

탄소중합체를 이용한 다점 박판 성형

박종우*

(2003년 11월 5일 접수)

Multi-Point Sheet Forming Using Elastomer

J. W. Park

Abstract

Recently, instead of a matched die forming method requiring a high cost and long delivery term, a multi-point dieless forming method using a pair of matrix type punch array as flexible dies has been developed. Since the conventional multi-point dieless forming method has some disadvantages of difficulty in precise punch control and high-cost of equipment, a new concept of multi-point dieless forming method combined with an elasto-forming method has been suggested in this study. For optimal selection of elastomers, compression tests of rubbers, polyethylene and foams were carried out together with FEM analysis of the deformation behavior during sheet forming process using a rigid punch and elastomers. Compressive strain was concentrated on the upper central area of the elastomer under the punch, and the rubber exhibited higher concentration of the compressive strain than foams. Two-dimensional curved surface was formed successfully by the multi-point elasto-dieless forming method using an optimal combination of rubber and foam materials.

Key Words : Sheet Forming, Multi-Point Forming, Elastomer Forming, Two-Dimensional Curved Surface, FEM Analysis.

1. 서론

자동차 산업을 중심으로 한 금속 판재 성형은 생산성과 정밀도가 높은 한 쌍의 조합금형(matched die)이 주로 사용되어 왔다. 그러나 조합금형은 가격이 비싸기 때문에 항공기, 철도차량, 선박 등 대형의 금형이 요구되는 산업 분야에는 사용하기 어렵고, 또 금형 디자인과 제조에 장기간이 소요되므로 신제품 개발 기간의 단축에 장애가 될 수 있다. 따라서 금형을 전혀 사용하지 않고도 다양한 형상의 제품을 제조할 수 있는 무금형 박판성형(dieless sheet forming) 기술 개발은 여러 산업계의 오랜 꿈이었다.

무금형 박판성형 기술 중 다수의 금속봉으로 곡면을 만들어 금형 대신 사용하는 다점성형(multi-point forming; MPF)법이 근래 일본, 미국, 중국 등에서 개발되어 일부 분야에서는 실용화가 시작되었다.⁽¹⁻²⁾ 이 방법은 금속봉이나 펀치의 배열만 바꾸면 다양한 모양의 곡면을 만들 수 있기 때문에 선진국에서는 특히, 고가의 대형 성형품이 필요한 항공기, 철도차량, 선박 등의 산업계가 기술개발을 지속해 왔다. 그러나 곡면 형성 후 금속봉을 고정시켜 금형 대신 사용하는 MPF 법은 성형결함의 발생이 잦은 단점이 있어서 아직 복잡한 형상의 성형에는 이용되지 못하고 있다.

최근에는 각각의 금속봉에 위치제어 장치를 부

* 한국과학기술연구원 재료연구부

착하여 연속적으로 곡면을 형성하는 능동형 펀치 방식의 MPF 기술도 개발되고 있다.⁽³⁾ 이 방식은 금속봉을 미리 정해진 곡면 위치에 고정시켜 성형하는 MPF 법에 비해 곡면 형성이 자유롭고 성형 결함의 발생이 적은 장점이 있으나 장비 가격이 고가여서 아직 널리 활용되지는 않고 있다.

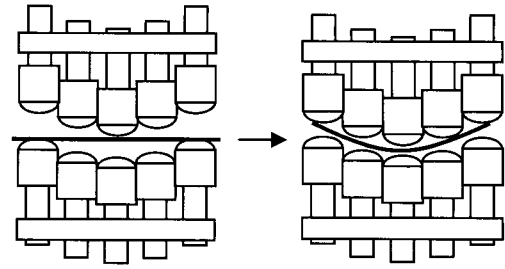
본 연구는 고분자 탄성물질(elastomer; 탄소중합체)과 하나의 금형을 사용하여 성형하는 elasto-forming (EF) 법을 MPF 법과 결합하여 기존 MPF 법의 단점을 극복할 수 있는 새로운 개념의 multi-point elasto-forming (MPEF) 법을 소개하고, 그 응용 가능성을 조사하고자 한다. 이를 위해 5개의 능동형 펀치로 구성된 유압식의 2차원 곡면 성형장치가 개발되었으며, 각종 탄소중합체와 금속판재의 변형특성 실험과 함께 유한요소법(Finite element method; FEM)에 의한 성형해석이 이루어졌고, 이 결과와 개발된 장치를 이용하여 실제 곡면성형이 시도되었다.

