

박판 페어 하이드로포밍 공정의 성형성 향상을 위한 다단 성형 공정의 개발

김태정* · 정창균* · 양동열** · 한수식***
(2003년 7월 1일 접수)

Improvement of Formability in the Multi-Stage Sheet Pair Hydroforming Process

T. J. Kim, C. G. Jeong, D. Y. Yang and S. S. Han

Abstract

In the automotive industry hydroforming of sheet metal pairs have received special attention because materials for various sheet metal components of vehicles have changed into the high strength steel, aluminum, and titanium blank having low formability. Uniform deformation over the whole region is a main advantage in the sheet hydroforming process. Because upper and lower parts could be produced simultaneously with one tool, hydroforming of sheet metal pairs is competitive in reducing the lead-time and development cost. In this paper, the multi-stage hydroforming process of sheet pair is proposed in order to increase the formability of a structural part like the oil pan shape. The upper die for forming oil pan shape is divided into two parts which can move separately. By the finite element simulation, the design parameters such as geometry of the tool and detailed specification of hydraulic pump were calculated and verified. For the strict comparison of the proposed process, the blank holding force is kept to a constant value during deformation by hydraulic valve. The deformed shape and strain distribution of the manufactured parts with the proposed process are compared with the results of simulation. In the multi-stage hydroforming process, maximum thickness strain was improved by more than 30 percent.

Key Words : Hydroforming, Sheet Metal Pairs, Multi-Stage Process

1. 서론

하이드로포밍 공정에 관한 많은 실험과 해석을 바탕으로 공정 변수 및 성형성에 대한 고찰뿐만 아니라 그 적용이 점차 늘어나고 있는 추세이다. 튜브 하이드로포밍 공정은 관형 제품의 형상을 성형하기 위한 획기적인 공정으로 부품의 일체화를 통한 제품 경량화와 제품 강도 및 충돌특성 향상에 많은 기여를 하고 있다. 또한, 여러 단계를 통해 생산하던 제품의 공정 수를 줄여 생산단가를 절감하고 제품 개발 기간을 단축시킬 수 있

다. 이러한 다양한 특징을 유지하면서 박판 제품을 생산하기 위해서 유압을 이용한 성형 공정이 박판 성형 공정에도 적용되고 있는 추세이다.^(1~7)

박판 제품은 자동차 부품의 생산 공정이나 항공 및 가전제품의 생산에 많이 적용되고 있다. 이러한 다양한 적용 분야 중에서 최근에는 자동차 경량화 및 연비 효율 개선의 목적으로 부품의 일체화 기술에 관한 집중적인 연구가 진행되었다. 이러한 차체 경량화를 이루기 위해서 고강도 강판에 대한 성형 기술 확보 및 향상이 필요한 시점이다. 즉, 기존 제품보다 우수한 기계적 강도를

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

*** POSCO 기술연구소 박판가공그룹

가지면서 부품을 경량화하기 위해서는 고강도 강판을 이용한 제품의 생산이 가능해야 한다. 그러나 고강도 강판은 알루미늄 등과 마찬가지로 성형성이 떨어져 제품의 생산 과정에서 많은 문제점을 나타내고 있다. 이러한 재료의 성형을 위해서 많은 생산공정에 관한 연구가 진행되고 있으며 대표적인 생산 공정으로 박판 페어의 하이드로포밍 공정을 들 수 있다.

박판 페어 하이드로포밍 공정은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 두 장의 박판을 상하부의 금형사이에 배치시키고 두 박판 내부에 고압의 유압을 발생시켜 성형하는 방법이다.

이러한 공정에서도 두 박판의 결합 시점에 따라 제품의 성형성에 차이가 있게 된다. 즉, 박판 성형 시 처음부터 두 박판을 용접 등으로 결합하여 내부에 유압을 발생시키는 경우에는 상하의 제품 형상에 따라 재료의 유입량이 영향을 받기 때문에 주름이나 파단 등의 결함이 발생하기 쉽다. 이러한 단점을 향상하기 위해서 예비 성형단계에서는 결합하지 않은 상태에서 성형하며 최종 성형단계에서 용접을 행한 후 고압을 발생시켜 성형하는 방법이 있다. 이 경우에도 상하부 형상의 결합 라인(line)을 따라 용접 결합을 하여야 하므로 장치가 복잡해지고 용접 장치의 3차원 자세 제어를 행해야 하는 어려움이 따른다. 박판 페어의 하이드로포밍 공정에서 두 박판 사이의 밀폐를 고압에서도 유지할 수 있도록 강건 설계가 이루어지면 미리 두 박판을 결합할 필요가 없어진다.

