

용접판재의 U-벤딩시 스프링백 특성에 관한 실험적 연구

신장모* · 장성호* · 허영무** · 서대교***

Experimental Investigation of the Springback Characteristics of Tailor-Welded Strips in U-bending

J. M. Shin, S. H. Chang, Y. M. Heo and D. G. Seo

Abstract

Sheet or plate bending is one of the most important industrial metal forming processes. And considerable attention has been focused on gaining a better understanding of many of bending characteristics. One of defaults in bending process is the springback. In this study, the springback characteristics of tailor-welded strips in U-bending process was investigated. Furthermore, not only the relationships between the springback and the process variables such as the geometry of the tools and thickness combination of workpiece but also the heat effect which affects the springback due to welding process was experimentally considered. First, tailor-welded strips are joined by the laser welding process and consisted of two types of thickness combinations of the SCPI sheet, $0.8t \times 1.2t$ and $0.8t \times 1.6t$ to investigate the effect of different thickness combination on the springback. Secondly, two different directionally welded strips, one was welded along the centerline of the strip-width and the other was along the centerline of strip-length, were adopted to compare the effects of the location of weld line on the springback. And three punch profile radii of 3, 9, and 15 mm were used. Some cases of the experimental results were simulated by using a commercial FEM code, PAM-STAMP to compare the experimental results to the analytical ones.

Key Words : Springback, Tailor-Welded Strips, The Location of Weld-Line, Punch Profile Radius

1. 서론

박판 성형 공정에서 정확한 형상을 얻기 위해서는 성형된 후 박판 내부의 응력이 탄성적으로 재편되면서 생기는 현상에 따른 치수 오차인 스프링백의 예측이 필

요하다. 최근 컴퓨터 산업의 비약적인 발전에 힘입어 많은 소성가공 공정들이 유한 요소법 등에 의해 해석되고 있음에도 불구하고 스프링백의 예측에 대한 수치적인 방법은 어려운 문제로 남겨져 실험적인 방법이나 숙련자의 경험에 의해 해결하는 경향이 두드러진다.⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾ 따라서,

* 성균관대학교 기계공학부 대학원
** 한국 생산 기술 연구원
*** 성균관대학교 기계공학부, 책임저자

자동차 산업 등 생산 현장 전반에 걸쳐 정확한 스프링백 예측이 절실히 요구되어지고 있다.

또한, 최근 자동차 산업에서는 경량화 추세와 차체의 용접 조립시 재료비의 절감, 차체의 강도 향상 등을 위해서 테일러 웰드드 블랭크(Tailor-welded Blank, TWB)방식의 사용이 적극 검토되고 있다. TWB 방식은 두께와 기계적 물성치, 코팅 타입 등 서로 상이한 2매 이상의 판재를 레이저(Laser) 또는 매쉬심(mash seam) 용접 등을 통해서 하나의 블랭크로 일체화시킨 후 성형 공정을 통하여 자동차 차체 패널을 제조하는 새로운 자동차 차체 제조 기술이다. 이러한 TWB 방식의 장점은 판의 두께와 재질의 최적 배치가 가능하고 연속적인 용접선을 이루므로 결합 강도가 높으며 접침 부를 없앨 수 있어 경량화가 가능하다는 점을 들 수 있다. 따라서 이러한 방식은 용접 공정과 프레스 성형 공정의 발달과 더불어 앞으로 보편화 될 것으로 본다.⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾ 지금까지 연구에는 이러한 신기술에 박판 성형의 중요한 문제점인 스프링백 특성을 적용한 연구는 많지 않았다. 따라서 이러한 TWB 방식의 용접판재에 대한 스프링백 특성을 실험적인 방법으로 고찰하고자 한다.

본 연구에 적용한 용접 판재는 두께가 다른 냉연강판(SCP1)을 레이저 용접을 이용하여 두 가지 두께 조합(0.8t×1.2t, 0.8t×1.6t)으로 제작하고, 용접부의 위치에 따른 스프링백 특성을 파악하기 위하여 용접을 시험편의 폭 방향 및 길이방향의 두 가지로 수행하여 스프링백을 측정, 비교하였다. 스프링백의 정도는 퍼센트 스프링백(%S.B.) 즉, $(\theta_a - \theta_b) / \theta_a \times 100$ 으로 측정 계산하여 정량적으로 나타냈다, 여기서 θ_a 는 성형 후 금형에서 제거하기 전의 시험편 바닥 면과 옆벽 부의 예각이고, θ_b 는 성형품을 금형에서 꺼낸 후 스프링백이 발생한 시험편의 바닥 면과 옆벽 부 사이의 예각이다.

