

DP780 초고장력 강판을 이용한 자동차용 시트레일의 성형공정 설계

고대철¹ · 안재홍² · 장명진³ · 배재호³ · 김창호⁴ · 김병민[#]

Process Design of Seat Rail in Automobile by the Advanced High Strength Steel of DP780

D. C. Ko, J. H. An, M. J. Jang, J. H. Bae, C. H. Kim, B. M. Kim

(Received January 7, 2008)

Abstract

The control of springback is very important in sheet metal forming since springback affects the dimensional inaccuracy of product. The object of this study is to design the manufacturing process for the improvement of the performance of seat rail by DP780. The influence of process variables such as bend angle and pad force on the springback has been firstly investigated through the comparison between the results of FE-analysis and trial out for initial design based on designer's experience. The process variables of the initial design have been modified in order to improve the dimensional accuracy of seat rail from the prediction of springback by FE-analysis. It was shown from experiment that the improved design satisfied the required specifications such as the dimensional accuracy and the strength of seat rail

Key Words : AHSS, Bending, Finite Element Analysis, Seat Rail, Springback

1. 서론

실제 판재성형공정에서 가장 큰 문제점은 파단 발생과 스프링백이다. 이러한 문제점들은 적절한 금형설계와 공정변수의 조절을 통해 해결될 수 있다. 특히, 스프링백의 예측은 판재성형공정에서 성형 후 원하는 제품 형상을 얻기 위해 가장 중요한 사항이라고 할 수 있다.

스프링백은 프레스 성형 시 탄성회복으로 인한 부분적 형상변형현상으로서 성형품의 기하학적인 형상변수, 재료 및 공정 변수 등에 영향을 받는다[1~3]. 공정변수는 경험, 시행착오 등에 의하여 결정되고 있는 경우가 많으며, 형상변수 및 재료의 경우에도 변형형상, 굽힘각도, 항복강도,

탄성계수, 재료 두께 등이 복합적으로 영향을 미치고 있어 정확한 스프링백의 예측이 어려운 실정이다.

스프링백에 대한 연구는 1940년대부터 수행되었으며, 1970년대까지는 대부분 순수굽힘에 대한 것이었다. 1980년대 초에 스프링백 특성에 관한 대부분의 연구는 순수굽힘이나 3점 굽힘과 같은 간단한 모델에 국한되었으나, 그 이후 외연적 유한요소법을 이용한 판재성형 공정해석용 프로그램들이 개발되어 복잡한 형상의 성형공정과 스프링백 현상을 수치적으로 시뮬레이션 하는 것이 가능해지면서 이 분야의 연구에 획기적인 발전이 이루어졌다. 근래 차체 경량화 및 연비향상을 위해 적용이 확대되고 있는 고장력강과 알루미늄

1. 부산대학교 동남권부품소재 산학협력혁신연구소
2. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템공학전공
3. ㈜다스 금형설계팀
4. 동의대학교 기계공학과
교신저자: 부산대학교 기계공학부, bmkim@pusan.ac.kr

합금의 경우에도 연강에 비해 상대적으로 큰 스프링백 때문에 엄밀한 공정설계 기술이 요구되고 있어, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[4~6].

본 연구의 목적은 차체 경량화 및 제품 강도개선을 위해 기존 1.8t의 DP(Dual Phase)600 소재로 제작하였던 자동차 시트레일을 1.6t의 초고장력 강판(AHSS : Advanced High Strength Steel)인 DP780으로 성형하기 위한 공정을 개발하는데 있다. 이를 위해 현장 설계자의 경험에 근거한 초기 공정설계 및 시험성형(T/O: Trial Out)결과를 분석하여 스프링백에 영향을 미치는 주요 공정변수의 영향을 파악하고자 한다. 공정분석을 바탕으로 공정변수를 설정하여 제품의 치수 정밀도 및 강도를 만족하는 시트레일의 성형공정을 제시하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 자동차 시트와 시트레일

자동차 시트레일은 Fig. 1(a)에서와 같이 시트를 전후로 이동하여 최적의 위치에 고정하는 역할을 하며, 탑승자의 안전성과 직결되므로 강도적으로 중요시 되는 부품이다. Fig. 1(b)와 같이 시트레일의 주요 부품은 상부레일(Upper Rail), 하부레일(Lower Rail), 리테이너(Retainer)이다. Fig. 1(b)의 상부레일은 시트와 결합되는 부품으로 비틀림 없이 편평도가 유지되어야 하며, 하부레일은 시트레일과 자동차의 하부를 연결시키는 부품으로 하부레일 또한 편평도 유지가 요구된다. 리테이너는 상·하부 레일을 연결한 뒤 볼을 고정하는 역할을 하는 부품이다.

