

S-레일 시험을 통한 자동차용 판재의 스프링백 특성 평가

Evaluation of the Springback Characteristics for Automotive Steel Sheets by the S-Rail Forming Test

권 인 재^{*} 임 재 규^{**} 김 형 중^{***}
Kwon, In-Jae Rim, Jae-Kyu Kim, Hyung-Jong

Abstract

This study is aimed to evaluate the springback characteristics of automotive steel sheets through the S-rail forming test and to find the process condition under which springback can be reduced. Die set for the S-rail test has been made according to the dimension of the NUMISHEET '96 benchmark model. Experiment and finite element analysis have been performed on two kinds of automotive steel sheets: mild steel, SPEN and high strength steel, SPRC.

The test results show that the amount of springback is larger on the high strength steel SPRC than on the mild steel SPEN, and decreases with increasing blank holding force as the case of material flow. And the reduction of friction has the effect of lowering the blank holding force in view of punch force and material flow. It is shown that the strain distribution over the whole specimen and along the specified sections calculated from the finite element analysis coincides with the measured data except local differences.

키워드 : 스프링백, 고강도강, S-레일 성형, 유한요소해석

Keywords : *springback, high strength steel, S-rail forming, finite element analysis*

1. 서론

최근 자동차 판재부품들이 경량화되고 있는 것은 물론, 더욱 정교해지고 복잡해짐에 따라 스프링백 문제에 대한 관심이 점차 커지고 있다. 특히 인장강도가 큰 재료일수록 스프링백에 의한 형상변화가 커지며, 성형시 신장량이 국부적으로 과도하게 되지 않도록 균일한 가공변형이 이루어지도록 하여야 한다. 스프링백에 의해 발생하는 치수오차는 부가적인 수정공정을 요구하는 경우가 많다. 이

러한 문제점들을 극복하고 성공적인 부품을 생산하기 위해서는 보다 효율적이고 정확한 형형설계 및 공정설계가 선행되어야 한다.

S-레일 성형과 같이 3차원 형상에서의 스프링백 문제는 2차원에서의 스프링백과는 또 다른 많은 문제점들이 발생된다. 자동차의 멤버류와 같은 구조용 부품들은 모델에 따라 다양한 형상과 치수를 가지고 있지만 대부분 채널(Channel)형 단면을 가지고 있다. 이는 NUMISHEET '96[1] 벤치마크 모델인 S-레일과 비슷한 형상이다. 이러한 형상의 부품을 성형한 후에는 보통 비틀림, 주름, 스프링백 등의 문제점들이 발생한다. 그러나 S-레일과 같은 3차원 형상의 스프링백 연구에서는 금형제작 등의 어려움으로 실험적 접근이 어렵기 때문에 유한요소해석에 의한 공정 시뮬레이션으로 실험을

* 강원대학교 산업대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 박사과정

*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 부교수

대체하는 경우가 많다. 유한요소해석을 이용한 최근의 연구들을 살펴보면, 우선 정완진과 조진우[2]는 균형면을 유한요소로 표현하고 벌칙함수를 사용하여 접촉처리 방법을 사용하는 경우 정확한 응력상태를 구하기 위해 해석인자의 적절한 선택방법에 대하여 연구하였고, 양동열 등[3,4]은 스프링백 해석의 경우 성형해석에서는 외연적 방법을 탄성복원해석에서는 내연적 방법을 함께 사용하는 현재 해석방법의 타당성을 확인하였고, 스프링백 현상을 유한요소법으로 해석하는 방법 및 유한요소 모델링 인자가 스프링백 양에 미치는 영향을 기술하였으며, Shi와 Zhang[5]은 항복조건, 가공경화법칙, 이방성, 변형률속도 등의 변화에 따른 스프링백 해석결과에 대해서 연구하였다.

본 연구에서는 스프링백 특성평가를 위해 자동차용 냉연강판인 SPCEEN, SPRC 등 2종의 재료를 사용하여 NUMISHEET '96에 제시된 S-레일 금형을 제작하고 성형 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 스프링백 양은 3차원 자동곡면정보 분석시스템(Automated Surface Information Analysis System: ASIAS)[6]을 사용하여 측정하였다. 유한요소해석에 필요한 소재의 물성 데이터는 인장시험을 통하여 구하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP[7]를 이용하여 해석함으로써 소재의 스프링백 특성을 비교·평가하였다.