본 연구에서는 용접 판재의 스프링백 특성을 단순한 U-벤딩 공정으로 몇 가지 성형 변수들을 변화시켜 가며 실험적으로 고찰하였으며, 일부 실험 결과는 상용 FEM code인 PAM-STAMP를 사용한 해석 결과와 비교, 고찰하여 그 예측 가능성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험 및 실험 장치

본 연구에 사용된 용접 판재(TWB)의 모재는 기존의 차량 성형용 판재인 냉연강판(SCP1)이며, 0.8t×1.2t, 0.8t×1.6t의 두 가지 두께 조합으로 레이저 용접되었고, 냉

연강판에 관한 기계적 물성치와 용접 조건은 Table 1에 나타났다. U-벤딩 실험을 위해 230 mm×30 mm 크기의 시험편을 Fig. 1에서처럼 용접선 방향에 따라 길이방향의 용접선(Type A)과 너비방향의 용접선(Type B)을 가지는 2종의 시험편을 두 가지 두께 조합으로 준비하였다. 또한 용접 판재의 스프링백과 비교를 위하여 모재인 냉연강판을 각 두께별로 용접 시험편과 같은 크기로 제작하여 실험을 수행하였다. 본 실험을 위해 사용한 U-벤딩 실험 장치는 용접 판재의 굽힘을 위해 Fig. 2와 같이 바닥 성형을 배제하기 위해 스프링을 이용하여 시험편을 지지할 수 있도록 패드(Pad)를 제작하였고, 펀치의 형상 반경의 변화를 주기 위해 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 반경별 인서트를 별도로 제작, 삽입하여 펀치 형상 반경(R_p)을 3 mm, 9 mm, 15 mm 3단계로 변화를 주었으며, 다이 어께 반경(R_d)은 5 mm로 고정하였다. 펀치와 다이 사이의 틈새(Clearance)를 변화시킬 수 있도록 지지대와 다이의 사이에 레일을 설치하였다. 또한, U-벤딩 실험장치는 30 ton 용량의 U.T.M. (universal testing machine)에 장착을 하여 실험을 수행하였다.

Table.1 Mechanical properties and welding conditions

Mechanical properties		Laser welding conditions	
Material	SCP1	Beam power (kW)	3.5
Yield Strength (kg/mm ²)	13.98	Welding speed (m/min)	4.0
Plastic Coefficient (kg/mm ²)	50.81	Ar-gas flow rate (ℓ/min)	20
Tensile Strength (kg/mm ²)	28.48	No. of mirrors	4
Strain Hardening Exponent	0.2151	Beam distance (m)	6

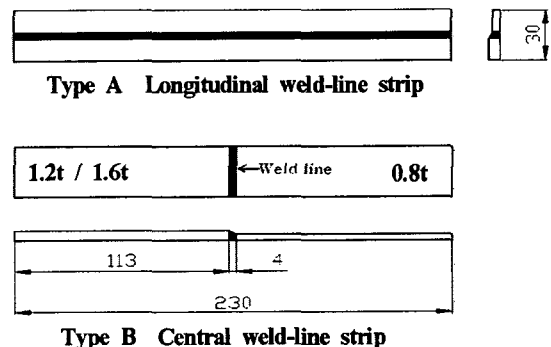


Fig. 1 Tailor-welded strips for U-bending test (Unit: mm)

