

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.219

고세장비 연속주름을 갖는 박판구조물 제작을 위한 다단성형공정 개발

최성우* · 박상후**† · 정호승*** · 민준기*** · 정재현**** · 조종래**** · 김현준***** · 폴 윌리엄*****

* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 정밀정형금형 및 금형가공연구소/기계공학부, *** 폴스로이스-부산대학교 기술센터, **** 한국해양대학교 기계정보공학부, ***** 동화엔텍, ***** 영국 Rolls-Royce SRC

Development of a Multi-step Stamping Process for the Effective Fabrication of a Thin Sheet for High Aspect Ratio Corrugated Structures

Sung-Woo Choi^{*}, Sang Hu Park^{**†}, Ho Seung Jeong^{***}, June Kee Min^{***}, Jae-Hun Jeong^{****}, Jong-Rae Cho^{****}, Hyun June Kim^{*****} and Paul Willians^{*****}

^{*} 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 Nat'l Univ.,

^{*****} DongHwa Entec, ^{*****} Rolls-Royce SRC

(Received November 16, 2009 ; Revised December 22, 2009; Accepted December 22, 2009)

Key Words : Multi-Stamping(다단성형), Sheet Metal(박판), Heat Treatment(열처리), Corrugated Structure(주름구조), High Aspect Ratio Structure (고세장비 구조)

초록: 스탬핑 프로세서는 고생산성과 낮은 가격으로 인해 자동차 차체나 항공기 부품, 그리고 전자제품 등 다양한 장치에 널리 이용된다. 최근에 에너지 산업과 연관되어 연료전지 분리판, 열교환기 등에 사용되는 주름구조를 가지는 박판의 응용이 급속히 증가되고 있다. 그러나 복잡한 형상 때문에 주름구조물을 한번의 성형으로 만들기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 다단성형공정을 이용하여 성형성을 향상시키는 방법을 제안하였다. 1 차 박판성형 후 열처리를 통하여 가공경화 부분을 제거하고 다시 성형하는 방법으로 복잡하고 실용성이 높은 박판구조물 제작이 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 제안한 방법을 검증하기 위하여 판형 열교환기에 응용이 가능한 두께 100 μm 를 가지는 박판주름구조를 제작하고 공정변수를 연구하였다.

Abstract: The stamping process is widely used in fabricating various sheet-parts for vehicle, airplane, and electronic devices due to its low processing cost and high productivity. Recently the use of thin sheets with corrugated structures has rapidly increased for the production of energy devices, e.g., heat exchangers and fuel cells. However, it is very difficult to make corrugated structures directly in the stamping process due to their geometrical complexity. To solve this problem, this paper proposes a multi-step stamping process with a combined heat treatment process: a sequence of the first stamping, heat treatment, and second stamping. By multi-stamping, we obtained successful results in fabricating very thin corrugated structures with thicknesses of 100 μm; these are applicable as part of a plate-type heat exchanger.

1. 서 론

박판 금속성형(sheet metal forming)은 소성가공의 한 종류로써 금속 판재를 이용하여 소재를 용융시키거나 절삭하지 않고 금속 판재에 힘을 가하여 이어붙임 없이 형상을 변화시켜 비교적 복잡한 형상의 제품을 만들 수 있다.^(1,2) 그리고 금형에 의한 대량 생산이 가능하여 낮은 가격과 가공시간의 최소화, 재료의 손실을 줄이는 동시

에 기계적 성질이 우수하여, 오늘날 소재의 무게를 중요시하는 항공기 기체 부품, 자동차의 차체나 부품 산업, 전자산업, 가전제품의 케이스 및 일상 주방용품에 이르기까지 다양한 형태와 용도로 여러 산업 분야에서 널리 적용되고 있다.⁽²⁾

그 중에서 고세장비의 주름구조를 갖는 박판부품은 에너지산업과 많은 연관관계를 가지고 있다. 예를 들어, 연료전지의 분리판 또는 판형 열교환기(heat exchanger) 등에 많이 사용되고 있으며, 에너지 산업에 대한 수요 급증으로 이러한 정밀부품에 대한 요구는 급속히 증가

† Corresponding Author, sanghu@pusan.ac.kr

할 것으로 예상된다. 열교환기의 경우 일반적으로 구조가 간단하고, 열전달 효율이 높으며, 소형 경량으로 만들 수 있고, 유지관리가 간편하기 때문에 매우 다양한 분야에서 이용되고 있다. 지역난방의 난방 및 급탕용수 열교환, 열병합 발전소의 응축수 및 공급수 처리, 자동차용 공조기, 화학공정에서 유기용액의 가열 및 냉각, 해상 및 육상용 기관의 냉각장치, 가스보일러의 급탕수 가열, 산업체의 폐열 회수 등 재료비 절감 효과와 많은 생산성을 높이기 위해 프레스 가공방법을 이용한다.⁽³⁾ 따라서 고효율 판형 열교환기 개발은 에너지 절약효과가 매우 클 것으로 예상되는 매우 중요한 과제이며 향후 이산화탄소 발생저감 등 녹색산업에도 큰 기여를 할 부품으로 판단된다.⁽³⁻⁵⁾ 이러한 열교환기의 제작기술에 있어서 판형 열교환기의 경우 판재의 두께가 얇을수록 그리고 효과적인 열 교환을 위하여 표면구조가 주름형태로 복잡할수록 일반적으로 성능이 올라가지만 이러한 형상은 단일 박판성형공정으로는 제작이 어려운 문제점이 있다.