2. 다점 무금형 성형의 원리와 특징

2.1 다점 성형

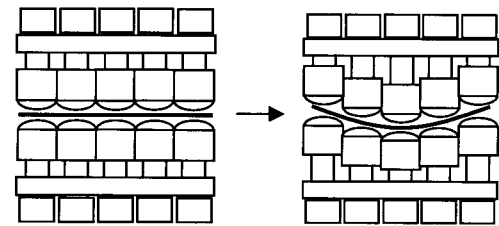
MPF의 기본 원리는 금형을 여러 조각으로 나눈 다음 각 조각의 위치를 조절함으로써 2차원 또는 3차원 곡면을 자유롭게 만들어 기존의 조합 금형 대신 판재 성형에 사용하는 것이다.⁽³⁾ 따라서 일단 다점 성형 장치를 만들면 매년 다른 금형을 만들지 않고도 다양한 형상의 판재 성형이 가능하다. 성형 가능한 곡면 형상과 정밀도는 금형을 몇 조각으로 나누었는가에 크게 좌우된다. 실제 MPF 장치는 상하 양면에 다수의 금속봉이 matrix 형태로 배열되어 있으며, 금속봉의 선두는 반구 곡면체에 가까운 형상을 하고 있다. 금속봉은 외부 동력에 의해 Fig. 1과 같이 미리 정해진 위치로 이동한 다음 고정시켜 사용하는 수동식과, Fig. 2와 같이 각각 위치제어 장치가 부착되어 연속적으로 이동하면서 성형하는 능동식이 있다.⁽⁴⁾ (능동식 금속봉을 이후 펀치라 명명함).

수동식은 가격이 저렴하지만 곡면 형성에 상당한 시간이 소요되고, 금속봉의 돌출된 곡면과 성형판재가 닿는 부분에서 성형결함이 발생하기 쉬운 단점이 있다. 반면에 능동식은 수동식보다 곡면 형성이 신속하고, 성형 초기 단계부터 모든 펀치가 성형 판과 닿은 상태로 동시에 움직이기 때문에 성형결함 발생이 적다. 그러나 능동식은 각



(a) Before forming (b) During forming

Fig. 1 Fixed type multi-point forming process



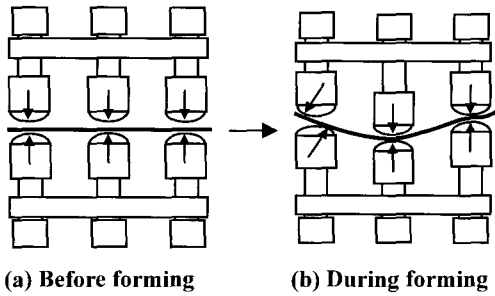
(a) Before forming (b) During forming

Fig. 2 Active type multi-point forming process

각의 펀치에 고가의 위치제어 장치가 부착되기 때문에 장비 가격이 매우 비싼 단점이 있다.

또한 능동식은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 성형된 판재가 평탄한 상태에서는 모든 상하 펀치의 간격이 동일하고, 상하 접촉점이 수직선상에서 서로 일치하지만 판재가 성형되기 시작하여 경사면이 되면 상하 펀치와 판재의 접촉점이 동일 수직선상으로부터 벗어나 서로 어긋나기 때문에 판재가 성형되는 동안 그 위치와 간격이 시시각각 변한다. 특히, 판재의 상하면이 모두 펀치와 접촉 상태이므로 특정한 펀치에 높은 압력이 가해지거나 위치가 조금만 어긋나도 판재에 펀치 자국이나 주름이 발생하기 쉽다. 따라서 성형 중 연속적으로 변하는 상하 펀치의 위치와 간격을 정확하게 제어하기 위해 고도의 기술이 필요하다.

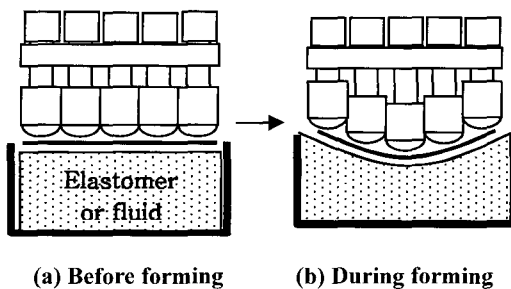
MPF 장치로 성형 결함을 줄이고 성형 정밀도를 높이기 위해서는 단위면적당 펀치 수가 높아야 한다. 그러나 펀치 밀도가 높아질수록 펀치 사이의 간격이 좁아서 각각의 펀치에 위치 제어 장치를 부착할 공간이 부족하므로 자동화가 어려워진다. 뿐만 아니라 펀치 수의 증가에 따라 장비의 가격은 더욱 비싸지기 때문에 이 방식은 대형의 박판 성형에 이용하기가 쉽지 않다.