2. 실험

2.1 인장시험

자동차용 냉연강판 금속판재의 기계적 성질을 측정하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험편은 압연방향으로부터 0°, 45°, 90° 방향으로 각 3장의 시험편을 KS B 0801 13B호 규격으로 채취하였다. 만능시험기(universal testing machine: UTM)에서 크로스헤드 속도를 20 mm/min으로 일정하게 유지하여 시험하였으며, 용량 10 ton의 하중계(load cell)와 표점거리 50 mm의 신율계(extensometer)를 통하여 PC로 입력되는 하중-변위 데이터를 진응력-진변형률 곡선으로 변환한 다음 주요 물성치를 구하였다. Table 1~2는 주요 물성치를 정리한 표이다. 표에 표시된 종탄성계수(E)는 재료별로 통상적으로 쓰이고 있는 값을 인용한 것이며, 항복응력(Y)은 이 기울기를 변형률속도로 0.2%만큼 오프셋(offset)하여 진응력-진변형률 곡선과 만나는 점의 응력 값으로 표시한 내력(proof stress)을 나타낸다. 강도계수(K)와 변형경화지수(n)는 최소자승오차법(least-square error method)을 이용하여 진응력-진변형률 곡선을 $\sigma = K\epsilon^n$ 형태로 곡선근사(curve fitting)한 결과이다. Y, K 및 n의 평균값은 같은 변형률에 해당하는 각 방향의 응력 값을 식 (1)과 같이 평균하여 곡선근

사함으로써 구한 것이다.

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}}{4} \quad (1)$$

이방성계수 R값은 연신율 15%까지 인장한 후, 시편에 인쇄된 격자들의 변형된 길이와 폭을 20배율의 윤곽투영기로 측정하여 구하였으며, 그 평균값은 식 (1)과 동일한 방법으로 계산하였다.

2.2 S-레일 성형시험

S-레일 성형시험에 사용된 시편은 인장시험에 사용된 같은 두께, 같은 재질인 자동차용 냉연강판인 SPCEEN(1.0t), SPRC(1.0t) 소재를 사용하였다. S-레일 성형시험용 금형은 NUMISHEET '96 벤치마크 문제에 제시된 형상과 치수대로 Fig. 1과 같이 제작하여 사용하였다.

금형세트를 다이 프레임에 장착하고 100 ton 유압 프레스를 사용하여 S-레일 성형시험을 수행하였다. 실험조건으로는 블랭크홀더 가압력(blank holding force; BHF)을 실험 하한점 60 kN(S-레일 성형제품에 주름이 발생하기 시작하는 최소의 힘)과 상한점 300 kN 사이에서 7가지 정도로 변화시키며 실험하였으며, 실험 전에 소재판의 양쪽 표면은 독일 Fuchs사의 윤활제 4107s를 얇게 도포하였다. 블랭크홀더 가압력 200 kN의 경우에는 소재 표면에 3×3 mm의 정사각형 격자를 전기화학적 부식(electro-chemical etching)으로 인쇄하고 윤활유와 비닐을 함께 윤활제로 사용하였다.

Table 1 Material properties of SPCEEN 1.0t

	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	Hardening		R-value
				K (MPa)	n	
0°	200	165	390	512	0.22	1.91
45°		174	392	512	0.21	1.73
90°		173	384	501	0.21	2.36
Average		172	389	508	0.21	1.93

Table 2 Material properties of SPRC 1.0t

	E (GPa)	Y (MPa)	UTS (MPa)	Hardening		R-value
				K (MPa)	n	
0°	200	240	448	581	0.16	1.50
45°		262	462	568	0.17	1.20
90°		251	442	551	0.16	1.82
Average		254	453	568	0.16	1.43