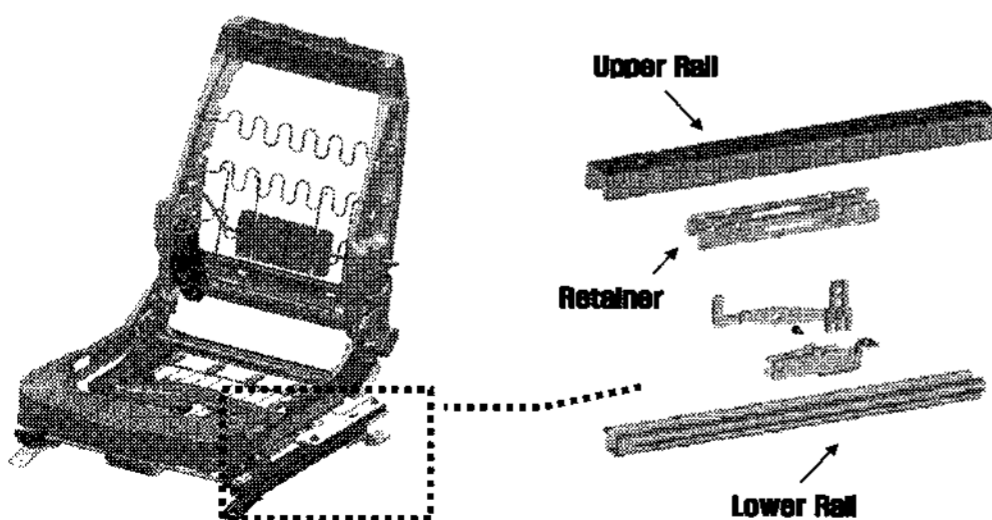
일반적으로 차량이 충돌하여 운전석이 이탈할 때, 가장 먼저 시트레일이 이탈되어 인명의 피해를 일으키게 된다. 따라서 최근 차체 경량화측면에서 소재 두께를 감소시켜 차체의 중량을 줄이고, 안정

성 측면에서 강도향상을 위해 초고장력 강판을 적용한 시트레일의 개발이 요구되고 있다.