(a) Before forming (b) During forming
Fig. 3 Change in contact points and formation of surface defects

2.2 다점-탄성체 성형

MPEF는 MPF와 EF 방식을 결합하여, Fig. 4와 같이, 기존의 MPF 방식에서 마주보는 양쪽 금속봉이나 펀치 배열 중 한쪽을 탄소중합체(유체도 가능)로 대체한 것이다.⁵⁾ 탄소중합체는 신축이 자유롭고, 반대편의 펀치 움직임에 따라 위치가 자유로이 변하므로 별도의 위치 제어를 하지 않아도 펀치와 동일한 곡면이 자연스럽게 만들어진다. 그러므로 소재 양면의 금속봉이나 펀치 위치를 동시에 제어해야 하는 기존의 MPF 방식과는 달리, 위치 제어가 단순하고 용이하다. 또한 성형 소재 양면에서 점접촉을 하여 국부적으로 힘이 집중되는 MPF와는 달리 MPEF는 소재 한 면이 면접촉을 하기 때문에 성형 중 힘이 골고루 분산되어 자국이나 주름 같은 성형 결함이 잘 발생하지 않는 장점이 있다.



(a) Before forming (b) During forming
Fig. 4 Multi-point elasto-forming process

한편 딥드로잉(deep drawing)과 같은 성형이 불가능한 기존의 MPF 방식과는 달리, MPEF 방식은 Fig. 5와 같이 딥드로잉뿐만 아니라 금형을 사용한 성형도 가능하므로 다기능, 다목적으로 활용할 수 있다. 이 때 금형은 EF처럼 단일 금형이므로 금형 가격이 절감되고, 제작기간이 단축된다. 또한

MPEF 장치 중 일부 펀치에 blank holder를 부착하여 소재에 적절한 압력을 가하면 stretch forming 효과도 얻을 수 있고, 딥드로잉 시에는 소재가 좁은 금형으로 들어갈 때 주름이 발생하는 것을 방지할 수도 있다. 그 외에도 MPEF는 MPF 장치에 비해 금속봉이나 펀치 수를 반으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 탄소중합체는 펀치 가격의 1/100 이하이기 때문에 제작비가 40% 이상 저렴하다.

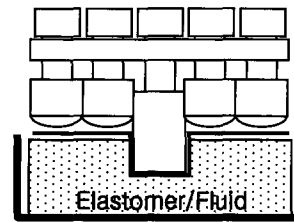


Fig. 5 Deep drawing by multi-point elasto-forming method

3. 실험 방법

3.1 금속과 탄소중합체의 인장, 압축 특성

다점-탄성체 성형은 금속판재가 탄소중합체와 함께 변형되는데, 금속은 주로 소성변형을 하며, 탄소중합체는 탄성변형을 하기 때문에 이 두 소재가 동시에 변형될 때는 탄성과 소성이 혼합된 변형을 하게 된다. 또한 금속과 탄소중합체는 다양한 종류가 있고, 재료마다 변형특성이 다르므로 이러한 변형특성의 차이는 다점-탄성체 성형 시스템의 최적 설계와 성형 공정을 결정하는 주요 인자가 될 수 있다. 여기서는 알루미늄 합금과 스텐레스강 등의 금속재료와 폴리에틸렌(PE), 고무 및 다공성 고분자 탄성체(foam) 등의 탄소중합체를 대상으로 변형특성을 조사, 비교하여, FEM 성형해석과 실제 성형실험에 기초자료로 활용하고자 한다. 고무는 천연고무와 styrene-butadiene이 각각 45:56과 46:54의 비율로 혼합된 흑색과 황색의 2종류가 사용되었다.

MPEF에서 예상되는 주된 변형 방식과 재료의 형태를 고려하여 금속판재는 인장특성, 탄소중합체는 압축변형 특성이 조사되었다. 금속판재의 인장시험은 표점거리 50mm인 표준시편과 인스트론 인장시험기를 사용하여 실험하였다. 탄소중합체는

정밀 압축실험 장비인 Thermecmator-Z 시험기에서 가로와 세로가 31mm, 두께 10mm인 시편을 지름 20mm인 압축봉으로 1/초의 속도로 눌러 실험하였다. 단, 다공성 고분자 탄성체는 압축강도가 너무 낮아서 소형시편을 사용해야 하는 Thermecmator-Z로는 압축 하중의 측정이 불가능하여 시마쯔 인장-압축시험기에서 측정 가능한 하중이 나오도록 가로, 세로 각각 200mm이고 두께 10mm인 판을 10장 겹쳐 전체 면적을 눌러 압축실험 하였다.

