

채널 성형에서 마찰이 탄성복원에 미치는 영향

한영호* · 송윤준**

(2003 년 1 월 7 일 접수)

Effect of Friction on Springback in Channel Forming

Y. H. Hahn and Y. J. Song

Abstract

Maintaining the required dimensional accuracy after springback becomes the main concern of sheet-forming die designers when formability is secured through beforehand tryouts. As a part to build guidelines for springback control in automobile frame forming, experiments are carried out to show the effects of process parameters, such as holding force, blank size, and lubrication, on corner angles of channels formed by U-bending or by square-cup drawing and trimming. The results predicted by a commercial FE package were compared with the experiment and the current limitations on springback evaluation were closely discussed.

Key Words : Springback, Channel forming, U-bending, Drawing, Finite Element Simulation

1. 서 론

근래 프레스 가공 제품의 성형성 판단을 위해 상용 해석 프로그램의 활용이 보편화되는 추세에 있다. 이같은 해석 프로그램의 현장 활용은 트라이아웃에 소요되는 시간을 효과적으로 단축시키는 역할을 해내고 있지만, 초기 트라이아웃에서 주된 관심이 되는 제품의 성형성 판단의 관점에서만 주로 활용되고 있다. 과단이나 주름이 생기지 않도록 제품의 성형성을 확보한 후에는 제품의 품질 측면에서 사용자가 원하는 오차 범위를 만족시킬 수 있도록 탄성복원을 억제하기 위한 금형의 수정이 이루어지

게 되는데, 이 단계에서는 해석이 제대로 활용되지 못하고 있으며, 아직은 현장 기술자의 노하우를 통해 많은 시간과 시행착오를 거치면서 해결되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 숙련된 기술자라 하더라도 경험적 차이가 있는 만큼 성형 공정과 제품의 특성에 따라 반드시 최선일 수는 없는 다양한 수정 방법이 적용되고 있다. 그러므로 효과적으로 금형의 수정 방향을 관리하고, 나아가서는 탄성복원 문제에 대해서도 성형 해석의 결과를 활용하기 위해서 여러 가지 제품 특성에 따른 탄성복원의 경향을 밝힐 필요가 있다. 프레스 박판 가공의 다양한 제품이 일관된 경향을 나타내는 것은 아니지만, 탄성복원에 대한 기본적인 경향을 알아보는 것은 데이터 확보의 차원에서 중요한 일이 될 것이다.

* 건국대학교 기계항공공학부

** 건국대학교 대학원

자동차용 박판 성형품 중에서 형상은 비교적 단순하지만 탄성복원 때문에 금형 제작에 많은 어려움을 겪는 제품으로 프레임류를 들 수 있다.

이들 제품은 성형 후에 길이방향의 비틀림과 단면내의 탄성복원이 복합적으로 나타나므로 품질 기준에 맞는 형상으로 제어하기가 까다롭다. 프레임류와 같은 채널 형상에서 성형성이 확보된 이후에 가장 문제가 되는 것은 상대 제품과의 조립면인 플렌지의 정확도이다. 펀치 어깨를 감싼 초기 굽힘부와 다이 모서리를 두른 최종 굽힘부의 탄성복원의 정도가 최종적으로 플렌지면의 정밀도를 향상시키는 관건이 된다.

채널 형상 프레임에서 단면의 탄성복원과 전체적인 비틀림은 여러 가지 성형 변수들에 의해서 영향을 받는다. 특히 굽힘부에서 생기는 탄성복원의 경향은 형상개선을 위한 금형 수정작업의 방향을 결정하는데 큰 영향을 미친다. 따라서 작업자가 원하는 방향으로 제품의 형상을 바로잡을 수 있도록 금형 수정의 방향을 제시해 줄 수 있다면 작업의 효율을 크게 높일 수 있을 것이다.

