

자동차 내부 보강판 성형 금형 설계

안동규#, 송동한**, 노경보***, 한길영*

Design of Stamping Die for Inner Reinforcement Panel of Automotive

Dong-Gyu Ahn[#], Dong-Han Song^{**}, Gyung-Bo Noh^{***}, Gil-Young Han^{*}

(Received 6 April 2009; received in revised form 07 May 2009; accepted 19 May 2009)

ABSTRACT

The objective of this paper is to design stamping die of inner reinforcement panel with DL 950 advanced high strength steel as stamping materials through numerical analyses and experiments. The stamping process was designed as bending dominant process consisting of 1 step of notching and 4 steps of bending processes. In order to obtain a proper design of the stamping die, various three-dimensional elasto-plastic finite element analyses were performed using a commercial code AUTOFORM V4.2. Design parameter of stamping die was chosen as the corner radius of the stamping die for each step. From the results of the FE analysis, feasible corner radii of the stamping die, which can minimize the deviation of corner angle of the stamped part from design data, and forming load for each part were estimated. Stamping experiments were carried out using the manufactured stamping die according to the proposed die design. The results of experiments were shown that the stamping die can successfully manufacture the inner reinforcement panel with DL 950 advanced high strength steel as base stamping material.

Key Words : Inner Reinforcement (내부 보강판), Sheet Metal Forming (박판성형), High Strength Steel Sheet (고장력 강판), Corner Radius (모서리 반경), Spring Back (스프링백), Die Design (금형설계)

1. 서 론

전세계적인 에너지 자원의 감소와 녹색 환경 규제 강화로 인하여 수송기계 및 관련부품 회사에서는 연

비와 환경 영향성 최소화를 위한 많은 노력을 기울이고 있다^[1]. 특히, 자동차 및 자동차 부품 업종에서는 자동차 무게를 감소 시키기 위하여 고강성 설계, 손상허용설계 및 고강도 재료 적용등의 다양한 연구를 수행하고 있다^[2]. 이러한 연구들의 한가지 방향으로 인장강도 590 MPa 이상의 고장력 강판을 이용한 자동차 내외부 부품의 성형 공정과 관련 금형 개발에 대한 연구가 시작되고 있다^[3].

고장력 강판으로 자동차 부품산업에 적용되거나, 적용이 준비되고 있는 재료는 DP(Dual Phase)계열

교신저자 : 조선대학교 기계공학과

E-mail : smart@mail.chosun.ac.kr

* 조선대학교 기계공학과

** 조선대학교 일반대학원 기계공학과

*** (주) 주영하이텍

과 TRIP(Transformation-Induced Plasticity)계열 강판이 대표적이다^[4,5]. 고장력 강판의 경우 인장강도가 증가되나 최대변형율이 감소하여 대변형을 요구하는 성형 공정에 대해서는 적용이 어렵다. 또한, 항복강도 증가에 따른 탄성 구간이 증가하여 판재 성형후 스프링백량이 현저히 증가한다^[6,7]. 그러므로 고장력 강판을 이용하여 프레스성형으로 제품을 제작할 경우, 제품의 탄성회복 현상에 의한 스프링 백을 고려하여 성형공정 및 금형설계를 수행하여야 한다^[8].

송정한 등은 TRIP 600 및 DP 600 계열 고강도 강판을 적용한 프러트 사이트 멤버의 성형시 스프링 백 현상에 대한 유한요소해석을 수행한 바 있다^[9]. Hilditch 는 DP 600 고장력강판의 인장후 굽힘성형시 저변형을 변위특성이 제품 쉘(Curl)과 스프링 백에 미치는 현상에 대하여 실험적으로 연구하였다^[10]. Peng 등은 DP 600 계열의 고강도 강판의 개방형 채널 드로잉시 제품의 스프링백 현상에 대하여 유한요소해석과 실험계획법을 적용한 바 있다^[11].

본 연구에서는 DL 950 급 고장력 강판으로 자동차 내부 보강판을 성형하는 연속형 금형 설계를 위하여 3차원 비선형 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 본 성형해석 결과를 이용하여 스프링백과 벽면 쉘(Wall Curl)현상이 최소화되는 각 단계별 금형의 모서리 반경을 도출하였다. 또한, 유한요소해석을 통하여 도출된 금형설계를 이용하여 연속형 성형 금형을 제작한 후 성형 실험을 수행하여 해석 및 실험결과를 비교/분석하였다.