3.2 FEM 성형해석 및 박판 성형실험

금속 박판과 탄소중합체의 성형 거동을 조사하기 위하여 유한요소법(FEM)으로 모의 성형 해석이 시도되었다. 성형 해석은 ABAQUS를 사용하였다. 이 때 성형은 평면변형 상태에서 두께 1mm, 폭 100mm인 금속판을 두께 150mm, 폭 300mm인 탄소중합체 위에 놓고 지름 100mm인 U자형 펀치로 마찰 없이 30% 압축한다고 가정하였다. 성형 해석에서는 주로 금속판과 탄소중합체의 종류에 따른 변형률과 주응력 분포의 차이 및 mesh의 변형양상 등이 조사되었다.

한편, 박판성형 실험을 위해 Fig. 6과 같이 유압 구동식의 펀치 5개가 50mm 간격으로 나란히 배열된 성형장치가 제작되었다. 전체 시스템은 컴퓨터 제어부, 유압 공급부 및 성형부로 구성되어 있다. 성형부는 다시 상부의 다축 제어부와 하부의 탄소중합체로 이루어지며, 필요시 탄소중합체는 유체로 대체할 수 있게 하였다. 다축 제어부는 서보 밸브와 5개의 펀치로 구성된다. 펀치의 최대 변위는 60mm, 최대 속도는 33mm/초이며, 이웃끼리 서로 밀착된 펀치 머리의 곡면 반경은 50mm이다. 유압 구동식 펀치 블록은 유압실린더, 피스톤 봉 내장형 변위센서로 구성되어 있다.

성형하려는 형상은 컴퓨터에 입력되어 다축 성형부로 전달되며, 여기서 서보 밸브를 통해 펀치가 이동하면서 실시간으로 변하는 위치신호를 컴퓨터로 보내어 위치가 정밀하게 제어된다. 다축 펀치는 초기에 옆으로 나란히 배열되어 있다가 제공된 위치 신호에 따라 점진적으로 이동하면서 탄소중합체나 유체 충전 bed 위에 놓인 금속판재를 변형시켜 최종 형상으로 성형한다.

곡면성형 실험용 금속 박판은 두께 1mm, 길이 250mm, 폭 40mm이고, 항복강도와 인장강도가 각각 129와 143MPa인 A1100 합금 판재가 사용되었고, 탄소중합체는 가로와 세로가 50mm, 두께가 10mm인

고무와 다공성 고분자 탄성체를 폭, 길이, 깊이가 각각 60, 260, 170mm 인 용기 속에 고무가 제일 아래쪽으로 가도록 적층하였다.

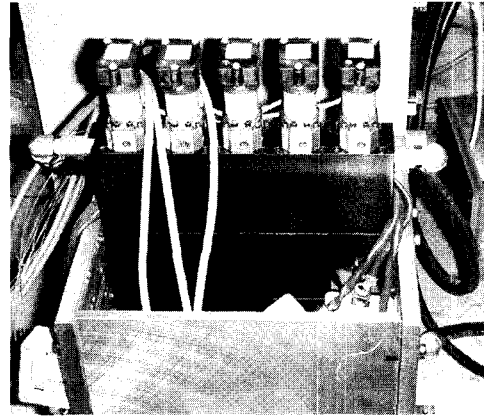


Fig. 6 Multi-point elastomer forming apparatus with 5×1 punch array

4. 실험 결과 및 검토

4.1 탄소중합체와 금속판재의 변형 특성

Fig. 7은 탄소중합체인 고무, PE 및 다공성 고분자 탄성체의 압축변형 특성을 비교한 것이다. 탄소중합체는 보통 30%의 압축 변형까지는 내부 조직이 큰 손상을 받지 않고 외부응력 제거 후 원상복구되므로⁽⁶⁾ 압축변형량은 30%로 하였다. 실험 결과를 보면 대부분의 탄소중합체는 압축되는 동안 변형량의 증가에 따라 변형응력이 거의 직선적으로 증가하고, 압축된 시편이 원상태로 되돌아가는 과정에서는 복구 초기에 변형응력이 크게 감소한 후 점차 완만하게 감소하다가 마지막 단계에서 변형응력이 초기값에 접근하여 전체 변형 곡선은 단혀진 긴 고리 형태를 이룬다. 즉, 탄소중합체는 압축과 복구과정 전체로는 탄성변형을 하지만 탄성한계 내에서 인장과 복구과정의 변형응력이 일치하는 금속과는 달리 동일 변형량에서 압축응력이 복구응력보다 높다.

