

균일압력 유도에 의한 꺾임 구조를 가진 미세주름 박판구조물 성형을 위한 고무성형 공정연구

김민훈* · 박상후**† · 정호승*** · 조종래**** · 하만영*

* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소/기계공학부,
*** 롤스로이스-부산대 대학기술센터, **** 한국해양대학교 기계정보공학부

Investigation of a Novel Rubber-Forming Process Inducing Uniform Surface Pressure for the Fabrication of a Thin Bent Plate with Corrugated Structure

Min Hoon Kim*, Sang Hu Park**†, Ho Seung Jeong***, Jong Rae Cho**** and Man Yeung Ha*

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** ERC/NSDM, School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

*** Rolls-Royce PNU UTC,

**** School of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime Univ.

(Received February 23, 2011 ; Revised May 18, 2011 ; Accepted May 19, 2011)

Key Words: Sheet Metal Forming(박판성형), Rubber Forming(고무성형공정), Mooney-Rivlin Function(무너리블린 함수), Corrugated Structure(주름구조)

초록: 주름구조를 가지는 박판구조물은 비행기, 자동차, 전자제품 등의 다양한 용도의 열교환기로 사용된다. 이러한 주름구조를 가지는 박판구조물의 경우 대량생산을 위하여 박판소성가공 공정으로 제작하게 되는데 꺾임 각을 가지는 주름구조를 형성하는 것은 매우 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 정확한 주름구조를 형성하기 위하여 일정한 압력을 박판의 전면에 효과적으로 미칠 수 있도록 새로운 고무성형공정을 제안한다. 본 연구에서 제안한 공정을 검증하기 위하여 우선 유한요소해석을 통해 고무성형공정 변수를 최적화하였다. 그리고 최적화한 고무성형공정을 이용하여 꺾임구조와 미세주름구조를 가지는 박판을 제작함으로써 본 연구에서 제안한 공정이 목표로 하는 박판의 성형에 효과적인 공정임을 검증하였다.

Abstract: Thin sheets with a corrugated structure are generally used for the fabrication of heat exchangers for electronics, airplanes, and vehicles. However, it is difficult to fabricate corrugated structures, especially those with a bent angle, using the conventional stamping process because of its intrinsic formation mechanism. We propose a novel rubber-forming process for the effective pressing of the both tilted sides of a plate under the same pressure to form exact corrugated shapes. We use finite element analysis and experiments to study the rubber-forming process parameters, and we evaluate the maximum allowable bent angle for high-quality formation. We show that the proposed method is effective for the fabrication of bent plates with low cost.

1. 서론

박판 금속 성형공정은 금속 판재를 이어 붙임 없이 소성변형에 의하여 필요한 형상으로 성형하는 공정으로 비교적 복잡한 형상의 제품을 제작할 수 있다. 이 공정은 저렴한 소재의 가격, 대량생산성, 제품의 높은 비강도 및 높은 정밀도 등의 장점을 가지고 있어 다양한 산업분야에서 폭

넓게 이용되고 있다. 주요 박판성형제품은 비행기 부품, 자동차의 차체 및 부품, 가전제품의 하우징, 주방기기에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다. 이 중에서 특히 판형 열교환기는 두께가 얇고 복잡한 표면구조를 가지는 박판구조물이며, 여러 겹의 주름구조가 있는 전열판을 포개어 설치하여 전열판들 사이로 유체가 서로 교대로 흐르게 하여 열교환을 하게 한다.⁽¹⁾ 이러한 주름구조가 있는 전열판은 난류를 유발함으로써 전열효율을 높인다. 판형 열교환기의 전열효율을 높이

† Corresponding Author, sanghu@pusan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

기 위해서 전열판의 주름구조가 깊고 복잡한 형상을 제작할 수 있는 박판성형 기술개발이 필요하다.