앞선 연구에서 김성환 등은 차체 성형에 사용되는 판재의 종류에 따른 스프링백의 경향을 살펴보고⁽²⁾, J.M. Lanzon 등은 윤활제, 금형면 조도, 블랭크 홀딩력 등의 상호 작용이 소재 마찰에 미치는 영향을 실험을 통해 비교하였다.⁽³⁾

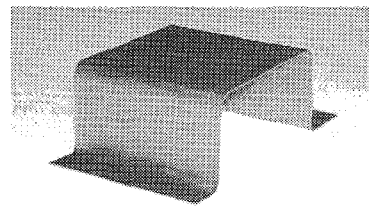
이 연구에서는 프레임류 성형시 끝이 닫힌 성형과 열린 성형에서 홀딩력과 블랭크 크기, 그리고 마찰이 탄성복원에 미치는 영향을 밝히고자 한다. 즉 금형의 다이쪽만 윤활한 경우와 다이/펀치 양쪽 모두 윤활하는 경우에 대하여 U-벤딩의 방식으로 채널을 성형하였을 때와, 사각용기로 드로잉한 후 끝을 트리밍하여 채널로 성형하였을 때 발생하는 단면의 탄성복원의 경향을 먼저 실험을 통해 살펴 보았다. 또한 상용 유한요소해석 패키지인 PAM-STAMP 를 사용하여 제품의 탄성복원을 예측하고 실험 결과와 비교하면서 해석결과의 활용에 어떤 제약이 남아있는지를 분석하였다.

2. 채널형상의 탄성복원

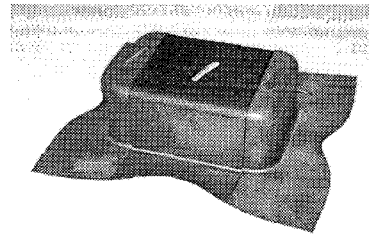
채널 형상의 프레임을 끝이 열린 상태로 성형하는 것과 닫힌 상태에서 성형함이 단면의 탄성복원에 미치는 영향이 어느 정도나 다른지를 살펴보기 위하여 채널 형상을 Fig. 1(a)와 같이 U-벤딩에 의하여 성형한 경우와, Fig. 1(b)와 같이 사각 용기로

드로잉한 후 양쪽 가형상을 절단한 경우를 대상으로 삼아 실험을 행하였다.

실험은 100 톤 용량의 유압식 프레스이며, 성형 속도는 15mm/sec 이다. 금형의 치수는 Table 1 에 나타내었다. 소재로는 탄성계수 $E=206\text{Gpa}$, 강도계수 $K=507\text{Mpa}$, 가공경화지수 $n=0.18$, 이방성계수는 $r_0=1.15$, $r_{45}=0.74$, $r_{90}=1.48$ 을 갖는 두께가 0.8mm 인 일반 냉간압연강판 SPC1 종을 사용하였다.



(a) U-bended



(b) Drawn and trimmed

Fig. 1 Channel type Frame

Table 1 Die dimensions (unit : mm)

punch	size	120 × 80
	Shoulder radius	6.5
	Corner radius	15.5
die	Hole size	122 × 82
	Shoulder radius	4.5

U-벤딩용 소재의 크기는 190× 80mm, 210× 80mm 로 하였고, 사각 컵 드로잉용 소재는 190× 220mm, 210× 240mm 의 2 가지로 선정하여 드로잉 후에 길이 80mm 로 절단을 하였다. 성형 깊이는 45mm 이다. 프레임 성형시 마찰의 차이가 단면 탄성 복원에 미치는 영향을 알아보기 위하여 윤활을 달

리하였다. 윤활제로는 극단적인 경향을 관측하기 위해 금형 표면과 소재 사이의 마찰을 무시할 수 있는 두께 0.1mm의 테프론 시트를 사용하였다. 현장에서는 빈번히 활용되지만, 금형의 경면가공이 어려운 실험실 여건 속에서 이에 상응하는 마찰 조건의 차이를 부여하기 위하여 소재의 다이쪽, 또는 양쪽에 테프론 시트를 윤활제로 활용한 것이다.

성형 후 탄성복원된 제품들의 굽힘각을 측정하였다. 성형된 제품들의 굽힘 각도가 다이페이스 및 블랭크 홀더의 표면 가공 정도와 어깨반경 등 미세한 가공 오차에 의해 정확히 대칭을 이루고 있지 않아 Fig. 2의 좌우 양쪽 각도의 평균으로 잡았다. 그리고 금형 형상에 의한 성형 오차를 최소화하기 위해 홀더의 방향을 달리하여 여러 번의 실험을 거쳐 경향을 확인하였다. 성형 후 채널의 벽이 휘어지는 현상도 눈에 띄었지만 일정 이상의 홀딩력에서는 그 정도가 매우 작았으며, 소재 두께에 비하여 훨씬 적은 수평 변형량을 나타내는 정도에 불과하였으므로 벽부는 직선으로 가정하였다. Fig. 2는 펀치와 다이쪽 모서리의 굽힘각의 측정 위치를 나타낸다.