3. 시트레일의 성형공정

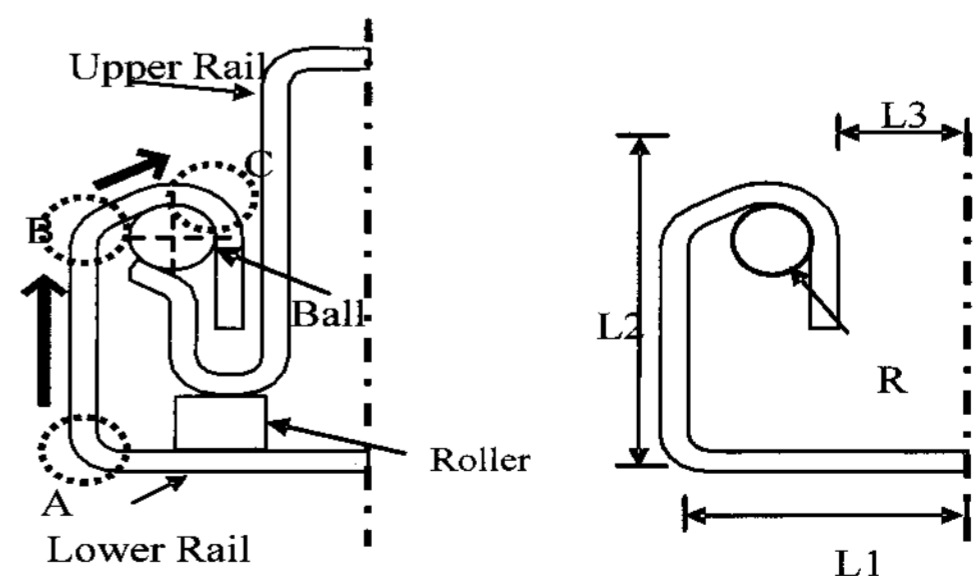
3.1 공정분석

시트레일에서 주요관리 인자는 Fig. 2(a)와 같다. 상부레일과 하부레일이 결합되는 볼 접촉부에서 기능면 면접촉이 이루어져야 한다. 면접촉이 되기 위해서는 A, B, C 부분의 굽힘누적공차가 관리되어야 한다. Fig. 2(b)에 하부레일의 주요관리 부분을 나타내었다. Fig. 2(a)의 A, B, C 부분의 굽힘가공이 Fig. 2(b)에 나타낸 치수부분에 영향을 미치게 된다. 하부레일은 상부레일과 결합되는 부분이 레일의 내측에 위치하고 있다. 따라서 하부레일의 외측부터 성형할 경우 내측 성형이 난이 하므로 가공시에는 Fig. 2(a)에서 C-B-A 순서로 내측부터 성형되어야 한다. 상부레일은 최종 마무리공정에서 Fig. 3(a)와 같이 전체적인 성형이 가능하므로 요구되는 최종치수를 만족시킬 수 있을 것으로 판단하여 성형 공정 분석에서 제외하였다. Fig. 3(b)와 Fig. 4에 나타낸 하부레일의 최종공정과 다단성형공정을 살펴보면 Fig. 4의 굽힘 1공정에서 가공된 부분만 최종공정에서 재가공 되므로 굽힘 2~5공정에서 스프링백을 제어한 정확한 성형이 필요함을 알 수 있다. Fig. 4의 하부레일의 상세 공정도에서 볼 수 있듯이, 총 공정수는 생략된 블랭킹, 피어싱 및 최종공정을 포함하여 9공정으로 이루어져 있다. 굽힘 1공정의 V 굽힘은 금형의 강도적인 측면을 고려하여 M 형태로 제품을 성형하기 위한 공정이다. Fig. 4에서 2공정과 3공정은 상부레일과 결합시 볼이 접촉되는 부분을 성형하기 위한 공정이며, 2공정은 3공정을 위한 예비성형에 해당된다. 2, 3



(a) seat (b) seat rail

Fig. 1 Seat and seat rail in automobile



(a) seat rail (b) lower rail

Fig. 2 Important parts of seat rail

공정에 걸쳐서 성형된 부분이 Fig. 2(a)의 C 부분에 해당되며, 4 공정에서 성형된 부분은 Fig. 2(a)의 B 부분에 해당된다. 또한 5 공정은 Fig. 2(a)의 A 부분을 성형하는 공정이고, 6 공정은 1 공정에서 성형하였던 부분을 다시 펼치는 공정에 해당한다.

