %

끄림거리(sliding distance) 등에 대하여 분석하였다. 펀치 형상에 따른 변형 특성을 분석하는데 주안점을 두기 위하여 해석에 적용된 마찰인자는 0.15로 모든 경우에 동일하게 적용하였다. 해석에는 강소성 유한요소법에[7] 기반을 둔 상업적 응용 프로그램인 DEFORM 2-D™[8]를 사용하였다. 소재 및 펀치, 그리고 공정조건에 대한 변수들이 Table 1에 정리되어 있다.

2.3 측정방법 (Method of mesurment)

접촉경계 면의 제반 변형특성을 보다 쉽게 알아 보기 위하여 초기 상태에서 펀치 및 소재 표면에 측정점(locations of measurement)을 설정하였다. 초기 형상(original configuration)에서 설정된 물질점(material points)을 따라 소재가 변형된 후에도 같은 위치에서 여러 가지 변형특성을 나타냄으로써 모의 실험에 의한 해석결과를 보다 명확하게 표현하고자 하였다. Fig. 2에 본 논문에서 사용된 측

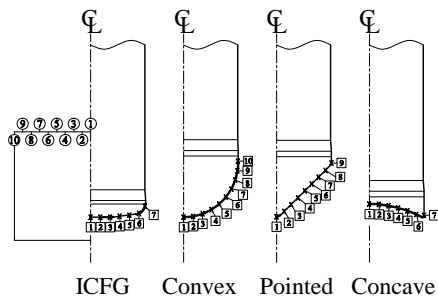


Fig. 2 Location of measurement on the surface of punches and workpiece

정점들이 나타나 있으며, 소재 및 펀치의 표면은 원문자(numbers in circle)와 사각문자(numbers in square)로 각각 구분하였다.

3. 해석 결과

3.1 변형형태 (deformation patterns)

Fig. 3에서는 각기 다른 펀치 형상에 대한 소재의 표면 유동형태를 측정점들의 분포로 나타내었다. ICFG 추천 펀치를 사용한 경우에 넓은 범위의 소재 표면에서 비교적 고르게 표면확장이 발생됨을 알 수 있다. 볼록 펀치와 뾰족한 펀치를 사용한 경우 펀치노우즈와 접촉하고 있는 소재의 표

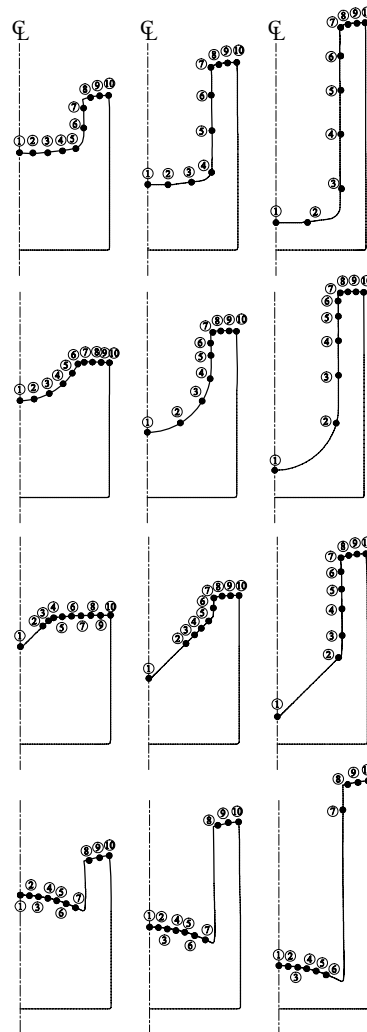


Fig. 3 Effect of punch geometries on surface metal flow

면에 표면확장이 집중됨을 볼 수 있다. 오목 펀치의 경우에는 펀치코너 부근의 소재 표면에 국부적인 표면확장이 발생됨을 알 수 있으며 펀치면과 접한 소재에서는 표면확장이 전혀 발생하지 않는 것을 볼 수 있다.