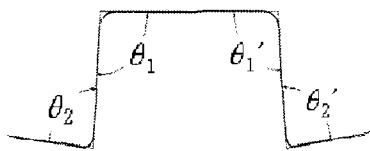


Fig. 2 Measurement of corner angle

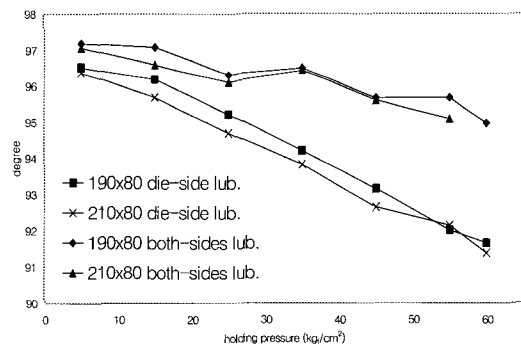
2.1 U 벤딩한 채널

U-벤딩에서 홀딩력과 윤활조건이 굽힘각에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 3은 크기가 다른 2 종류의 소재를 대상으로 성형시 다이쪽만 윤활한 경우와, 다이쪽과 펀치쪽을 동시에 윤활한 경우로 분리하여 블랭크 홀딩력을 바꾸어가며 실험한 탄성복원 후의 굽힘각의 변화를 나타낸 것이다.

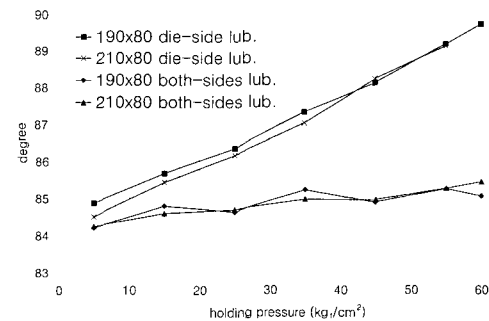
일반적으로 알려진 경향과 같이 다이쪽 모서리나 펀치쪽 모서리 모두에서 홀딩력이 커질수록 금형의 각도인 90°에 가까워지고 있다. 다이쪽 모서리각 (θ_2)은 홀딩력이 작을 때는 90°보다 작은 각도를 보이다가 홀딩력이 증가할수록 90°에 가까워지는 경향을 나타내고 있으며, 펀치쪽 모서리각(θ_1)은 90°보다 큰 굽힘 각도부터 홀딩력이 증가하면서 90°에 가까워지는 양상을 보이고 있다. 윤활의 영향이 제품의 모서리각에 나타내는 변화를 살펴보면,

표로 제시하지는 않았지만 다이쪽 모서리나 펀치쪽 모서리에서 양쪽 모두 윤활한 경우가 전체 홀딩력 범위에서 탄성복원의 양이 가장 크게 나타났으며, 펀치쪽 윤활, 다이쪽 윤활, 무윤활의 순서로 탄성복원의 정도가 줄어들었음을 확인하였다. 그러나 다이쪽을 윤활하지 않고 펀치쪽만 윤활한 경우와 양쪽 모두 무윤활인 경우에는 홀딩력이 증가되면 파단이 일어나는 등 성형범위가 급격히 줄어들어 성형에 한계를 나타내었다. 따라서 윤활 부위에 따른 탄성복원의 각도 변화를 넓은 홀딩력 범위에서 비교하기 위해 다이쪽만 윤활한 경우와 양쪽 모두 윤활한 경우만을 택하여 실험결과를 비교하였다.

Fig. 3에서 다이쪽만 윤활한 경우가 양쪽을 모두 윤활한 경우에 비해 홀딩력 증가에 의한 탄성복원 억제 효과가 다이쪽 모서리와 펀치쪽 모서리 모두에서 더 커지고 있음을 그래프의 기울기 차이를 통해 알 수 있다. 이 경우에 다이쪽 윤활



(a) Punch-side corner angle, θ_1



(b) Die-side corner angle, θ_2

Fig. 3 Corner angle of U-bended channel after Springback

은 소재 두께 방향으로 흐름에 차이를 줄여 주기 때문이라고 볼 수 있다. 블랭크 크기에 따른 홀딩력의 영향을 살펴보면, 홀딩력이 낮은 초기에는 적은 차이이지만, 다이쪽 모서리의 경우 플렌지 길이가 긴 210×80mm 일 때, 그리고 펀치 쪽 모서리는 플렌지 길이가 짧은 190×80mm 일 때가 탄성복원이 더 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있다. 그러나 일정 이상의 홀딩력에서 소재 크기에 따른 굽힘각의 변화는 별다른 차이를 보이지 않고 있음이 관측되었다.

