

## 수직벽을 가진 자동차 부품 성형공정의 스프링백 유한요소 해석

이두환\* · 윤치상\* · 신철수\* · 조원석\* · 구본영\*\* · 김영탁\*\*\*

(2000년 9월 7일 접수)

## Finite Element Springback Analysis of Vertically-Walled Auto-Body Part

D. H. Lee, C. S. Yoon, C. S. Shin, W. S. Cho, B. Y. Ghoo and Y. T. Keum

### Abstract

A vertically-walled auto-body part is one of the most difficult stamping parts because of angle change, wall curl, and twisting of the blank after springback as well as fracture and wrinkle. In this study, computational simulations of the vertically-walled auto-body part are carried out focusing on angle change, wall curl, and twisting after springback. Binderwrap blank shape is used in forming analysis for precise initial contacts between punch and blank. An adaptive mesh method is used in springback analysis for precise calculation of bending moments. In springback analysis, the differences of 2 and 3 dimensional analysis are compared and the effects of blank holdig force and friction coefficient are evaluated. In order to verify the validity of simulation results, they are compared with measured ones. The predicted thickness distribution and formed shape are agreed well with those of the measurement. The predicted springback amount is less than that of the measurement.

**Key Words** : Vertically-Walled Auto-Body Part, Springback Analysis, Finite Element Method, Twisting Sheet Metal Forming, Explicit/Implicit Program

### 1. 서 론

박판 성형은 평판 형태의 블랭크에 금형과 프레스로

외력을 가하여 원하는 형상의 제품을 생산하는 성형 기술이다. 성형 중 박판이 일으키는 변형의 대부분은 소성 변형이지만 탄성변형도 포함되어 있다. 소성변형된 부분

\* 현대/기아 연구개발본부 금속재료연구팀  
\*\* 한양대학교 대학원  
\*\*\* 한양대학교 CPRC

은 금형구속이 풀려 외력이 제거되어도 형상이 그대로 유지되지만 탄성 변형된 부분은 금형 구속이 풀리면 판재 내의 잔류응력에 의해 형상이 변하는 스프링백이 발생한다. 스프링백은 제품의 치수정밀도에 영향을 미치기 때문에 정교하고 복잡한 형상을 가진 박판 제품 사용이 증가함에 따라 박판 성형에서 그 중요성이 날로 커지고 있다.

최근에는 스프링백을 예측하고 스프링백에 영향을 주는 인자를 찾아내기 위해 직접 인자를 바꿔가며 실험을 하는 대신에 시간과 공간, 비용을 절약할 수 있는 방법으로 컴퓨터를 이용한 수치해석이 널리 사용되고 있다.

수치해석 방법으로는 유한 요소법이 주로 사용되고 있으며 이를 이용한 내연적 및 외연적 프로그램이 개발되어 널리 사용되고 있다. 내연적 프로그램은 해의 정확도 면에서 큰 장점이 있지만 계산시간 및 수렴성 문제로 인해 아직까지 3차원 실금형 해석 및 가상 트리아아웃에 적용한 예는 거의 없다. 외연적 프로그램은 해의 정확도가 떨어지는 단점이 있지만 빠른 해석시간과 사용상의 편의성 등으로 현장의 요구에 빠르게 대처할 수 있는 장점 때문에 최근 들어 널리 사용되고 있다. 특히, 외연적 프로그램을 이용한 3차원 실금형 성형(forming)해석은 힘평형 방정식을 만족하는 해는 아니지만 성형형상 및 변형을 예측에 정확도가 높아 이를 이용한 가상 트리아아웃을 수행할 수 있는 단계에 이르고 있다. 그러나, 스프링백 해석의 경우에는 해석결과의 정확도가 검증되지 않아 아직까지는 컴퓨터 트리아아웃 단계에는 이르지 못한 실정이다. 이것은 크게 2가지 이유 때문인 것으로 생각된다. 첫째는 스프링백 해석 프로그램이 내연적 방법을 이용함에도 불구하고 외연적 프로그램의 성형해석 결과를 스프링백 해석의 입력데이터로 사용하여 해의 정확도가 떨어지기 때문이며, 둘째는 스프링백 해석의 정확도를 검증하기 위한 실패널 스프링백 측정법이 표준화되어 있지 않기 때문이다.