본 연구에서 고효율 열교환기 또는 연료전지 분리판 등의 다양한 응용이 가능하도록 두께 100 μm 수준을 갖는 미세 박판에 대하여 복잡한 연속주름구조를 제작할 수 있는 다단성형공정을 제안하였으며, 실제 제품으로 사용될 재료의 소성변형 거동을 파악하기 위한 재료실험 수행과 기존의 단일 공정으로 고세장비 구조물의 제작이 어려운 한계를 효과적으로 극복할 수 있는 실용적인 제작기술에 대하여 실험적으로 검증하였다.

2. 기초 실험

2.1 시험 장치 구성

박판성형 실험을 위하여 다음과 같은 실험장치를 구성하였다. Fig. 1 에는 박판성형을 위한 프레스(press) 장비를 나타내었다. 최대 하중은 150 ton 이며, 상하방향으로 압력을 제어할 수 있는 2 개의 실린더를 가진 유압방식으로 설계되어 있다. 실험에 사용된 펀치(punch), 다이(die), 블랭크 홀더(blank holder)의 금형구조를 그림에 같이 나타내었다. 자세한 금형 형상과 치수는 Fig. 2(a)-(c)에 나타내었다. Fig. 2 (a)와 (b)는 가공된 펀치와 다이 형상에 대하여 세부 치수를 나타내고 있으며, 주름진 부분의 단위형상 치수는 주름높이 1.5 mm, 주름폭 1.5 mm, 주름간격을 3.3 mm로 두었다. Fig. 2(c)는 펀치와 다이가 서로 맞물린 최종 성형단계의 금형모습을 나타낸 것인데, 이것은 처음 블랭크 홀더가 소재의 뒤틀림을 방지하기 위해 먼저 소재를 다이와 고정시킨 이후에 펀치가 아래방향으로 내려감에 따라 다이와 맞물리게 된다. 펀치와 다이 사이의 간격은 0.15 mm 이며, 이는 초기소재의 두께가 0.1 mm 사용하는 조건에서 간섭이 일어나지

않도록 설계된 것이다. 중간의 주름진 형상은 소재가 펀치와 다이의 소성작용에 의해 변형될 때의 최종 주름성형 구조 모양을 나타내고 있다. 주름부분의 형상 세장비(높이:폭)의 비율이 1 : 2.2 가 되도록 설계하였으나 본 연구에서는 최종형상까지 성형목표를 잡지 않고 단일성형과 열처리를 포함한 다단성형간의 성형성 차이를 비교하는 것을 연구범위로 정하였다.

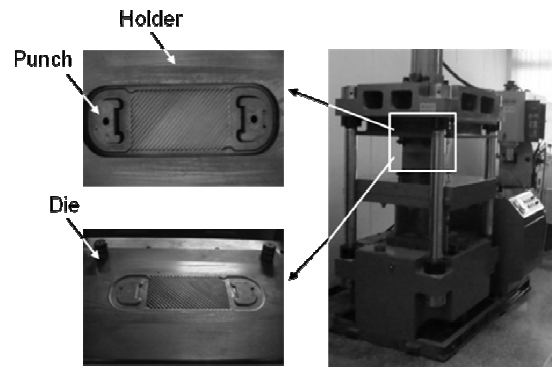


Fig. 1 Experimental equipment setup for the stamping process

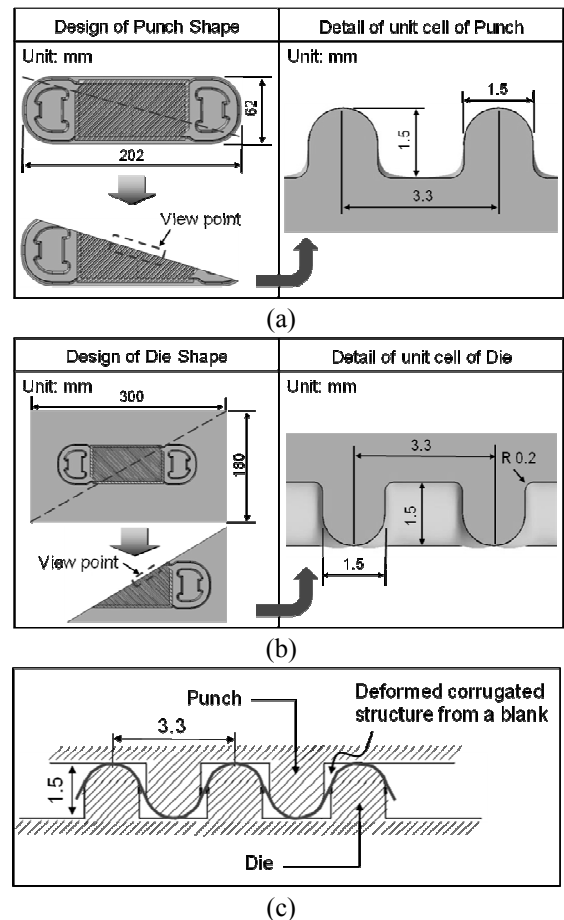


Fig. 2 Details of shape and dimension of mold; (a) punch, (b) die, and (c) matched punch and die, deformed corrugated structure