U-벤딩 실험에서의 결론을 종합해 보면 다이쪽면의 마찰을 줄이는 경우가 성형 가능한 홀딩력의 범위가 넓고, 또 탄성복원에 의한 각도 변화가 적어 제품의 품질 저하를 막는데 도움이 된다고 할 수 있다. 이는 소재 크기와 관계없이 나타난 일관된 경향이다.

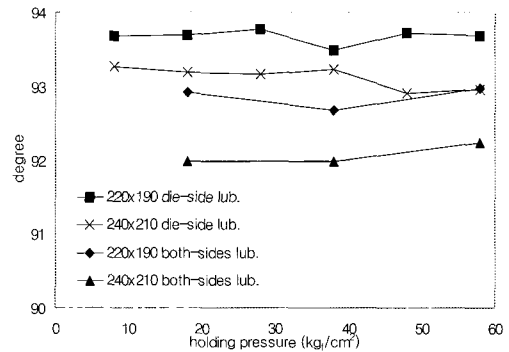
2.2 드로잉을 거친 채널

U-벤딩에서 나타나는 윤활 부위의 차이에 따른 탄성복원의 경향을 산업 현장에서 보다 널리 행해지고 있는 끝이 닫힌 채널 성형의 경우와 비교해 보기 위해, 동일한 변수들이 드로잉 후 트리밍을 한 단면의 모서리 각도에 미치는 영향을 측정하였다. 무윤활과 펀치쪽만 윤활한 경우는 소재 유동에 의해 제품 코너에 터짐 현상이 U-벤딩과 비교하여 더 적은 홀딩력 범위에서 발생하였다. 따라서 아날로그 형태로 홀딩력을 조절하는 유압 프레스로 좁은 성형 범위에서 홀딩력에 따른 탄성복원의 정도를 정밀하게 나타내기 어려워 이 두 경우는 생략하고 다이쪽 윤활과 양쪽 윤활만을 대상으로 실험하였다.

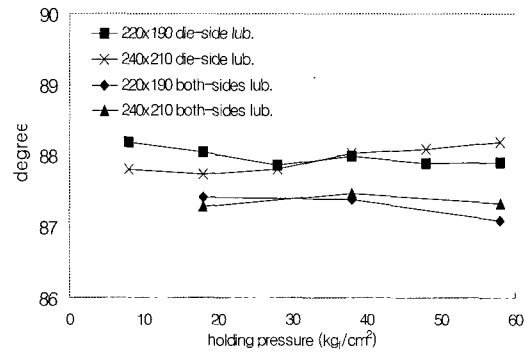
Fig. 4는 다이쪽만 윤활한 경우와 양쪽을 윤활한 경우, 드로잉한 제품을 U-벤딩한 형상과 같은 길이로 와이어 컷팅한 후 나타나는 모서리각의 변화를 나타낸 것이다. U-벤딩한 형상에 비해 드로잉한 제품에서는 윤활 부위에 따른 모서리각의 변화 범위가 적음을 볼 수 있다. 또한 성형의 범위 안에서 홀딩력 증감 역시 모서리각의 변화에 큰 영향을 미치지 못하는데, 이는 드로잉에서 탄성복원의 정도는 홀딩력의 증감에 의한 요인보다는 제품 프로파일 코너부에 의한 소재 유동의 영향이 더 크게 작용하고 있기 때문인 것으로 볼 수 있다.

윤활 부위가 탄성복원에 미치는 영향을 비교하기 위하여 먼저 다이쪽 모서리각(θ_2)의 변화를 살펴보면, 다이쪽만 윤활한 경우가 양쪽 윤활한 경우보다

탄성복원 각도가 적어 90°에 더 가깝게 윤활 부위가 탄성복원에 미치는 영향을 비교하기 위하여 먼저 다이쪽 모서리각(θ_2)의 변화를 살펴보면, 다이쪽만 윤활한 경우가 양쪽 윤활한 경우보다 탄성복원 각도가 적어 90°에 더 가깝게 나타나고 있다.