기존의 상하금형을 이용한 스탬핑(stamping) 가공으로 평면 박판에 주름구조만 제작하는 것은 가능하지만, 일정한 깊이의 주름구조 형성과 동시에 평면의 수직방향(out-of-plane)으로 꺾임 구조를 갖는 박판을 제작하는 것은 어렵다. 꺾임 구조와 일정한 깊이의 주름구조를 같이 형성하기 위해서는 박판의 전면 표면을 따라 일정한 압력이 부가되어야 하는데, 상하 금형의 운동을 이용한 기존의 스탬핑 공정에서는 상하 방향으로만 변형하중이 전달되어 꺾임 구조를 가지는 경우 정확한 형상제작이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 꺾임 구조와 일정한 깊이의 주름구조를 한 번의 공정으로 제작하기 위하여 금형과 고무를 함께 사용하는 고무성형공정(rubber forming)을 이용하여 꺾임구조를 가진 박판구조물을 성형하고자 한다.

일반적인 고무성형공정이란 펀치 역할을 하는 성형다이(die)를 프레스의 하부에 고정하고 프레스의 상부 슬라이드에는 두꺼운 고무 블록을 장착하여 프레스의 상부 슬라이드를 하강시켜 고무가 프레스 하부의 성형 블록을 감싸 박판 전면에 균일한 압력이 전달되도록 하여 박판을 성형하는 공정으로 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.⁽²⁾ 그러나 이러한 경우 고무 펀치에 의해 성형다이에 주는 압력이 균일하지 못하여 형상불량이 생기거나 또는 국부적인 과도한 압력차에 의하여 고무 블록의 수명이 짧아져서 생산비용이 올라가는 경우가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 기존의 고무성형공정을 개선하여 평탄한 고무 블록 대신에 균일면압을 유도하는 특정한 형상을 가진 고무 펀치를 이용하여 꺾임 구조와 일정한 깊이의 미세주름구조를 가지는 박판을 효과적으로 제작하고자 한다. 또한 유한요소해석을 통하여 박판의 전면에 가장 균일한 수직 하중을 전달할 수 있는 최적의 고무 펀치형상을 제안하고, 꺾임 각에 따라 박판에 미치는 압력분포를 비교하였다. 이러한 공정변수 최적화 과정을 통해 얻어진 결과를 이용하여 실제 실험적 장치를 구성하고 두께 100 μm 의 꺾임 구조를 가진 박판 구조물을 성형하여 개발된 공정의 유용성을 평가하였다.

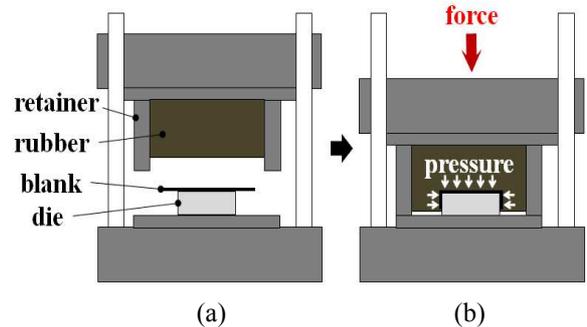


Fig. 1 Conventional procedure of rubber forming; (a) experimental rig setup, and (b) perpendicular load on die surface induced by the compressed rubber punch

2. 고무 펀치 재료평가

2.1 고무 물성 시험

고무성형공정에 사용할 고무는 압축력에 의하여 박판을 성형시킨 후 본 상태로 되돌아와야 반복적으로 박판성형을 할 수 있으므로 우수한 탄성력을 가져야 한다. 실리콘 고무는 어떤 형태의 다른 탄성체보다도 일반 범용으로 널리 쓰이고 있으며 높은 신뢰성과 화학적 안정성을 가지고 있어 본 연구에서도 고무 펀치의 소재로 사용하였다. 고무 펀치의 물성은 기본적으로 실리콘 고무의 경도에 따라 실험적 방법을 통하여 5가지 종류의 실리콘 고무 특성을 평가하였다.

