

## 트럭 프레임의 성형성에 관한 연구

### A Study on Formability of Truck Frame

민 홍 기, 김 의 석, 이 화 원  
H. K. Min, Y. S. Kim, H. W. Lee



- 민 홍 기
- 1963년 1월생
  - 구조 및 샤시연구
  - 쌍용자동차 차량연구개발실



- 김 의 석
- 1965년 8월생
  - 소성 가공 및 구조연구
  - 쌍용자동차 차량연구개발실



- 이 화 원
- 1958년 12월생
  - 자동차 구조 연구
  - 쌍용자동차 차량연구개발실  
구조해석 팀장

높아 중요도가 날로 더해가고 있으나 스탬핑 공정에 의한 제품생산시 판매에 발생하는 여러가지 결함(파단, 주름등)으로 인해 재료의 성형성 문제가 대두되어 신차종 개발시 기간단축에 큰 장애요인으로 작용하고 있다.<sup>2-3)</sup>

최근 컴퓨터의 대형화, 고속화 추세는 유한요소법을 이용한 비선형 해석을 활발히 전개시켜 구조해석에 의한 해석기법에 커다란 진보를 이룩했고 비선형 해석결과를 설계에 반영하여 제품생산시 시작품제작에 소요되는 막대한 시간과 경비를 줄임으로써 제품성능 향상에 기여도를 높여 구조해석의 유용성을 인정받고 있다.<sup>4-5)</sup>

본 연구는 MSC/DYNA<sup>®</sup> EXPLICIT CODE를 이용하여 자동차용 샤시 프레임의 성형성을 파악하기 위한 모델링 방식과<sup>7)</sup> 단계별 변형양상, 컴퓨터 시뮬레이션의 결과인 스프링백, 잔류응력, 두께변화, 변형률등을 소개하기로 한다.

## 1. 서 론

자동차 제조공정중 판재를 성형하여 제품을 제조하는 스탬핑 공정은 주로 몇단계의 연속적인 프레스 공정을 거치면서 완성되므로 가공불량이 없이 성공적인 제품을 생산하려면 각 공정마다 숙련된 기술 및 엄격한 공정관리를 필요로 한다.<sup>1)</sup>

자동차 산업에서는 금형이 차지하는 비율이

## 2. 프레임 스탬핑 개요

자동차용 프레임의 역할은 차량 및 하중을 지지하면서 엔진, 트랜스미션 및 각종 샤시 부품등을 지지하고 결합하는 것으로 차량의 전반적인 개념에서 검토되어야 하며 차량의 구조적인 구조물로서 안전성을 갖추어야 한다. 그중 측면부재(Side Member)는 하중을 지지하는 역할을 하

로 프레임 요소중에서 가장 중요한 부재이다. 연료탱크 및 배터리의 사시요소가 측면부재에 부착되는 경우 굽힘 모멘트로 인한 국부적 비틀림 변형이 발생하기도 하므로 사시요소 부착시 잔류응력 및 변형을 분포를 고려하여 측면부재에 구멍을 내어 부착시켜야 한다.

스탬핑 공정이 끝난후 프레임 내부에는 항상 잔류응력이 존재하여 피로수명 단축에 많은 영향을 미치고 있으나 측정장비의 부족으로 재료 내부에 어느정도의 잔류응력값이 존재하는지의 여부가 밝혀지지 않아 설계에 반영되지 못하는 실정이다. 따라서 프레임에 구멍의 위치를 선정하여 각종 사시부품등을 부착할 때에는 잔류응력 및 스트레인이 높게 발생하는 부위는 피하여 선정해야 하며 집중 스트레인이 발생하는 부위는 펀치 및 다이의 설계 변경으로 프레임 내부에 결함을 제거하여 보다 안전한 차량개발을 모색하여야 한다.

본 해석에서는 프레임 스탬핑 작업공정을 드로잉(Drawing) #1만의 공정으로 설정하고 펀치의 운동을 하강(1단계)과 상승(2단계)으로 나누어 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

### 3. 해석 모델 및 성형조건

그림 1은 해석전 프레임의 Mesh 형상, 그림 2는 해석후 프레임의 변형양상을 나타내고 있다. 스탬핑 해석모델로는 Solid 2결 모델인 Full 모델과 Solid 3결 모델인 단면 모델의 2가지로 구성하여 Full 모델(그림 3)에서는 프레임의 전반적인 변형거동 및 잔류응력, 변형률, 스프링백을 조사하고 단면 모델(그림 4, 그림 5)에서는 잔류응력, 변형률, 두께변화, 스프링백을 구하였다.