(a) Punch-side corner angle, θ_1



(b) Die-side corner angle, θ_2

Fig. 4 Corner angle of drawn channel after springback

이는 U-벤딩에서 나타나는 경향과 동일하다. 그러나 펀치쪽 모서리각(θ_1)의 변화를 살펴보면, 다이쪽만 윤활한 경우가 양쪽을 윤활한 경우보다 탄성복원량이 더 크게 나타나고 있다. 이는 U-벤딩에서 나타내는 경향과 반대이다. 따라서 펀치쪽 모서리에서는 다이쪽만 윤활한 것 보다 양쪽 윤활인 경우가 다이 형상인 90°에 더 가까워 탄성복원 억제에 도움을 주고 있는 것으로 나타났다. 이 같은 경향은 소재 크기에 관계없이 동일함을 보인다.

윤활 부위의 영향으로 펀치쪽 모서리에서 나타

나는 각도의 차이에 비해 다이쪽 모서리의 각도 차이는 적게 나타나지만, 윤활 부위에 따른 경향은 확실하게 구분되고 있다.

소재 크기의 관점에서 보면, 펀치쪽 모서리에서, 소재 크기에 따른 모서리각의 차이가 확연히 구별된다. U-벤딩한 경우에 나타나는 경향과 마찬가지로, 성형 후 남은 플렌지 길이가 길수록 탄성복원의 정도가 작아지고 있음을 볼 수 있다.

U-벤딩에서는 일정 홀딩력 이상에서 다이쪽만 윤활하는 것이 다이와 펀치쪽 모서리각의 탄성복원을 효과적으로 억제하는 일관성을 보이는데 반해, 드로잉을 거치는 경우 다이쪽 윤활과 양쪽 윤활이 다이와 펀치 어깨의 탄성복원에 미치는 영향이 서로 반대로 나타나면서 둘을 합한 전체 탄성복원의 양은 거의 비슷하였다.

3. 유한요소 해석

탄성복원에 대한 유한요소 해석이 실험 결과를 어느 정도 정확히 반영하는지 알아보기 위해 실험의 상황을 PAM-STAMP로 재현하여 탄성복원을 예측하여 보았다. 해석에 사용되는 소재 물성치는 실험

에 쓰인 소재를 인장 시험하여 얻어진 측정값을 사용하였다.

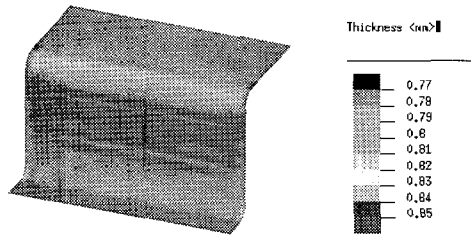
탄성복원의 해석에 소재 요소의 크기가 큰 영향을 미치게 되므로 기초 해석을 통해 적절한 요소 크기를 선정하였다. 요소 크기가 작을수록 해석 결과가 정밀해지지만⁽⁴⁾, 일정 이하로 작아지게 되면 해석에 소요되는 시간의 증가에 비해 결과에는 큰 차이를 보이지 않는 요소 크기의 한계 값이 나타났다.

이 해석에서는 금형 형상의 어깨반경 중 작은 값인 다이측 어깨의 길이 7mm 안에 최소한 6 개 이상 요소가 들어갈 수 있도록 제품 굽힘부의 소재 요소의 한 변이 최대 1mm 가 되도록 설정하였다.