고무의 기계적 물성을 결정하기 위해서는 일반적으로 단축인장(uniaxial tensile test), 단축압축(uniaxial compression test), 순수전단(pure shear), 이축 인장시험(biaxial tensile test) 등의 다양한 방향별 특성을 평가하게 된다. 그러나 본 연구에서는 시험의 편리성을 고려하여 단축인장 실험만을 통하여 고무의 특성을 평가하여 실리콘 고무별 상대적 특성치를 비교하였다. 고무 재료의 단축인장 시험을 하기 위해서 IRHD(international Rubber Hardness Degrees)가 40, 45, 50, 60, 70인 5 가지의 실리콘 고무를 사용하였다. 또한 단축인장에 사용한 시편으로는 KS M 6518 : 2006의 아령형(dumbbell specimens) 3호를 사용하였다.⁽³⁾

인장시험에 사용된 아령형 시편은 그림에 고정하기가 쉽고 인장 시 균일한 압력으로 시편을 잡을 수 있으며 그림과 고정되는 부분의 면적이 커 미끄러짐 현상을 줄일 수 있다. 5가지 실리콘 고무의 단축 인장 시험결과에 대하여 Fig. 2에 나

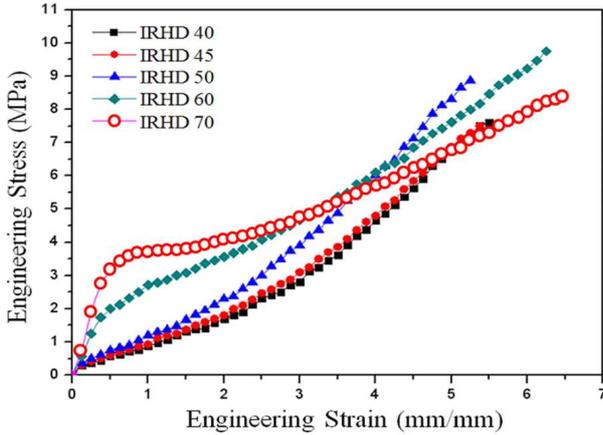


Fig. 2 Engineering stress vs. engineering strain relation of various types of silicon rubber: IRHD of 40, 45, 50, 60, and 70

타내었다. 위의 결과에서 보면, 실리콘 고무 IRHD 40(HD-9240)의 경우 작은 하중에 가장 변형이 쉽게 발생함을 알 수 있다. 따라서 주름구조를 가진 다이면을 따라 고무편치가 성형되기 위해서는 가장 효과적일 것으로 사료된다.

2.2 Mooney-Rivlin 상수

고무는 초탄성 재료로 비선형 거동을 보이고 유한요소해석에서 초탄성 재료 모델은 변형률 에너지 함수(strain energy function)로 표현된다. 고무의 거동을 표현한 변형률 에너지 함수는 여러 형태로 연구되었으나 일반적으로 주 변형률 불변량(principal strain invariant)과 주 연신율(principle stretch ratio)의 형태로 표현된다. 유한요소해석에는 그 적용의 편의성 때문에 주 변형률 불변량으로 표시되는 함수의 형태가 선호되고 있다. 특히, Mooney-Rivlin 모델에서 두 개의 상수를 가진 단순 Mooney-Rivlin 모델이 수학적 단순성과 그 상수 값의 물리적 의미 때문에 가장 많이 사용되고 있다. Mooney-Rivlin 등은 주 변형률 불변량으로 표현하였다. 이때 I_1, I_2, I_3 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 \\
 I_2 &= \epsilon_1^2 \epsilon_2^2 + \epsilon_2^2 \epsilon_3^2 + \epsilon_3^2 \epsilon_1^2 \\
 I_3 &= \epsilon_1^2 \epsilon_2^2 \epsilon_3^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, $\epsilon_{i, i=1,2,3}$ 는 각 축에서의 주 변형률을 의미한다. 고무가 등방성이고 비압축성재료로 가정하면 $I_3=1$ 이 되므로 변형률 에너지 함수는 다