3.2 표면확장(surface expansion)

Fig. 4 는 각기 다른 펀치 형상에 대한 표면확장(S_E)을 각각의 행정거리 별로 나타낸 것이다. 표면확장은 소성가공공정에서 일정한 두께로 소재 및 금형 표면에 도포된 윤활제의 두께가 어떻게 변화하는지를 알 수 있는 가장 기본적인 자료가 된다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 ICFG 추천 펀치를 사용한 경우에는 표면확장은 공정이 진행되면서 거의 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 공정이 진행됨에 따라 최대 표면확장이 발생하는 위치가 초기 빌렛 기준으로 점차 중심축 방향으로 이동하면서 그 크기도 증가함을 알 수 있다. 변형후의 소재를 기준으로 최대 표면확장은 항상 소재가 펀치코너 부근을 통과하면서 발생된다. 행정거리가 16.0 mm 에서 즉, 예정된 공정이 완료되었을 때 최대 표면확장 값은 약 30 정도로 예측되었다. 반구형 펀치와 뾰족한 펀치를 사용한 공정에서는 표면확장이 소재의 중심부에 집중됨을 알 수 있다. 하지만, 소재 중심부에서의 국부적인 표면확장은 뾰족한 펀치를 사용하였을 시

더욱 심하여 최대표면확장 값이 300 정도로, 이는 반구형 펀치를 사용했을 때보다는 약 3 배이고 ICFG 추천 펀치를 사용할 때보다는 약 10 배 정도의 최대표면확장 값을 보여준다. 오목펀치를 사용한 경우도 국부적인 표면확장의 분포를 보이고 있으나, 표면확장이 발생하는 위치가 펀치코너 부근의 소재표면에 집중됨을 알 수 있으며, 최대표면확장 값이 반구형 펀치를 사용한 경우보다 조금 큰 약 140 정도를 보인다.

Fig. 4 의 표면확장분포를 기반으로 후방압출에서 윤활제의 분포를 Fig. 5 에 정성적으로 나타냈다. ICFG 추천 펀치를 사용한 경우, 비교적 편평한 펀치를 사용하기 때문에 표면에 도포된 윤활제와 소재가 반경방향으로 흐르는 것을 어느 정도 방지해 준다. 따라서 윤활제가 소재 표면 전체에 비교적 고르게 도포됨으로써 소재와 공구 사이에 분리막이 형성되어 용착 등에 의한 결함이 방지될 수 있다. 또한 펀치 행정이 진행되면서 표면확장이 발생하는 위치가 점차 중심축 방향으로 이동하고 소재 표면은 반경방향으로 흐르기 때문에 소재 중심부에 갇힌(trapped) 윤활제가 점차 소재 표면에 자연스럽게 퍼지게 된다. 반구형 및 뾰족한 펀치를 사용하는 경우에는 펀치면에 접한 소재와 윤활제가 빠른 속도로 반경방향으로 이동하게 된다. 또한 소재 중심부의 표면확장이 집중되는 현상으로 인하여 행정거리가 작은 경우에도 윤활제가 분리막을 형성할 정도의 두께를 유지하지 못하게 된다. 다만 뾰족한 펀치의 경우가 반구형 펀치를 사용한 경우보다 이러한 경향이 더 심하다고 볼 수 있다. 오목한 펀치를 사용한 경우에는 펀치면에 접한 소재와 윤활제가 오목한 펀치면 아래 갇혀있음으로써 국부적으로 표면확장이 발생하는 펀치코너 부분으로 윤활제가 충분히 공급되지 않기 때문에 펀치코너 부위가 마손(galling) 될 우려가 있다.