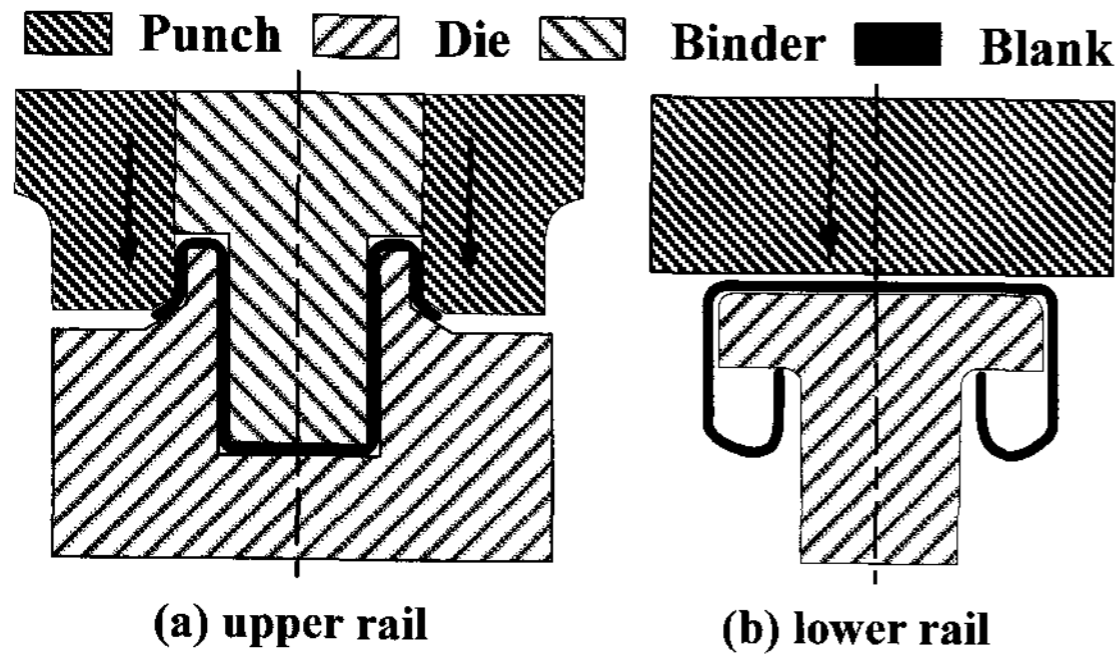


Fig. 3 Restriking processes of upper and lower rail

3.2 공정해석 및 문제점 도출

성형해석 소프트웨어로는 LS-Dyna 를 사용하였다. 입력 값으로 마찰계수 m 은 0.125, 펀치의 속도는 1m/sec, 패드력은 9ton 으로 하였고, 굽힘부분 다이의 요소(mesh) 수는 5 개 이상으로 모델링하였다. 소재의 요소 크기는 최종적으로 어댑티브 4 단계 (Adaptive mesh level 4)를 적용하여 굽힘부를 충분히 나타낼 수 있도록 초기 크기를 설정하였다[7].

초고장력 강판의 물성치를 구하기 위해 인장시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 1 에 나타내었다. DP600 에 비하여 DP780 이 항복강도와 인장강도가 높게 나타났고, 가공경화 지수는 낮게 나타났다. DP600 에 비하여 DP780 이 항복강도와 인장강도가 높기 때문에 스프링백이 크게 나타나며, 굽힘각도가 클수록, 굽힘 곡률반지름이 클수록 스프링백이 크게 나타나는 경향이 있다[8-9].

초기 설계도면을 바탕으로 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 시험성형한 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 하부레일 1공정은 90°

로 성형하기 위하여 98°의 과도굽힘(overbending)을 하였다. 그 결과 스프링백으로 인하여 유한요소해석에서는 7.78°가 회복이 되어서 90.22°로 예측되었고, 시험성형에서는 6.13°가 회복이 되어 Table 2 에서와 같이 91.87°로 성형되었다. 유한요소해석과 시험성형 결과에서 1공정을 제외하고는 스프링백 오차율이 20% 보다 작음을 확인할 수 있다. 하부레일에서 중요한 치수는 굽힘2~5공정에서 성형된다. 1공정의 경우 6공정에서 다시 펼쳐지는 부분이므로 성형품의 치수적 측면에서는 중요하지 않다고 판단된다.

Table 1 Mechanical properties of AHSS

Material Properties	n	K (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)	r_m
DP600	0.175	969	439	589	1.020
DP780	0.133	1177	514	786	0.880

Table 2 Results of FEA and T/O for forming process of lower rail

Process	1	2	3	4	5	
Bend Angle(°)	98	46.5	76.5	61	91	
Die Radius(mm)	10	2.6	2.6	2.5	1.5	
Requirement(°)	90	45	75	60	90	
Measurement(°)	FEA	90.22	43.43	69.98	58.05	89.5
	T/O	91.87	43.76	70.25	58.50	89.60
Springback(°)	FEA	7.78	3.07	6.52	2.95	1.50
	T/O	6.13	2.74	6.25	2.50	1.40
Error(%)	26.9	12.0	4.3	18	7.14	

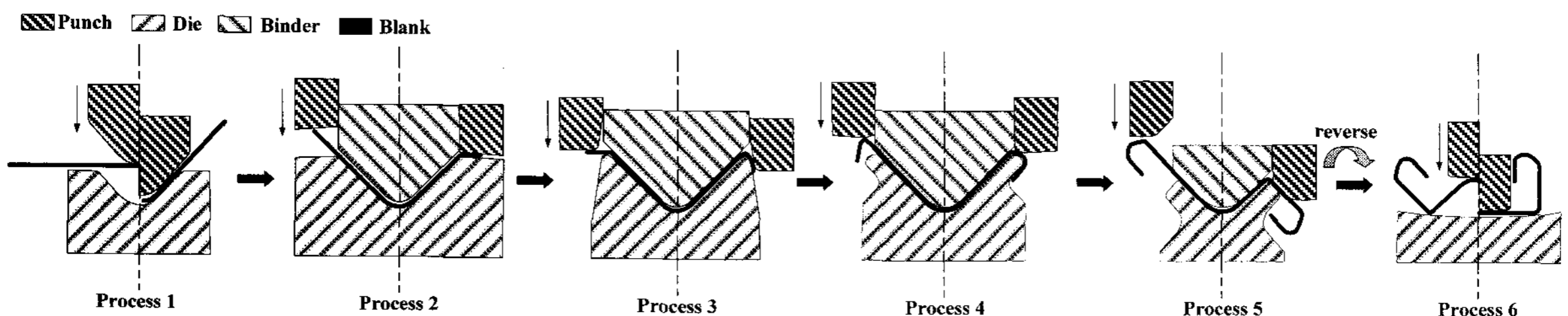


Fig. 4 Multi-stage foming process of lower rail (except piercing, blanking and restriking)