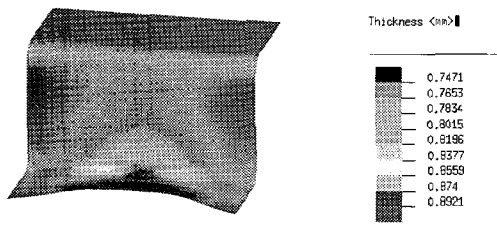
또한 성형이 진행되면서 요소 사이의 각도가 일정 이상으로 꺾이게 되면 소재 요소의 한 변을 둘로 나누어 전체 요소의 개수를 늘리면서 변형 부위만 요소의 크기를 줄이는 적응 메쉬(adaptive mesh)를 사용한 경우에도 초기의 요소 크기를 작게 설정한 경우와 차이를 보이지 않았다. 따라서 성형 전 소재의 요소 크기를 4mm 로 하고 2 단계의 적응 메쉬를 적용하였다. 소재 두께 방향의 적분점 개수는 7 개로 설정하였다. 적분점 개수를 9 개 이상으로 늘린 경우에도 해석 결과의 경향이 동일하게 나타났다. 이 해석에서는 다른 성형 변수들의 상대적인 영향을 관찰하는 것이 목적이므로 해석 시간 과다를 방지하며 경향을 관측하는데 가장 적절하다고 판단되는 7 개를 적분점 개수로 설정하였다. 성형 속도는 동적효과가 영향을 주지않도록 1m/sec 로 하였다.

테프론 시트로 윤활된 금형면의 마찰 계수를 $\mu = 0$ 에 가깝게 설정하고 윤활되지 않는 면의 마찰 계수를 $\mu = 0.3$ 으로 택하여 윤활의 차이에 의한 영향이 보다 크게 나타나도록 하였다.

Fig. 5 는 해석 결과 중 실험에서 활용한 중간 정도 홀딩력인 35 kgf/cm² 에서 길이가 190mm 이고 소재의 양쪽을 윤활한 경우의 성형 후 두께분포를 나타낸다. 두께 분포와 소재 유입 정도를 실험값과 비교하여 신뢰할만한 성형 해석이 이루어졌음을 확인하고 탄성복원 해석을 수행한 후 제품 어깨의 각도 변화를 예측한 결과 중 Fig. 5 에 제시된 경우를 Table 2 에 나타내었다. 먼저 U-벤딩 형태의 탄성복원 해석 결과를 보면 펀치와



(a) U-bended channel



(b) Drawn and trimmed channel

Fig. 5 Thickness distribution on half channel

Table 2 Comparison of simulated results between U-bended and drawn part

Lubrication		Die-side	Both-sides
U-bended channel	Punch	94.6°	91.7°
	Die	85.1°	86.0°
Drawn & Trimmed channel	Punch	93.6°	92.6°
	Die	87.9°	88.2°

다이 어깨각 모두에서 실험과는 반대로 양쪽 윤활인 경우가 90°에 가까워 탄성복원이 적게 이루어지는 것으로 예측되었다. 이같은 경향은 실험시 사용된 홀딩력 범위 전체에서 나타나고 있다. 일반적으로 성형해석을 현장에 적용하는데 두께 변화 등 성형성 측면은 신뢰할만한 정확도를 보이지만, 탄성복원에 있어서는 아직 그 정확도에 의구심이 있는 것으로 알려져 있다. 특히 U-벤딩 형태의 성형과 같이 채널 양끝의 소재 흐름에 구속이 없는 경우는 해석을 통한 탄성복원의 예측이 더욱 어렵다. 이같은 부정확한 예측은 해석상의 여러 가지 문제의 복합적인 결과로 판단되어진다. 그 중 근본적인 원인으로 판단되는 것은 쉘 요소를 사용한 소재에 대해 성형은 외연적(explicit) 방법으로 해석하고 그 결과 값을 이용하여 탄성복원을 내연적(implicit) 방법으로 해석을 하는 일반적인 상용 프로그램의 문제이다. 실제로 3 차원 응력 상태하에서 변형되는 소재를 두께 방향의 응력 성분을 정확히 고려하지 못하는 2 차원 쉘 요소를 사용한 성형을 해석하여 탄성복원을 유발하는 두께 방향의 응력으로 유추하게 된다. 특히 소재의 굽힘부에서 지속적인 인장이나 압축을 동반하지 않고 단순 굽힘에 가까운 U-벤딩의 경우 굽힘이 작용하는 부위에서 응력의 역전현상이 발생하게 되는데, 소재 두께 방향의 각각의 적분점에서 평면응력 상태로 고려되는 쉘 요소 해석의 경우는 이같은 소재 두께 방향의 응력 변화를 제대로 반영하기가 어렵기 때문에 탄성복원을 정확히 예측하는데 근본적인 어려움이 있다.⁽⁵⁻⁶⁾