2. 내부보강판 성형공정 및 금형 설계

DL 950 급 고장력 강판의 경우 인장강도가 950 MPa 내외이고 최대 연신율이 20 % 미만으로, 제품 성형시 드로잉 공정을 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 노칭을 1단계 공정으로 수행하며, 나머지 4단계에서 연속형 굽힘 성형 공정으로 제품이 제작되도록 전체 성형 공정을 설계 하였다. Fig. 1 과 2는 I 및 II 형 제품의 굽힘 성형 공정을 순차적으로 나타내었다. I 형 제품의 경우 Fig. 1 과 같이 C-D-E-F 부분에 대한 1차 굽힘 성형 후, A-B-C-D 의 2차 굽

힘 성형을 수행한다. 그 후 B-C-D-E 의 상단부를 성형하고, 최종적으로 D-E-F 부에 대한 성형 및 형상 안정화를 수행한다. II 형 제품의 경우 Fig. 2 와 A-B-C-D 에 대한 1 차 성형을 수행한 후, C-D 부의 반대 방향 성형을 포함하는 C-D-E-F 부의 굽힘 성형을 수행한다. 그 후 3단계에서 D-E-F 부를 성형하며, 최종적으로 A-B-C-D-E-F 부의 형상 안정화 공정으로 최종 제품을 성형한다.

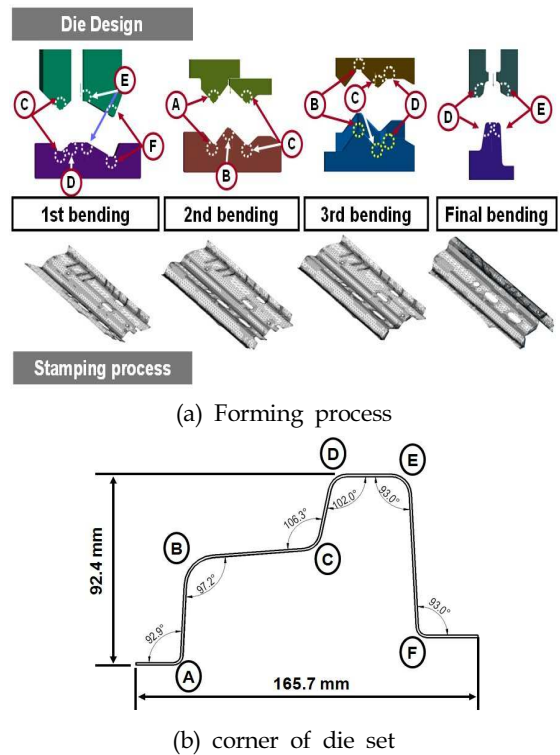
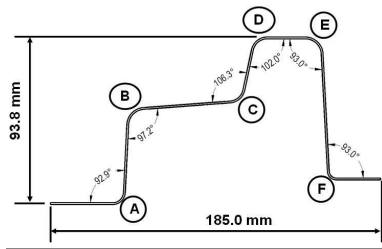
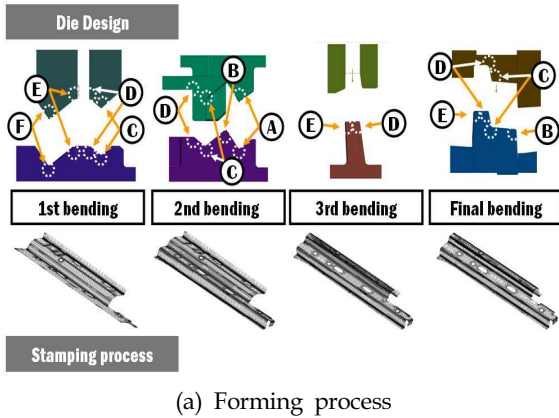


Fig. 1 Design of forming process and bending corners of part I

I 형 및 II 형 제품에 대한 금형의 크기는 모두 2,750 mm × 1,750 mm × 740 mm 이다. 본 연구에서는 DL 950 고장력 강판으로 제품 성형시 Fig. 1 과 2 의 CAD 형상과 최대한 유사한 형상의 제품을 성형하기 위하여 각 단계별 금형의 굽힘 반경을 금형 설계 인자를 설정하고, 여러 가지 굽힘 반경 조합에 대한 유한요소해석을 통하여 적절한 금형 설계를 도출하였다.