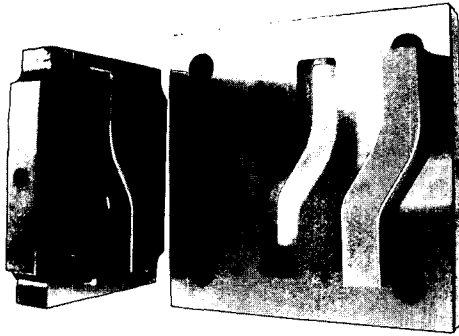


Fig. 1 Photograph of the S-rail forming die set

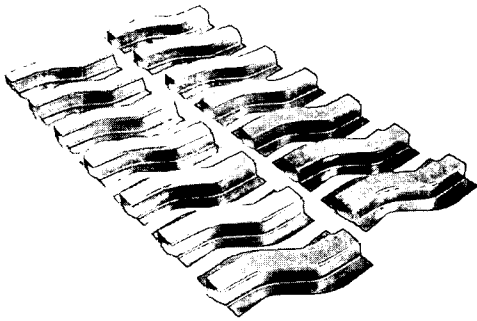
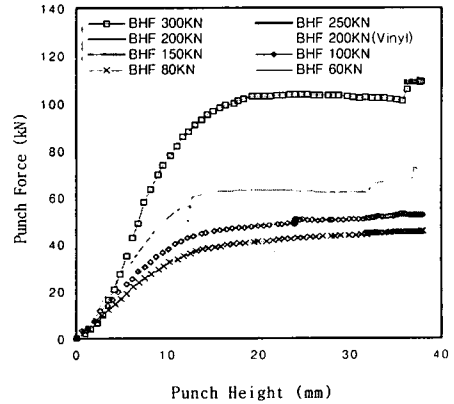
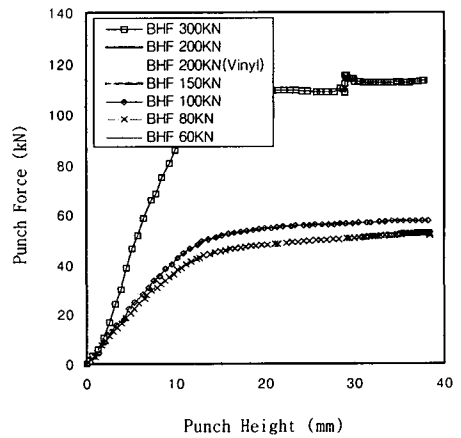


Fig. 2 Photograph of S-rail forming specimens after springback



(a) SPCEN



(b) SPRC

Fig. 3 Punch height vs. punch force

펀치가 37 mm 하강했을 때 실험을 중지하였고, 시편을 주의 깊게 다이 세트로부터 꺼낸 후 측정을 실시하였다. Fig. 2는 성형 후 시편들의 모습이다.

S-레일 성형 및 스프링백 실험의 검증을 위하여 NUMISHEET '96 벤치마크에서 제시한 내용을 토대로 일반강판 'SPCEN'과 고강도강판 'SPRC' 재료에 대한 3차원 측정을 수행하였다.

Fig. 3은 성형 도중 펀치행정에 따른 펀치하중의 변화를 도시한 것이다. SPCEN 재료의 경우는 펀치행정이 13 mm 정도까지 급격히 상승하고, 이후 완만한 증가를 보인다. SPRC 재료의 경우는 블랭크홀더 가압력과 상관없이 펀치행정 15 mm 정도까지는 급격히 상승하다가 이후 완만한 증가를 보인다.

