

# 사다리꼴 단면용기의 성형성에 관한 연구

## An Experimental Study on Trapezoid Box Drawing

고대림,유호영(울산대 대학원),김진무(울산대)

### 요 약

본 연구에서는 사다리꼴 용기의 성형성을 여러종류의 블랭크를 사용하여 실험하였으며, 소재의 두께 및 유동 현상을 성형성의 평가와 블랭크의 크기결정을 위해서 측정하였다. 이러한 결과 성형품의 파단위치는 단변부의 코너임을 확인하였고, 전단영역에 인접한 직변부 부근의 플랜지 가장자리가 두꺼워지는 것을 알 수 있었으며, 코너컷은 코너에 인접한 2개의 전단영역의 가장자리를 연결하는 선과 평행하게 하는 것이 좋다는 결과를 얻었다.

### 1. 서 론

자동차차체부품, 연료탱크, 오일팬, 주방용용기 등 많은 종류의 제품들은 판재를 딥드로잉(Deep-drawing)하여 성형하고 있다. 이러한 딥드로잉(Deep-drawing)의 변형거동은 복잡한 변형 모드를 포함하고 있으며,재료자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy)등의 기계적 성질이나 공구상태, 표면윤활상태, 성형속도, 성형압력 등에 따라 가공상태가 달라진다. 성형시 발생하는 문제점들은 제품의 형상에 따른 적절한 블랭크의 결정 및 소재의 유동현상을 파악함으로써 해결할 수 있다.

딥 드로잉에 관한 연구는 많이 발표되었으나, 대부분의 연구들은 축대칭 문제에 대한 실험 및 해석에 국한되어 왔다. Yoshida<sup>(1)</sup>는 판재성형에 관한 유동해석을 체계적으로 연구하였고, 비축대칭 형태의 단면을 가진 용기의 성형에도 관심이 높아 Kawai<sup>(2)</sup>는 알루미늄을 이용하여 사각형상 용기의 성형성을 연구 하였다. 최근에는 성형성을 향상시키는 방안으로 초기 블랭크의 형상 결정에 관한 연구들<sup>(3-4)</sup>이 많이

진행되고 있으며, 특히 미끄럼선장법을 이용한 초기 블랭크의 형상을 결정하는 연구들<sup>(5-7)</sup>과 이와 병행하여 특정한 형상(L형)의 성형 실험에 관한 연구<sup>(8-9)</sup>도 발표되었다. 그러나 성형성 향상을 위한 초기 블랭크의 결정 방법들은 산업현장에서 단순 작업자가 쉽게 적용하기에는 이론적인 접근에 힘이 들고, 블랭크 채취용 복잡한 금형의 제작이 필요하게 되므로 경제적 측면에서도 바람직하지 않다. 이러한 관점에서 단면의 기하학적인 형상변화에 대한 유동해석은 성형성의 예측 및 블랭크 크기 결정에 필수적이거나, 아직까지 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 성형가공시 단면의 형상에 따른 재료의 유동상태를 예측하여 블랭크의 단순한 코너컷에 의한 블랭크 결정 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 실험연구에서는 변사이의 각이 예각 및 둔각을 갖는 사다리꼴 단면의 용기 성형시 초기 블랭크의 적당한 코너컷에 의한 소재의 유동상태 및 두께변화를 실험적으로 고찰하고 소재의 유동모델을 제시하여 이론해석의 자료를 제공하고자 한다. 추후 이러한 연구 영역을 확장하여 단면의 형상에 따른 유동현상을 Draw-Bead

를 포함하여 연구할 예정이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1) 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 프레스, 금형, 편치구동부, 변위측정부, 변위 및 하중 data 신호처리 system으로 구성되어 있다. 금형의 구성은 다이, 편치, 블랭크홀더, 블랭크홀더력과 편치력을 측정하는 두개의 로드셀(load cell)로 구성되며,  $R_p=12$ ,  $R_d=10$ 인 금형부문의 형상 및 자세한 치수는 Fig 1과 같다.