(b) Design parameters of die set
Fig. 2 Design of forming process and bending corners of part II

Table 1 Design conditions of I type die set

Des-ign	A(mm)		B(mm)		C(mm)		D(mm)		E(mm)		F(mm)	
	P	D	P	D	P	D	P	D	P	D	P	D
1	1.0	2.2	2.2	1.0	1.0	2.2	2.2	1.0	2.2	1.0	1.0	2.2
2	2.0	3.2	3.2	2.0	2.0	3.2	3.2	2.0	3.2	2.0	2.0	3.2
3	8.0	9.2	9.2	8.0	8.0	9.2	9.2	8.0	9.2	8.0	8.0	9.2
4	6.0	7.2	8.8	10.0	7.8	9.0	8.0	9.2	8.4	9.6	3.5	4.7
5	2.8	4.0	5.2	4.0	4.0	5.2	3.0	1.8	5.4	4.2	3.8	5.0
6	1.8	3.0	5.4	4.2	8.0	9.2	9.0	7.8	10.0	8.0	6.0	7.2

Table 2 Design conditions of II type die set

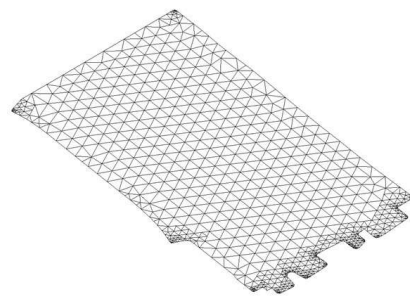
Des-ign	A(mm)		B(mm)		C(mm)		D(mm)		E(mm)		F(mm)	
	P	D	P	D	P	D	P	D	P	D	P	D
1	6.0	7.0	10.0	9.0	8.0	9.0	8.0	7.0	10.0	9.0	4.0	5.0
2	3.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	5.0
3	5.0	6.0	5.0	4.0	3.0	4.0	4.0	3.0	5.0	4.0	6.0	7.0

Table 1 과 2 는 각각 I 형과 II 형 제품에 대한 금형 설계안들의 굽힘 반경 조합들이다. Table 1 과 2 의 금형 설계 조건들은 현업에서 제안한 각 공정 별 금형의 모서리 설계조건 범위들로부터 선정하였다. II 형 제품의 금형의 경우 I 형 제품 보다 제품 모서리부의 곡률이 크게 형성되어 제품 성형이 다소 용이하여, 설계안을 3가지로 선정하였다. Table 1 과 2 의 P 와 D 는 각각 상하형 금형에서의 모서리 반경들이다.

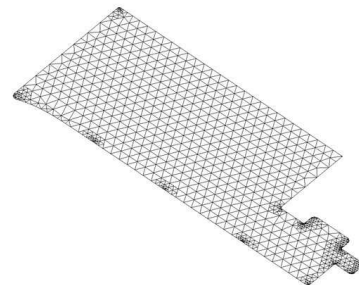
3. 탄소성 유한요소 해석

3.1 유한요소해석 방법

I 및 II 형의 제품을 제작하는 연속형 성형 공정용 금형 설계를 도출하기 위하여 3차원 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 3차원 탄소성 유한요소 해석은 상용 내연적 유한요소 성형 해석 프로그램인 AUTOFORM V4.2 를 활용하였다. I 및 II 형 제품 성형용 판재 두께는 각각 1.2 mm 와 1.0 mm 이다.