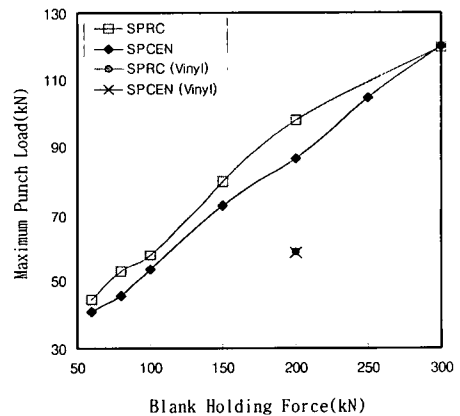


Fig. 4 Blank holding force vs. maximum punch load

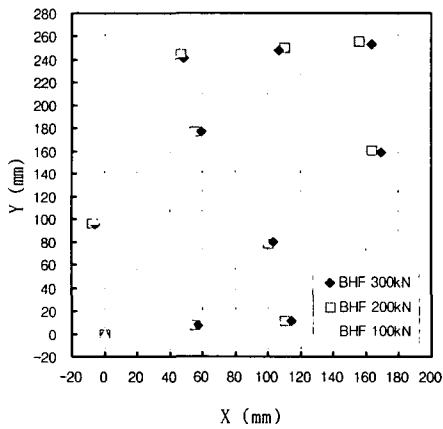
Fig. 4는 블랭크홀더 가압력과 최대 편치하중과의 관계를 도기한 것이다. 전반적으로 SPRC 소재가 약간 높은 것으로 나타난다. 그러나 블랭크홀더 가압력을 200 kN으로 한 경우 비닐 운환을 하면 100 kN의 하중과 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 5~6은 각각 금형으로부터 소재를 분리하여 A-J에 대한 기준 물질점들에 대한 위치를 A점을 기준으로 X-Y 평면에 포개서 나타낸 결과이다. 스프링백에 의하여 벽 부분이 약간 벌어지고 뒤틀린 것을 알 수 있다.

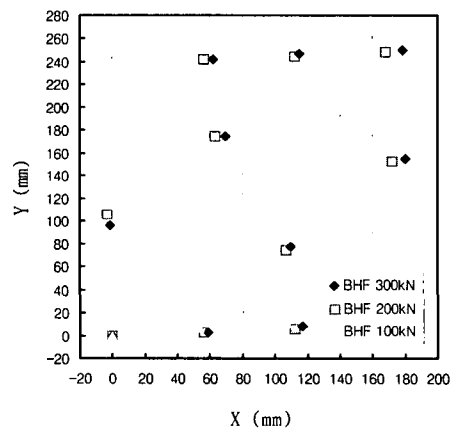
Fig. 7은 단면 B" G"를 따른 Z-좌표의 분포이다. 전체적으로 B" 점에서 G"점 쪽으로 완만하게

Z-좌표가 감소하며, B" 점으로부터 약 130 mm 떨어진 부분에서 폭 약 35 mm, 최대높이 0.6~0.8 mm 정도의 주름이 발생한 것을 알 수 있다.

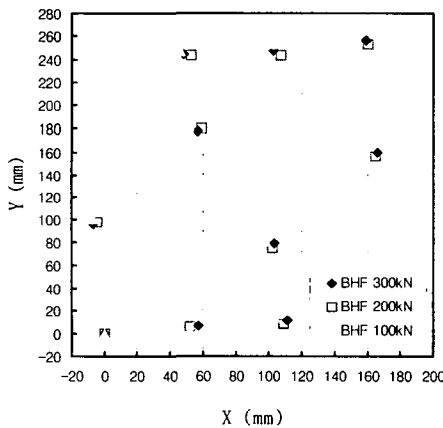
Fig. 8~9는 스프링백 후의 단면을 A점을 기준으로 맞춘 다음 도기한 것이다. 블랭크홀더 가압력이 증가할수록 스프링백이 감소한다. 비닐과 운환유를 함께 사용하고 블랭크홀더 가압력을 200 kN 가한 경우, 운환유만 사용하고 블랭크홀더 가압력을 100 kN 가한 경우와 거의 같은 정도로 재료가 유입되었고, 또한 운환유만 사용하고 블랭크홀더 가압력을 200 kN 가한 경우보다 스프링백 양이 적은 것을 알 수 있다.