Full 모델은 장시간의 Run Time을 필요로 하는 비선형 해석모델이므로 먼저 프레임을 Solid 1결 모델로 구성하여 해석을 실시한 후 이를 참고로 하여 4555mm만큼 Solid 2결 모델을 길이 방향으로 모델링하였다. 단면 모델은 XY평면과 YZ평면에 대칭임을 고려하여 단면 부위를 1/2로 모델링한후 Coarse모델과 Fine 모델의 2가지로 분류하여 해석을 실시하였다.



그림 1 Full 모델의 Mesh 형상

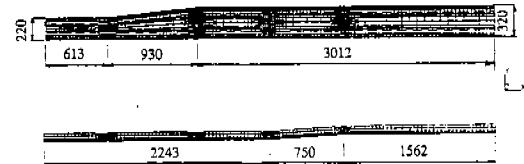


그림 2 해석후 Full 모델의 변형양상

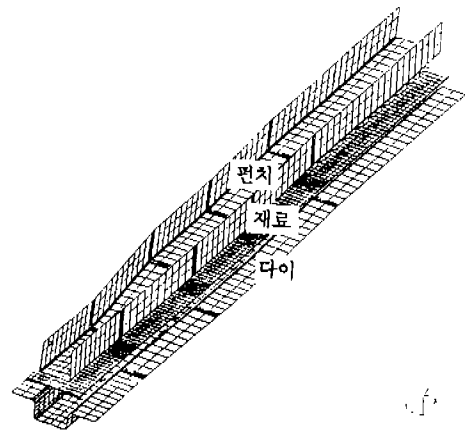


그림 3 해석에 사용된 Full 모델

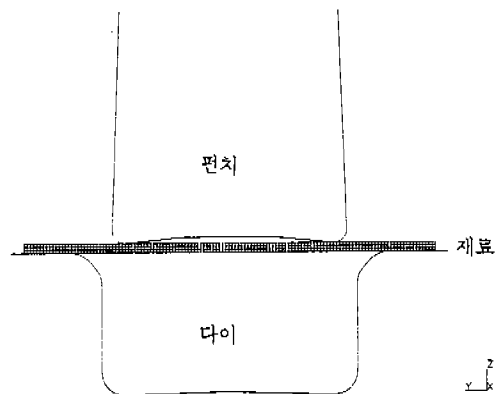


그림 4 해석에 사용된 단면 Coarse 모델

박판성형공정에서는 재료에 압축력을 가하면 좌굴, 접힘, 주름 현상등이 유발되므로 이를 피하고자 인장력을 재료에 가하므로써 변형을 유발시키고 주름현상을 방지하기 위해서는 재료를 고정시키는 Holder가 필요하지만 프레임 스탬핑의 실제작업시 Holder를 고려하지 않으므로 본 해석에서도 Holder를 생략하였다.

다이의 어깨 R이 너무 작으면 제품성형에 영향을 미치므로 경험적으로 판두께의 1.5-1.8배로 한다.<sup>8)</sup> 굽힘가공시 꺾어 굽히는 부분의 바깥표면이 주름이나 균열이 생길때는 모서리를 갑자기 꺾어 구부리지 말고 R을 붙여서 굽히면 단단한 재료도 성형이 되므로 이 균열이 생기지 않고 굽힐 수 있는 한도를 가공한도라 하며 재료 가공한도의 R을 최소굽힘 반지름이라 한다.

굽힘 반지름이 작을수록 스프링백이 적으므로 제품의 정밀도를 향상시키기 위하여 이 최소굽힘 반지름의 값이 중요하다. 최소굽힘 반지름(R)의 비(R/t)는 판두께가 클수록 크게되는 비례적 경향이 있다.<sup>8)</sup>

그림 3의 프레임 요소는 7844개의 8-Node Solid Element(CHEXA)를 사용하였고, 펀치, 다이 요소는 4-Node Shell Element(CQUAD4)를 사용하여 Rigid Element의 특성을 부여하였다. 그림 4, 그림 5는 단면부위를 384개 및 612개의 8-Node Solid Element(CHEXA)로 구성하였으며 펀치, 다이 요소의 특성은 위와 동일한 조건으로