Table 1 Chemical composition (%) of STS 304-1/2H

Element	Cu	Ni	Mn	P	C
wt.%	0.60	10.5	2.00	0.04	0.08
Element	Cr	S	Si	Mo	Fe
wt.%	20.0	0.03	1.00	0.60	R

Table 2 Mechanical properties of STS 304-1/2H

Material	YS (MPa)	T.S (MPa)	El (%)	E-Modulus (GPa)
STS 304-1/2H	651.4	851.8	38.4	190.87

2.2 박판재료의 기계적 물성

원소재의 물성을 알아보기 위하여 인장시험 수행하였다. 실험에 사용한 시편의 규격은 Fig. 3(a)와 같이 두께 100 μm의 STS 304-1/2H 박판을 사용하였고 KS 0801의 규격에 따라 시편을 압연방향을 기준으로 90° 방향에서 절취하였다. 또한 시편 가공시에 레이저 등을 이용하면 절단면에 발생하는 열영향으로 인해 인장시험치에 영향을 줄 가능성이 있기 때문에 시편을 와이어 커팅을 이용하여 절취 후 2 mm/min의 속도로 인장시험을 수행하였다. 실험과정은 로드셀(load cell)에 의한 하중과 비접촉 신장계(extensometer)를 이용하여 변형률을 측정하며, 측정된 하중을 공칭단면적으로 나누어 인장강도를 산정하였다. 인장시험에 사용된 시험기는 Zwick/Roell z100(Zwick/Roell, Germany)을 이용하였다. 두께가 얇은 박판을 인장시험 할 때 인장시험기에서 시편을 잡은 부분(grip)에 생기는 과단을 방지하기 위해 압력조절이 가능한 유압식 사용하였고 시편을 잡아당겨주는 조 페이스(jaw face)부분은 시편이 미끄러지지 않게 하기 위하여 아주 촘촘한 무늬의 톱니모양을 이용하였다[Fig. 3(b) 참조].

실험용 시편에 사용된 STS 304-1/2H 소재의 초기화학적 성분과 실험에서 나타난 기계적 물성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 또한 실험에 사용된 두께 100 μm의 STS 304-1/2H 박판소재는 물 사이에 재료를 통과시켜 소성변형 시키는 압연 가공법을 사용하는데, 이 방법은 재료를 변형시킬 때 재료가 롤링의 압하 작용으로 인해 높은 압축응력을 받게 되어 가공경화가 생기게 되는데⁹⁾ 이때의 소재를 이용하여 열처리에 따른 물성변화와

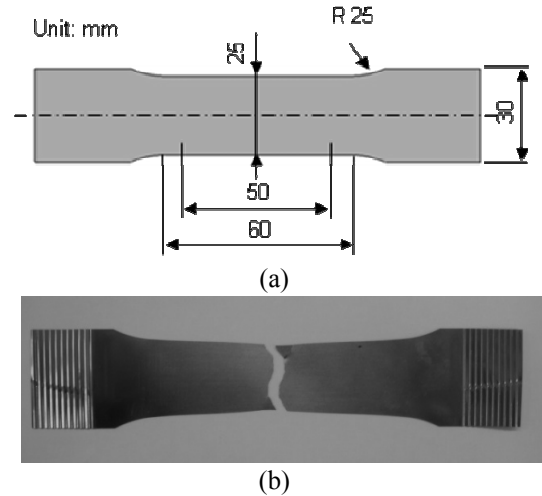


Fig. 3 Picture of the; (a) geometry tensile test specimen, (b) fractured specimen after tensile test

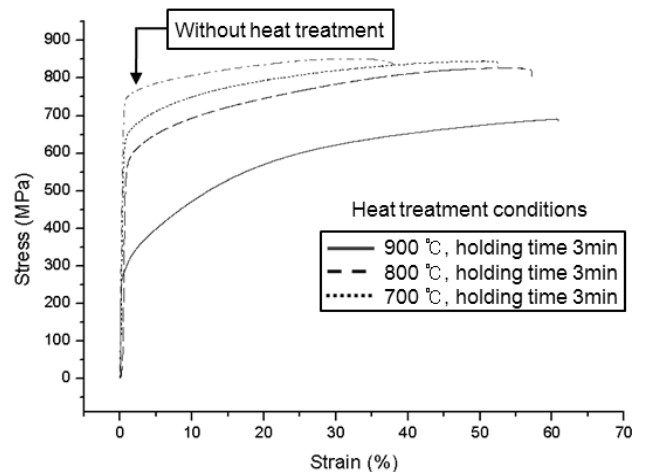


Fig. 4 Stress-Strain curve of STS 304-1/2H under various conditions of heat treatment