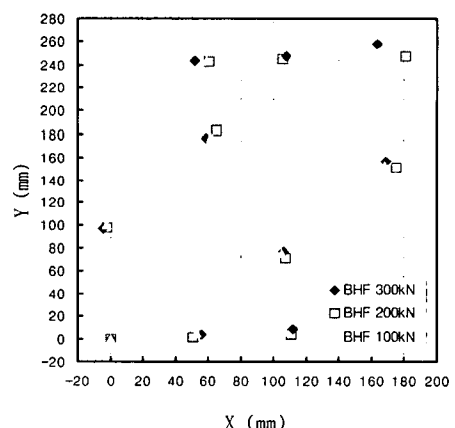
(a) SPEN



(a) SPEN



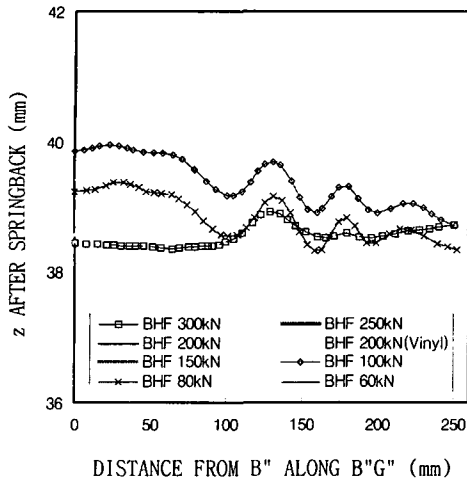
(b) SPRC



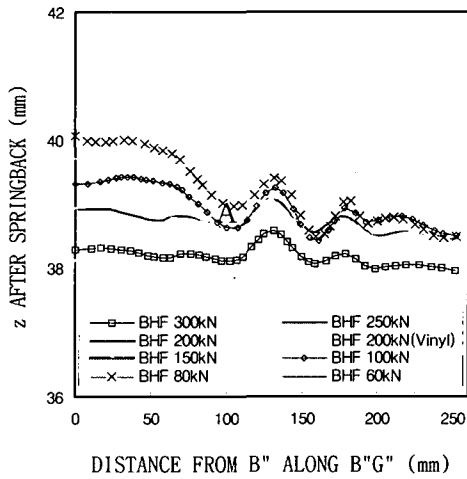
(b) SPRC

Fig. 5 Deformed position of key material points before springback

Fig. 6 Deformed position of key material points after springback



(a) SPCEEN

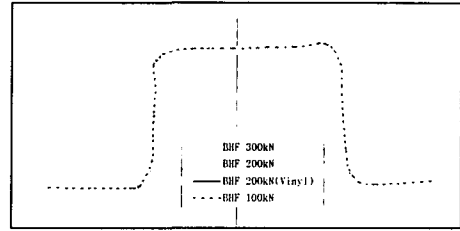


(b) SPRC

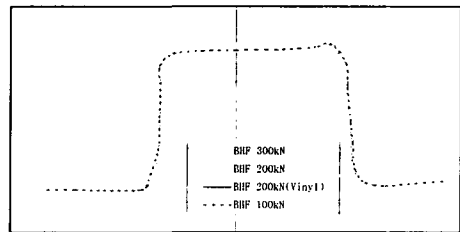
Fig. 7 z-coordinates along B' G' after springback

3. 유한요소해석

Fig. 10은 NUMISHEET '96에 벤치마크 모델의 초기소재 형상과 금형 배치를 개략적으로 그린 것이다. A, B, C, ..., J는 성형 전 소재 상의 위치와 단면을 정의하기 위한 기준물질점들을 나타내며, 성형 후에는 각각 A', B', C', ..., J'로, 스프링백이 일어난 후에는 각각 A'', B'', C'', ..., J''로 표시된다.

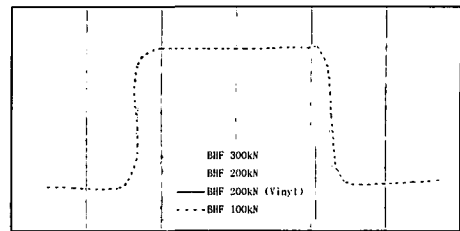


(a) SPCEEN

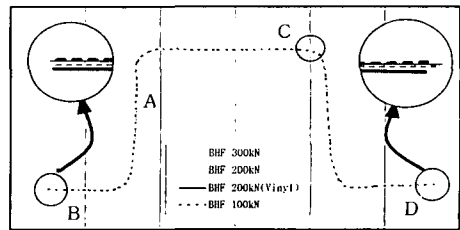


(b) SPRC

Fig. 8 Top surface profile of section I' E' after springback

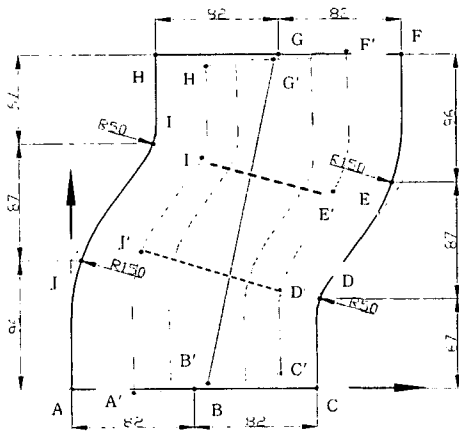


(b) SPRC



(a) SPCEEN

Fig. 9 Top surface profile of section J' D' after springback



Y-axis is along the rolling direction

Fig. 10 Reference points before and forming (before springback, schematic)