최근들어 스프링백에 관한 연구가 국내외적으로 다양하게 진행되고 있으며 특히, 해석 프로그램들의 장단점을 비교하고 해석 프로그램 자체의 오차를 극복하여 보다 효율적인 해석결과를 얻을 수 있는 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Montmayer 등<sup>(1)</sup>은 상용프로그램인 OPTRIS를 이용한 스프링백 해석으로 재료 물성치, 블랭크 홀딩력, 요소 크기, 펀치속도, 요소법선 방향, 유한요소 생성조건 등의 변화가 스프링백에 미치는 영향을 평가하고 스프링백을 저감시킬 수 있는 인자조합을 제시하였다. Park 등<sup>(2)</sup>은 U-밴드 스프링백 해석을 통해 외연적 방법을 이용한 성형 해석과 내연적 방법을 이용한 스프링백 해석의 장단

점을 비교하였다. He 등<sup>(3)</sup>은 2개의 유한요소 프로그램인 ZBEND1과 LS-DYNA3D를 이용하여 스프링백 해석을 수행하고 2개 프로그램의 장단점을 비교하였다. 이로부터 블랭크 홀딩력이 증가할수록 스프링백량이 감소하는 것을 정량적으로 제시하였다. Joanic 등<sup>(4)</sup>은 스프링백 해석을 위한 내연적 수식을 제안하고, U-밴드 및 S-레일 실험을 통해 블랭크 홀딩력과 금형 디자인이 스프링백에 큰 영향을 미치는 것을 보였다. Wang 등<sup>(5)</sup>은 스프링백이 최대 벤딩 모멘트와 벤딩 아크 길이 비례한다는 것을 발견하고 다이 금형 설계에서 벤딩 아크 길이를 줄이면 스프링백량이 감소함을 보였다.

정완진 등<sup>(6)</sup>은 내연적 방법을 이용한 스프링백 해석 프로그램을 개발하고 두께방향의 적분점 개수가 5개인 4절점 요소를 사용하며 U-밴드 및 S-레일 스프링백을 해석하였다. Han 등<sup>(7)</sup>은 판재 프레스 성형에서 성형 제품의 형상 정밀도를 향상시키기 위하여 여러 가지 변형 모드에 대한 실험과 컴퓨터 성형 해석을 수행하였다. Yang 등<sup>(8)</sup>은 스프링백 현상을 유한요소법으로 해석하는데 있어서 유한요소 모델링 인자인 블랭크 요소 크기, 곡률부 요소 개수 등이 스프링백에 미치는 영향을 평가하였다. 이로부터 정확한 스프링백 해석을 위해서는 금형 및 블랭크의 기하학적 형상을 정확하게 모델링하는 것이 중요함을 발견하였다.

수직벽을 가진 자동차 부품 성형은 성형 중 또는 성형 후 파단(fracture) 및 주름 문제뿐만 아니라 특히, 각도변화, 비틀림, 찌힘 등 수직벽의 스프링 백에 의한 치수정밀도 저하 문제 때문에 성형이 난이한 부품 중의 하나이다(Fig. 1 참조). 따라서, 본 연구는 수직벽을 가진 자동차 부품 성형 공정에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 성형결함 및 스프링백으로 인한 치수정밀도 문제를 예측하여 양산 시 특히 문제가 될 것으로 생각되는 스프링백 문제에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 적용가능성을 검토하였다. 또한, 2차원 및 3차원 스프링백 해석의 장단점을 보이고, 블랭크 홀딩력과 마찰계수 변경이 스프링백에 미치는 영향을 평가하였다.