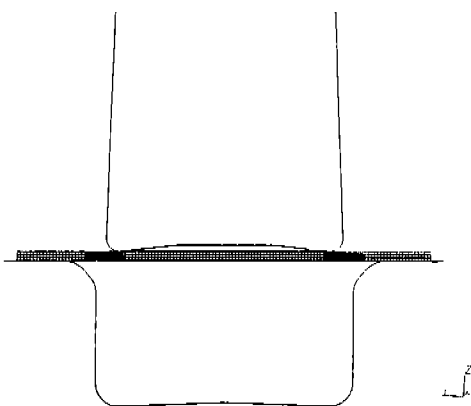


그림 5 해석에 사용된 단면 Fine 모델

하였다. 해석에 사용된 위의 3가지 모델에서 다이는 고정시켰고 펀치는 Z방향의 이동만 고려하였으며 재료는 Free상태로 놓았다. 그림 6은 1단계가 끝난후 재료의 변형양상을 나타내었고 그림 7은 2단계가 끝난후 스탬핑공정의 최종단계에서 나타나는 재료의 변형양상을 나타내었다. 그림 8과 그림 9는 단면 Fine모델과 단면 Coarse 모델에 사용된 펀치의 속도곡선으로 1단계에서는 각각  $V_z = -1181\text{mm/sec}$ 와  $-1221\text{mm/sec}$ 의 속도로 90msec를 진행한 후 110msec에서  $V_z = 0$ 이 되고 2단계에서는 130msec에서 부터 220msec까지  $1181\text{mm/sec}$ 와  $1221\text{mm/sec}$ 의 속도로 진행시켰다.

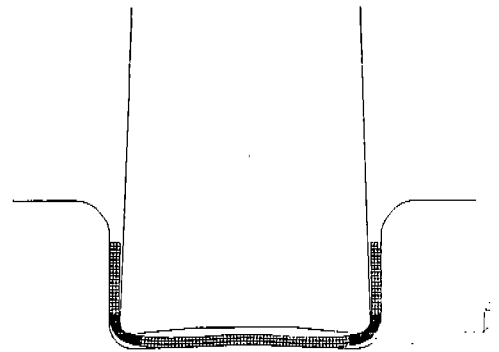


그림 6 펀치의 -Z방향이동(1단계)

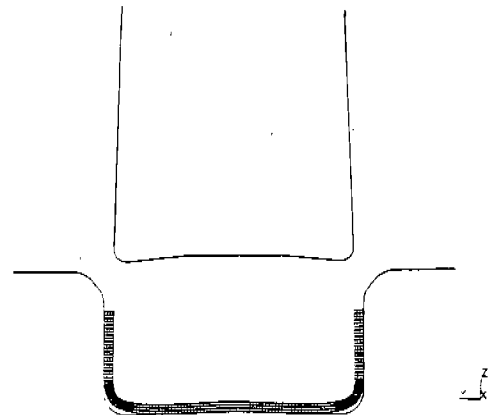


그림 7 펀치의 +Z방향이동(2단계)

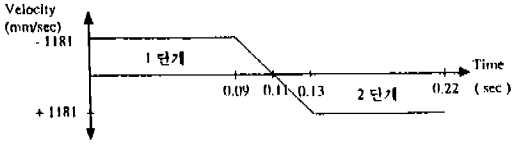


그림 8 시간 경과에 따른 펀치의 속도곡선(단면 Fine 모델)

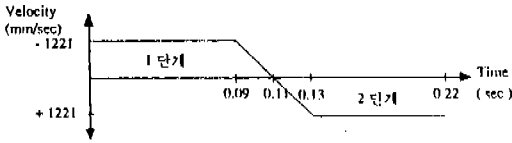


그림 9 시간 경과에 따른 펀치의 속도곡선(단면 Coarse 모델)