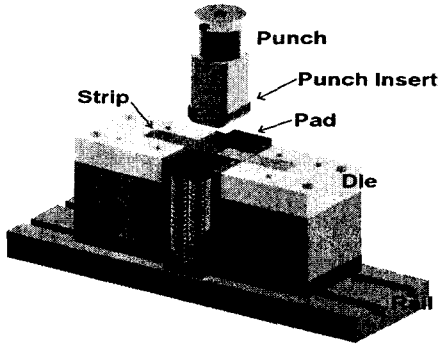


Fig. 2 Experimental apparatus of U-bending test for the tailor-welded strips

2.2 실험 방법

용접 판재(TWB)의 굽힘 실험을 하기 위하여 펀치의 동적인 충격을 막고, 굽힘이 원활하게 진행될 수 있도록 Die의 높이와 일치하게 패드(Pad)를 제작하였다. 패드의 힘은 Fig. 3에서와 같이 펀치가 10 mm 진행되었을 때 판재의 두께가 가장 두꺼운 냉연강판(1.6t)의 경우와 펀치 형상 반경이 가장 작은 3 mm인 경우에서 최대 굽힘 일에 의한 펀치 하중이 최대가 되었다. 이 경우를 기준으로 펀치 바닥 영역에서 시편이 굽힘을 발생시키지 않는 최소 패드의 스프링 상수를 결정하였다. 스프링 상수는 1.643 kg/mm이었다. 펀치와 다이 사이의 간격은 시편 두께의 1.5배로 하였고, 용접선 길이방향의 시편의 경우는 두꺼운 쪽 소재 두께의 1.5배로 다이와 펀치의 틈새(Clearance)를 조절하였다. 그리고 성형 깊이는 70 mm, 펀치 속도는 5 mm/sec로 성형을 하였다.

먼저, 본 실험인 용접 판재(TWB)의 스프링백 특성 실험에 앞서 용접하지 않은 모재에 대한 동일한 실험 조건

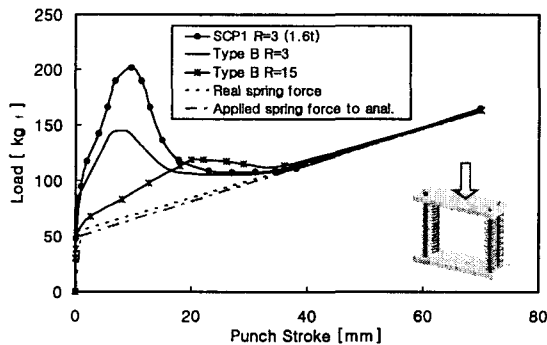


Fig. 3 Punch load versus punch stroke

Table 2 Experimental condition

Specimen	Condition	Clearance (mm)	R _p (mm)	Spring coefficient (kgf/mm)
SCP1	0.8t	1.2	3	1.643
	1.2t	1.8		
	1.6t	2.4		
Type A	0.8t×1.2t	1.8	9	
	0.8t×1.6t	2.4	15	
Type B	0.8t×1.2t	1.2	1.8	
	0.8t×1.6t	1.2	2.4	

에서 두께(0.8t, 1.2t, 1.6t)에 따른 스프링백 량과 펀치의 형상 반경(3 mm, 9 mm, 15 mm)에 따른 스프링백에 대해 실험, 고찰하였다. 실험의 세부적인 조건들은 Table 2에서 보여 주고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉연강판의 스프링백 특성

먼저 용접 판재의 실험에 앞서 U-벤딩에서의 SCP1의 스프링백 특성을 살펴보면 Fig. 4에서 용접되지 않은 SCP1의 대칭성을 고려하여, 펀치 형상 반경과 재료의 두께에 따라 스프링백 후의 반쪽 형상을 측정하여 각각 그림의 왼쪽과 오른쪽에 형상을 나타내었다.

그림에서 (1), (2) 그리고 (3)의 결과처럼 펀치의 형상 반경(R_p)이 커질수록 스프링백이 크게 발생하였다. (4), (5) 그리고 (6)은 동일한 펀치 반경에서의 두께(t)에 따른

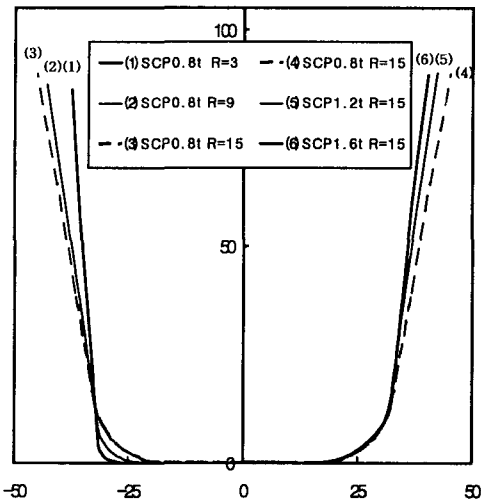


Fig. 4 Deformed shapes after springback for SCP1 according to the punch radii and thicknesses

스프링백 후의 형상으로 두께가 얇을 수록 스프링백이 크게 발생함을 알 수 있었다.