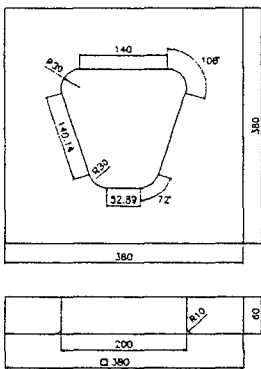


Fig 1 금형의 형상 및 치수

### 2-2) 실험방법

본 실험에서 사용한 판재의 두께는 0.88mm인 냉연강판(SPPC)을 사용하였고, 예비실험을 통하여 성형 가능성이 확인된 블랭크의 크기 300×310(mm), 성형 깊이를 45mm를 기준으로 최적 성형 조건을 찾기 위하여 실험하였다. 최적의 성형은 성형후 파단 및 주름이 발생하지 않고 제품의 각 부위별 두께변화가 적게 나타나며 플랜지 부분의 면적이 트리밍 여유를 고려한 최소 면적이 나타날 경우이다. 이러한 기준으로 블랭크 채취시 적절한 코너컷 및 최적의 공정

수를 결정하기 위해서 성형 단계별로 실험하였다. 블랭크홀더력과 편치력의 측정은 상하 로드셀에서 나오는 신호를, 편치의 움직임은 편치구동부에 부착된 변위 측정기에서 나오는 신호를 각각 받아서 컴퓨터에 입력시켜 데이터 파일로 저장하였다. 무운환 상태에서 블랭크 홀더력은 35ton을 가하여 시편을 5단계의 성형깊이(10,20,30,40,45mm)로 순차적으로 성형하여 재료의 유동특성 및 두께를 실측하여 코너컷이 필요한 부분을 결정하였다. 코너컷량은 분석된 결과와 코너 부분에서 성형깊이와 관련된 블랭크크기 결정식 및 최저공정의 블랭킹 작업을 고려하여 결정하여 실험하였고, 이러한 결과들은 Hill의 Slip 수치해법 및 Hodo graph를 이용하여 결정된 블랭크를 성형하여 비교 하였다. 성형시 블랭크의 위치는 장변부 및 단변부의 다이 Cavity로부터 각각 68.2mm, 51.4mm를 끝점을 맞추어 좌우 대칭으로 설치하였다. 시편 각부위의 두께는 소재의 표면에 5mm의 정사각 격자무늬를 새겨넣어 현대자동차(주)에서 보유하고 있는 ASAME(The Automated Strain Analysis and Measurement Environment) 장비로 측정하였고, 부위별로 Micrometer를 사용하여 확인하였다.

### 2-3) 실험결과의 정리

사다리꼴 단면을 갖는 용기는 장변부와 단변부의 중심으로 대칭이므로 시편의 1/2을 해석하였다. 직사각형 블랭크를 사용한 성형품은 성형깊이 10, 20, 30, 40, 45(mm)로 성형후 플랜지 끝단의 두께를 32 지점으로 나누어 실측하여 나타내었고, 실측한 위치는 Fig 2 에 명시되어 있다. 직사각형 블랭크에 의한 실험에서 분석된 결과를 이용하여 코너컷한 블랭크의 성형품은 단변부와 장변부의 중앙부 및 코너부들을 용기의 바닥에서 높이 15mm부터 35mm까지 5mm 간격으로 두께를 실측하였다. 블랭크의 형상을 Slip선장법에 의해서 결정된 성형품의 경우도 단변

부와 장변부의 중앙부 및 코너부들의 두께를 같은 방법으로 실측하였다. 이와같은 방법으로 각각의 성형품들의 유동상태를 파악하여 비교 분석하였다. 그래프상에서 데이터점의 표기 방법을 설명하면, 블랭크의 형상에 따라서 코너컷이 있을 경우는 C, 직사각형은 N-C, Hodo그래프와 Slip선장법에 의한 경우는 H로 표기 하였다. 본 연구에서 Slip선장법에 의한 블랭크의 결정은 플랜지가 없는 성형에서 성형깊이 65mm에 해당되는 크기로 하였다.