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 응력 및 변형률

소성변형시 발생하는 응력 및 변형률은 재료의 성형성을 밝혀주는 것으로 스탬핑 공정시 재료의 상태를 지배한다. 단성굽힘에서는 변형이 "0"인 중립면이 판재 두께의 중심에 위치하지만 소성 굽힘 작업에서는 그 중립면이 안쪽으로 이동하게 된다. 소성변형률은 중립면으로부터 떨어져 있는 거리에 비례하므로 굽힘면 바깥쪽 표면이 내측 표면보다 큰 변형을 가지게 된다. 판의 두께 중심부에서는 인장변형을 받는데 이것은 전체 두께에 대한 평균이므로 굽힘 부분에서는 체적을 일정하게 유지하기 위하여 두께가 감소되어야 한다. 즉 굽힘 반경이 작을수록 두께감소는 커지게 된다.<sup>9)</sup>

드로잉시 발생하는 잔류응력은 작업공정이 끝난후 재료에 남아있는 응력으로서 정확하게 계산하는 것이 어려우므로 실험을 통하여 측정하는 것이 통례로 되어 있다. 가장 많이 이용되는 측정법은 잔류응력이 있는 부분을 물체에서 제거하거나 기계가공을 하면서 적절한 부위에 부착된 스트레인게이지로 부터 변형률의 변화를 측정하는 파괴 시험법과 변형을 받는 재료에서 특정

결정격자면의 원자간 거리를 X-선 회절법으로 측정하면서 변형을 받고있지 않는 상태와 비교하는 비파괴 시험법인 X-선법<sup>10)</sup>이 주로 이용되고 있다.

그림 10에서 그림 12는 작업이 끝나 펀치와

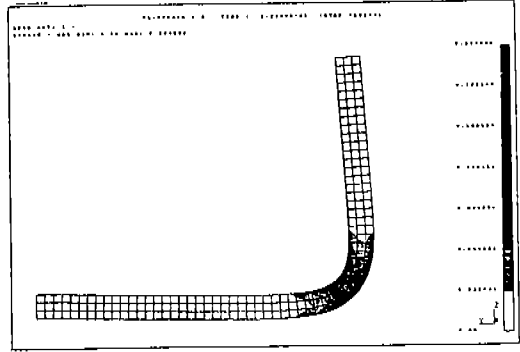


그림10 성형후 단면 Coarse 모델의 변형률분포

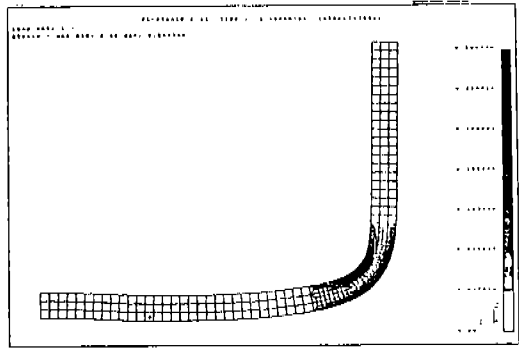


그림11 성형후 단면 Fine 모델의 변형률분포

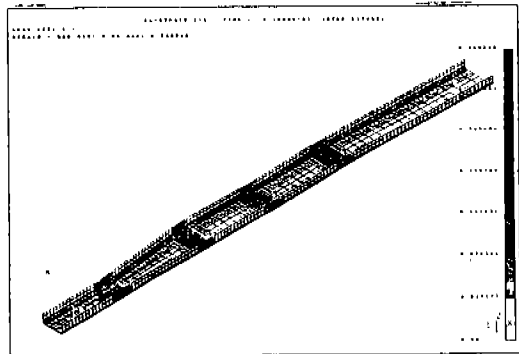


그림12 성형후 Full 모델의 변형률분포

다이를 제거했을 때 각각의 모델에 존재하는 내부 변형률 분포를 나타내고 있고 그림 13과 그림 14는 각각의 모델에 대한 주응력 분포를, 그림 15에서 그림 17은 잔류응력분포를 나타내고 있으며 이 결과 값들을 표 1에서 비교 정리하였다.

변형률이 최대인 영역은 굽힘을 가장 많이 받는 부위로서 프레임에서는 곡률이 큰 부위에서 발생하며 최대응력 발생부위도 최대 변형률 발생 부위와 일치함을 보여준다.