앞서 제시한 원인과 함께 부정확한 예측을 만드는 또 다른 원인은 성형 해석시 소재와 금형간 접촉면의 처리 방식과 연계된 마찰의 고려 방법을 들 수 있다. 성형 해석시 소재와 접촉면간의 접촉처리는 라그랑지(lagrange)와 벌칙(penalty)의 두 가지

접촉 방법을 사용하게 되는데, 접촉 처리 방식은 이 연구의 관찰 대상인 마찰에 직접적인 관련이 있다. 그러나 U-벤딩에서는 마찰 정도에 따른 해석 결과의 오차가 일정한 경향을 보이지 않는다. 이 연구와 같이 소재 양쪽면의 마찰 정도에 따른 제품의 탄성복원 차이를 비교하는 경우에 있어서 마찰이 다른 변수들에 비해 제품 성형과 탄성복원 해석에 미치는 영향이 적어서 생기는 현상으로 볼 수 있다.

그렇지만 드로잉후 절단된 제품의 해석 결과를 살펴보면 펀치 어깨각의 변화가 U-벤딩과는 다르게 실험과 동일한 경향을 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

단순 굽힘에 가까운 U-벤딩의 코너부 변형 양상과 달리 홀딩력과 제품 형상에서 기인하는 소재의 흐름이 전반적으로 구속되어 성형 과정동안 인장 또는 압축 소성 변형이 일어나게 된다. 따라서 굽힘이 일어나는 부분에서도 U-벤딩시 부정확한 예측의 원인이 되는 두께 방향 응력 분포의 역전현상이 발생되지 않기 때문에 성형에 미치는 영향이 미미한 마찰의 영향을 비교적 정확히 예측한 것으로 볼 수 있다. 또한 성형 동안 굽힘부에 소성변형이 발생하기 때문에 U-벤딩 보다는 평면 변형에 가까운, 즉 2 차원 쉘 요소를 사용하여도 큰 무리가 없는 변형 양상을 갖게 되어 마찰의 영향이 정확히 반영된 결과로 판단된다.

그러나 다이 어깨부에서는 여전히 실험과 반대의 경향으로 예측되고 있다. 이는 U-벤딩의 경우와 마찬가지로 플렌지가 빨려들어 오면서 굽힘부를 평면변형으로 간주하는데 필요한 충분한 소성 변형을 주지 못해 마찰의 영향을 반영하지 못한 것으로 판단될 수 있다.

이를 간접적으로 판단하기 위하여 Fig. 5(b)의 다이쪽만을 윤활한 경우를 해석할 때 제품의 굽힘부에 해당하는 소재 요소의 방향을 펀치 프로파일과 동일한 방향으로 정렬하였을 때와 45°로 비스듬히 놓았을 때 탄성복원을 예측해 보았다.

Table 3 Effect of mesh direction on simulated results

Mesh direction		0°	45°
Punch		93.5°	92.7°
Die		87.8°	87.6°

요소의 방향이 다른 두 경우 두께 분포는 거의 동일한 양상을 나타냈다. 그러나 탄성복원에 의한 어깨각의 변화를 살펴보면, 펀치 어깨부 경우 일반적으로 알려졌듯이 굽힘부의 요소 방향이 비스듬한 경우에는 굽힘부에 평행한 요소의 결과보다 탄성복원의 정도가 적게 나타났다. 그러나 다이 어깨부의 경우에는 요소가 놓이는 방향의 차이가 어깨각의 변화에 큰 영향을 미치지 못하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 응력 역전 현상을 보이지 않는다고 판단된 펀치 어깨각은 다른 해석 요인에 의한 영향을 정확히 반영하지만, 근본적으로 두께방향의 응력 분포를 제대로 예측하지 못한 다이 어깨각에서는 다른 해석요인의 영향을 반영하지 못하며, 이는 마찰의 영향보다 더 큰 오차를 만드는 요인에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 채널 성형에서 마찰과 같이 상대적으로 성형에 미치는 영향이 적은 변수인 경우 실제 일어나는 현상을 그대로 예측하는데 한계를 보인다고 볼 수 있다.