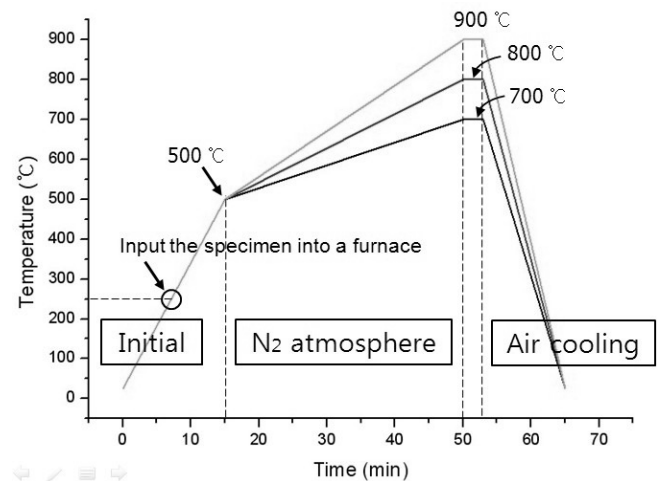


Fig. 5 Scheduling of heat treatment; holding time on the highest temperature was 3 min

Table 3 Comparison of physical properties of STS 304-1/2H under various conditions of heat treatment

Material		Y.S (MPa)	T.S (MPa)	El (%)
STS 304-1/2H Thickness (100 μm)	Without heat treatment	651.4	851.8	38.4
	700 °C	618.5	845.7	52.5
	800 °C	552.5	827.3	57.2
	900 °C	272.1	691.3	60.9
Material		E-Modulus (GPa)	Hardness (Hv)	
STS 304-1/2H Thickness (100 μm)	Without heat treatment	190.87	270.07	
	700 °C	144.33	258.76	
	800 °C	143.82	237.32	
	900 °C	140.40	155.08	

성형성과의 관계를 알아보기 위하여 풀림 (annealing) 조건에서 열처리 후 인장시험을 실시 하였다. 일반적으로 STS 304 의 오스테나이트 조직의 재결정 온도는 1010-1120°C⁽¹⁰⁾이고, 이때 사용된 시편의 두께는 2.5 mm 이다. 본 실험에서 사용된 시편의 두께가 100 μm 로써 2.5 mm 와 비교하면 두께가 1/25 수준이므로, 열처리 온도 조건을 참고문헌에서의 재결정 온도보다 낮은 온도인 700, 800, 900°C로 선정하였다. 그리고 열처리 온도조건은 각각 다른 시편들을 각각 700°C, 800°C, 900°C 에서 3분간⁽¹⁰⁾ 유지시킨 후 열처리된 시편을 공냉 (air cooling)으로 냉각 처리하였다 [Fig. 5 참조].⁽⁸⁾ 또한 열처리시 고온부식을 방지하기 위하여 질소 분위기에서 열처리를 실시하였다.

물리적 인장거동 특성을 분석하기 위하여 다양한 열처리 온도에서 열처리 된 시편을 KS 규격으로 인장 시험을 하였고, Fig. 4 에는 시편을 다양한 열처리 온도에 따른 응력-변형률 선도 결과를 나타낸 것이다. 700°C, 800°C 의 열처리 조건에서는 열처리를 하지 않은 경우와 비교하여 항복응력의 각각 5%, 15% 줄어듦을 알 수 있고, 900°C 조건에서는 약 58% 정도 항복응력이 급격하게 줄어듦을 알 수 있다. Table 3 에 정리된 각 열처리 조건에서 얻은 기계적 물성치 평균값에서도 열처리 이전의 원소재 시편보다 연신율이 약 36~58% 증가하였고, 따라서 900°C 열처리 조건에서 항복응력의 감소와 연성의 증가로 프레스 성형성이 향상되고, 성형과정 중에서 발생하는 가공경화 효과에 대하여 열처리를 통하여 성형한계를 증대시켜 복잡한 주름구조에 대하여 미세박판의 고세장비 형상을 프레스 성형으로 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