Table 3 Comparison between results of FEA and T/O for required dimension

Part of Fig. 2(b)	L1		L3		R	
	Angle (°)	Length (mm)	Angle (°)	Length (mm)	Radius (mm)	
Requirement (Tolerance)	90	20.50 (+0.2)	120	13.36 (±0.25)	2.60 (+0.15)	
Measurement	FEA	89.50	20.68	114.98	12.66	2.83
	T/O	89.60	20.66	115.25	12.67	2.81
Related forming process	5		2, 3, 4		2, 3	

Fig. 2 에 나타난 하부레일의 중요치수를 유한요소해석 및 시험성형 결과와 비교하여 Table 3 에 나타내었다. Fig. 2(b)의 L1, L3, R 부분에서 치수 불량이 나타남을 볼 수 있다. L1의 치수를 만족하기 위해서는 5공정이 개선이 되어야 하고, L3부분의 치수에서는 Fig. 2(a)의 A, B부분의 굽힘가공 누적공차가 C에 영향을 미치므로 C부분을 성형하는 3공정과 A, B부분을 성형하는 관련된 4, 5공정의 개선이 필요하다고 판단된다. 또한 R부분의 볼 접촉부가 치수공차를 벗어나서 면접촉이 이루어지지 않으므로 이에 대한 개선이 필요함을 알 수 있다.

4. 유한요소해석을 통한 성형공정의 개선

4.1 굽힘각도 수정

초기 공정설계의 문제점을 해결하기 위해 기존 공정에서 굽힘각도만 수정하는 경우를 고려해 보았다. 일반적으로는 패드력과 굽힘 곡률반지름을 이용하여 스프링백을 최소화시켜서 공정을 개선한다. 하지만 기존의 금형을 활용하여 초고장력강판을 현장에서 응용할 수 있는 데이터베이스를 확보하기 위해 굽힘각도만을 수정한 후, 유한요소해석을 활용하여 성형해석을 수행하였다. 초기 공정설계에 대한 유한요소해석 결과의 오차율을 바탕으로 공정을 개선하였다. 개선된 공정과 그에 따른 해석결과를 Table 4에 나타내었다.

하부레일 2공정의 경우, 3공정을 위한 예비성형이므로 공정의 개선에 크게 영향이 없을 것으로 판단하여 고려하지 않았다. Table 2에서 볼 수 있듯이, 초기 설계의 3공정에서 76.5°의 굽힘을 하였을 때, 유한요소해석에서는 6.52°의 스프링백이 측정

Table 4 Improved design I in lower rail

Process	3	4	5
Requirement(°)	75	60	90
Bend Angle(°)	82	62.5	91.5
Result(°)	75.12	59.91	90.08

되었다. 스프링백은 굽힘각도에 따라서 선형적으로 증가하는 경향이 있으므로 초기 공정설계에 대한 유한요소 해석결과를 근거로, 82°로 굽힘각도를 수정하였다. 그 결과 6.88°가 회복이 되어 75.12°로 성형됨을 예측할 수 있다. 4,5공정에서도 유사한 방법으로 굽힘각도를 수정하여 해석한 결과 Fig. 2(b)의 L1, L2, L3에 해당되는 주요 치수는 공차범위를 만족하였지만, 볼과 접촉되는 부분의 반지름(R)은 2.81mm로 요구 기준을 만족하지 못하였다.