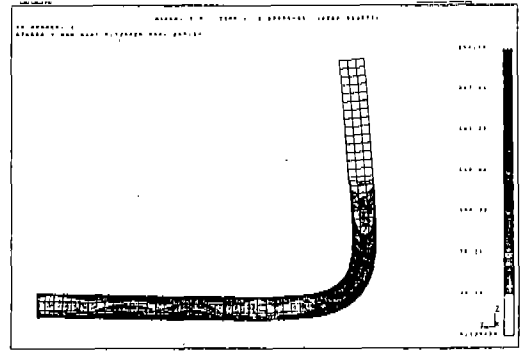


그림 15 성형후 단면 Coarse 모델의 잔류응력 분포

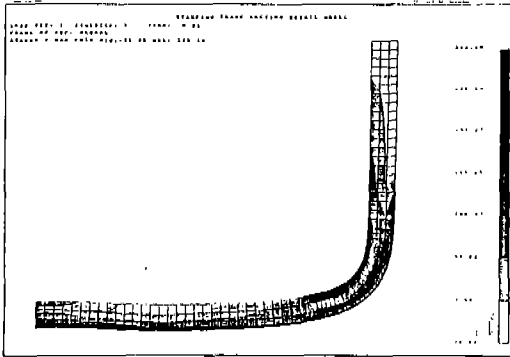


그림 13 성형후 단면 Fine 모델의 Principal Stress 분포

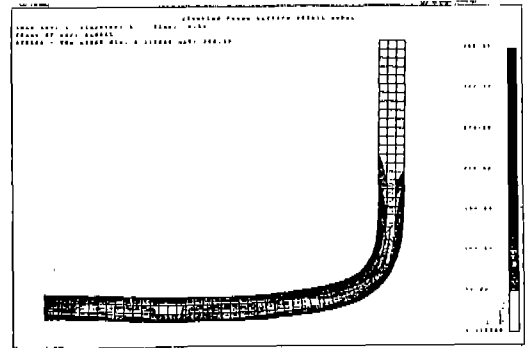


그림 16 성형후 단면 Fine 모델의 잔류응력 분포

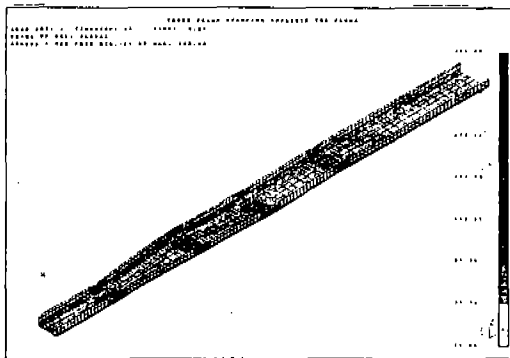


그림 14 성형후 Full 모델의 Principal Stress 분포

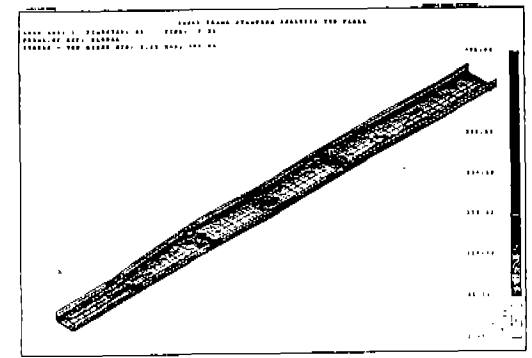


그림 17 성형후 Full 모델의 잔류응력 분포

표 1 각 단계별 응력 및 변형률

분 류	응력 및 변형률	1단계	2단계
단면 Coarse 모델	Mises Equivalent Stress(N/mm <sup>2</sup> )	815.2	254.1
	Plastic Equivalent Strain	0.2242	0.2242
단면 Fine 모델	Mises Equivalent Stress(N/mm <sup>2</sup> )	815.1	382.4
	Principal Stress(N/mm <sup>2</sup> )	910.2	282.1
	Plastic Equivalent Strain	0.2630	0.2647
Full 모델	Mises Equivalent Stress(N/mm <sup>2</sup> )	819.3	408.1
	Principal Stress(N/mm <sup>2</sup> )	747.4	392.3
	Plastic Equivalent Strain	0.2602	0.2602

#### 4.2 스프링백 및 두께변화

스텝핑공정이 끝나 펀치 및 다이를 제거하였을 때 제품의 형상은 원래상태로 복귀하려는 탄성력으로 인해 제품도와 일치하지 않거나 불균일한 재질에서는 불량률의 원인이 되기도 한다.