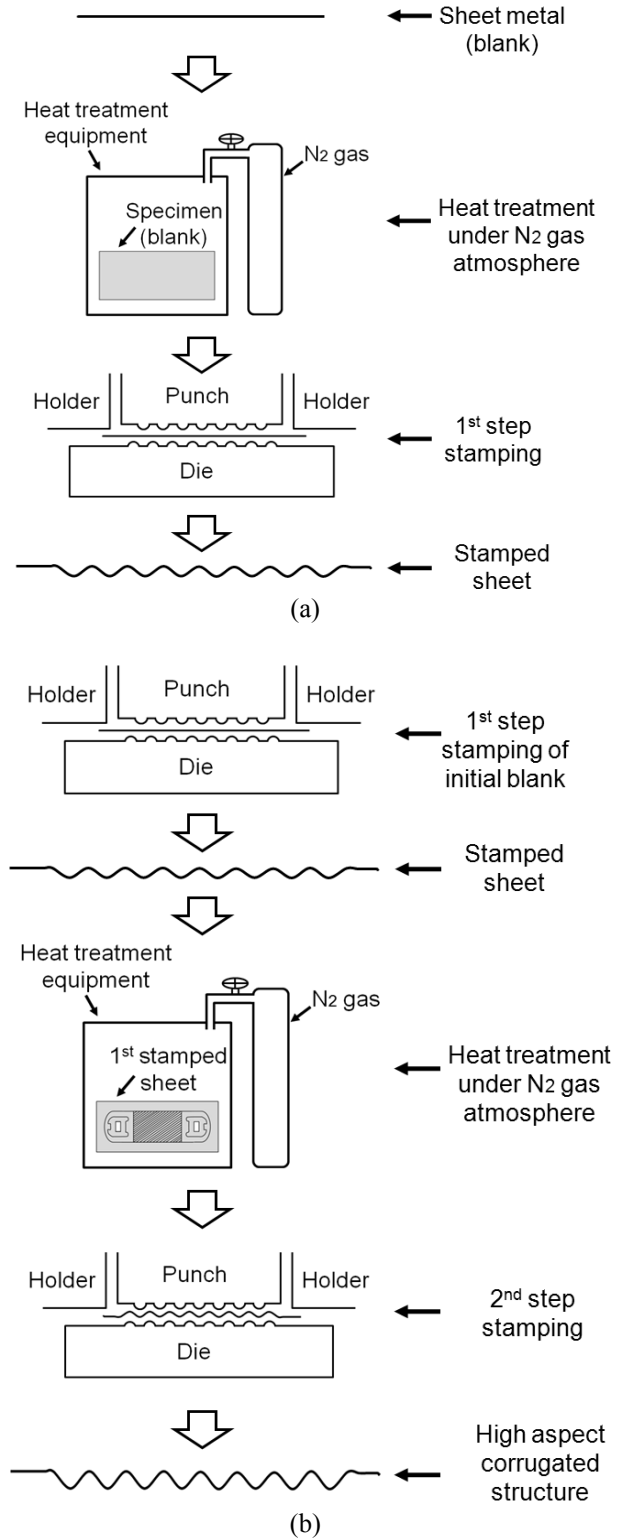


Fig. 6 Schematic diagram of metal working process; (a) single step stamping with heat treatment sheet (PHS), (b) multi-step stamping with intermediate heat treatment (SHS)

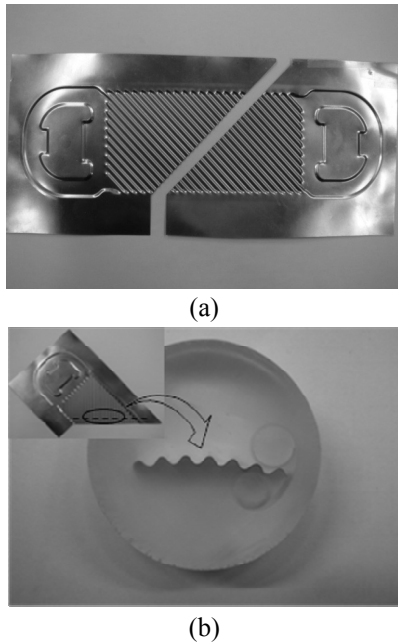


Fig. 7 Photo-images of a deformed specimen; (a) wire-cut full-shape of a deformed corrugated structure, (b) partial view of cross-section of corrugated structure

3. 고세장비 제품 성형을 위한 다단성형 공정

기존의 연구사례에서도 프레스 성형 공정에서 한계 드로잉 비 이상의 성형 깊이를 가지는 제품의 경우에는 다단공정으로 성형을 한 경우가 있다.^(6,7) 그러나 다단성형에 대한 기존의 연구는 대부분의 경우 벌크(bulk) 및 판재 성형공정에 주로 국한되기 때문에 본 연구에서와 같이 박판 두께가 100 μm 수준으로 얇은 경우에 대해서는 연구가 흔치 않다. Fig. 6(a)-(b)에는 다양한 온도에서 열처리 효과와 연계된 다단성형공정의 장점을 비교해 보기 위하여 선열처리 후 단일성형(Pre-Heat treatment single-Stamping, PHS)하는 경우와 1차 성형 후 풀립 열처리를 실시한 뒤 다시 성형하는 다단 성형(Stamping-Heat treatment-Stamping, SHS) 공정에 대하여 개략적인 프로세스를 나타내었으며, 모든 공정에서 성형시 마찰의 영향을 동일하게 다루기 위하여 박판 전용 윤활제를 사용하여 동일한 윤활조건을 구현하였다. 그리고 각각의 성형된 시편의 연속주름구조 단면을 관찰하여 주름구조 형상과 두께분포를 측정하기 위하여 주름의 수직방향으로 절단하여 각각의 시편을 Fig. 7(b)와 같이 냉간 마운팅 하였다. 이렇게 준비된 시편은 연마 용지(#200~#2000)를 이용하여 표면 연마처리(polishing)를 실시한 후 광학현미경으로 주름구조물의 성형 깊이와 단면모양, 두께 분포를 관찰하였다.