다. 이렇게 되면 용접 기계의 위치 제어 등의 추가적인 어려움도 방지할 수 있다.

그러나, 오일 팬 등 사각형 컵 형상의 제품을 단일 성형하게 될 경우, 형상의 기하학적인 구속으로 인해 주름이나 파단 등의 결함이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 고압으로 형상의 완전 충진을 이루어야 하는 박판 하이드로포밍의 경우 중요한 문제점이 될 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 박판 재료의 거동을 단순화시키고 변형을 점진적으로 발생시켜 성형성 향상을 꾀할 필요가 있다. 즉, 변형이 집중되는 영역을 분산시키기 위해 단계적으로 성형을 실시하고 변형이 증진되어야 할 부분에서 변형을 더욱 유도하게 된다. 이러한 원리에 의해서 복잡한 형상을 지니는 제품을 낮은 압력에서 원활하게 성형하게 하는 공정의 개발이 필요하다.

2. 다단 성형 공정

2.1 다단 성형 공정의 개요

박판 하이드로포밍 공정은 고압의 성형압력을 이용하여 박판을 변형시키기 때문에 성형 압력 및 블랭크 홀딩력이 대표적인 공정 변수다. 하지만 성형 압력 및 블랭크 홀딩력의 제어로 재료의 변형 거동을 제어하기에는 많은 어려움이 있다. 이러한 관점에서 재료의 변형 거동을 제어할 뿐만 아니라 변형을 전 영역에서 고르게 유도하기 위하여 Fig. 2와 같은 다단 성형 원리를 제안하였

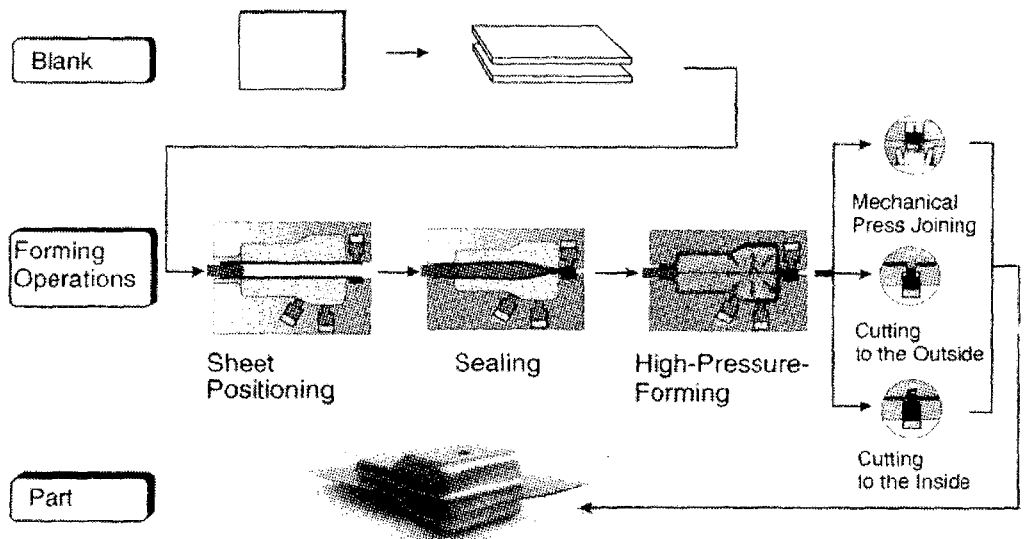


Fig. 1 Schematic diagram of sheet pair hydroforming process⁽¹⁾

다. 최종 형상을 한번에 성형하게 되면 각각의 형상에 따른 단일한 변형 거동을 보인다. 블랭크 홀딩력의 제어로 재료의 유입을 원활하게 할 수 있지만 본 공정에서는 두 박판 사이의 밀폐를 위해서 제어할 수 있는 블랭크 홀딩력의 범위가 제한되므로 블랭크 홀딩력의 제어를 통한 성형성 향상에는 한계가 있다.