스프링백은 모든 금속공정에서 발생하지만 굽힘 작업에서는 그 현상이 매우 현저하다. 금형에서 제거하기 전의 굽힘반지름을  $R_0$ , 제거한 후의 곡률반지름을  $R$ 라고 했을 때 스프링백  $K_s$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$K_s = \frac{R_0 + h/2}{R_f + h/2} = \frac{2R_0/h + 1}{2R_f/h + 1}$$

$h$ 는 재료의 두께로 스프링백은 판의 두께에 대한 굽힘 반경의 비에 따라 변한다.<sup>9)</sup>

스프링백을 피하기 위해서는 펀치로 재료를 찍어 눌러서 소성변형을 주는 방법과 항복점을 낮추기 위하여 가열하는 방법도 이용되고 있다. 스프링백은 펀치 끝 부위의 곡률 반경이 클수록 크게 발생하므로 펀치 및 다이의 형상에 따라 결정되거나 재료의 기계적 특성에 의해 결정되지만 가공재료의 종류마다 달라서 일반적으로 탄성계수가 적고 항복응력이 높은 재질일수록 크게 나타나므로 금형의 설계시 이러한 스프링백을 고려하여 설계에 반영하여야 한다.

그림 18은 프레임을 금형에서 탈거한 후의 두께변화를 나타내었고 그림 19는 재료 두께인

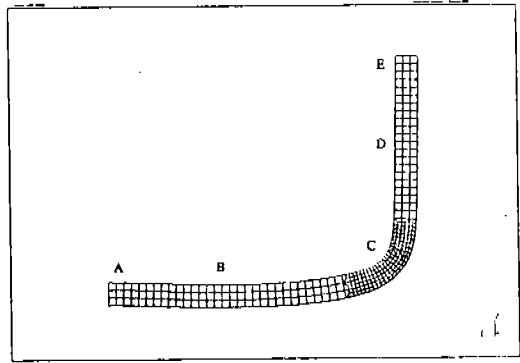


그림 18 단면 Fine 모델의 두께변화

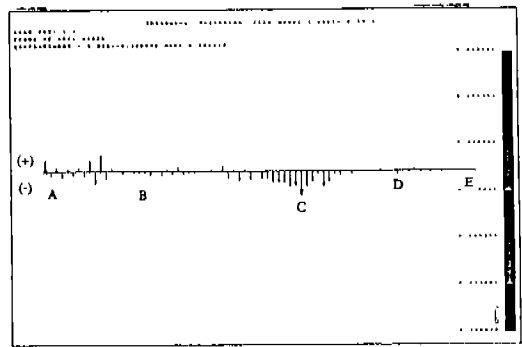


그림 19 재료두께변화의 10배 확대

8mm를 기준으로 10배 확대하여 도식적으로 나타낸 그림으로서 최고 +0.26mm에서 최소 -0.38mm까지의 범위를 두께가 늘어난 부위는 (+) 방향, 감소한 부위는 (-) 방향으로 표시하였다.

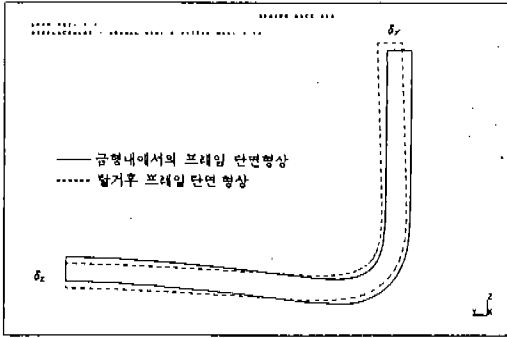


그림 20 단면 Coarse 모델의 스프링백

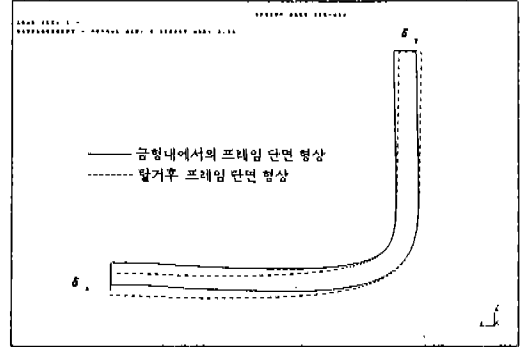


그림 21 단면 Fine 모델의 스프링백

표 2 각 모델별 스프링백

		Y방향(mm)	Z방향(mm)
단면 Coarse 모델		+3.99	-2.2
단면 Fine 모델		-1.86	-3.96
Full 모델	A(283X)	3.46	+8.68
	B(1086X)	2.60	+4.02
	C(2626X)	1.25	+4.94
	D(3772X)	0.333	+3.77

프레임의 두께가 가장 많이 줄어든 부위는 곡률이 큰 부위로 나타나고 두께감소는 변형률이 최대인 부위에서는 재료의 두께변화도 가장 컸으며 이 부위의 두께 감소는 4.7%이었다.