탄성률과 압축강도는 PE가 가장 높고, 다공성 고분자 탄성체가 가장 낮으며, 고무류는 그 중간이다. 또한 탄성률과 압축강도가 높은 재료일수록 압축 응력과 복구응력의 차이가 커서 곡선 loop의 내부 면적이 넓다. loop의 내부 면적은 압축-복구 과정에서 재료 내부 손상과 관련된 에너지 손실

량에 해당한다.⁽⁷⁾ 즉, 압축강도와 에너지 손실은 PE가 가장 크고, 다공성 고분자 탄성체가 가장 작으며, 그 중간인 고무류는 천연고무의 비율이 낮은 흑색고무가 황색고무보다 약간 높다.

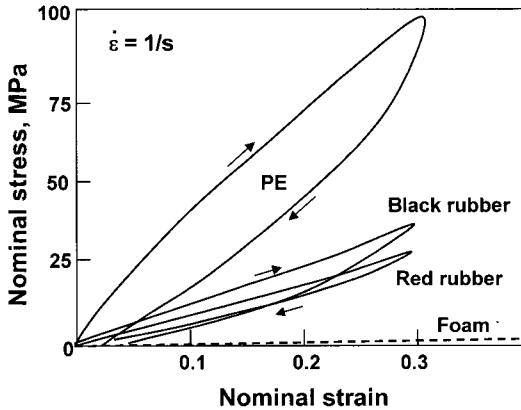


Fig. 7 Flow curves of various elastomers

Fig. 8은 A1100과 A5083 알루미늄 합금 및 304 스테인레스강의 인장곡선이다. A1100 알루미늄은 항복 후 약간의 가공경화를 거쳐 거의 일정한 수준의 유동응력에 도달하고, A5083 알루미늄 합금은 보다 큰 가공경화를 거쳐 최대 응력에 도달하며, 304 스테인레스강은 항복 후 긴 가공경화로 인해 항복강도에 대한 인장강도의 비가 매우 높다.

한편, 금속과 탄소중합체의 변형거동을 비교해 보면 큰 차이가 있어서, 금속은 탄성변형량이 1% 이하인 반면 탄소중합체는 수십% 또는 그 이상에 달한다. 따라서 EF(elasto-forming)에서처럼 금속과 탄소중합체가 동시에 변형되면 금속은 소성변형, 탄소중합체는 탄성변형이 대부분의 변형을 지배하게 된다. 한편, 유동응력을 비교해 보면, 금속은 변형 초기 탄성한계에 해당하는 1% 이하의 변형량에서 변형응력이 급격히 증가하다가 이후 소성변형 단계에서 완만하게 증가하는 반면에 탄소중합체는 수십% 또는 그 이상의 변형량까지 탄성변형을 하면서 응력이 완만하게 증가한다. 이 때 탄성계수는 금속이 $10^4 \sim 10^5$ MPa이고, 탄소중합체는 0.1~300MPa로서 탄소중합체가 금속에 비해 매우 작다. 변형량이 0.3까지 증가하여도 탄소중합체의 변형응력은 금속에 비해 매우 낮아서 다공성 고분자 탄성체는 금속의 수백~수만분의 1, 고무류는 수십분의 1에 불과하다.

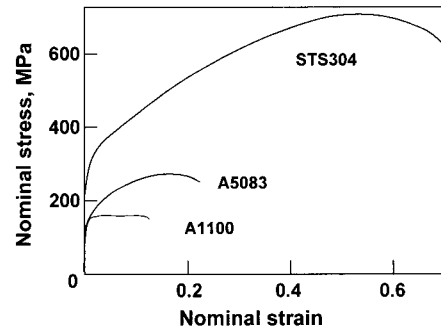


Fig. 8 Flow curves of various metals

4.2 박판-탄소중합체 성형 해석

탄소중합체를 이용한 금속판재의 MPF 성형은 기존의 MPF나 EF와는 성형 공정이 상당히 다르므로 FEM을 이용한 모의 성형해석은 성형 공정의 요소 기술 개발에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다.