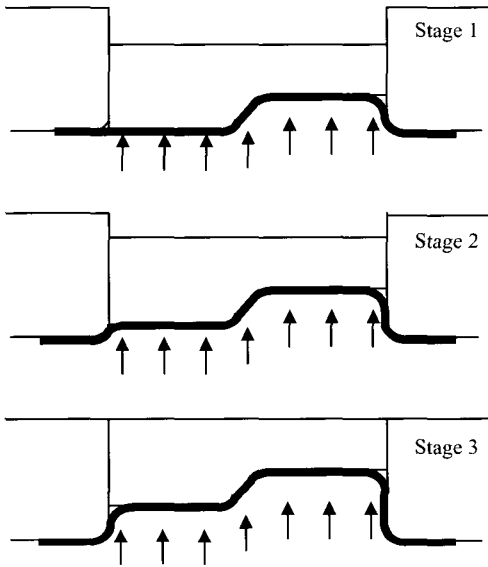


Fig. 2 Schematic diagram of the multi-stage hydroforming process

다단 성형 공정을 위해서 각 단계마다 금형의 종류를 변경하게 되면 금형 비용이 증가하고 매 단계마다 금형을 교체해야 하는 등 많은 어려움이 있을 수 있다. 이러한 문제점을 제거하고 동일한 금형 내에서 성형을 수행할 수 있도록 Fig. 2에 표시한 바와 같이 금형의 일부분을 상하방향으로 움직일 수 있도록 하였다.

2.2 다단 성형 공정의 성형성 검증

일반적으로 하이드로포밍 금형은 1000 톤 이상의 프레스에 설치하게 되며 이때 상부 램 및 하부 플랫폼의 이동 방식을 함께 고려하여 금형을 설계하게 된다. 본 연구에서는 소형 제품을 성형하게 되며 사용될 프레스는 450 톤 용량의 범용프레스이다. 다단 공정 설계의 가장 중요한 부분은 동일 금형 내에서 분리 금형의 이송을 구현시키는 것이다. 일반적으로 블랭크 홀더는 유압식 실린더를 사용하게 되므로 이를 이용하여 분리 금형의 이송이 가능하도록 금형을 설계하였다.

본 연구에서 성형할 제품은 모두 2 종류로 상부는 계단형 컵 형상(the stepped rectangular cup)이며 하부는 사각형 컵(rectangular cup) 형상이다. 설계된 제품 형상 및 금형에 대한 성형성을 평가하기 위하여 동일 형상에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 상부 형상인 계단형 컵 형상이 사각형 컵 형상보다 더 복잡하며 성형성이 떨어지므로 계단형 컵 형상의 성형에 다단 성형 원리를 적용하였고 하부의 사각형 컵 형상은 단일 성형을 하게 된다.

다단 성형 공정의 검증을 위해 Fig. 3 과 같이 금형을 모델링하고 하이드로포밍 공정을 해석하였다. 유한요소해석에 있어서는 평면이방성을 고려한 셸(shell)요소를 이용하였다. 내연적 적분 알고리즘을 적용하였으며 성형 압력은 면적분을 통해 각 요소의 절점들에 외력으로 부가하였다. 압력 증분에 따라 내압을 서서히 증가시키는 방식으로 해석을 진행하였다. 이때 압력 증분의 양이 해석시간 및 수렴성에 미치는 영향을 고려하여 최대 유효 변형률에 따라 압력 증분을 자동적으로 조절하게 하였다.

해석 및 실험에 사용된 박판은 두께 1mm 의 DDQ 급 강판(260mm x 220mm)이며 실험을 통해 아래 식 (1), (2)와 같은 재료 물성치를 구하였다. 또한, 금형과의 마찰계수는 오일에 의한 윤활효과를 고려하여 0.05 를 적용하였으며 블랭크 홀딩력은 80 톤을 적용하였다.

$$\bar{\sigma} = 525.6 * (0.0043 + \bar{\epsilon})^{0.197} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$R_0 = 2.16, R_{45} = 1.61, R_{90} = 2.67 \quad (2)$$

상부의 제품에 대해서 설계된 제품의 형상 및 금형 형상과 동일하게 모델링 한 뒤 하이드로포밍 해석을 수행하였으며 이때 사용된 유한요소는 Fig. 3 과 같다.