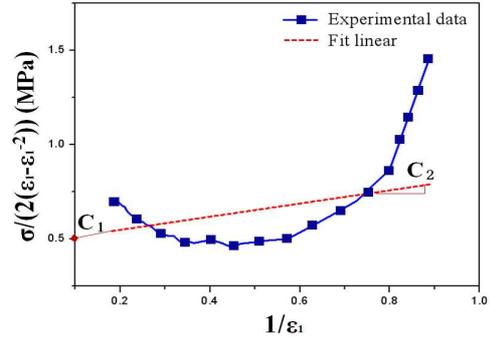


Fig. 3 Determination of the constants of silicon hardness 40(the horizontal axis $1/\epsilon_1$ and the vertical axis $\sigma_1/(2(\epsilon_1 - 1/\epsilon_1^2))$)

음 식 (2)와 같이 표현된다.^(4,5)

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j
 \tag{2}$$

식 (2)에서 I_1 과 I_2 에 대한 선형인 항만을 고려하면 두 개의 물질상수 C_1, C_2 을 갖는 다음과 같은 Mooney-Rivlin 식을 얻을 수 있다.

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3)
 \tag{3}$$

식 (3)을 단축 인장 시험의 경우에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$W = C_1 \left(\epsilon_1^2 + \frac{2}{\epsilon_1} - 3 \right) + C_2 \left(2\epsilon_1 + \frac{1}{\epsilon_1^2} - 3 \right)
 \tag{4}$$

식 (4)를 ϵ_1 에 대하여 편미분하면 다음과 같은 응력-신장률 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial W}{\partial \epsilon_1} = \sigma_1 = 2 \left(\epsilon_1 - \frac{1}{\epsilon_1^2} \right) \left(C_1 + \frac{C_2}{\epsilon_1} \right)
 \tag{5}$$

식 (5)의 양변을 $2(\epsilon_1 - 1/\epsilon_1^2)$ 으로 나누어주면 다음과 같은 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\sigma_1}{2(\epsilon_1 - 1/\epsilon_1^2)} = C_1 + \frac{C_2}{\epsilon_1}
 \tag{6}$$

실리콘 고무 IRHD 40의 단축 인장 시험에서 얻은 데이터를 이용하여 Fig. 3과 같이 가로축 $1/\epsilon_1$, 세로축 $\sigma_1/(2(\epsilon_1 - 1/\epsilon_1^2))$ 으로 하는 그래프

를 얻을 수 있다. Mooney-Rivlin 함수의 두 물질 상수를 결정하기 위하여 Fig. 3에서 식 (6)을 이용하여 1차 함수로 곡선 적합(curve fitting) 시키면 C_1 은 그래프의 세로축 절편 값이고 C_2 는 기울기가 되므로 두 상수를 얻을 수 있다.⁽⁶⁻⁹⁾

나머지 실리콘 고무 IRHD 45, 50, 60, 70의 고무에 대한 단축 인장 시험결과도 이와 같은 방법으로 변환하여 Mooney-Rivlin 함수의 두 물질 상수를 얻을 수 있었다. Table 1에 5가지 실리콘 고무의 두 물질 상수를 정리하였다. Mooney-Rivlin 두 물질 상수의 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 전단탄성계수(shear modulus; G)를 이용하였다. 전단탄성계수는 고무재료가 비압축성이며 변형이 작은 영역에서 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

$$G = 2(C_1 + C_2) \tag{7}$$

고무성형공정을 사용하여 복잡한 구조를 가진 박판을 제작하기 위해서는 미세 구조 사이로 고무펀치가 변형할 수 있어야 하므로 단축인장시험의 결과와 같이 실리콘 고무 IRHD 40의 경우가 가장 적합함을 알 수 있다. 일반적으로 전단탄성계수의 값이 클수록 고무의 강성이 높다는 것을 의미하므로 고하중을 요구하는 경우에는 유리하지만 복잡한 박판 구조를 제작하는 고무성형공정에서는 오히려 불리하다.