Table 1은 모의 성형 해석에 사용된 재료상수로써, 금속판재는 150MPa의 항복강도까지는 영률이 E인 탄성변형, 그 후는 가공경화률이 E_p 인 소성변형을 하며, 탄소중합체는 전 변형구간에서 각 소재마다 일정한 기울기를 갖는 탄성변형을 한다고 가정하였다. 이를 변형방정식으로 나타내면 아래 식 (1~3)과 같다.

Table 1 Material constants for FEM analysis

Material		E (MPa)	E_p (MPa)	σ_y (MPa)	ν
Metal	Al	7.05×10^4	500	150	0.34
	Fe	2.13×10^5	90	150	0.28
Elastomer	Rubber	50			0.49
	Foam	0.05, 5			0.10

$$\text{금속: } \sigma = E_m \epsilon \text{ when } \epsilon < \epsilon_y \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_y + E_p (\epsilon - \sigma_y / E) \text{ when } \epsilon \geq \epsilon_y \quad (2)$$

$$\text{탄소중합체: } \sigma = E_c \epsilon \text{ when } \epsilon < \epsilon_p \quad (3)$$

여기서 E_m 은 금속의 영률, σ_y 는 항복응력, E_p 는

소성변형 영역에서의 가공경화율이고, E_c 는 탄소중합체의 탄성계수이다. Poisson비 ν 는 금속인 Al과 Fe는 각각의 대표적인 값인 0.34와 0.28로 하고, 탄소중합체인 고무와 다공성 고분자 탄성체는 각각 0.49와 0.1로 하였다. ν 가 0.25이면 완전 등방성의 탄성체이지만 대부분의 금속은 ν 가 0.33에 가깝다.⁽⁷⁾ 또한 고무처럼 부피 변화가 거의 없는 탄성변형 재료는 ν 가 0.5에 가깝고, 다공성 고분자 탄성체처럼 부피 변화가 큰 재료는 ν 값이 매우 작다.⁽⁸⁾

Fig. 9는 평면변형 상태에서 두께 1mm, 폭 300mm인 Al판을 두께 150mm, 폭 300mm인 고무와, 탄성계수가 고무의 1/1000인 다공성 고분자 탄성체 위에 놓고, 선두 곡면의 지름이 100mm인 U자형 강철대로 30% 압축할 때의 변형거동을 유한요소법으로 해석하여 수직방향의 진변형량, ϵ_{yy} 의 크기 분포를 비교한 것이다. 여기서 고무와 다공성 고분자 탄성체의 ϵ_{yy} 최소값은 각각 -0.495 (39%), -0.565 (43%)이고, 최대값은 0.0732 (7.3%), 0.0263 (2.6%)으로서 강철대 아래 부분은 약 40%의 큰 압축변형, 다른 부분은 3~7%의 작은 인장변형이 나타난다.

이 그림으로부터 고무의 압축변형은 철판의 약간 아래 부분에 집중되고, 그 좌우측 및 고무판 양 측면에는 작은 인장변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 다공성 고분자 탄성체는 압축변형의 집중 부위가 좌측의 고무와 유사하게 상중양부에서 발생하지만 작은 인장변형이 생기는 부위는 우상단으로 이동하여 여기서부터 상중양부의 변형 집중부까지는 상당한 거리에 걸쳐서 거의 일정한 간격으로 변형량이 증가하는 특징을 보인다. 또한 고무는 최대 압축변형과 최대 인장변형 지점 간의 거리가 가까워 중심에서 좌우 양쪽 방향으로 변형량의 기울기가 급하지만 다공성 고분자 탄성체는 두 지점 간의 거리가 멀어서 변형량이 완만하게 변한다. 따라서 Al 판의 변형은 고무에서는 강구 아래에 집중되고 다공성 고분자 탄성체에서는 전면에 걸쳐 비교적 완만하다.

이러한 결과는 탄소중합체의 압축강도와 Poisson비, 즉 압축성과 관련이 있다고 생각된다. 즉, 압축해도 부피변화가 거의 없는 고무에 비해 다공성 고분자 탄성체는 부피가 쉽게 줄어들어 전체적으로 압축이 용이하므로 응력 집중이 완화된다.