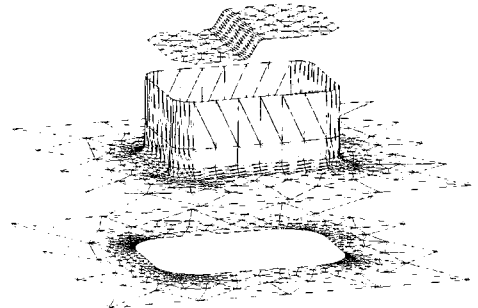


Fig. 3 Meshes for FE-analysis of the multi-stage hydroforming process

분리 급형의 이송을 연속적으로 할 수 있으므로 성형 단계를 무한히 나눌 수 있으나 성형 시간을 고려하여 Table 1에 표시한 바와 같이 3단 성형으로 설계하였다. 300bar 이상의 성형 압력에서는 재료가 쉽게 파단됨을 예비 실험을 통해 확인할 수 있었으므로 최종단계인 3 단계의 최대 성형 압력을 300bar로 설계하였다. 또한, 1,2 단계에서는 제품의 결함 발생 가능성을 줄이고 제품의 강도 및 기계적 특성을 유지하기 위해서 성형 압력을 15% 이상 줄여 250bar 까지만 성형하였다.

Table 1 Process parameters for each stage

Stage	Stroke (s)	Max. pressure
1	0	250 bar
2	10	250 bar
3	20	300 bar

각각의 단계에 따른 다단 성형의 해석 결과를 Fig. 4에 표시하였다. 또한 성형성을 비교하기 위하여 동일한 계단형 컵 형상에 대해 단일 성형으로 해석한 결과를 Fig. 5에 표시하였다.

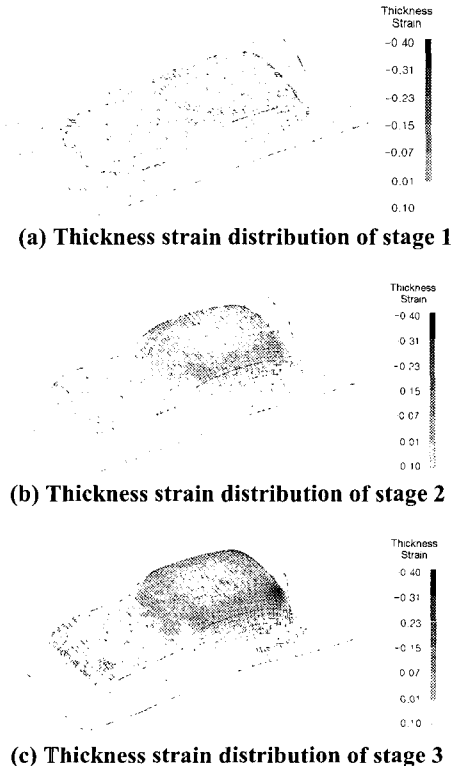


Fig. 4 Thickness strain distribution of the multi-stage hydroforming process

Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 계단형 컵 형상을 단일 성형할 경우 약 220bar에서 깊은 단의 코너부위에서 두께 변형률이 급격히 증가하여 파단됨을 알 수 있다. 이러한 파단 현상은 Fig. 7에 표시한 성형한계곡선(FLC)을 통해서도 알 수 있다. 이는 제품의 형상에 따른 기하학적 구속으로 인해 코너부위에서는 재료의 유입이 거의 발생하지 않으나 최종 성형 압력에서는 코너부위에서 스트레칭(stretching)이 발생하여 두께가 급격히 얇아지기 때문이다.

형상에 따른 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제안된 다단 성형의 해석 결과(Fig. 4)에서 볼 수 있는 바와 같이 마지막 단계인 3 단계에서 내압을 300bar까지 증가시켜도 파단없이 원하는 형상을 성형할 수 있었다. 이렇게 다단 성형을 통해 재료의 변형을 점진적으로 진행시켜 급격한 두께 변화를 막고 기하학적인 구속을 완화시키는 효과를 거둘 수 있다. 또한, 각 단계에 따라 변형 모드가 다르므로 국소 영역에 집중되는 변형을 전 영역에 걸쳐 균일하게 유도할 수 있다.