4.2 굽힘각도 및 패드력 수정

곡률반지름은 일반적으로 스프링백에 비례하여 증가하는 경향이 있다. 3공정에서 공차를 벗어난 곡률반지름을 개선하기 위해서는 스프링백을 감소시켜야 한다. 일반적으로 스프링백을 감소시키기 위해서 굽힘반지름과 패드력을 수정한다[1]. 그러나 시트레일의 특성상 기능면 면접촉을 위해 하부레일의 볼 접촉부 반경은 2.6mm를 만족하여야 되기 때문에 일반적으로 사용하는 굽힘반경을 조절하여 스프링백을 감소시키는 방법을 사용할 수 없다. 그러므로 패드력 증가시켜 스프링백을 감소시키는 방법을 사용하였다. 패드력을 증가시켜 치수 불량의 원인이 되는 공정에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 초기 공정설계에 적용된 패드력은 9ton이며, 설계상의 한계가 10ton이므로 패드력을 8, 9, 10톤을 설정하여, 패드력의 증감에 따른 스프링백의 변화를 유한요소해석을 통하여 예측해 보았다. 일반적으로 스프링백은 굽힘 반지름, 굽힘각도, 패드력이 감소할수록 커지는 경향이 나타난다(REF). 초고장력강판도 유한요소해석 결과, 스프링백의 경향은 고장력강판의 경향과 같이 나타남을 확인할 수 있다[8~9].

유한요소해석 결과를 바탕으로 3공정의 굽힘각도를 76.5°에서 82°로 패드력을 9ton에서 10ton으로 개선하였다. 4, 5공정은 개선 방안 I으로 요구치가 만족되었다. 이러한 결과를 바탕으로 관련 공정을 재설계한 내용을 Table 6에 나타내었다. 개선결과 Fig. 2(b)의 중요치수 부분이 공차를 만족함을 확인할 수 있다.

Table 5 Influence of pad force on springback

Process (Bend Angle)	Springback Requirement(°)	Pad Force(ton)		
		8	9	10
3(82)	7	8.30	6.88	6.81

Table 6 Improved design II in lower rail

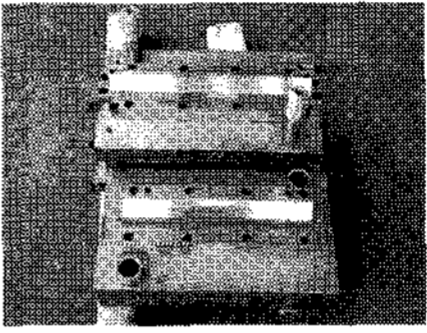
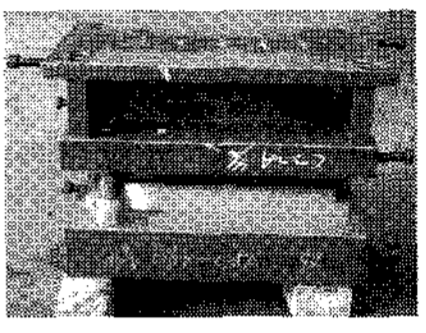
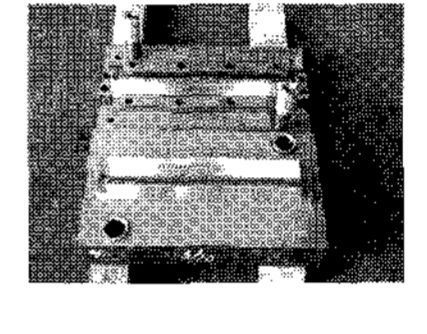
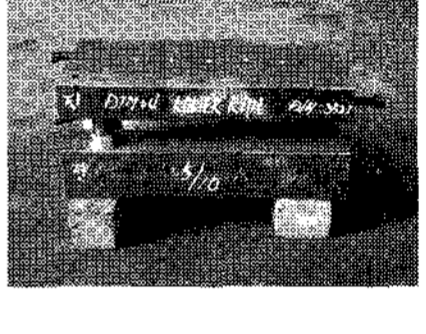
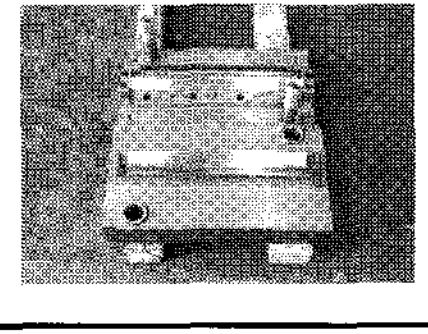
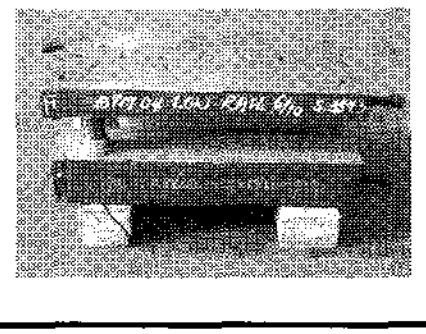
Process	3	4	5	
Bend Angle(°)	82	62.5	91.5	
Pad Force(ton)	10	9	9	
Result	Angle(°)	75.19	59.91	90.08
	Radius(mm)	2.70	.	.