3. 균일압력 유도 고무성형공정

3.1 성형공정 해석모델

Fig. 4와 같은 고무성형공정을 이용하여 Fig. 5와 같이 꺾임 구조와 일정한 미세주름구조 형상을 하는 박판을 성형하기 위해서는 박판의 전면에 고무를 압력이 균일하게 가해져야 한다.

Table 1 Mooney-Rivlin constants of silicon-rubber specimens

specimen	C_1	C_2
silicon IRHD 40	0.4780	0.3495
silicon IRHD 45	0.4465	0.5211
silicon IRHD 50	0.5670	0.5750
silicon IRHD 60	0.1258	2.5349
silicon IRHD 70	-0.2308	3.7980

유한요소해석을 통하여 고무 펀치 형상에 따른 고무를 압축력이 박판의 전면에 미치는 압력분포를 알아보았다. 고무를 압축력에 의해 박판에 미치는 압력은 다이에 미치는 압력과 같으므로 본 기초해석에서는 고무 펀치 형상과 다이를 고려하였다. 또한 해석의 편의성을 위하여 고무를 압축력이 다이의 전면에 미치는 압력을 비교하는 것이므로 다이는 주름 구조를 단순화하여 평면으로 가정하였다. 그리고 해석의 효율성을 높이기 위하여 고무 펀치와 다이의 꺾임이 일어나는 중심선을 기준으로 좌우의 형상이

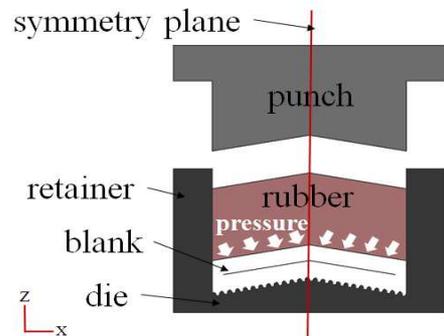


Fig. 4 Experimental setup for the proposed rubber forming; punch(steel), metal punch, retainer (steel), rubber punch, blank and die(steel)

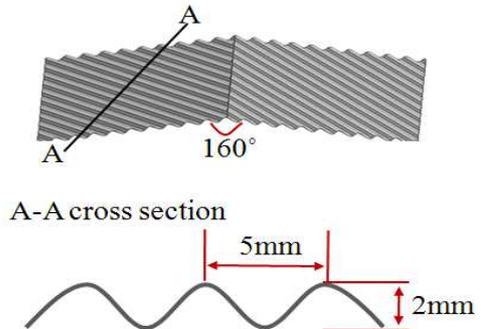


Fig. 5 Target shape of a deformed sheet according to rubber forming

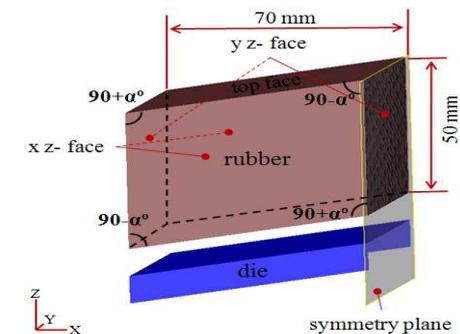


Fig. 6 Analysis model and boundary conditions of rubber forming

Table 2 Die pressure standard deviation of rectangle, trapezoid, parallelogram rubber type

rubber type	σ
rectangle - 6 mm	0.001728
rectangle - 8 mm	0.000719
trapezoid - 2 mm	0.000183
parallelogram - 2 mm	0.00017

다. 이러한 효과에 의해서 고무 펀치의 과도한 국부적인 변형과 압력이 줄어들어 전체적인 고무 펀치의 수명도 향상될 것으로 예측된다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - m)^2}{n - 1}} \quad (8)$$

여기서, σ 는 표준편차, x_k 는 측정값, m 은 측정값의 평균, n 은 측정값의 개수를 의미한다. 식 (8)의 결과 값이 클수록 평균값에서 떨어진 측정값들이 많다는 것을 의미한다. Table 2의 값을 비교하여 보면 평행사변형 형상의 경우가 가장 일정한 압력을 다이에 전달하는 고무형상이다.