3.2 용접 판재의 스프링백 특성

본 연구의 주 내용인 용접 판재에 대한 스프링백 특성을 알아보기 위해 2종의 두께 조합(0.8t×1.2, 0.8t×1.6t)에 대한 U-벤딩 실험을 실시하였다. 먼저 Fig. 5에서는 Type A의 용접 판재(0.8t×1.2t)와 용접되지 않은 SCP1의 결과를 % S.B.로 나타내어 비교한 결과이다. Type A의 용접 판재는 두꺼운 소재와 얇은 소재 그리고 용접 비드부가 동시에 굽힘 공정 후 탄성적 회복을 일으켰으나 전체 스프링백의 정도는 용접되지 않은 두꺼운 판재의 % S.B.과 일치하였다. 그리고 이때 펀치 형상반경에 대하여서는 스프링백 량이 기존의 연구 결과와 같이 R_p 에 비례하는 결과를 나타냈다. Type A의 용접 판재(0.8t×1.6t)의 경우도 같은 결과였다. Fig. 6에서는 Type B의 용접 판재와 용접하지 않은 SCP1과의 스프링백 후의 실험 결과 형상을 비교하였다. 여기에서 Type B의 두꺼운 쪽(Fig. 6에서 (4)와 (7))은 같은 두께의 용접하지 않은 모재(Fig. 6에서 (5)와 (6))와 거의 일치하는 것을 알 수 있는데, Type B의 얇은 쪽(Fig. 6에서 (2)와 (3))은 같은 두께의 용접하지 않은 모재(Fig. 6에서 (1))보다 스프링백이 감소함을 알 수 있었다. 이러한 Type B의 스프링백 실험 결과를 Fig. 7에서와 같이 펀치 형상 반경에 따른 % S.B.으로 나타내었다. 이 경우 얇은 쪽(0.8t)의 % S.B.이 1.2t와 1.6t의 % S.B.사이 에 위치함을 알 수 있다. 이는 용접하지 않은 모재의 스프링백 실험과 다른 양상임을 알 수 있었다. 이러한 용접 판재(Type B)의 스프링백 특성은 용접시 고온에 의한 영향으로 비교적 얇은 두께 0.8t의 재료적 특성이 변화되었다고 사료된다. 이에 대한 심도 있는 고찰이 요구되어진다고 하겠다.

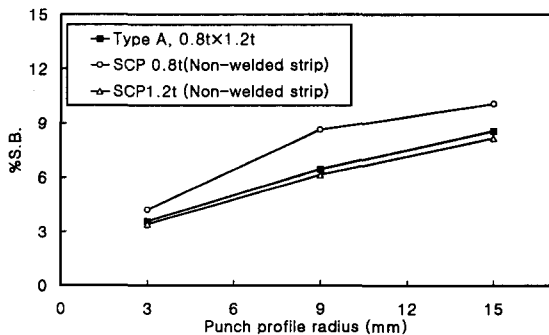


Fig. 5 % springback versus various punch profile radii

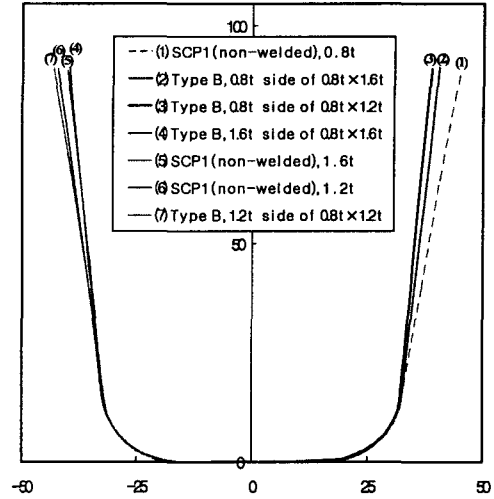


Fig. 6 Deformed shapes after springback ($R_p=15$ mm)