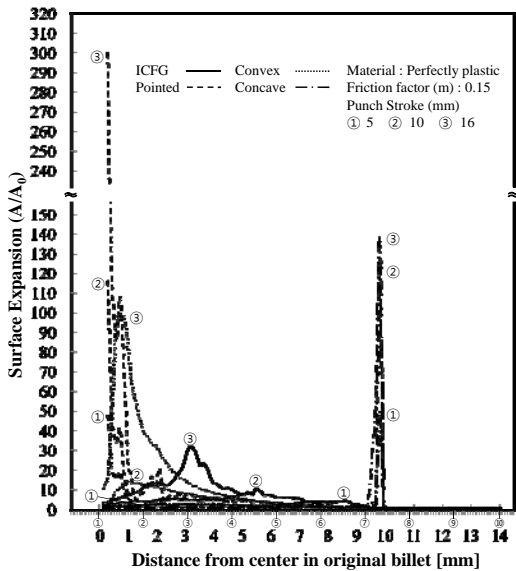


Fig. 4 Effect of punch geometries on surface expansion distributions

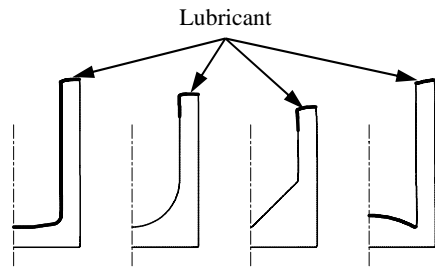


Fig. 5 Effect of punch geometries on lubricant distribution in backward extrusion

3.3 미끄럼속도(sliding velocity)

Fig. 6 은 각각의 펀치형상에 대한 펀치와 소재의 상대속도 즉, 미끄럼속도(S_v)를 나타낸 것이다. 공구와 소재 사이의 상대적인 미끄럼속도는 압력 분포와 함께 유체 윤활제를 사용할 경우 공정이 진행됨에 따른 윤활막의 도포 상태를 예측하는데 사용될 수 있으며, 상대속도가 큰 경우에 연마마모(abrasive wear)의 위험성이 있다. 또한, 표면에서의 속도분포가 완만하지 못하고 급격한 변화를 보이거나 특히, 반경방향으로 진행되면서 속도가 줄어드는 구간이 발생할 경우에는 고착미끄럼(stick-slip) 현상에 의한 표면결함이 발생할 수도 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 반구형 펀치를 사용하였을 경우 펀치 표면을 따라 반경방향으로 미끄럼속도가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, ICFG 추천펀치와 뾰족한 펀치의 경우에는 미끄럼속도가 반경방향으로 완만하게 증가하다가 펀치코너 부근에서 급격히 증가하는 경향을 보이며, 이러한 경향은 뾰족한 펀치일 때 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 오목펀치의 경우에는 펀치와 접촉하고 있는 소재의 대부분이 펀치에 거의 고착된 형태를 나타내며, 펀치코너 부근에서 급격한 상대속도의 증가를 보인다.

3.4 미끄럼거리(sliding distance)

Fig. 7 은 공정이 마무리 되었을 때 즉, 펀치의

행정거리가 16.0mm 에서 공구와 소재 사이의 미끄럼거리(S_p)를 나타낸 것이다. 공구와 소재 사이의 미끄러진 거리는 공구 표면에 작용하는 압력과 더불어 공구의 마모를 예측하는데 중요한 기초자료가 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 모든 공구형상에 대하여 반경방향으로 진행하면서 소재가 공구 표면을 미끄러진 거리가 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서, 미끄러진 거리는 쉽게 예측할 수 있듯이 항상 펀치코너에서 가장 크게 나타나며, 약간의 차이지만 뾰족한 펀치가 가장 크고 오목펀치가 가장 작게 예측되었다.

3.5 접촉압력(contact pressure)

펀치와 소재 사이에 작용하는 접촉압력(P/Y)의 분포는 마모를 예측하거나 과도한 압력, 특히 공구의 코너 부위에서 접촉압력의 분포가 과도한 편차를 보일 때 공구에 작용하는 높은 펀치응력에 의하여 공구가 소성변형을 하거나 피로에 의한 파손의 위험이 있다. Fig. 8 은 각각의 펀치형상에 대하여 정상상태에서의 접촉압력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ICFG 추천펀치의 경우 펀치노우즈 부근에서 반경방향으로 압력의 편차가 거의 없이 분포하다 펀치코너 부근에서 압력이 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 반구형펀치에서는 펀치노우즈에서 최대 압력을 나타내면서 반경방향으로 진행하면서 접촉압력이