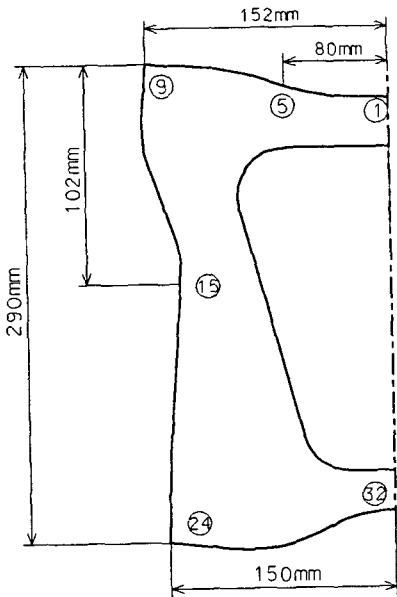


Fig 2. 플랜지 끝단의 실측위치

### 3. 실험 결과의 검토

Fig 3에서 위치점 1-5까지는 장변부의 직변부를 나타내며 성형깊이가 20mm까지는 플랜지 끝단의 두께는 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 성형깊이가 30mm이상에서 부터 두께의 급격한 증가가 관찰된다. 이러한 현상은 성형 초기에는 재료의 거동이 다이 cavity방향으로만 일어나고 둘레 방향으로의 유동은 미약하나 성형이 진행됨에 따라서 코너부에서는 유입저항이 증가하면서 강제영역을 형성하여 직변부 중심방향으로 재료가 유동하여 두께가 증

가함을 알 수 있다. 그러나 5번 위치점에서는 성형 깊이와 무관하게 두께의 변화를 볼 수 없다. 5-9까지는 장변부의 코너부로서 성형깊이와 무관하게 두께의 변화가 거의 없음(0.01mm이내)을 알 수 있다. 즉 강제영역을 형성함이 관찰된다. 이러한 현상은 위치점 10-13인 빗변부의 코너부에서 발생함을 알 수 있다. 장변 코너부에서 성형된 제품의 형상을 살펴보면 성형에 관계없이 플랜지 끝단은 90도로 유지되나 장변방향으로 회전되어 있는 현상이 발견된다. 14-21사이의 영역은 빗변부의 중앙부로서 장변부의 중앙부(1-5)와 유사한 현상을 나타냄을 알 수 있으나 장변부의 코너부에 비하여 단변부에 접한 코너부의 두께가 큰것을 알 수 있다. 그러므로 단변부의 코너쪽 벽에서 벽균열이 예상된다. 22-29영역은 단변부의 코너부로서 강제영역을 형성하여 두께의 변화가 0.01mm내의 임을 알 수 있다. 단변 코너부에서 성형된 제품의 형상을 살펴보면 플랜지 끝단은 여전히 90도로 유지되나 빗변방향으로 회전되어 있는 현상이 역시 발견된다. 30-32영역은 단변부의 중앙지역으로서 장변부 및 빗변부의 중앙부와 비교하면 두께가 적은 것이 관찰되는데 이것은 단변부에서는 양쪽 코너부의 영향으로 둘레방향으로의 유동이 제약을 받기 때문이라 판단된다. 전체적으로 보면 코너부에서는 압축이 다이로 유입되는 양보다 많아 두께가 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 위치점 5, 13, 21, 27 부근을 기점으로 플랜지 끝단의 두께가 급격하게 변화가 있음이 관찰되는데 참고문헌 5에서 분석한 전단영역으로 파악된다. 이러한 위치는 다이의 반경중심에서 장변부 및 단변부의 라운드가 변하는 곳을 연결하여 연장선을 작도할때 블랭크의 외곽선과 만나는 지점(변곡점)과 거의 일치함을 알 수 있다. 전체 성형품의 형상을 보면 양쪽 코너부에서 플랜지의 모서리는 변곡점에 가까운 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 코너부에서 각각의 변곡점을 연결한 사선을 다이의 반경중심에서 다이의 라운드부를 2등분하는 선을 작도하여

다이의 반경과 같은 원형컵의 성형시 성형깊이에 따라서 결정되는 블랭크의 거리만큼 평행이동하여 코너컷을 하였다.