또한 평행사변형 형상의 성형 능력을 알아보기 위해서 박판의 최대 꺾임 각(α°)에 따른 압력분포 변화를 살펴보았다. Fig. 9에 나타낸 것처럼 2 mm 고무펀치 변형에 대하여 고무 펀치의 기울기 각도와 다이의 꺾임 각도를 동일하게 5° 에서 30° 까지 5° 간격으로 해석하여 다이에 미치는 압력분포를 비교해 보았다. 해석결과 다이 면의 기울어짐에 상관없이 다이 면 전체에 균일한 압력분포를 보였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 방법이 30° 꺾임까지는 적용이 가능함을 알 수 있었다.

4. 꺾임 구조의 박판구조물 제작

4.1 실험장치 구성

본 연구에서 제안한 균일압력을 유도하는 고무 성형공정 효율성을 검토하기 위하여 Fig. 10 (a)-(b)와 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 프레스(press)는 상부 실린더의 하중이 최대 200 ton 까지 작동이 가능하며, 하부실린더의 경우 최대 150 ton의 하중을 가할 수 있다. 프레

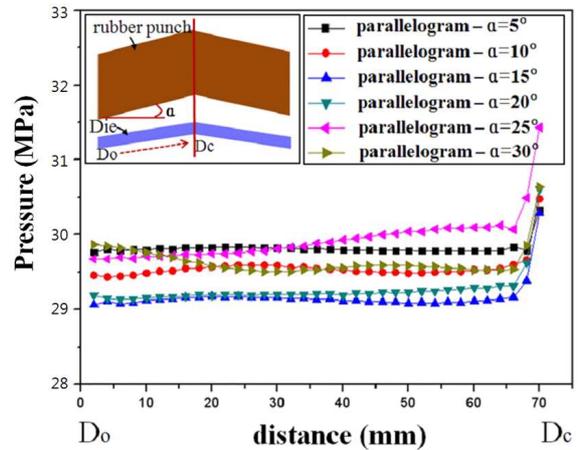
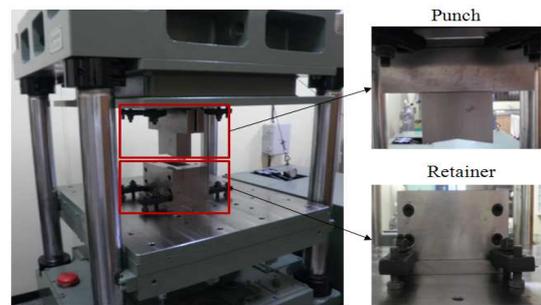
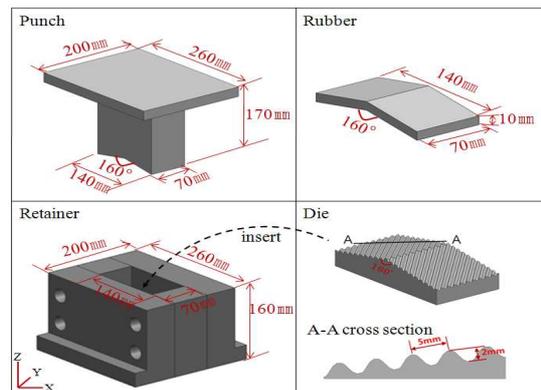


Fig. 9 Die pressure comparison graph of parallelogram rubber type according to angle



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Photographs of experimental apparatus, and (b) schematic view and dimensions of punch, rubber, die and retainer.