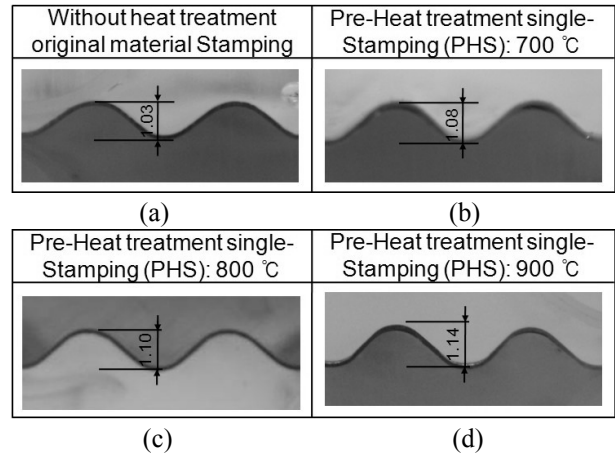


Fig. 8 Evaluation of formability results of; (a) without heat treatment original material stamping, (b) PHS 700 $^{\circ}\text{C}$, and (c) PHS 800 $^{\circ}\text{C}$, (d) PHS 900 $^{\circ}\text{C}$

4. 결과 및 토의

성형된 연속주름구조의 성형 단면모양에서 Fig. 8(a)-(d)와 Fig. 9(a)-(c)에는 각각 열처리를 하지 않은 초기시편(original material)을 이용한 성형조건과 PHS 조건, 그리고 SHS 조건으로 제작된 다양한 열처리 조건을 가진 시편의 성형실험 후 주름형상을 나타내었다. 열처리를 하지 않은 초기시편을 터짐 불량 없이 조건에서의 최대 성형깊이는 1.03 mm로 나타났으며, PHS에서는 초기 시편을 성형성이 향상되도록 Fig. 6(a)에 나타난 질소분위기에서 900 $^{\circ}\text{C}$, 3분 지속시간을 가진 후 공냉으로 냉각 처리를 통하여 풀립 처리를 한 후 파단이 되지 않는 조건에서 성형을 하였다. 이때의 펀치압과 블랭크 홀더력이 각각 7.5 MPa, 6 MPa이며, 주름부분의 성형 깊이(주름 높이)는 1.14 mm로 나타났다. 이것은 열처리를 하지 않은 상태에서 성형한 경우 Fig. 8(a)와 비교해 보면 열처리 온도가 올라갈수록 초기 풀립현상이 뚜렷해져서 성형깊이가 증가됨을 알 수 있으며[Fig. 8(b)-(d) 참조], 가장 열처리 조건이 좋은 경우 Fig. 8(d)에서도 약 10.6% 정도만 성형 깊이가 향상되어 열처리를 하지 않은 시편과 비교해 볼 때 큰 차이점이 없음을 알 수 있다.

SHS 조건에서 Fig. 9(c)는 1차 성형 이후에 실시한 열처리에서 900 $^{\circ}\text{C}$ 의 질소분위기에서 3분간 지속시간을 가진 후 공냉으로 냉각 처리한 후 동일한 금형 조건에서 2차 성형을 수행하였다. 2차 성형은 풀립 처리에 의한 연성증가로 펀치압과 블랭크 홀더력이 각각 8 MPa, 6 MPa로 1차 성형 대비 펀치압이 약 12% 증가하여도 성형에는 문제 없었으며, 성형깊이는 1.36 mm로 나타났다.

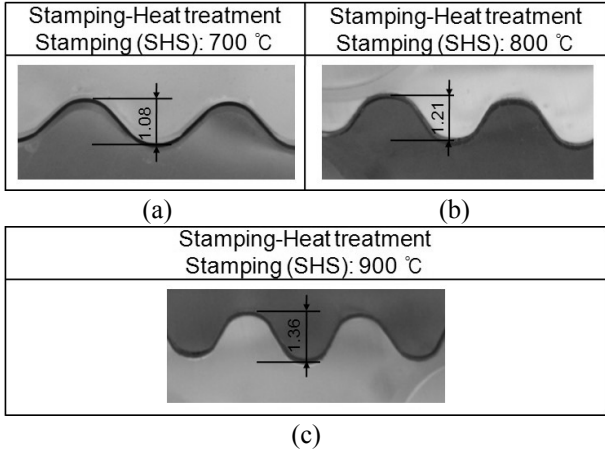


Fig. 9 Evaluation of formability; (a) SHS 700 °C, (b) SHS 800 °C, and (c) SHS 900 °C

SHS 조건의 경우에 성형깊이가 열처리를 하지 않은 초기시편을 이용한 성형조건 [Fig. 8(a)]과 비교해 볼 때 한계 성형깊이(1.03 mm)보다 최대 32% 향상 [Fig. 9(c) 조건]됨을 알 수 있고, PHS 조건 [Fig. 8(d) 조건]과 비교해 볼 때 한계 성형깊이 (1.14 mm)보다 최대 19% 향상됨을 알 수 있다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 풀림처리에 의한 연성증가로 1 차 성형에서 발생한 가공경화 효과가 제거되기 때문으로 사료된다.