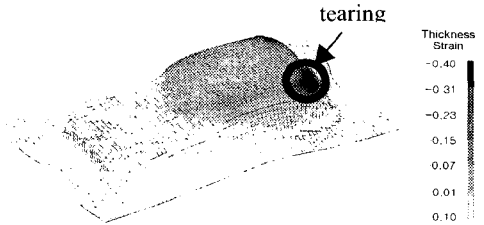


Fig. 5 Thickness strain distribution of the simple hydroforming process

이상의 해석 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 설계된 다단 성형 공정의 향상된 성형성을 검토하여 볼 수 있었다. 또한, 해석 결과에서 살펴본 바와 같이 내압이 300bar일 때 원하는 형상으로 성형할 수 있음을 보았으며 이로부터 유압 펌프의 용량을 결정할 수 있었다.

제안된 다단 성형 공정의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각의 공정에 대한 요소의 변형률 상태를 성형한계도(Forming Limit Diagram)에 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 다단 성형을 할 경우에는 300bar에서도 변형률 분포가 안전한 영역 내에 존재한다. 그러나 단일 성형 시에는 220bar에서도 코너 부위가 이축 인장(bi-axial stretching) 상태로 급격히 두께가 얇아져 파단이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

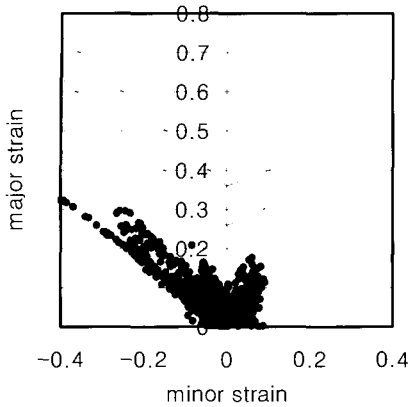


Fig. 6 Forming limit diagram of the stepped rectangular cup in the multi-stage forming process (300bar)

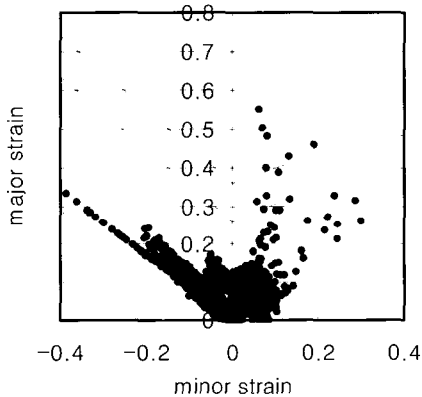
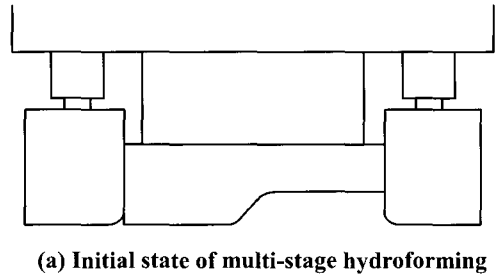


Fig. 7 Forming limit diagram of the stepped rectangular cup in the single stage forming process (220bar)

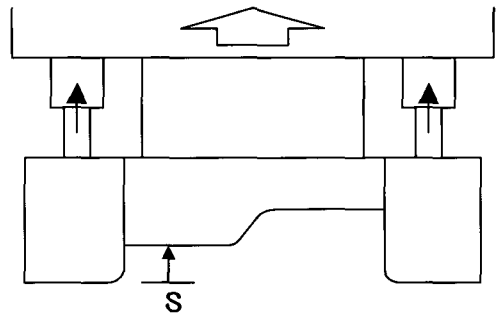
2.3 다단 성형 공정의 설계

앞의 해석 결과를 바탕으로 다단 성형 원리를 구현할 수 있는 분리 금형의 이송시스템과 성형 압력 생성 및 밀폐를 위한 금형을 설계하였다. 분리 금형의 이송을 위해 Fig. 8 과 같이 블랭크 홀더와 프레스의 상부 램의 상대적인 운동을 이용하였다. 상부 램을 위로 이송하게 되면 상부 금형이 전체적으로 이동하지만 이동되지 않아야 할 고정 금형은 블랭크 홀더의 실린더 운동을 통해 위치를 보상에 주게 된다. 즉, 블랭크 홀더의 절대적인 위치는 변화가 없고 블랭크 홀더의 스트로크를 증가시켜 프레스의 상부램을 상승시키게 된다. 상부 금형은 계단형 컵 형상을 다단으로 성

형하기 위해서 Fig 8 의 개략도와 같이 금형을 분리되도록 설계하였으며 하부 금형은 사각형 컵 형상을 단일 성형하는 일체형 금형으로 설계하였다.