Fig. 10은 앞서의 다공성 고분자 탄성체보다 탄

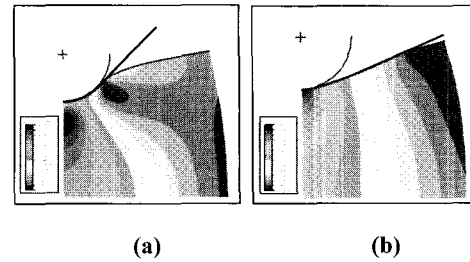


Fig. 9 Strain distribution during compression of a aluminum sheet on a (a) rubber, and (b) soft foam

성계수가 100배 높은 다공성 고분자 탄성체 위에 두께 2mm, 폭 300mm인 철판을 놓고 30% 압축할 때의 변형특성을 해석한 결과이다. 좌측 그림은 제2주응력인 σ_2 의 크기 분포이고, 우측 그림은 변형된 mesh의 형태이다. 여기서 제2주응력과 mesh의 압축변형은 상기 해석 결과와 마찬가지로 탄소중합체의 중앙 상부에 집중되며, 중심으로부터 좌우 측면으로 멀어질수록 압축변형이 작은 것을 알 수 있다. 금속판이 변형되는 정도는 앞의 고무와 저탄성계수 다공성 고분자 탄성체의 중간쯤에 해당한다.

탄소중합체는 변형이 반복됨에 따라 내부 조직이 점차 손상되는데, 변형량이 클수록 손상의 정도가 심해지며, 특히 30% 이상 변형될 때 많은 손상을 받는다.⁽⁶⁾ 본 해석 결과는 변형량이 집중되는 상중양부에서 탄소중합체의 손상이 가장 빠르게 진행될 수 있음을 보여준다. 따라서 손상이 심한 상 중양부만 교체한다면 나머지 부분은 장기간 그대로 사용이 가능하다. 공업적인 관점에서 탄소중합체의 위치에 따른 손상률의 차이를 고려하여 교환주기를 다르게 하면 원가는 낮추면서 생산성은 높일 수 있다.

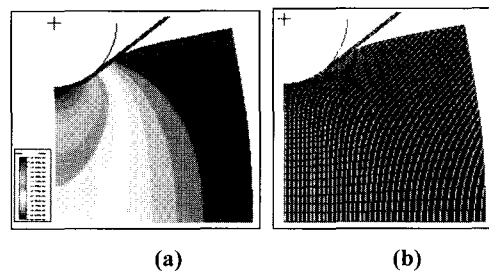


Fig. 10 Forming behavior of a steel sheet on a hard foam showing (a) distribution of a principal stress of σ_2 , and (b) flow pattern

4.3 다점-탄성체 박판 성형

각 종 탄소중합체와 금속판재의 물성실험 및 성형해석을 통해 탄소중합체는 그 종류와 특성에 따라 금속판의 변형에 큰 차이를 가져오는 것을 알 수 있었다. 그러므로 탄소중합체와 펀치를 이용하는 MPEF에서는 용도에 따라 적절한 탄소중합체의 선정이 요구된다. 즉, 탄성계수와 Poisson 비가 큰 탄소중합체는 딥드로잉과 같이 금속판에 국부적으로 큰 힘과 변형을 가할 때 유용하며, 탄성계수와 Poisson 비가 작은 탄소중합체는 금속판의 넓은 면적에 힘을 분산시켜 완만한 경사면으로 변형시킬 때 효과적이다. 또한 여러 가지 서로 다른 특성을 갖는 탄소중합체를 적절히 조합하면 필요한 곳에만 큰 힘을 가하면서 금속판을 다양한 형상으로 변형시킬 수 있다.

Fig. 11은 A1100 알루미늄 판재를 고무판 위에서 지름 8mm인 반구형 head가 부착된 펀치로 성형한 예로서 성형품은 반구 곡면의 형상이 잘 드러나 있다. 이 성형은 앞서의 성형해석에서 금속판을 고무 위에 놓고 펀치로 누를 때 펀치 head에 집중적인 힘과 변형이 가해지는 성질을 이용한 것이다.

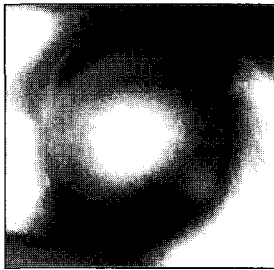


Fig. 11 Hemisphere forming using rubber and A1100 aluminium sheet

Fig. 12는 본 연구에서 개발한, 지름 50 mm인 곡면 head의 펀치 5개가 일렬로 배치된 MPEF 장치를 사용하여 A1100 알루미늄 판재를 성형한 예이다. 이 성형에서는 변형량이 큰 가운데 부분에 약 1:2의 비율로 고무 위에 다공성 고분자 탄성체를 적층하여 아래로 블록하게 성형하였다. 그림에서 보는 바와 같이 성형품의 표면은 펀치 자국이 뚜렷하여 고무와 다공성 고분자 탄성체의 조합이 적절하지 않음을 알 수 있다. 이것은 AI 판재가 아래 방향으로 가장 많이 변형되는 중심부에 적