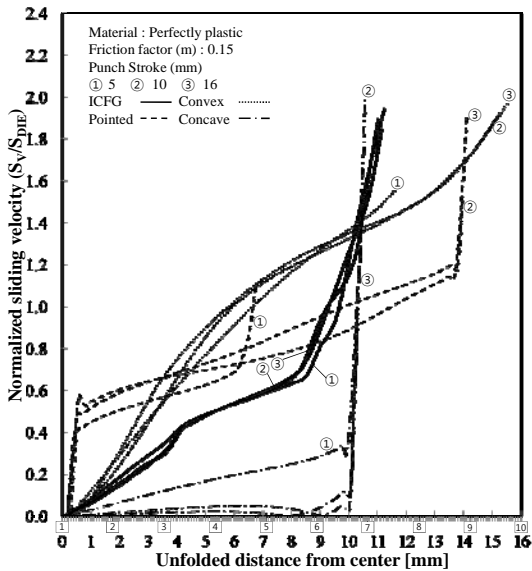


Fig. 6 Effect of punch geometries on normalized sliding velocity

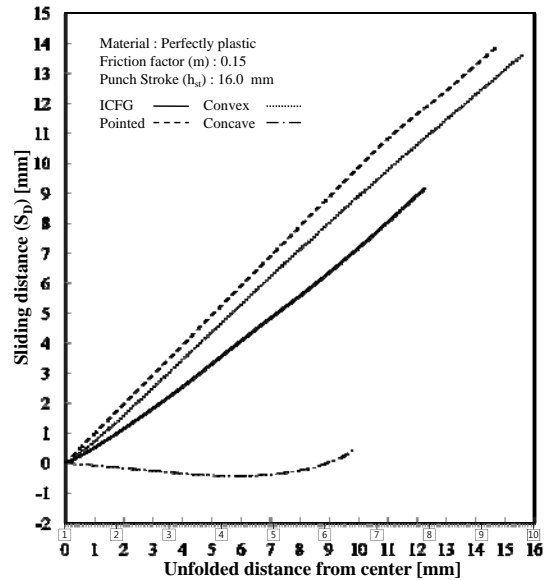


Fig. 7 Effect of punch geometries on sliding distance

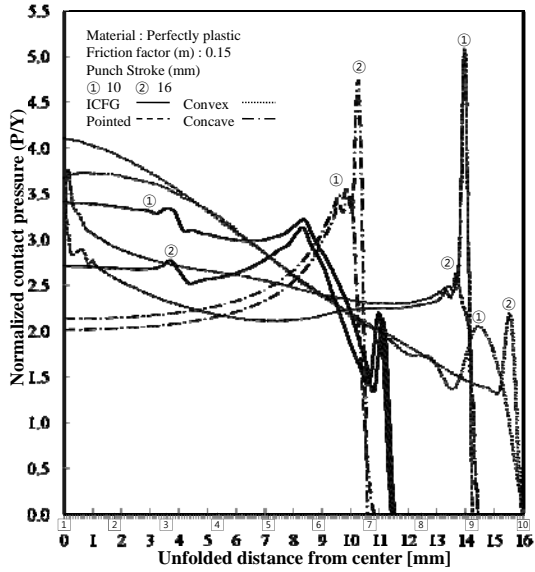


Fig. 8 Effect of punch geometries on normalized contact pressure

점차 낮아지다가 펀치코너 부근에서 압력이 약간 상승한다. 뾰족한 펀치 및 오목펀치의 압력분포는 서로 비슷한 경향을 보이거나 뾰족한 펀치에서는 펀치노우즈에서 펀치코너 방향으로 완만하게 접촉압력이 낮아지다가 펀치코너 부근에서 급격히 압력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 하지만 오목펀치의 경우 펀치노우즈에서 반경방향으로 접촉압력이 점차 상승하다가 펀치코너 부근에서 급격히 압력이 상승한다. 공구에 작용하는 접촉압력은 절대적인 크기도 중요하지만 국부적인 펀치압력에 의해 발생하는 공구의 소성변형 및 파손을 정성적 또는 정량적으로 분석하는 것이 더 중요하다 하겠다.