(a) Initial state of multi-stage hydroforming



(b) Controlled state of the position of movable die

Fig. 8 Control of stroke (s) by the movable die

본 공정에서는 상부와 하부의 제품을 동시에 성형하므로 두 금형사이의 밀폐가 중요하게 된다. 앞에서 언급하였듯이 성형성을 위해 용접 등의 방식으로 두 박판을 미리 접합하지 않기 때문에 두 박판 사이에 탄성체를 넣어 밀폐를 하였다. 즉, 성형시 플랜지 부위에서 두께 변화가 일어나고 이러한 두께 변화에 의해 내압이 유지되지 않게 된다. 그러므로 이러한 재료의 두께 변화에 적응할 수 있도록 실리콘 및 고무 재료를 사용하여 밀폐 시스템을 구성하였다. 또한, 두 박판 사이에 압력을 작용하기 위해서는 압력관이 두 박판 사이에 설치되어야 한다. 그러나 실리콘 등의 재질은 가공성이 떨어지고 압력관의 고정이 어려우므로 압력관이 고정된 금속 플레이트(plate)를 삽입하고 상,하로 두께 1mm 의 고무 패드(pad)를 삽입하여 밀폐 시스템을 구성하였다.

이렇게 구성된 장치를 프레스에 설치한 모습을 Fig. 9 에 나타내었다. 유압 펌프는 성형을 위한 펌프와 블랭크 홀딩력의 조절을 위한 펌프 등 2 종류가 사용되었으며 각각의 최대 압력은 700bar

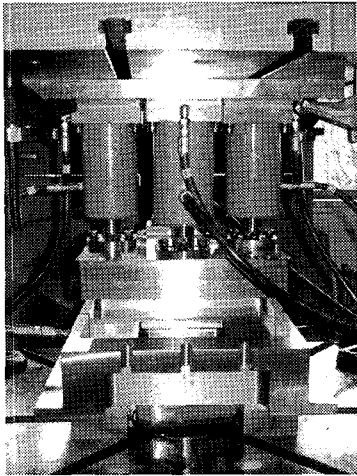


Fig. 9 Set-up for multi-stage hydroforming of sheet metal pair

와 500bar 이다. 블랭크 홀딩력은 최대 100 톤을 부가할 수 있도록 실린더의 직경을 선정하였다.

3. 다단 성형 실험 결과

오일 팬 형상은 단이 있는 형상으로 기존의 성형 공정에서도 파단이나 주름과 같은 많은 결함이 발생하고 있으며 일반적으로 성형하기 어려운 제품으로 인식되어 있다. 이러한 제품에 대해서 본 연구를 통해 개발된 박판 페어의 하이드로포밍 공정에서의 다단 성형 공정의 적용성을 살펴 보았다.

3.1 단일 성형 실험

스트로크(s)를 초기단계에서부터 20mm 로 고정시켜 놓고 단일 성형을 하였다. 이 경우에도 블랭크 홀딩력은 80 톤을 적용하였으며 블랭크는 해석에 사용된 것과 똑같은 재료를 사용하였다. 블랭크의 크기는 260x220mm 의 사각 블랭크를 이용하였다.

이에 대한 실험 결과는 Fig. 10 에 나타내었다. 상형 제품인 계단형 컵 형상의 제품은 실험 시 약 220bar 에서 파단이 발생하였다. 이로 인한 압력 누수로 하형 제품도 220bar 에서 성형이 중지되었다. 본 실험결과는 앞의 해석결과와 상당히 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 계단형 컵 형상의 제품의 경우에 코너 부위에서 파단이 발생하거나 파단 시의 충격으로 코너 부위부터 길게 찢

어지는 형상을 보이고 있다. 밀폐가 이루어지는 범위에서 다양한 블랭크 홀딩력을 가한 후 동일 실험을 수행하였으나 모두 약 220bar 부근에서 파단이 발생하였다. 이로 보아, 계단형 컵 형상을 성형하기 위해서는 새로운 성형 방법이 필요함을 알 수 있다.