Fig 4는 성형깊이에 따른 성형된 용기의 다이 모서리에서 펀치 어깨까지 차지하는 예칭된 Grid(간격은 5mm)수를 순차적 실험을 통하여 단변부 및 장변부에서 측정된 결과이다. 10mm 성형에서는 장, 단변부 모두 스트레칭 없이 유입만 일어나고, 20mm 성형에서는 단변부는 5mm가 늘어나지만 장변부는 신장량이 없다. 40mm의 성형까지 두 경우 모두 5mm만 신장된다. 45mm 성형에서는 장변부는 신장이 없으나 단변부에서는 0.25mm가 신장된다. 이상의 결과에서 살펴보면 장변부에서 최초 성형에서 45mm 성형까지 5mm의 신장만 발생하여 원만한 유동이 이루어짐을 알 수 있으나, 단변부에서는 20mm 성형까지 5mm의 신장이 초기에 발생하고 이후 40mm 성형까지는 5mm의 신장만 발생하여 유동이 잘되지만 다시 45mm 성형시 2.5mm 신장이 발생하여 네킹이 진전됨을 알 수 있다. 전체적으로 보면 45mm 성형시 장변부의 신장량은 5mm이나, 단변부는 12.5mm로서 단변부가 취약함을 알 수 있고, 이러한 현상은 단변부의 재료 유동은 양쪽 코너부에서 강체영역의 영향에 의해서 의해서 제약을 많이 받는 것으로 판단되며, 이후 50mm의 성형에서 단변부 코너에서 벽균열이 발생하였다. 예비실험에서 결정된 블랭크의 설치위치가 장변부 및 단변부의 다이 Cavity로부터 거리차이가 17mm 정도 발생하는 것은 상기와 같은 재료의 유동특성에 기인된 것으로 검증된다. 더불어 다이의 형상과 같은 블랭크의 성형시에도 상하로 적정 거리차이를 유지해야만 성형이 가능하였고, 빗변부에서 장변코너의 변곡점 부근에서 다이속으로 많은 유입이 발생하여 성형이 가능한 깊이는 40mm 정도였고, 이러한 현상은 빗변을 접한 장, 단변부 코너에서의 유동특성에 기인된다고 할 수 있다. 이러한 유동특성에 기인하여 C의 경우 성형가능한 깊이는 55mm로서 성형시 유동을 억제하는 각코너부의

강체영역을 제거하여 성형성을 향상시켰다. H의 경우 성형시 소재의 두께변화가 없다는 가정에서 Slip 신장을 구성하였으므로 실제 성형상태와는 차이가 발생하므로 유동을 고려하여 성형시 소재를 장변부 방향으로 이동하여 실험하였다. 그 결과 플랜지 발생없이 65mm 정도까지 성형이 되었으나 장변부 및 빗변부 중앙부근에서 네킹이 진전된 흔적 나타나 형상불량이 발생하였다.