그럼에도 불구하고, 이전의 많은 연구에서는 블랭크 홀더면 전반에 홀딩력이 작용하고 제품에 비드 등 내부 형상이 있는 경우에 대해서는 탄성복원 해석의 전체적인 경향이 실제와 유사함을 보여 주었다.⁽⁷⁻⁸⁾ 이는 홀딩력과 마찰 계수가 탄성복원 해석에 사용되는 소재 두께 방향의 응력 분포에 미치는 영향보다 홀딩력이 소재 전면에 작용하여 펀치 프로파일과 제품 형상에 의한 측면 방향의 소재 유동이 소재의 탄성복원 해석에 더 큰 영향을 미치기 때문이라고 할 수 있다. 특히 다이페이스에 비드가 사용되는 경우 비드에 의한 지속적 인장은 다이 어깨에서 생기는 소재 흐름과 블랭크 홀더면의 압력이 상호 작용하여 해석시 생기는 오차를 줄여줄 수 있다. 따라서 쉘 요소를 사용하는 해석 프로그램을 사용하여 탄성복원 해석을 수행할 때 소재 전체에 충분한 소성 변형을 갖고 있는지를 판단하여 해석 결과를 활용하는데 주의가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

U-벤딩으로 성형한 채널과 사각컵으로 드로잉한 후 절단한 채널에서 소재 크기와 홀딩력, 마찰의 정도가 제품 모서리각의 탄성복원에 미치는 영향을 알아본 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) U-벤딩한 경우 다이쪽 모서리와 펀치쪽 모서리 모두에서 양쪽 윤회한 경우가 전체 홀딩력 범위

에서 탄성복원 양이 가장 크게 나타났으며, 펀치쪽 윤회, 다이쪽 윤회, 무윤회의 순서로 탄성복원의 정도가 줄어들었다. 이 중 다이쪽이 윤회되지 않는 펀치쪽 윤회와 무윤회에서 홀딩력이 증가하면 성형범위가 급하게 줄어들었다.

(2) U-벤딩한 경우 다이쪽만 윤회한 경우가 양쪽 윤회의 경우보다 양쪽 모서리 모두에서 탄성복원이 적게 발생하여, 탄성복원에 의한 제품의 품질 저하를 막기 위해서는 금형의 다이쪽 마찰 정도를 줄이는 것이 제품의 탄성복원 억제에 유리함을 보였다.

(3) 드로잉한 후 절단한 채널에서 펀치쪽 모서리의 탄성복원에 의한 각도 변화를 보면 플렌지 길이가 길수록 탄성복원의 정도가 작아지는 경향이 다이쪽 모서리와 비교하여 명확히 나타났다.

(4) 드로잉한 후 절단한 채널의 펀치쪽 모서리각은 다이쪽만 윤회한 경우보다 양쪽 윤회한 경우가 탄성복원 억제에 도움을 주는 것으로 관측됐다. 이는 U-벤딩한 경우와 반대인 경향이다.

(5) 마찰 등과 같이 상대적으로 성형에 미치는 영향이 적은 변수를 대상으로 제품의 탄성복원을 해석할 때는 제품의 변형 예측에 어려움이 있으므로 현 상황에서는 해석 결과의 활용에 주의가 필요하다.

후 기

이 논문은 2001 학년도 건국대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) 프레스가공 노우하우 편집위원회, 1995, "프레스가공 노우하우 100 선", 기전연구소, pp. 124~138.
- (2) 김성환 외, 2001, "차체 성형용 판재의 U 벤딩시의 스프링백에 관한 연구", 한국소성가공학회 2001 년도 추계학술대회 논문집, pp. 66~70.
- (3) J.M. Lanzon, M.J. Cardew-Hall, P.D. Hodgson, 1998, "Characterising frictional behavior in sheet metal forming", J. of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, pp. 251~256.
- (4) 양동렬, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, "박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응

- 용” , 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 1 호, pp. 22~28.
- (5) J. W. Cho, D. Y. Yang, W. J. Chung, 2002, "A simplified approach for incorporating thickness stress in the analysis of sheet metal forming using shell element", *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 53:2311-2327.
- (6) 정완진, 1999, "박판성형시 탄성복원에 대한 유한요소해석" , 대한기계학회논문집 A 권, 제 23 권, 제 12 호, pp. 2197-2208.
- (7) D. Joannic, J.C.Gelin, 1999, "Shape defects in sheet metal forming operations after springback", *NUMISHEET'99*, Vol. 1, pp. 29~34.
- (8) 이두환 외, 2000, "수직벽을 가진 자동차 부품성형 공정의 스프링백 유한요소 해석" , 한국소성가공학회지, Vol. 9, No. 6, pp. 574-581.