Table 3 Input parameters and CPU time

Initial Thickness of Blank	1.0 mm
Clearance between Punch & Die	1.2 mm
Friction Coefficient, Punch	0.11
Die	0.05
Holder	0.11
Blank Holding Force	200 kN
Punch Velocity	5 m/sec
No. of Blank Elements, Initial	3,588
Final	10,557
No. of Die Corner Elements	10
No. of Integration Points	3
Contact Algorithm, Punch	Lagrange
Die	Penalty
Holder	Penalty
Penalty Parameter for Contact	0.01
Contact Damping Parameter	0.1
CPU Time, Forming	8,964 sec
Springback	11,170 sec

해석에 사용된 프로그램은 PAM-STAMP[7]이다. 이는 주로 판재성형 공정의 동적-외연적(dynamic-explicit) 해석을 위한 상용 유한요소 프로그램이다. 사용된 재료와 블랭크홀더 가압력(blank holding force)의 크기, 비닐 윤활 여부에 따라 총 16가지의 해석이 수행되었으나, 본 연구는

판재의 스프링백 특성 평가가 목적이기 때문에 비닐 윤활, 블랭크홀더 가압력 200 kN, 두께 1.0 mm의 자동차용 고강도 강판(SPRC)의 경우만 분석하기로 한다.

SPRC 재료에 규칙적으로 배열된 3,588개의 초기 유한요소망을 사용하였다. 이 초기 유한요소 모델은 성형해석 중 1회의 적용요소세분화를 적용하여 약 10,000개의 요소로 세분화된다. 소재와 금형 간의 모든 접촉면에서는 Coulomb의 마찰조건을 적용하였다. SPRC재료에 대한 유한요소 해석에 입력된 주요 공정변수와 수치변수, 소요된 CPU 시간은 Table 3에 정리하였으며, 재료의 주요 물성치는 Table 2의 인장시험 결과와 같다.

S-레일 성형 및 스프링백 해석 기법의 검증을 위하여 비닐 윤활한 SPRC 재료에 대하여 성형공정 및 스프링백 해석을 수행하였다. 해석결과와 실제 성형한 결과들과 비교하였다.

Fig. 11은 펀치 행정에 따른 펀치 하중의 변화를 나타낸 것이다. 실험에서는 약 12 mm, 해석에서는 약 15 mm의 펀치 행정까지 하중이 급격히 증가하다가 이후 완만한 증가를 보인다. 최대 하중은 실험과 해석에서 약 6 kN의 차이를 나타내고 있는데, 그 주원인은 성형 도중 마찰상태의 변화인 것으로 생각된다.

Fig. 12는 J" D", I" E" 및 B" G" 단면을 따른 주변형률의 분포를 도시한 그림이다. 해석 결과는 전반적으로 실험 결과와 비슷한 값을 나타내고는 있으나 국부적인 변형률 집중 정도와 그 위치를 정확히 예측하지는 못하고 있다. 이는 외연적 해석 결과의 근본적인 신빙성 문제와 3차원 곡면의 변형률 측정에 수반되는 오차의 복합적 요인 때문인 것으로 보인다.