5. 성형공정 개선결과 검토 및 고찰

개선방안Ⅱ를 적용하여 시트레일의 제품 제작을 위해 사용된 금형세트를 Table 7에 나타내었다. 금형은 M2재질로 제작하였으며, TiCN 코팅처리하여 내마멸성을 증대시켰다. Fig. 5와 같이 재설계된 개선방안Ⅱ를 실제 공정에 적용한 시험성형품과 유한요소해석 결과를 치수적인 측면에서 Table 8에 비교하여 나타내었다. 유한요소해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 전체적으로 치수 공차를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 자동차의 충돌사고 시에 시트레일이 이탈하는 강도를 측정하기 위하여 Fig. 6과 같은 단면이탈실험을 수행 하였다. 단면이탈실험은 상하부레일을 60cm 폭으로 절단하여 결합시킨 후, 인장실험과 유사하게 하부레일은 고정시키고 상부레일에 인장력을 가한다. 이로부터 시트레일의 단면이 이탈될 때, 최대 하중을 측정할 수 있다. 시험성형품의 하부레일과 개선후의 하부레일을 각각 상부레일과 결합하여 단면이탈 실험을 하였다. Fig. 7은 단면이탈실험에서 시트레일의 변형을 나타낸 결과이다. 상·하부 레일의 바닥부가 먼저 변형을 일으킨 후에 측벽부의 변형이 일어나고 최종적으로 레일이 이탈을 하게 된다. 단면이탈실험에서 최대하중을 측정하여 Table 9에 나타내었다. 시험성형품은 1158kgf 가 측정되었으며, 개선된 공정설계 Ⅱ를 적용한 시트레일의 단면이탈 하중은 1467kgf 로 요구치인 1400kgf 보다 크게 나타났다.

또한 DP780이 DP600으로 성형한 제품(1180kgf)에 비하여 단면이탈강도가 대단히 높음을 알 수 있다. 따라서 개선방안 Ⅱ는 시트레일의 정밀도 및 강도측면에서 요구기준을 모두 만족함을 볼 수 있다.

Table 7 Die set for manufacturing of seat rail by improved design II

Process	Open	Close
3		
4		
5		

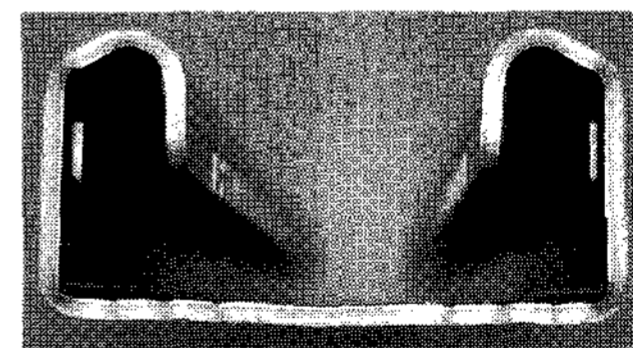


Fig. 5 Lower rail manufactured by improved design

Table 8 Comparison between FEA and experiment for improved design II

Part Fig.2(b)	Dimension	Tolerance	Design II	
			FEA	Exp
L1	20.50	±0.20	20.52	20.52
L3	13.36	±0.25	13.35	13.35
R	2.60	+0.15	2.70	2.69

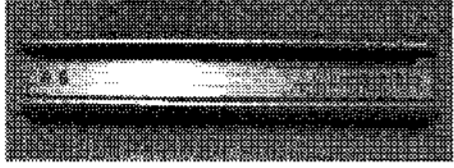
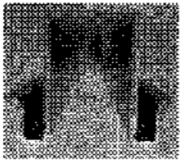
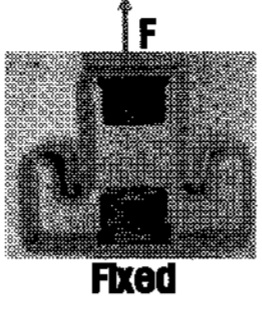
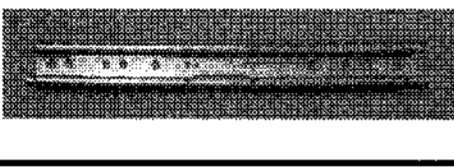