(a) Blank of type I of part



(b) Blank of type II of part

Fig. 3 Design and initial mesh structures of blanks

Table 3 Number of meshes and those refinement level

Type	Status	Elements (EA)	Nodes (EA)	Refinement Level
I	Initial	3,050	1,196	4
	Final	26,784	11,866	
II	Initial	3,050	1,621	4
	Final	39,455	17,455	

초기 블랭크 형상은 Fig. 3 과 같으며, 블랭크에 대한 유한요소격자 생성은 AUTOFORM V4.2 의 전 처리기를 이용하였다. I 및 II 형 제품의 블랭크 크기는 각각 317.9 mm × 558.0 mm 와 385.3 mm × 870 mm 이다. 금형면은 강체로 가정하였으며, 블랭크는 삼각형 쉘요소 (Triangular Shell Element) 들로 표현하였다. 블랭크의 초기 및 최종 요소수들은 Table 3 과 같으며, 격자 재생성 수준은 4 로 선정하였다.

3.2 DL 950 급 재료 물성

3차원 탄소성 유한요소해석용 블랭크 재료의 기계적 물성을 취득하기 위하여 인장시험을 수행하였다.

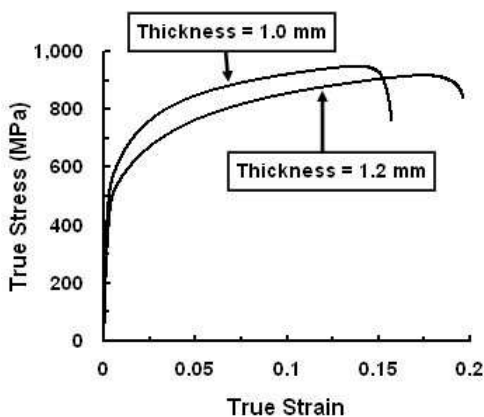


Fig. 4 Stress-strain relationship of DL 950 high strength steel sheet

인장시험편은 ASTM A370-03 의 박판재료 인장시험

규격에 따라 제작하였다. 일반적으로 고장력강판의 경우 이방성 특성이 거의 나타나지 않으므로, 인장 시험편은 압연방향에 대해서만 채취하였다. 또한, 이방성 계수는 1.0 으로 가정하였다. 인장시험은 두께 1.0 mm 와 1.2 mm 시험편에 대하여 INSTRON 5585 를 이용하여 수행하였다. Fig. 4 는 실험결과 취득된 진응력-진변형을 곡선이며, Table 4 는 기계적 물성 데이터이다.

Table 4 Mechanical properties of DL 950 high strength steel sheet

Thickness (mm)	Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Poisson's Ratio
1.0	210.0	520.2	955.5	0.3
1.2	205.4	514.6	920.0	0.3

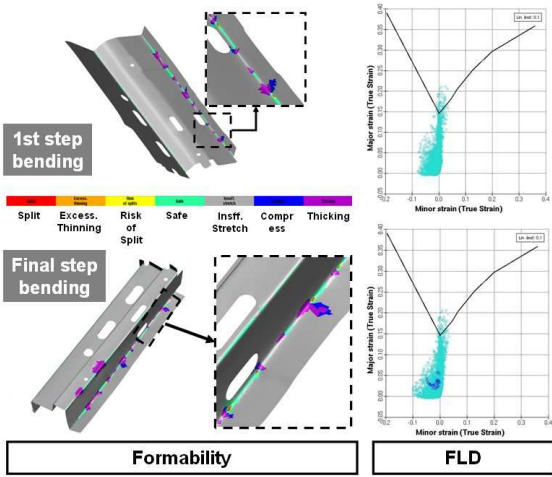
본 재료의 성형한계곡선 (Forming limit diagram : FLD) 은 인장시험 결과와 AUTOFORM V4.2에서 제공하는 Accelor V9 식으로부터 도출하였다.

4. 해석결과 및 고찰

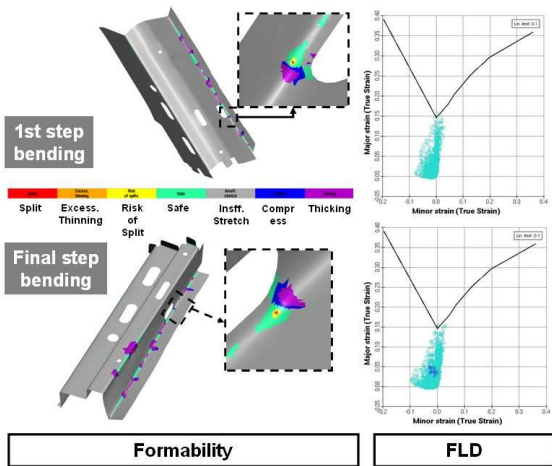
4.1 성형성

I 및 II 형 제품의 스프링백 해석을 수행하기에 앞서 Fig. 5, 6 및 7 과 같이 각각의 금형 설계 조건에 대한 제품의 성형성 분석을 수행하였다.