선 열처리 후 성형을 실시하는 PHS 공정과 1 차 성형과 풀림 열처리 후 2 차 성형하는 SHS 공정에 대하여 형상의 세장비 AR 값 [Aspect Ratio; 폭(a) 대비 높이(h) 비율]으로 성형성을 비교해 볼 수 있다. AR 값의 정의는 Fig. 10 에서 세부 그림으로 나타내었으며, 여기서 열처리 조건에 따라 다단성형(SHS) 공정이 큰 AR 값 변화를 나타내고 있으며, 열처리를 하지 않은 원소재 단일성형, 미리 열처리를 한 소재로 단일성형한 경우(PHS)에서는 상대적으로 적은 AR 값이 나타났다. AR 값을 향상시키기 위해서는 정해진 주름간격 (a) 조건에서 성형깊이 (h)를 높여서 AR 값을 향상시킬 수 있는데, h 값을 높이기 위해서 일반적으로 소재를 프레스 성형을 할 때 그 재료가 가지는 한계 드로잉 비 에서 h 값이 결정되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서 실험한 방법과 같이 h 값을 재료가 가지는 한계 드로잉 비 이상으로 향상시키기 위해 다단성형 공정으로 고세장비를 갖는 주름형상의 구조물을 가지는 형상을 제작할 수 있다고 판단된다.

초기박판의 두께가 100 μm 인 시편을 주름성형 이후에 변화한 두께의 형상 및 두께 감소를 Fig. 11(a)-(c)와 Fig. 12 에 나타내었다. 먼저 Fig. 11(a)-(c)에서 각 조건에 대하여 주름성형된 시편을 정리해 보면 Fig. 11(a)는 열처리를 하지 않은 원소재

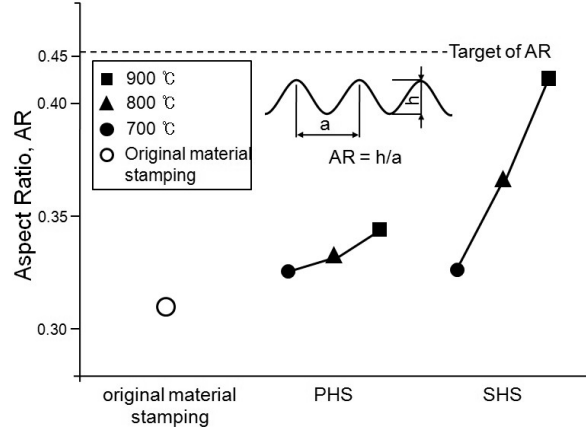


Fig. 10 Relative aspect ratio of deformed structures in case of single-step stamping without heat treatment sheet, PHS, and SHS

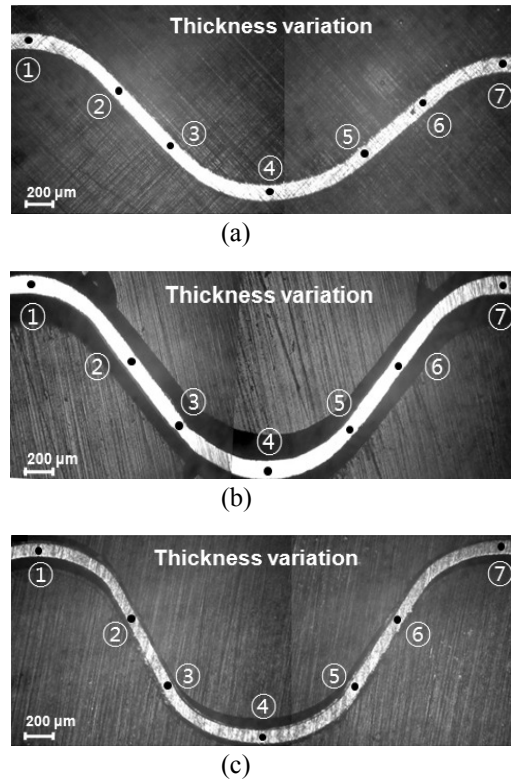


Fig. 11 Optical micrographs of the deformed corrugated structure; (a) original material stamping, (b) PHS 900 °C, and (c) SHS 900 °C

를 이용하여 성형한 후의 시편 두께를 나타내고 있으며, 이때의 평균 두께는 96.7 μm 로 두께 변화가 크게 나타나지 않았지만 ②, ③, ⑤, ⑥ 지점에서 작은 스트레칭이 발생하였고, 처음 소재와 비교하여 3.3%의 평균두께 변화율을 나타내고 있으며, Fig. 11(b)는 PHS 으로 평균 두께가 86.1 μm 로 처음 소재보다 13.9%의 평균두께 변화율을 나타내었고, 그리고 Fig. 11(c)는 다단성형 조건인

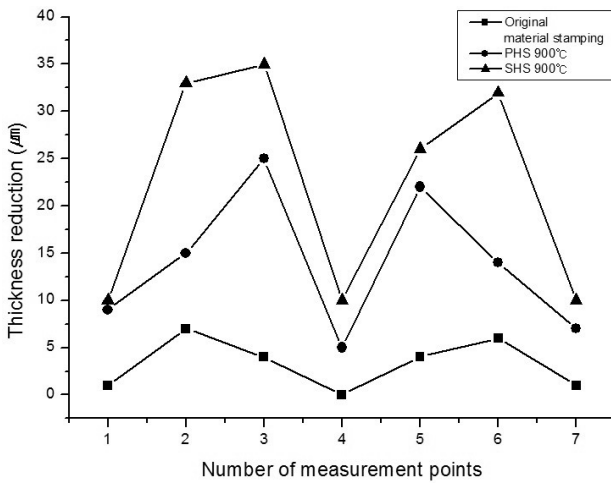


Fig. 12 Thickness ratio of the deformed corrugated structure; (a) Original material stamping, (b) PHS with pre-heat treatment under 900°C, and (c) SHS with intermediate heat treatment under 900°C