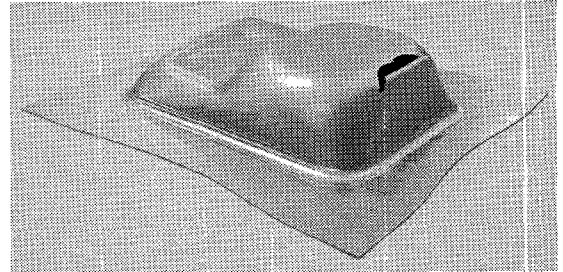


Fig. 10 Stepped rectangular cup formed by simple hydroforming (220bar)

3.2 다단 성형 실험

단일 성형으로는 계단형 컵 형상의 성형에서 300bar 까지 내압을 증가시킬 수가 없었다. 즉, 두께가 코너부위에서 급격히 감소하여 220bar 에서 파단이 발생한 것으로 볼 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 앞에서 제안한 다단 성형 원리에 기초하여 모두 3 단계로 나누어 실험을 수행하였다. 각 단계의 실험조건은 해석조건과 동일하다.

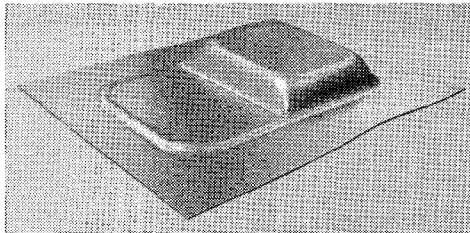
각 단계에 대한 실험 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 상형 급형에 3°의 테이퍼가 적용되었기 때문에 1 단계 성형에서는 해당 높이만큼 공간이 존재하여 완전히 평면이 되지 않는 것을 볼 수 있다. 즉, 평면부에서 약간 볼록해 진 것을 볼 수 있는데 이는 2 단계에서 제거되므로 큰 문제는 되지 않는다.

최종 성형 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 단일 성형시 파단이 발생했던 계단형 컵 제품이 300bar 까지 성공적으로 성형됨을 볼 수 있다. 이는 다단 성형의 경우 재료의 변형을 분산시키고 재료의 유입이 증대되기 때문에 발생하는 결과이다.

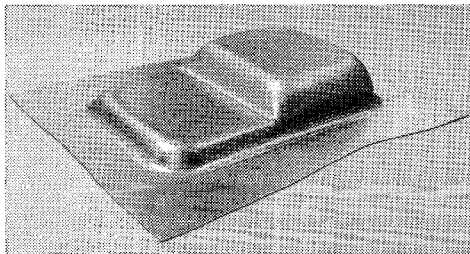
단일 성형에서는 상형 제품의 파단으로 220bar 에서 성형이 중지되었으나 본 다단 성형 공정에서는 상형 제품이 원활히 성형되므로 하형 제품인 사각형 컵도 Fig. 12 과 같이 300bar 까지 성형됨을 알 수 있다.

Fig. 13 에 최종 성형이 끝난 상형 제품의 두께

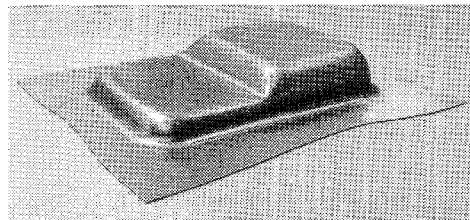
변형률 분포를 비교하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 장축 방향의 중심선을 따라 두께 변형률을 측정하였으며 실험을 통해서 측정한 변형률이 해석 결과보다 다소 작게 측정되었다. 즉, 최대 변형률이 발생한 60mm 의 위치에서는 실험값이 해석값보다 10% 정도 작게 측정되었다. 이 부위는 재료가 90° 로 꺾이면서 최종 성형 압력에서도 코너부위를 충진시키기 위하여 변형률이 증가하는 부위이다.