Fig. 5 와 같이 I 형 제품의 금형 설계 조건 1 및 2 에서는 Fig. 1(b) 의 F 곡률부에서 국부적인 제품 파단이 발생하는 것을 예측할 수 있었다. 그러나 Fig. 6 및 7 과 같이 다른 금형 설계 조건들에서는 제품의 파단이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. I 형 제품의 경우 Fig. 1(b) 의 E 와 F 곡률부에서 Fig. 6 과 같이 국부적인 압축과 두께 증가 현상이 나타나지만, II 형 제품의 경우 Fig. 7 과 같이 각 곡률부에서 국부적인 압축과 두께 증가 현상이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 또한, 두가지 제품 모두 모든 설계 조건에서 제품에 주름이 발생하지는 않는 것으로 예측되었다.

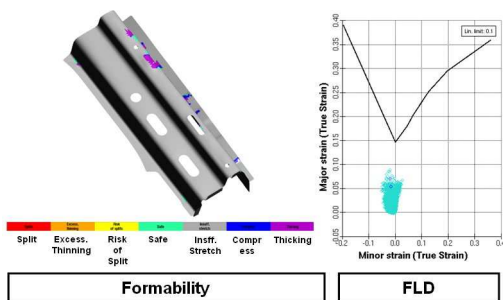


(a) Design-1

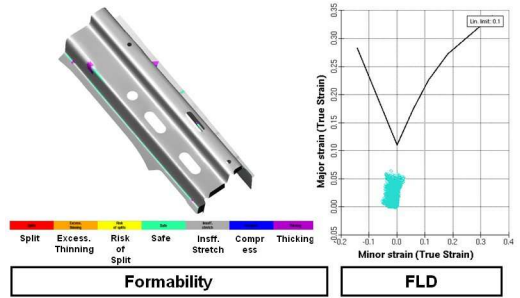


(b) Design-2

Fig. 5 Formability of design-1 and 2 of I part

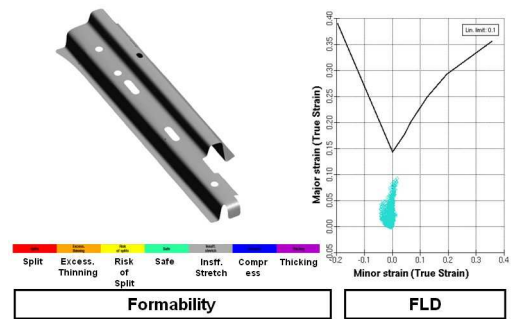


(a) Design-4

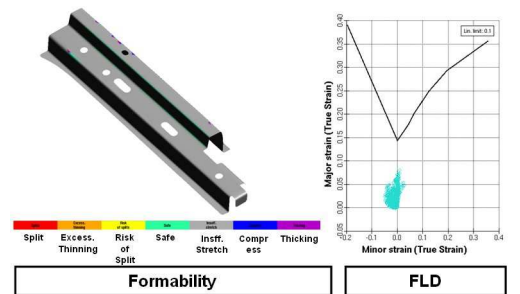


(b) Design-6

Fig. 6 Formability of I part



(a) Design-1



(b) Design-3

Fig. 7 Formability of II part

이 결과들로부터 I 형 금형의 F 부의 상하형 금형의 곡률 반경이 각각 3.5 mm 와 4.7 mm 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

4.2 모서리부 각도

성형 공정중 제품에 파단이 발생하는 I 형 제품의 금형 설계 조건 1을 제외한 모든 설계 조건에 대하

여 스프링 백 해석을 수행하였다.

스프링백 해석 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 기준 설계 데이터인 Fig. 1(b) 및 Fig. 2(b) 의 각 모서리부의 각도와 해석 결과 얻어진 각 모서리부의 각도를 비교하였다. 모서리각은 각 제품의 끝단면에 대하여 측정하였다. Fig. 8 과 9 는 설계 데이터에 대한 해석 결과의 모서리부 각도 차이를 나타낸다.