Fig 5는 장변 코너부의 벽면에서 높이에 따른 각지점의 두께분포를 나타낸 그래프다. N-C의 경우 바닥에서 30mm 지점에서 두께가 0.7mm 이하로 되어 파단이 우려되나, C와 H의 경우는 0.75mm 이상으로 나타나 N-C의 결과보다 성형성에 있어 우수함이 증명된다. 특히 C의 경우 H보다 두께의 변화가 적고 두꺼움을 나타내므로 코너컷량의 결정이 적절함을 알 수 있다. Fig 6은 단변 코너부의 그래프로서 N-C의 경우 25mm 지점에서 두께가 0.7mm 이하로 되며 각부위별 두께차가 0.1mm 이상으로 나타나서 장변부 코너보다 파단의 위험이 크다고 판단된다. C와 H의 경우는 전체적인 두께의 변화량을 고려하면 H가, 두께의 크기에서는 C가 우수하여 비슷한 결과라고 할 수 있다. Fig 7은 단변 중앙부의 결과로서 N-C의 경우 25mm 및 30mm 지점에서 두께가 0.7mm 이하로 되며 각부위별 두께차가 0.1mm 정도로 나타나서 단변부 코너부와 비슷하게 벽균열의 위험이 우려된다. H의 경우 20mm 지점 이상에서 두께가 얇아지며 C와 비교하면 부위별 두께 및 두께의 변화폭에서 불만족한 결과라 판단된다. 단변부의 중앙 및 코어부에서 비슷한 결과가 나타나지만 중앙부는 유입이 계속되나 코너부에서는 성형 초기에는 압축과 유입이 병행되고 성형이 진전될수록 스트레칭이 일어나서 이부위에서 파단이 일어난다. 장변 중앙부는 유동이 원활하여 이루어져서 가장 안전한 영역으로 판단되어 결과를 게재하지 않았다.