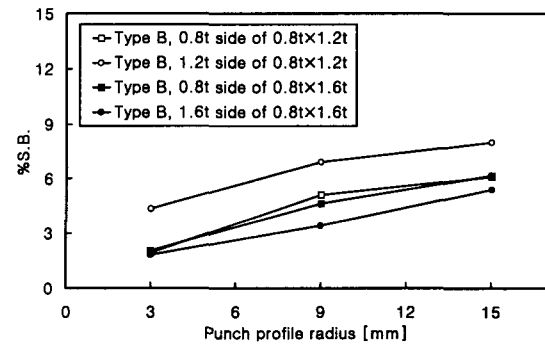


Fig. 7 % Springback versus various punch profile radii

4. 해석

용접 판재(TWB)의 스프링백을 예측하기 위해 본 연구에서는 박판 성형에 일반적으로 많이 쓰이는 상용 FEM code인 PAM-STAMP를 이용한 해석을 수행하였다. 용접 판재의 성형 해석과 스프링백 해석시 Type A의 길이 방향과 Type B의 너비 방향 대칭성을 고려한 Half-모델링을 하였고, 용접하지 않은 모재의 경우는 1/4모델링을 하였다. 또한, 폭 방향으로의 변형을 고려하지 않았기 때문에 폭 방향으로는 하나의 요소(element)로 나누었다. 그리고 고온의 레이저 용접으로 인한 열영향부(Heating Affected Zone, HAZ)를 고려하여 4 mm 정도의 용접부를 고려하여 해석을 수행하였다. 이러한 성형해석 조건들을 table 3에 제시하였다.

Fig. 8은 Type A 용접 판재의 스프링백 후 형상

Table 3 Simulation condition and the mechanical properties of the weld zone

Simulation Condition	Element type	Shell
	Element size of strip	1 mm
	No. of corner Element	20 EA
	Punch velocity & stroke	1 m/sec, 70 mm
Mechanical properties of the weld bead	No. of integration point	7 EA
	Welding type	Laser welding
	Plastic coef.	58.032(kgf/mm ²)
	Tensile strength	29.98(kgf/mm ²)
	Strain hardening exp.	0.2493
	Elongation	44.9%

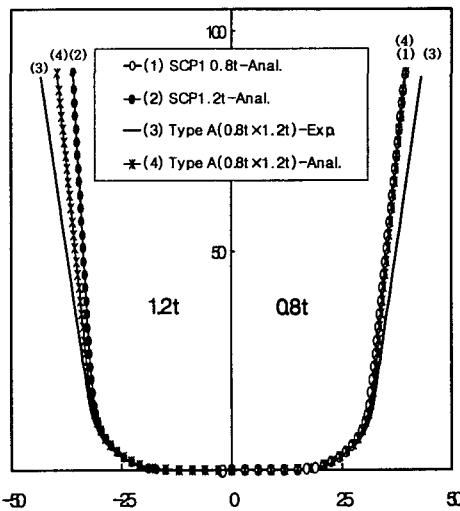


Fig. 8 Deformed shapes after springback ($R_p=15$ mm)

을 펀치 형상 반경 15 mm인 경우에 대하여 실험 및 해석 결과(그림에서 (3)과 (4))와 각 두께의 용접하지 않은 SCP1(그림에서 (1)과 (2))의 해석 결과를 비교하여 나타내었다. Type A 용접 판재의 해석 결과 (4)를 살펴보면 앞선 실험결과와 달리 전체 스프링백 후 형상이 얇은 쪽과 같은 두께의 용접하지 않은 판재의 해석결과 (1)과 거의 일치하였으며, 용접 판재의 실험 결과 (3)와 해석 결과 (4)를 살펴보면, 전체적으로 해석이 실험보다 스프링백이 적게 나타나고 있다.

Fig. 9에서는 Type B 용접 판재의 스프링백 후 형상을 실험 및 해석 결과(그림에서 (4)와 (5))와 용접하지 않은 판재의 해석결과 (그림에서 (2)와 (3))를 비교하여 나타내었다. Type B 용접 판재의 해석결과 (5)는 각 두께의 용접하지 않은 판재의 해석결과와 같은 결과를 나

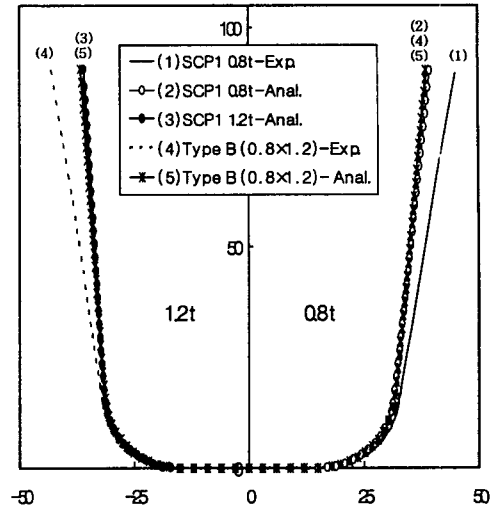


Fig. 9 Deformed shapes for the experiment and the analysis after springback ($R_p=15$ mm)

타내어 용접 판재의 스프링백 특성을 정확하게 예측할 수 없었다. 이에 대한 심도 있는 연구가 필요하다고 사료된다.