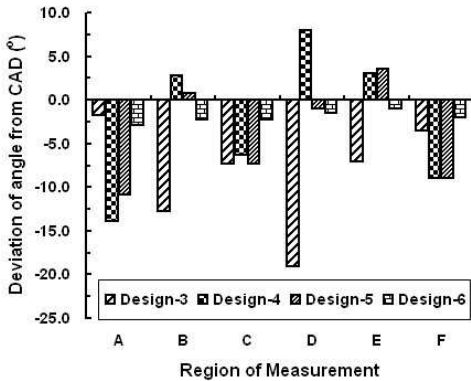


Fig. 8 Deviation of corner angle from CAD data for the case of part I

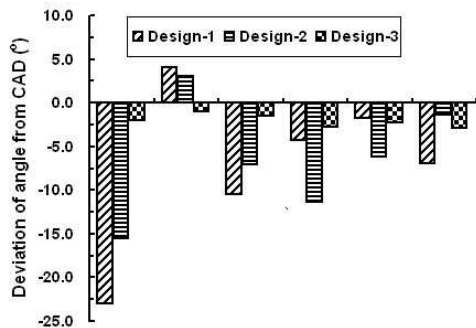


Fig. 9 Deviation of corner angle from CAD data for the case of part II

I 형 제품의 경우 Fig. 8 에 나타난 것과 같이 금형 설계 조건 6 에서 설계 데이터와 해석 결과의 모서리각 차이가 최대 3 ° 이내로 최소화 되었다. I 형 제품의 경우 금형 설계 조건 6 에서 최대 모서리각 차이가 모서리 I 부위에서 2.9 ° 정도가 발생하였으며, 모서리 E 부위에서 1.0 ° 정도의 최소 모서리각 차이를 나타내었다. 또한 굽힘 반경이 작은 모서리

에서 설계 데이터와 해석 결과의 차이가 많이 발생함을 알 수 있었다.

II 형 제품의 경우 금형 설계 조건 3에서 설계 데이터와 해석 결과의 모서리각 차이가 최대 3 ° 이내로 최소화 되었다. II 형 제품의 경우 금형 설계 조건 3 에서 최대 모서리각 차이가 모서리 F 부위에서 2.9 ° 정도가 발생하였으며, 모서리 B 부위에서 1.0 ° 정도의 최소 모서리각 차이를 나타내었다. 또한 B형 제품의 경우 제품의 양끝단에서 설계 데이터와 해석 결과의 차이가 많이 발생함을 알 수 있었다.

위 결과로부터 I 및 II 형 제품에 대하여 가장 적절한 설계안으로 I 형 제품의 금형 설계 조건 6 과 II 형 제품의 금형 설계 조건 3 을 선택하였다.

4.3 성형 하중

Fig. 10 은 3차원 유한 요소 해석 결과 I형 제품의 금형 설계 조건 6 과 II 형 제품의 금형 설계 조건 3 에 대한 각 단계별 굽힘 공정에서 발생할 것으로 예측된 성형하중을 나타내었다.