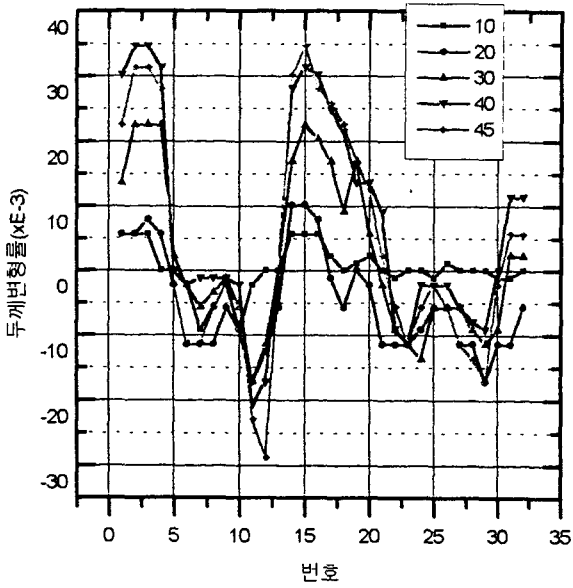


Fig 3.플랜지가장자리의 두께분포

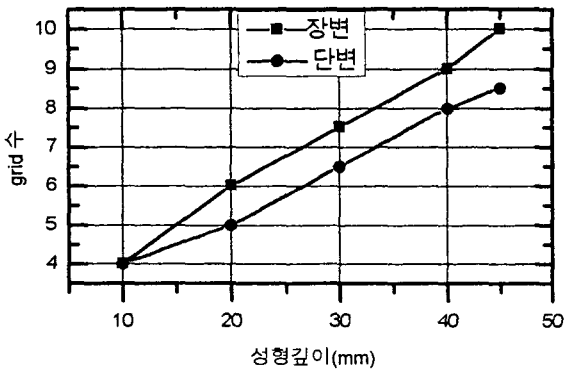


Fig 4.장단변부의 유입량

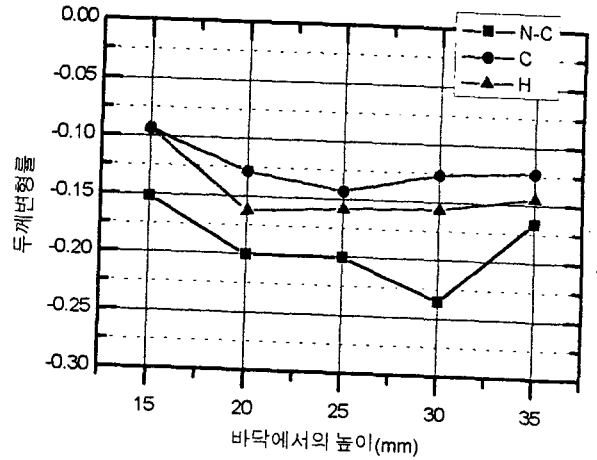


Fig 5.장변 코너부의 두께분포

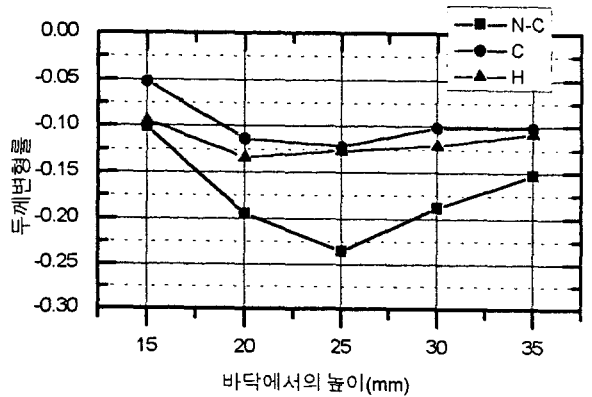


Fig 6.단변 코너부의 두께분포

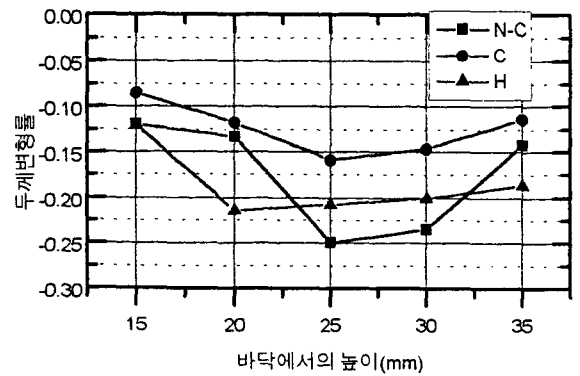


Fig 7.단변 중앙부의 두께분포

#### 4. 결 론

사다리꼴 단면을 갖는 용기의 딥드로잉 성형실험에서 블랭크의 크기를 결정하여 파단이 예측 되는 각 부위별로 두께 및 유입량을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전단영역에 인접한 직변부 부근의 플랜지 가장자리가 두꺼워 진다
2. 파단되는 위치는 다이의 각도가 둔각인 단변부의 코너부에서 파단된다.
3. 코너컷은 코너에 인접한 2개의 전단영역의 가장 자리를 연결하는 선과 평행하게 한다.

#### 참 고 문 헌

[1] K. Yoshida & K. Miyauchi, "Experimental Studies of Behavior as Relation to Sheet Metal Forming," GMR Symposium, pp. 19-52, 1978.

[2] N. Kawai, T. Mori, H. Hayash, F. Kondoh., "Effect of Punch Cross-Section on Deep-Drawability of Square Shell of Aluminum Sheet," Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp 355-361, 1987.

[3] Gopinathan, V., 1977, "Optimum Blank Profile Determination for Rectangular Deep Drawing," Indian Journal of Technology, Vol. 15, August pp. 330-333.

[4] Toh, C. H. and Shiro Kobayashi, 1985, "Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing," International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 25, No.1, pp. 15-32.

[5] Hasek, V. V., Lang, K., 1979, "Use of Slip-Line Method in Deep Drawing of Large Irregular Shaped Components," NAMRC, Vol. 7, pp. 65-71.

[6] 김민수, 신재현, 서대교, 1993, "비원형단면에 대한 판재 성형성(I)," 한국자동차공학회논문집, 제2권 제1호, pp. 84-95.

[7] 김민수, 신재현, 서대교, 1993, "비원형단면에 대한 판재 성형성(II)," 대한기계학회논문집, 제17권 제12호, pp. 3094-3104.

[8] 神馬 敬, 桑原利彦, 崔 淳哲, 1985, "凹輪郭を有する容器の深絞り加工の研究," 塑性と加工, 제26권 제294호(1985-7), pp. 744-751.

[9] 神馬 敬, 桑原利彦, 崔 淳哲, 1985, "深い凹輪郭を有する容器の深絞り加工の研究," 塑性と加工, 제26권 제299호(1985-12), pp. 1195-1202.