5. 결론

용접 판재에 대한 스프링백 특성에 관한 연구를 위해 그 모재인 냉연강판(SCP1)의 스프링백 특성과 비교하고, 그리고 용접 비드의 방향과 펀치 형상 반경 등의 실험조건을 적용하여 시편의 탄성적 회복, 즉 스프링백 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 펀치의 형상 반경을 3단계로 변화시켜 실험한 결과 SCP1과 길이방향 용접 시편(Type A, 0.8t×1.2t) 모두 반경이 증가함에 따라 스프링백 량도 증가하였고, 소재 두께(t)에 대해서는 두께가 증가함에 따라 스프링백 량은 감소하였다. 그리고 Type A의 스프링백 측정 결과는 얇은 소재, 용접부, 두꺼운 소재가 동시에 굽힘을 받은 후 탄성적 회복을 거치므로 3가지 재료적 특성의 평균에 의한 스프링백을 예상하였던 것과는 달리 두꺼운 쪽과 같은 두께의 SCP1의 스프링백 량과 같은 결과가 나타났다.

(2) 너비 방향 용접선을 갖는 용접 시편(Type B, 0.8t×1.2t)의 경우, 두꺼운 소재의 스프링백은 같은 두께의 용접하지 않은 SCP1(1.2t)과 같은 스프링백 량을 보였으나, 얇은 소재(0.8t)의 스프링백은 용접되지 않은 SCP1의 결과보다 약 44%의 스프링백 량이 줄어드는 경향을

나타냈다.

(3) 용접 판재(0.8t×1.6t)의 경우도 위의 결과 (1), (2)와 같은 경향의 결과가 나타났다. 이러한 용접 판재의 얇은 쪽 소재에서의 스프링백 감소 특성은 높은 출력과 온도의 조건에서 레이저 용접시 열 영향에 의한 재료적 물성치가 변화되었다고 판단된다. 따라서 추후 이러한 특성의 원인을 심도 있게 고찰 할 필요성이 있다고 사료된다.

(4) 상용 FEM code를 이용한 용접 판재의 스프링백 해석 결과, 실험보다 스프링백의 정도가 과소평가 되는 것으로 예측되었으며, Type A 용접 판재의 경우에는 실험과 반대로 얇은 쪽의 스프링백과 일치하는 것으로 예측되었고, Type B 용접 판재의 경우에는 용접 판재의 효과 없이 각각의 용접하지 않은 판재의 해석결과와 같은 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) T. Uemori, T. Okada, F. Yoshida, 1998, "Simulation of Springback in V-bending Process by Elasto-Plastic finite Element Method with consideration of Bauschinger Effect", METALS AND MATERIALS, Vol. 4, No. 3, pp. 311~314.
- (2) F. Pourboghra, E. Chu, 1995, "Prediction of spring-back and side-wall curl in 2-D draw bending", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 31~374.
- (3) M. J. Finn, P. C. Galbraith, L. Wu, J. O. Hallquist, L. Lum, T. -L. Lin, 1995, "Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 395~409.
- (4) S. W. Lee, D. Y. Yang, 1998, "An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80~81, pp. 60~67.
- (5) 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, "박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp. 22~28.
- (6) 이호용, 황병복, 1994, "3점 굽힘에서의 스프링백에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제3권 제4호, pp. 401~414.
- (7) 김성환, 신장모, 장성호, 서대교, 2001, "차체 성형용 판재의 U벤딩시의 스프링백에 관한 연구", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 66~70.
- (8) 이상무, 장성호, 최이천, 허영무, 서대교, 2001, "박판의 온간 2차원 드로오 벤딩에서의 스프링백", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 75~80.
- (9) K. M. Zhao, B. K. Chun, J. K. Lee, 2001, "Finite element analysis of tailor-welded blanks", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 37, pp. 117~130.
- (10) Y. M. Heo, Y. H. Choi, H. Y. Kim, D. G. Seo, 2001, "Characteristics of weld line movements for the deep drawing with drawbeads of tailor-welded blanks", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 164~169.
- (11) R. J. Pallett, R. J. Lark, 2001, "The use of tailored blanks in the manufacture of construction components", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 117, pp. 29~254.