스의 상부 틀에는 고무 펀치를 가압하기 위하여 고무 펀치의 형상과 동일한 꺾임 각도를 가진 금속 펀치를 고정하고 하부에는 리테이너와 다이를 고정하고 리테이너에는 50 mm 두께의 고무 펀치를 두었다. Fig. 10(b)에는 실험에 사용된 펀치, 고무, 리테이너, 다이의 치수와 모양을 각각 나타

냈다. 다이는 160°의 꺾임 각을 가지고 미세주름 구조는 깊이 2 mm, 너비 5 mm의 형상을 반복적으로 가지도록 하였다. 또한 고무 성형에 사용되는 고무 편치는 다이와 동일한 꺾임 각도 160°를 가지도록 설계하여 고무성형이 다이와 균일한 접촉이 일어나도록 하였다.

실험에 사용된 박판은 스테인레스 계열의 금속(STS304-1/2h)으로 두께 100 μm를 가지고 가로 및 세로의 크기가 각각 120 mm, 50 mm의 직사각형 형태로 절단한 뒤, 다이의 꺾임각도와 동일하게 초기 꺾임 구조를 갖도록 하였다.

4.2 실험결과 및 토의

꺾임 구조의 박판구조물 제작을 한 결과 Fig. 11의 (a)와 같이 양면에 일정한 형태의 주름구조물이 잘 성형된 것을 알 수 있다. 그리고 성형된 미세 주름의 형상을 정량적으로 측정하기 위하여 미세주름의 수직 방향에 대하여 꺾인 좌우 면에서 각각 와이어커팅(wire cutting)을 한 뒤 Fig. 11(b)에 나타낸 것처럼 각 단면의 성형된 구조를 관찰하였다.

Fig. 12(a)-12(b)는 성형된 박판의 미세주름형상을

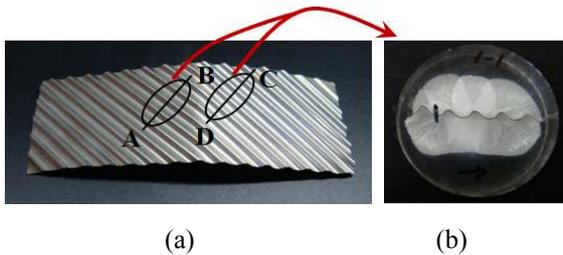


Fig. 11 Photographs of ; (a) A deformed sheet according to rubber forming, (b) cross - section of a corrugated structure

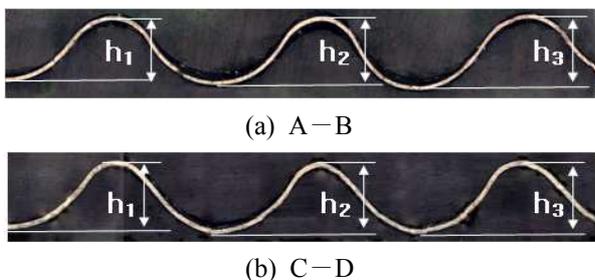


Fig. 12 Corrugated structure depth of; (a) left face of a deformed sheet (h₁ = 1.38 mm, h₂ = 1.38 mm, h₃ = 1.40 mm), (b) right face of a deformed sheet(h₁ = 1.39 mm, h₂ = 1.39 mm, h₃ = 1.40 mm)

을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 박판의 꺾이는 중심선을 기준으로 박판의 좌측면 미세주름형상이고 Fig. 12(b)는 박판의 우측면 미세주름형상이다.

식 (9)를 이용하여 성형된 미세주름의 균일성을 평가하였다.

$$e = \frac{h_m - h_k}{h_m} \times 100 (\%) \tag{9}$$

여기서, e는 오차율, h_m은 h₁, h₂, h₃의 평균값, h_k는 각각의 미세주름깊이를 나타낸다. 비교한 결과 최대 0.94%이하의 차이를 보이며 일정한 미세주름깊이를 형성하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 꺾임 구조를 가진 미세주름 박판구조물을 성형하기 위하여 고무성형공정을 제안하였다. 고무성형공정 시 박판의 전면에 균등한 압력을 가할 수 있는 고무의 형태를 해석적으로 비교하고 이를 바탕으로 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고무성형공정을 이용해 박판의 전면에 균등한 압력을 전달하기 위해서는 다이와 고무 편치의 꺾임 각을 같이 해주는 것 [Fig. 7(c)]이 가장 효과적이고 이와 같은 방법으로 성형할 경우 꺾임 각을 크게 하여도 박판의 전면에 비교적 일정한 압력을 미친다는 것을 알 수 있었다.