3.6 공구마모(tool wear)

소성가공에서 공구의 마모를 예측하는 것은 매우 중요하다. 하지만 공구의 마모를 정량적으로 분석하는 것도 중요하지만 정성적인 측면에서 공구의 마모를 예측하는 것도 의미가 있다. 본 연구에서는 일반적으로 잘 알려진 펀치와 소재 사이에 작용하는 접촉압력(P/Y)과 미끄럼거리(S_D)를 사용하여 마모율을 예측하였다. Fig. 9 에 각각의 공구에 대한 점착마모율(adhesive wear-rate)을 행정거리가 16.0 mm 일 때 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 경우의 펀치에서 펀치코너 부근의 마모율이 가장 높은 것을 볼 수 있다. ICFG 추천

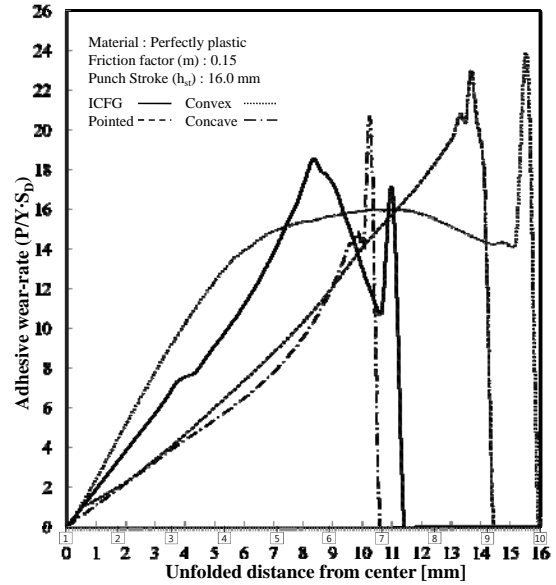


Fig. 9 Expected punch wear distribution for various punch geometries

펀치를 사용할 경우가 가장 마모율이 낮은 것을 볼 수 있으며, 나머지 펀치의 경우 마모율은 서로 비슷하게 예측되었다.

3.7 성형하중(forming load)

Fig. 10 은 각각의 펀치 형상에 따른 하중-변위 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 전형적인 후방압출공정의 하중-변위관계를 보여주고 있으나, ICFG 추천펀치를 사용한 경우에 가장 빨리 정상상태(steady state)에 도달함을 알 수 있다. 뾰족한 펀치의 경우 비정상상태(non-steady state) 구간이 상당히 넓은 것을 볼 수 있다. 성형하중은

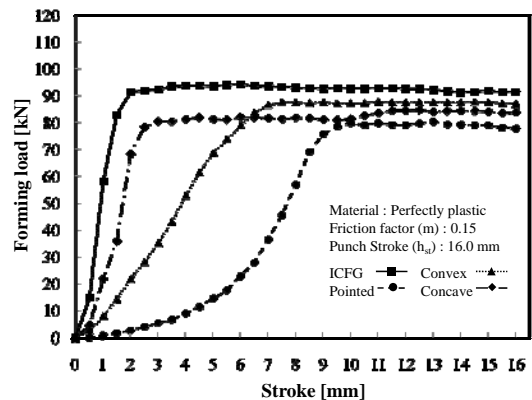


Fig. 10 Load-stroke relationships

Table 2 Surface stress profiles for various punches

Material : Perfectly plastic Friction factor : 0.15				
	Punch			
	ICFG	Convex	Pointed	Concave
S_E	31.80	99.08	299.86	139.07
S_V/V_{DIE}	1.94	1.98	1.91	2.00
S_D	9.16	13.66	13.92	0.49
P/Y	3.45	4.10	5.01	4.64
$(P/Y) \cdot S_D$	18.54	23.54	27.30	22.11

네 가지 경우 모두 대동소이하나 뾰족한 펀치와 오목한 펀치를 사용했을 때 약간 낮은 성형하중이 예측되었다.