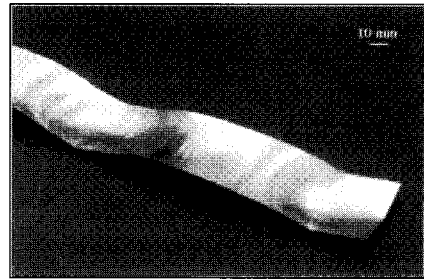


Fig. 12 A1100 aluminium sheet formed by MPEF method. Large defects of indents are noted on the surface

층되어 있는 고무로 인해 펀치 머리 부분에 지나치게 큰 압축응력이 작용한 결과이다.

따라서 이번에는 Fig. 13과 같이 AI 판재의 성형이 위로 블록하게 되도록 함으로써 가운데 부분에 큰 힘이 걸리지 않도록 하였다. 또한 각 펀치마다 고무:다공성 고분자 탄성체의 적층비가 중앙에서는 약 2:1, 가장자리는 1:2, 중앙과 가장자리 사이에서는 1:1이 되게 하여 탄소중합체의 반발력이 보다 균일하게 작용하도록 하였다. 성형 결과, 성형품의 표면은 펀치 자국이 거의 없이 부드러운 곡면을 형성하고 있다. 이러한 성형결과는 성형하려는 곡면의 형상에 따라 탄소중합체의 종류와 조합비를 적절히 선택함으로써 새로 제안된 MPEF 방식의 곡면 성형이 가능함을 보여준다.

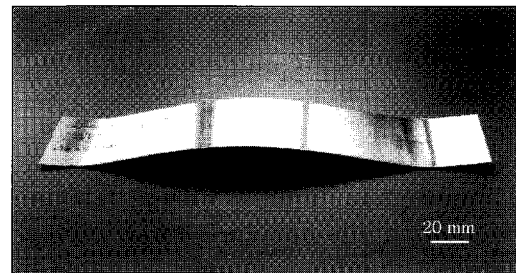


Fig. 13 Curved surface formed successfully by MPEF method

5. 결론

(1) MPF와 EF 방식을 결합한 신개념의 MPEF법이 고안되어 성형해석과 실험을 통해 새로운 방식의 박판성형 가능성이 확인되었다.

(2) 고무는 펀치와 접촉하는 금속판 아래의 상중양부에 압축변형이 집중되고, 그 좌우측 및 아래 부분은 약간의 압축변형 또는 인장변형이 생길 수 있다.

(3) 다공성 고분자 탄성체도 고무처럼 상중양부에 압축변형이 집중되지만 고무에 비해 그 정도가 크지 않으며, 상중양부로부터 측면까지 변형량이 보다 완만하게 감소한다.

(4) 고무처럼 탄성계수와 Poisson 비가 큰 탄소중합체는 금속판에 국부적으로 큰 변형을 가할 때 유용하며, 다공성 고분자 탄성체처럼 탄성계수와 Poisson비가 작은 탄소중합체는 완만한 경사면의 성형에 효과적이다.

후 기

본 연구는 KIST의 기관고유사업으로 시작되어, 현재 MOST의 국제공동연구사업으로 진행되고 있으며, 국제공동연구의 상대국 책임자로서 많은 도움을 주고 있는 중국 길림대의 이명철 박사에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) D. F. Walczyk, J. Lakshmikanthan and D. R. Kirk,

1998, "Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels", *J. Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 287~296.

(2) M. Y. Demeri, 2001, "Key technologies for manufacturing and processing sheet materials: a global perspective", *JOM*, Vol. 53, Feb., pp. 33~36.

(3) M. Li, Y. Liu, S. Su and G. Li, 1999, "Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 87, pp. 277~280.

(4) M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui and Q. G. Yan, 2002, "Multi-point forming technology for sheet metal", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 129, pp. 333~338.

(5) 박종우, 2002, "금속 판재 성형 기술의 진보", *한국소성가공학회지*, 제11권 제3호, pp. 223~230.

(6) "Metals Handbook, Forming and Forging", Vol. 14, 9th edition, 1988, ASM, Metals Park, Ohio, pp. 605~615.

(7) G. E. Dieter, 1976, "Mechanical Metallurgy" 2nd ed., McGraw-Hill, Tokyo, pp. 49~51, 78.

(8) Hibbitt, Karlson, Sorensen, 1997, "Modeling materials with ABAQUS", Hibbitt, Karlson & Sorensen Inc., L4, L8