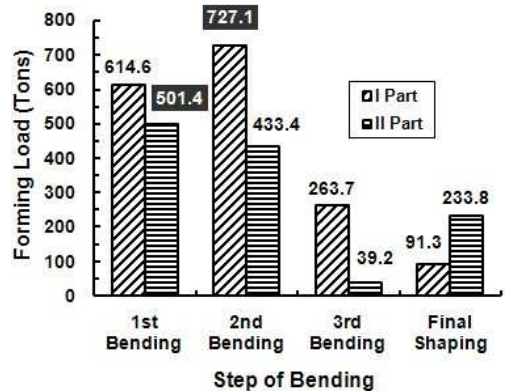


Fig. 10 Forming load for different bending steps

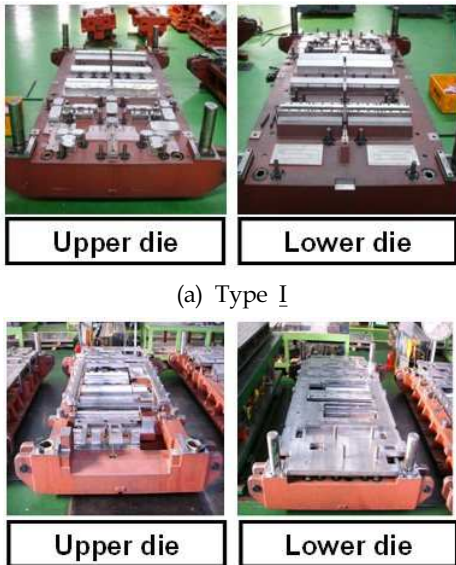
I 형 제품의 경우 두 번째 굽힘 공정에서 최대 성형하중이 발생하였으며, 최대 성형 하중의 크기는 727.1 톤 정도임을 알 수 있었다. 또한, II 형 제품의 경우 첫 번째 굽힘 공정에서 최대 성형하중이 발생하였으며, 최대 성형 하중의 크기는 501.4 톤 정도였다. 이 결과로부터 I 및 II 형 제품 모두 1과 2단계 굽힘 공정에서 대변형의 성형 공정을 수행하며, 3과

4단계에서는 거의 국부 형상 생성 및 형상 안정화 공정이 수행되는 것을 알 수 있었다.

5. 금형 제작 및 성형 실험 결과 고찰

5.1 금형 제작 및 성형 실험

3차원 유한요소해석결과 제안된 금형 설계 조건중 가장 바람직한 설계일 것으로 판단되는 A형 제품의 Design-6 조건과 B형 제품의 Design-3 조건에 대하여 금형을 제작하였다. FC 25 주조로 제작된 상부 및 하부 금형 홀더를 제작한 후, 금형 장착용 형상과 구멍을 고속가공기로 생성하였다. 금형면 가공에 이터는 금형 3차원 CAD 모델링 데이터를 사용하여 WorkNC CAM 소프트웨어로 생성하였다. 상하부 금형면 제작시, 1차적으로 상하부 금형면을 황삭가공한 후 금형의 열처리를 수행하였다. 그 후 상하부 금형에 대한 정삭 가공 및 방전가공을 수행하고 최종적으로 금형면 사상을 통하여 금형면을 설계 형상과 동일하게 구현하였다. 금형 재료는 SKD 11 을 열처리하여 사용하였으며, 금형면은 경질 크롬 코팅하여 마모 특성을 향상시켰다.



(a) Type I

(b) Type II

Fig. 11 Manufactured die set

Fig. 11 은 최종적으로 제작된 I 및 II 형 자동차 내부 보강판 성형용 금형이다. 금형 제작과정에서 와이어 커팅공정과 NC 가공 공정에 대한 공차 적용 범위는 각각 ± 0.01 mm 와 ± 0.01 mm 였다.

3차원 유한요소해석 결과 가장 바람직한 설계일 것으로 판단되는 I 형 제품의 Design-6 조건과 II 형 제품의 Design-3 조건에 대하여 성형 해석시 취득된 최대 성형하중을 근거로 하여, 성형 실험은 1,000 톤급 기계식 프레스를 이용하여 수행하였다. 10 개의 시편에 대하여 반복 성형실험을 수행하여 결과를 고찰하였다.

5.2 성형 실험 결과 고찰

I 및 II 형 제품에 적합하도록 제작된 금형을 이용하여 성형 실험을 수행한 결과 Fig. 12 와 같은 제품을 얻었다. 제작된 제품을 검사한 결과, 각 제품에 비틀림 현상은 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있었다.



(a) I part

(b) II part

Fig. 12 Stamped parts

Table 5 Comparison of the results of experiments and those of analyses

Type of part		Corner					
		A	B	C	D	E	F
I	CAD	92.9	97.2	106.3	102.0	93.0	93.0
	Analysis	90.0	95.0	104.0	100.5	92.0	91.0
	Experiments	90.0	97.0	104.0	101.0	95.8	91.0
II	CAD	93.0	93.0	102.0	106.3	97.2	92.9
	Analysis	91.0	92.0	100.5	103.5	95.0	90.0
	Experiments	91.0	91.0	102.0	105.0	94.5	91.0

Table 5 와 같이 실험결과와 해석결과를 각 부위별 모서리부 각도 측면에서 비교 하였다. 실험과 해석의 비교 결과 해석과 실험결과가 약 3 % 오차 범위내에서 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 최종적으로 제작된 I 와 II 형 제품의 경우 설계 데이터와 거의 유사한 모서리각을 형성하는 제품임을 알 수 있었다. 성형하중의 경우 제품용 프레스에서는 측정할 수 없어 해석 결과와 비교하지 않았다. 그러나 해석 결과에 의하여 선정된 1,000 톤 프레스로 I 및 II 형의 제품을 성형할 경우 제품의 미성형 없이 제품이 성형됨을 알 수 있었다.