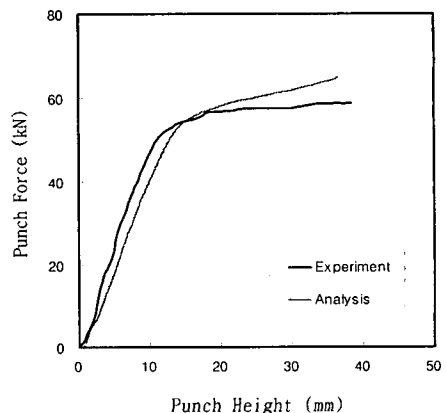
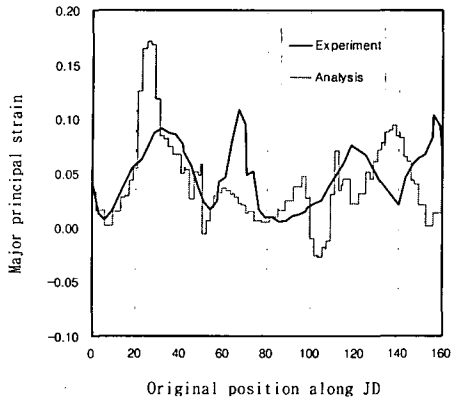
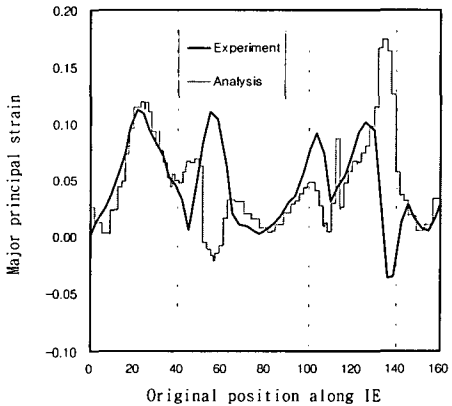


Fig. 11 Punch height vs punch force

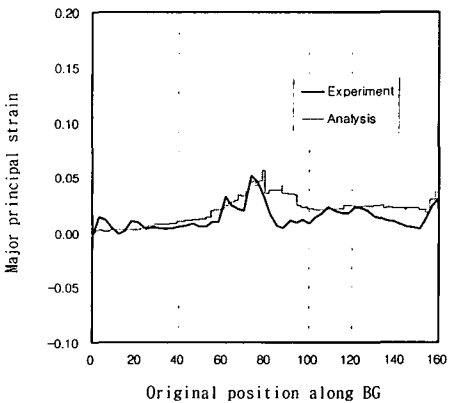
S-레일 시험을 통한 자동차용 판재의 스프링백 특성 평가



(a) along J'D"



(b) along I'E"



(c) along B'G"

Fig. 12 Major strain distribution after springback

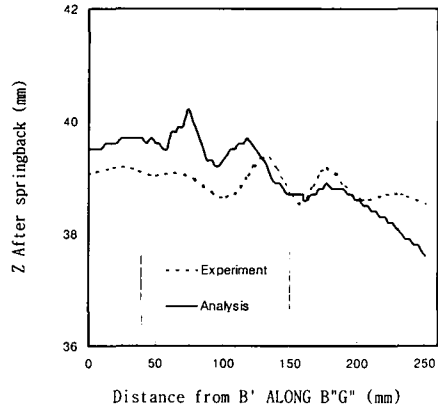


Fig. 13 Z-coordinates along B'G' after springback for SPRC

Fig. 13은 B'G' 단면을 따른 Z-좌표의 분포를 나타낸 그림이다. 해석과 실험 결과는 최대 약 1 mm 정도의 편차를 가지나 전체적으로 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 스프링백이 일어난 후의 주변형률 및 두께변형률 분포에 대하여 유한요소해석과 실험의 결과를 비교한 것이다. 실험 결과는 스테레오비전과 화상처리기술을 이용한 자동곡면정보분석시스템(ASIAS)[6]으로 측정된 것이다. 주변형률과 두께변형률 공히 그 정량적 크기는 실험과 해석에서 약간의 차이가 있으나 전체적인 분포 양상에서는 흡사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 자동차용 냉연강판의 스프링백 특성 평가를 기초로 스프링백의 예측·저감 기술을 확보하는데 목표를 두고 수행되었다.

우선 일반강판(SPCEN)과 고강도강판(SPRC)의 두 가지 재료에 대한 인장시험을 실시하여 주요 물성치를 파악·정리하였다. 3차원적 스프링백 특성 평가를 위하여 NUMISHEET '96 벤치마크 모델로 제시된 내용을 토대로 S-레일 성형용 급형세트를 직접 제작하고 성형시험을 수행하였다. 그리고 스프링백 특성 평가의 정확도를 높이기 위해 S-레일 성형공정에 대한 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 실험값과 비교·분석하였다. 재료별 스프링백 양의 분석, 성형 중 편치하중의 변화에 따른 분포, 유향 상태에서의 분포를 주요 물질점들의 위치, 3가지 단면에 따른 주변형률 분포, 길이방향