(a) First stage($s=0\text{mm}$, $p_{\text{max}}=250\text{bar}$)



(b) Second stage($s=10\text{mm}$, $p_{\text{max}}=250\text{bar}$)



(c) Final stage($s=20\text{mm}$, $p_{\text{max}}=300\text{bar}$)

Fig. 11 Stepped rectangular cup formed by the multi-stage sheet pair hydroforming process

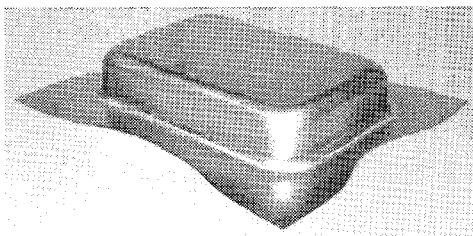


Fig. 12 Rectangular cup formed at the pressure of 300 bar

4. 결론

박판 하이드로포밍 공정에 많은 연구가 진행되면서 공정의 안정화와 성형성 향상에 대한 다양한 접근이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 계단형 컵 형상 등 일반적으로 기하학적인 구속이 많이 발생하는 형상에서 성형성을 향상시키기 위해 다단 성형 공정을 제안하였다.

유한요소해석을 통해 성형성 검증 및 설계 사양을 결정하고 설계된 금형으로 직접 제품을 성형하였다. 기하학적 구속이 큰 오일팬 형상의 제품을 최종 형상으로 제작하기 위해서 본 연구에서는 다단 성형 공정을 제안하였다. 하이드로포밍 공정의 단일 성형으로는 220bar 에서 파단이 발생하였으나 금형을 분리시켜 3 단계로 다단 성형을 하여 300bar 까지 성형함으로써 최종 형상을 제작하였다. 이는 유한요소해석 결과를 바탕으로 변형률을 성형한계곡선에 나타내어 그 효과를 검증하였다.

본 연구를 통해서 분리 금형을 이용한 다단 성형이 성형성을 향상시킴을 보여줬으나 하이드로포밍 공정의 단점으로 지적되는 성형 시간이 더 증가하였다. 이는 자동화를 통해 극복해야 할 과제로 생각되며 상,하 금형간의 밀폐방법에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 생각된다.

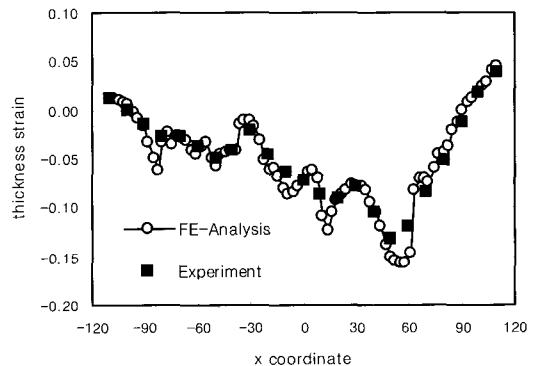


Fig. 13 Comparison of thickness strain distributions between FE-analysis and experiment after the final stage along the major axes of the stepped rectangular cup

참고 문헌

- (1) D.Schmoeckel, C.Hielscher, M. Prier, 1999, Developments and perspectives of internal high

- pressure forming of hollow sections, *Advanced Technology of Plasticity, Vol II, Proceedings of the 6th ICTP*, pp. 1171~1182.
- (2) M.Kleiner, W.Homberg, A.Brosius, 1999, Processes and control of sheet metal hydroforming, *Advanced Technology of Plasticity, Vol II, Proceedings of the 6th ICTP*, pp. 1243~1252.
- (3) S.Bobbert, *Advanced Technology of Plasticity, 1999, Process limits for the hydroforming of sheet metal pairs, Vol II, Proceedings of the 6th ICTP*, pp. 1261~1266.
- (4) P.Hein, M.Geiger, 1999, Advanced process control strategies for the hydroforming of sheet metal pairs, *Advanced Technology of Plasticity, Vol II, Proceedings of the 6th ICTP*, pp. 1267~1272.
- (5) Markus Haussermann, Bruno Losch, Ralf Rieger, Klaus Siegert, 2000, Recent developments in hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 251~258.
- (6) E.v. Finckenstein, M. Kleiner, W.Homberg, E.Szucs, In-Process punching with pressure fluids in sheet metal forming, 1998, *Proceedings of CIRP*.
- (7) T.J.Kim, D.Y.Yang, S.S.Han, 2002, Finite element analysis of the multi-stage hydroforming process of sheet metal, *Proceedings of NUMISHEET 2002*, pp. 337~342.