그림 20과 그림 21은 단면 Coarse 모델 및 Fine 모델에 대한 스프링백을 나타내었고 그림 22는 Full 모델의 XZ평면에 대한 스프링백을 나타내었으며 표 2에 이값들을 비교정리하였다.

Full 모델의 좌측 끝단의 좌표를 X방향으로 0이라 놓을 때 A, B, C, D점의 좌표값은 283mm, 1086mm, 2626mm, 3772mm 지점을 나타낸다.

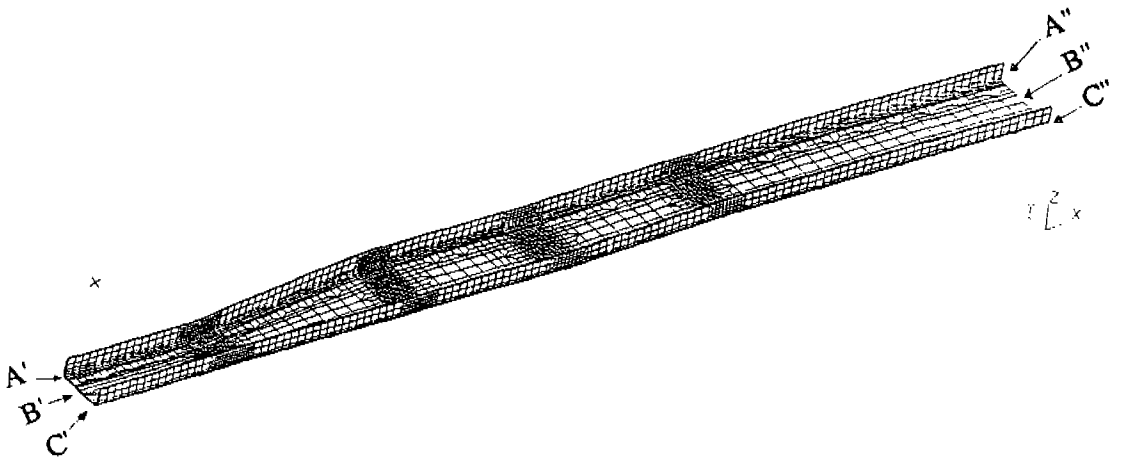
### 4.3 프레임 재료 및 금형간의 마찰

제품의 성형성을 결정하는 중요한 요인중의 한가지가 재료와 금형간의 접촉면에서 발생하는 마찰에 의한 영향이다. 재료와 금형사이의 마찰이 큰 경우는 국부적인 Necking현상을 유발시켜 과도한 두께변화 Stretch Mark가 발생하

면서 찢겨지기도 하지만 너무 작은 마찰의 경우에는 판재가 과도하게 금형내부로 유입되어 Wrinkling현상을 발생시키기도 한다.

적절한 마찰력은 성형성의 향상과 작업조건을 안정을 도모하고 다이의 수명을 연장시키므로 적절한 윤활유를 선택하는 문제가 중요하다. 점도가 낮은 윤활유를 사용하는 것은 작업성이 좋아지고 편리하나 스테인레스 강판이나 연강판의 딥드로잉시에는 드로잉 하중도 크므로 유막이 끊어지기 어려운 강력한 윤활성을 가진 점도가 높은 윤활유를 사용하여야 한다.<sup>8)</sup>

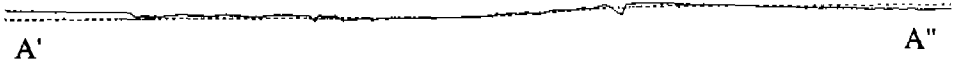
본 연구에서는 해석에 주된 영향을 주는 변수가 첫째는 프레임을 구성하고 있는 Element의 크기, 둘째는 펀치 및 다이의 형상, 셋째는 펀치의 속도등으로 나타났고 마찰을 고려하였을때와 거의 무시하였을때의 결과를 비교하여보면 1단계에서는 금형내부로 유입되는 재료의 양에 차이가 생겨서 결과에 10% 정도의 차이를 주었



FILE NAME: ...  
DATE OF MODIFICATION: ...