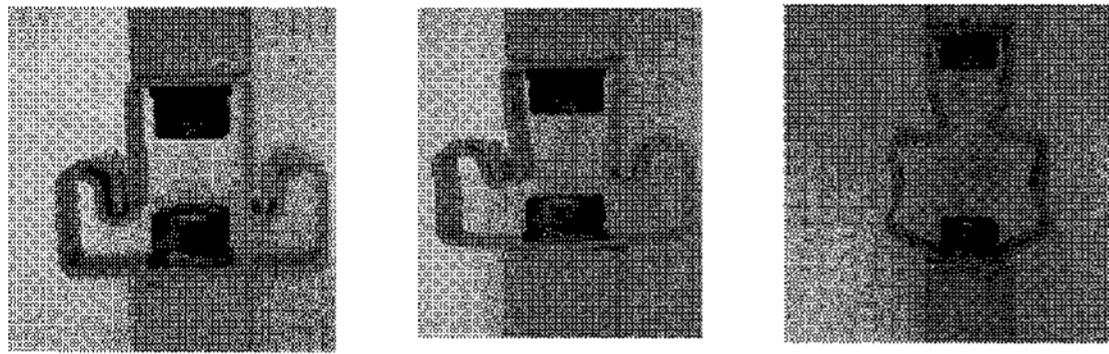
	Product	Section	Test
Upper			
Lower			

Fig. 6 Test of section breakaway



(a) mounting the specimen (b) curling the side wall (c) section breakaway

Fig. 7 Deformation of seat rail under section breakaway test

Table 9 Max. load obtained from section breakaway test for various design conditions

Condition	Max. load(kgf)
Requirement	1400
Initial Design	1158
Improved Design II	1467

6. 결론

본 연구에서는 차체 경량화 및 제품 강도개선을 위해 자동차 시트레일을 1.6t의 초고장력 강판 DP 780으로 성형하기 위한 공정을 개발하였다. 현장 설계자의 경험에 근거한 초기 공정설계의 유한요소 해석 해석과 시험성형결과의 비교분석을 통하여 시트레일 공정의 주요 공정변수인 굽힘각도와 패드력이 스프링백에 미치는 영향을 정량적으로 파악하였다. 이러한 결과로부터 초기 설계를 개선한 공정설계를 수행하였으며, 개선된 공정은 시트레일의 정밀도 및 강도측면에서 요구기준을 모두 만족하는 것을 실험으로 확인할 수 있었다. DP780으로 제작된 시트레일은 기존의 DP600을 이용한 시트레일에 비하여 두께가 1.8t에서 1.6t로 감소하여 기존의 레일보다 중량이 11% 감소하였고, 강도적인 측면에서는 1180kgf에서 1467kgf로 증가하였다.

후기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. M60601010004-06E0101-00410)

참고 문헌

- [1] C. D. Park. 2006, A Study on Multi-operation Forming and Springback Analysis for Autobody Panels.
- [2] I. J. Kwon, J. K. Rim, H. J. Kim, 2001, Evaluation of the Springback Characteristics for Automotive Steel Sheets by the S-Rail Forming Test, Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l. Univ., Korea No21, B, pp. 287~294.
- [3] W. Y. Yang, S. Y. Lee, Y. T. Keum, J. Y. Hwang, C. S. Yoon, C. S Shin, W. S. Cho, 2002, Development of Springback Reduction Technology for High-Strength Steel Sheets, The Korean Society of Automotive Engineers, United symposium, pp. 1011~1015.
- [4] J. H. Lee, D. W. Kim, S. M Sohn, M. Y. Lee, Y. H. Moon, 2007, Analysis of springback of sheet metal(I) : Analytical model based on the residual differential strain, KSTP, 1225-696x.
- [5] J. H. Lee, D. W. Kim, S. M Sohn, M. Y. Lee, Y. H. Moon, 2007, Analysis of springback of sheet metal(II) : Experimental validation of analytical model, KSTP, 1225-696x.
- [6] Y. E. Ling, H. P. Lee, B. T. Cheok, 2005, Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 168, pp. 296~302.
- [7] Bradley N. Maker, Xinhai Zhy, 2007, Input Parameters for Metal Forming Simulation using LS-Dyna, Livemore Software Technology Corporation.
- [8] L. C. Sousa, C. F. Castro, C. A. C. Antonio, 2006, Optimal design of V and U bending processes using genetic algorithms, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 172, pp. 35~41.
- [9] M. C. Oliveira, J. L. Alves, B. B. Chaparro, L. F. Menezes, 2007, Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction, International Journal of Plasticity, Vol. 23, pp. 516~543.