위 결과로부터 해석결과 도출된 각 제품의 금형 설계안들이 설계안에 근접하는 제품을 제작할 수 있는 금형 설계 조건임을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 DL 950 고장력 강판을 성형하여 자동차 내부 보강판을 성형하는 금형을 설계하기 위하여 3차원 탄소성 유한요소해석과 성형 실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 4개의 연속형 굽힘 성형 공정으로 구성된 DP 980 고장력 강판 이용 자동차 내부 보강판 성형 공정에 적합한 금형 설계 조건을 도출할 수 있었다. 각 제품별 도출된 금형 설계 조건에서는 설계 데이터 대비 모서리부 각도차를 3° 이내로 유지시킬 수 있음을 알 수 있었다.
2. 연속형 굽힘 성형 공정에 대한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 각 공정별로 요구되는 최대 성형하중을 도출할 수 있었다. 이 결과로부터 성형실험에 요구되는 프레스의 사양을 결정할 수 있었다.
3. 3차원 유한요소해석결과 도출된 제품 금형 설계 조건을 이용하여, 자동차 내부 보강판 제작용 금형을 제작하여 제품 성형실험을 수행하였다. 이 결과 설계 데이터와 3 % 이내의 모서리각 오차를 가지는 제품을 제작할 수 있었다.

참고문헌

1. Kim, J. C., Kwon, T. W. and Jeon, J. H., "Application Technology of High Strength Hot-Rolled Steels for Automotive Lightweight Chassis Parts," Proc. of 2005 Spring Conference of Korean Society for Technology of Plasticity, pp. 43-45, 2005.
2. http://www.a-sp.org/database/custom/hss_stampingDesignManual.pdf
3. Firat, M., "Computer Aided Analysis and Design of Sheet Metal Forming Process: Part III: Stamping Die-face Design," Materials & Design, Vol. 28, pp. 1311-1320, 2007.
4. Kim, Y. H., Kim, T. W., Lee, Y. S. and Lee, J. H., "A Study on the Springback of High-Strength TRIP Steel," Transactions of Materials Processing, Vol. 13, No. 5, pp. 409-414, 2004.
5. <http://www.worldautosteel.org/projects/AHSSGuidelines/AHSS-application-guidelines-version-4.aspx>
6. Yang, W. Y., Lee, S. Y., Keum, Y. T., Hwang, J. Y., Yoon, C. S., Shin, C. S. and Cho, W. S., "Springback Control in the Forming Processes for High-Strength Steel Sheets," Transactions of Materials Processing, Vol. 12, No. 8, pp. 718-723, 2003.
7. Satorres, A., "Bending Simulation of High Strength Steel by Finite Elements," Master's Thesis, University of Oulu, 2005.
8. Ko, D. C., An, J. H., Jang, M. J., Bae, J. H., Kim, C. H. and Kim, B. M., "Process Design of Seat Rail in Automobile by the Advanced High Strength Steel of DP 780," Transactions of Materials Processing, Vol. 17, No. 3, pp. 197-202, 2008.
9. Song, J. H., Huh, H., Kim, S. H. and Park, S. H., "Springback Analysis of the Front Side Member with Advanced High Strength Steel," Proc. of 2005 Spring Conference of Korean Society for Technology of Plasticity, pp. 106-109,

2005.

10. Hilditch, T. B., Speer, J. G. and Matlock, D. K.,
“Influence of Low-strain Deformation Characteristics of High Strength Sheet Steel on Curl and Springback in Bend-under-tension Tests,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 84-94, 2007.
11. Chen, P. and Koç, M., “Simulation of Springback Variation in Forming of Advanced High Strength Steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 189-198, 2007.