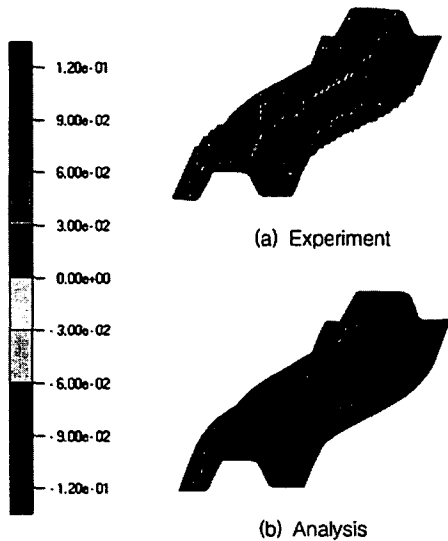


Fig. 14 Major strain contour after springback

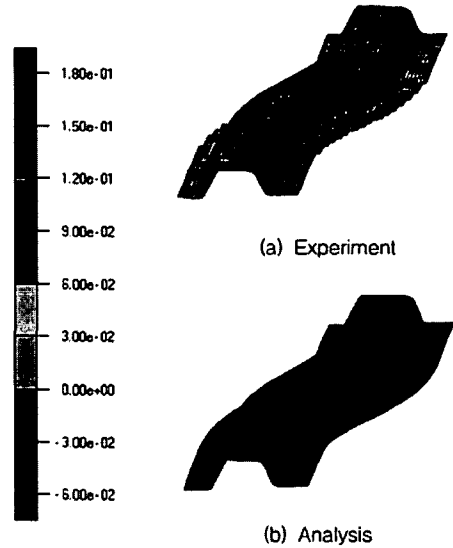


Fig. 15 Thickness strain contour after springback

단면 B", G"를 따른 Z-좌표의 분포 변화를 분석하였다.

주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 스프링백 특성을 연구하기 위해 NUMISHEET 96' 벤치마크 문제인 S-레일 시험한 결과 일반적으로 일반강판(SPCEN) 보다 고강도강판(SPRC) 재료의 경우 스프링백의 양이 크다는 사실을 확인하였다.
- (2) 실험으로부터 블랭크홀더 가압력이 클수록 스프링백 양이 감소한다는 일반적인 사실이 확인되었다.
- (3) 윤활유로만 윤활한 경우(블랭크홀더 가압력 100 kN)보다 비닐과 윤활유를 동시에 한 경우(블랭크 홀더 가압력 200 kN)가 블랭크홀더 가압력의 변화에 영향을 덜 받으며, 블랭크홀더 가압력이 커도 재료의 유입은 더 좋고 스프링백 양도 감소한다는 사실을 확인하였다.
- (4) S-레일 성형 문제를 상용 유한요소 프로그램인 PAM-STAMP를 사용하여 해석하였다. 해석 결과를 비교할 때 펀치하중의 변화는 비교적 잘 일치하였으나, 변형률의 분포는 차이를 보인다. 이는 변형률 측정상의 오차에 주로 기인하는 것으로 판단된다.
- (5) 이상의 실험과 유한요소해석에서 얻은 결과들은 금속 판재에서 스프링백 특성 평가 예측에 필요한 자료로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, J. K., Kinzel, G. L. and Wagoner, R. H. (Ed.), Proc. of the 3rd Int. Conf., NUMISHEET '96, USA, pp. 444-464, 1996
- [2] 정완진, 조진우, "박판금속 성형공정 해석시스템 개발", 한국소성가공학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 29-37, 1999
- [3] 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, "박판성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", 한국소성가공학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 22-28, 1999
- [4] Lee, S. W. and Yang, D. Y., "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, 1998
- [5] Ming F. Shi and Li Zhang, "Issues Concerning Material Constitutive Laws and Parameters in Springback Simulations", Society of Automotive Engineering, 1999-01-1002, pp. 107-114, 1999
- [6] 김두수, 김형중, "중·대형 판재성형 제품의 곡면변형률 측정을 위한 비전시스템의 개선", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No. 14, pp. 404- 412, 2000
- [7] Pam System International, PAM-STAMP™ User's Manual, 1998