SHS 로 제작된 결과인데 앞의 결과 [Fig. 11(a)-(b) 참조]보다 상대적으로 더 많은 22.3%의 평균두께 변화율을 나타내고 있는데 특히, ②, ③, ⑤, ⑥ 지점에서 많은 스트레칭이 발생하였다. 이것은 1 차 성형후에 생긴 가공경화를 재결정 온도에서 열처리를 통한 풀림효과와 동시에 연신율을 증가시켜 2 차 성형에서 ②, ③, ⑤, ⑥ 지점에서 평면변형을 조건에서 스트레칭이 발생하여 주름깊이가 더욱 향상된 것을 알 수 있었고 Fig. 12 에는 Fig. 11(a)-(c)의 형상변화에 따른 두께감소량을 각각의 측정 포인트 위치에서 열처리를 하지 않은 원소재 성형과, PHS, SHS 조건에서의 주름 성형된 시편의 위치에 따른 두께감소량을 비교하여 나타내었다. 다단성형공정으로 제작한 경우가 두께감소량이 증가하여 성형성이 더욱 향상됨을 알 수 있다.

따라서 원소재 제작시 롤링 공정으로 발생한 원소재의 가공경화를 개선하는 방향보다는 원소재를 성형할 때 발생하는 가공경화량을 풀림처리 하는 것이 더욱 효과적으로 고세장비의 복잡한 연속주름을 가지는 미세박판 구조물 제작이 가능하다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서 고효율 열교환기 또는 연료전지 분리판 등의 다양한 응용이 가능한 두께 100 μm 수준의 미세 박판성형에 대하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 소재두께 100 μm 수준의 미세 박판 프레스 성형공정에서 복합형 주름구조를 가지는 제품의

경우에는 단일성형공정으로 고세장비를 갖는 형상 제작이 어렵다.

(2) 원소재를 미리 열처리하여 연화 시킨후 단일 성형한 경우에 성형성이 어느 정도 향상되었지만 큰 효과를 얻지 못하였다. 이것은 성형시 발생하는 가공경화에 의하여 한계 성형비에 도달하기 때문으로 사료된다.

(3) 따라서 다단성형 공정으로 원소재를 1 차 성형 후 성형된 시편을 열처리 과정을 통하여 연화시킨 후 추가적으로 동일 금형에서 2 차 성형 과정을 수행하는 것이 한계 성형성 향상으로 세장비가 높은 연속 주름형상을 제작하는데 효과적임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 SHS 성형방법이 PHS 에 비하여 약 19% 정도 성형깊이가 향상됨을 알 수 있었다.

(4) 다단성형공정에서 중간 열처리 온도에 따라 최종형상의 한계 성형비에 차이가 있었으며, 열처리 온도가 사용된 원소재의 재결정 온도부근인 900°C에서 가장 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 GPP 과제 (K20702000013) 지원과 한국과학재단 지원 특정기초연구사업 (2009-0059176) 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) Shim, H. D. and Son, K. C., 2000, "A Study on the Optimal Blank Design Using Sensitivity Analysis Method," *Journal of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 1, pp. 79~86.
- (2) Shim, H. D. and Suh, E. K., 1995, "An Elastic-Plastic FE Analysis of Deep Drawing Processes with a Shear Energy Augmented Membrane Element," *Journal of the KSME*, Vol. 19, No. 11, pp. 2853~2862.
- (3) Yoo, S. Y., Lee, S. Y., Chung, M. H. and Kim, D. S., 1997, "Development of High Performance Plate Heat Exchanger," KRF, pp. 69~92.
- (4) Kim, D. H., Kim, Y. H., Yoo, S. Y., Park, G. S. and Kim, G. K., 1996, "Forming Analysis of Plate Type Heat Exchanger for Gas Boiler," *Journal of the KSME(A)*, pp. 102~107.
- (5) Lee, W. R., Kim, H. K. and Han, B. K., 2005, "A Study on the Mg sheet formability for the warm press forming," *Journal of the KSME*, pp. 1441~1446.

- (6) Yoon, I. C., Ko, T. J., Kim, H. S. and Park, D. H. 2008, "Ring Forming by Multi Forming Process," *Journal of the KSPE*, pp. 117~118.
- (7) Lee, K. S., Lee, S. H. and Yin, J. J., 2001, "Automatic Generation of CAD/CAE Model for a Stamping Die Rounding Optimization," *Journal of the KSME(C)*, pp. 269~274.
- (8) Shim, H. B., 2009, "Improving Formability to Develop Miniature Stamping Technologies," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 2, pp. 117~125.
- (9) Kim, D. Y., 1999, "Plastic forming," *Munbook*, p. 315.
- (10) ASM Handbook Volume 4, Heat Treating.