4. 결론

본 논문에서는 후방압출에 의한 캔의 성형공정에 대하여 강소성 유한요소법을 적용하여 여러 가지 펀치의 형상이 소재 및 공구의 표면에 미치는 영향을 표면확장 등과 같은 표면부하상태로 분석하였으며 이러한 표면부하상태를 Table 2에 정리하였다. 모의 실험에 의한 분석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 표면확장은 ICFG 추천 펀치를 사용하였을 때가 가장 낮고 뾰족한 펀치를 사용했을 때가 가장 높다. ICFG 추천 펀치 이외에 펀치를 사용했을 경우에는 국부적인 표면확장이 발생하였다.

(2) 미끄럼속도는 오목펀치를 제외하고 모든 경우에 반경방향으로 진행할수록 커지는 경향을 보이며, 오목펀치의 경우 펀치면 아래의 소재와 펀치 사이의 상대운동이 거의 발생하지 않는다.

(3) 미끄러진 거리는 항상 펀치코너에서 가장 크게 나타나, 약간의 차이지만 뾰족한 펀치가 가장 크고 오목펀치가 가장 작게 예측된다.

(4) 최대 접촉압력은 반구형과 ICFG 펀치에서는 펀치의 중앙부에서 발생되고 나머지 펀치에서는 펀치코너 부근에서 최대 접촉압력이 발생한다.

(5) 모든 경우의 펀치에서 펀치코너 부근의 마모율이 가장 높으며, ICFG 추천 펀치를 사용할 경우가 가장 마모율이 낮고 나머지 펀치의 경우 마모율은 서로 비슷하게 예측되었다.

(6) ICFG 추천펀치를 사용한 경우에 가장 빨리 정상상태에 도달하고 뾰족한 펀치의 경우 비정상

상태 구간이 상당히 넓게 나타났으며, 성형하중은 네 가지 경우 모두 대동소이하나 뾰족한 펀치와 오목한 펀치를 사용했을 때 약간 낮은 성형하중이 예측되었다.

후 기

본 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] B. Bennani, N. Bay, 1996, Limits of Lubrication in Backward Can Extrusion : Analysis by the Finite-element Method and Physical Modeling Experiments, J. Mater. Process. Technol., Vol. 61, No. 3, pp. 275~286.
- [2] American Society for Metals, 1975, ASM Engineering Bookshelf: Source Book on Cold Forming, The Periodical Publication Department ASM, Ohio, USA, p. 266.
- [3] International Cold Forging Group, 1983, General Recommendations for Design, Manufacture and Operational Aspects of Cold Extrusion Tools for Steel Components, ICFG Doc. No. 6/82, Portcullis Press, UK.
- [4] N. Bay, S. Lassen, K. B. Pedersen, V. Maegaard, T. Wanheim, 1991, Lubrication Limits in Backward Can Extrusion of Low Reductions, CIRP Annals Manuf. Technol., Vol. 40, No. 1, pp. 239~242.
- [5] J. H. Ok, B. B. Hwang, 2006, An Analysis on the Surface Expansion of Aluminum Alloys in Backward Can Extrusion Process, Mater. Sci. Forum, Vol. 519-521, pp. 931~936.
- [6] K. H. Min, V. R. Jayasekara, B. B. Hwang, D. H. Jang, 2007, Influence of Punch Nose Radius on the Surface Expansion, Trans. Mater. Process, Vol. 16, No. 8, pp. 582~589.
- [7] C. H. Lee, S. Kobayashi, 1973, New Solutions to Rigid-plastic Deformation Problem Using a Matrix Method, Trans. ASME, J. Eng. Ind. Vol. 95, pp. 865~873.
- [8] SFTC, 2004, DEFORM 2-DTM Ver8.0 User-manuals, Scientific Forming Technologies Corporations Inc., Columbus, USA.