LENGTH DATA: ...

x



FILE NAME: ...  
DATE OF MODIFICATION: ...

LENGTH DATA: ...

x



FILE NAME: ...  
DATE OF MODIFICATION: ...

LENGTH DATA: ...

x

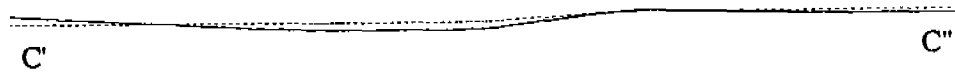


그림22 Full 모델의 스프링백(XZ평면)



지만 2단계의 경우에는 마찰의 변화가 결과에 거의 영향을 미치지 못한것으로 나타났다.

## 5. 결론 및 향후계획

유한요소법을 이용한 프레임의 스탬핑해석은 시간에 따른 재료거동 및 두께변화등을 분석할 수 있어 스탬핑공정의 정확성 및 성형완료후 스프링백을 확인할 수 있다.<sup>11)</sup> 또한 금형설계 및 시작품 제작시에 금형(편치, 다이)의 형상, 재료의 특성에 따른 성형성을 평가한다면 제품의 개발기간 단축에 따른 원가절감에 기여하게 된다.

프레임의 스탬핑해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 대형 프레임에 사시요소를 부착시킬 경우 잔류응력 및 집중변형 부위를 피하여 선정하여야 하므로 구배진곳에서 최소 30mm 이내에서는 구멍을 만들면 안된다.

둘째, 스탬핑 해석시 Run Time을 줄이기 위해서는 빠른 속도의 편치로 Solid 1점 모델에 대한 변형거동을 확인한후, 집중스트레인 발생 부위에 대한 상세한 모델링으로 최소 2점 이상의 새로운 Solid모델을 재구성하여 해석을 하여야 한다.

셋째, 편치 및 다이의 설계가 정확하더라도 편치의 하강거리 변화에 따라 재질에 발생하는 스프링 백은 크게 변한다.

앞으로, 본 연구와 같은 비선형 모델을 해석할 경우에는 초고속 대용량 컴퓨터를 확보하여 각각의 모델에서 Element의 수를 지금보다 많이 사용하면서 Full 모델에서는 프레임 전체를 모델링하여 해석에 이용한다면 실제작업과 비슷한 해석결과를 얻을수 있으리라 판단되며, 유효성에 관한 폭넓은 실험 데이터를 축적하여 성형성 해석을 발전시킨다면 많은 비용이 소요되는 금형제작 담당자에게 보다 정확한 설계자료를 제

공할 수 있으므로 금형의 개발 기간 단축 및 생산효율을 극대화 시킬수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Donald R. Allen, "Process Control in Stamping Lines", SAE Paper 890343, 1989
2. 김영석, "스탬핑 성형성 평가를 위한 2, 3의 모사실험", 자동차공학회지, Vol. 14, No. 6, 1992, pp.9-22.
3. Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, Taylan Altan, "Metal Forming and The Finite-Element Method", OXFORD University Press 1989, pp.26-53.
4. 김주성, 민홍기, "자동차용 휠 디스크의 스탬핑해석", 자동차공학회지, Vol. 14, No. 3, 1992, pp.26-31.
5. Medhat Karima, "A Methodology for Computer Aided Stamping Engineering", SAE Paper 890502, 1989
6. MacNeal-Schwendler Co., "MSC/DYNA User's Manual", Version 2, 1990
7. R. Stevenson, "Modeling of Sheet Metal Forming-A Status Report", SAE Paper 880523, 1988.
8. 김세환, "금형설계기법", 대광서림, 1990, pp. 69-80, pp. 226-228.
9. 전기연, "금속가공학", 반도출판사, 1991, pp. 177-178, pp. 300-304.
10. C.S.Barrett and T.B.Massalski, "Structure of Metals", 3rd ed., Chap. 17, McGraw Hill Book Company, New York, 1966
11. 민홍기, 김의석, 이화원, "자동차용 사시 프레임의 스탬핑해석", 자동차공학회 차체 및 차량동역학 부문위원회 초록집, 1993, pp. 27-33.