(2) 고무성형공정을 이용하여 두께 100 μm의 박판에 160°의 꺾임 구조와 균일한 형상의 미세주름 구조를 성형할 수 있었다. 이처럼 꺾임 구조와 미세주름구조를 동시에 가지는 복잡한 구조의 박판형상도 고무성형공정을 통하여 우수한 성형균일성을 가지도록 성형할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

(3) 본 연구에서 꺾임 각도를 5°에서 30°까지 변화시켜가면서 접촉압력의 변화를 살펴본 결과 꺾임 각도가 작을수록 접촉압력의 변화폭이 작아서 정밀하고 균일한 형상제작이 가능할 것으로 사료되며, 꺾임각도가 가장 큰 30°의 경우에도 꺾임부분 이외의 평면에서 약 3% 수준의 압력변화를 보이기 때문에 큰 문제없이 균일한 성형이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 정부 재원으로 한국연구재단(과제번호:

K20702001648-10E0100-07010, 2010-0008-276), 한국 에너지기술평가원(과제번호: 20100613016), 그리고 한국산업기술평가원(과제번호: 20090406000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Dieter, G. E., 1997, "Metallurgical Technology," Bando publisher, Seoul, pp. 291~321.
- (2) Kang, M. S. and Lee, J. K., 1998, "Press Sheet Metal Working," Cheong-Moon-Gak Publisher, Seoul, pp. 288~293.
- (3) Shin, S. J., Lee, T. S. and S. I. Oh, 1995, "Finite Element Modeling of Pad Deformation In Rubber Pad Forming (I)," *Proc. of Spring Conference of the KSME*, pp. 331~336.
- (4) Haines, D. W. and Wilson, W. D., 1979, "Strain Energy Function for Rubber-Like Materials," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 27, pp. 345~360.
- (5) Treloar, L. R. G., 1944, "Stress-Strain Data For Vulcanized Rubber Under Various Type of Deformation," *Trans. of Faraday Soc.*, Vol. 40, pp. 59~70.
- (6) Kim, Y. W. and Kim, J. G., 2002, "Measurement of Mechanical Material Properties of Rubber Compounds Sampled from a Pneumatic Tire," *Proc. of Spring Conference of the KSMTE*, pp. 404~409.
- (7) Kim, K. W. and Kim, N. W., 2006, "Prediction of Strain Energy Function for Butyl Rubbers," *Trans. of the KSME A*, Vol. 30, No. 10, pp. 1227~1234.
- (8) Kim, W. D., Kim, W. S., Kim, D. J., Woo, C. S. and Lee, H. J., 2001, "Experimental Testing of Rubber Materials for Finite Element Analysis," *Proc. of Spring Conference of the KSME*, pp. 704~709.
- (9) Kim, W. D., Kim, W. S., Kim, D. J., Woo, C. S. and Lee, H. J., 2004, "Mechanical Testing and Nonlinear Material Properties for Finite Element Analysis of rubber Component," *Trans. of the KSME A*, Vol. 28, No. 6, pp. 848~859.
- (10) Kim, Y. W. and Kim, J. G., 2003, "FE Analysis of The Radial Tire Inflation using the Hyper elastic Properties of Rubber Compounds Sampled from a Tire," *Trans. of the KSAE*, Vol. 11, No. 4, pp. 125~134.
- (11) Finney, R. H. and Kumar, A., 1988, "Development of Material Constants for Nonlinear Finite Element Analysis," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 61, pp. 879~891.
- (12) Woo, C. S., Park, H. S. and Lee, G. A., 2007, "Material Test and Forming Analysis of Urethane rubber," *Proc. of Spring Conference of the KSME*, pp. 2654~2659.