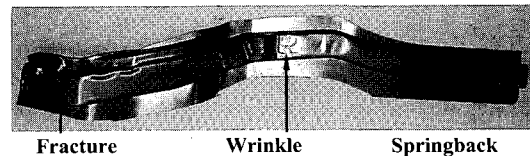


Fig.1 A car part with vertical walls and forming defects

## 2. 소재 물성 평가

블랭크 소재의 정확한 물성을 구하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 강판재이기 때문에 평면이방성은 적을 것으로 생각되지만 보다 정확한 데이터를 추출하기 위하여 압연방향(0°방향), 45°방향, 90°방향의 3방향 시편에 대한 인장시험을 각각 실시하였다. 항복강도는 45°방향의 값이 압연방향과 90°방향보다는 높은 값을 갖지만 강도계수, 가공경화지수, 그리고 연신율의 경우에는 방향에 따른 일정한 성질이 관찰되지 않았다. 연신율은 거의 모든 조건에서 약 30%의 값을 가졌고 소성이방성비는 압연방향, 45°방향, 90°방향에 대해 각각 1.140, 1.039, 1.535의 값을 가졌다. Fig. 2는 압연방향 인장시험 결과와 Hollomon 가공경화 법칙을 이용한 곡선을 비교한 그림이다. 변형률이 0.0~0.02인 범위에서 약간의 차이는 있지만 전반적으로 실험치와 Hollomon 가공경화 곡선을 이용한 결과가 근사함을 볼 수 있다. 해석 시 재료의 응력-변형률 관계를 묘사하기 위하여 3방향 인장시험 결과를 Fig. 2에서와 같은 Hollomon 가공경화 곡선으로 근사화 하였다.

## 3. 컴퓨터 성형해석

수직벽 부품은 다단계 공정을 거쳐 성형이 이루어진다. 1 공정은 주 형상을 제작하는 공정으로서 성형에 있어 가장 중요한 드로잉 공정이며, 2/3 공정은 트리밍

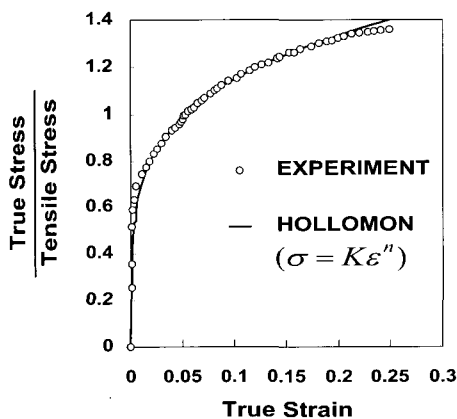


Fig. 2 Comparison of true stress-strain relationship between experimental measurement and Hollomon curve

및 굽힘 공정이다. 본 연구에서는 수직벽 부품 성형에 있어 가장 중요한 공정인 드로잉 공정에 대한 컴퓨터 성형해석을 수행하였다. 다이금형의 CATIA 데이터로부터 읍셋을 수행하여 펀치 및 블랭크 호몰더 금형을 생성하였고, 블랭크는 현장에서 사용되는 실 블랭크 패넬을 직접 측정하여 모델링하였다(Fig. 3 참조).

3차원 해석에는 현재 상용으로 널리 사용되고 있는 2개 유한요소 프로그램을 사용하였으며, 2차원 해석에는 자체개발한 HY-FORM2<sup>9)</sup>를 사용하였다. 바인더랩 및 성형 해석에는 외연적 해석방법을 사용하였고 스프링백 해석에는 내연적 해석방법을 사용하였다. 컴퓨터 성형해석의 타당성 및 정당성을 확인하기 위하여 실제 트라이된 제품의 두께 분포와 해석으로 예측된 두께분포를 비교하였으며, 해석된 스프링백 형상을 레이저 스캐너로 측정된 결과와 비교하였다.

### 3.1 바인더랩 해석

바인더랩은 평평한 블랭크가 바인더 곡면에 고정될 때 다이 캐비티 내에서 블랭크가 굴곡 되어 일정 형상의 곡면을 이루는 것을 말한다. 바인더랩 해석은 펀치 초기 접촉 위치, 드로잉 깊이, 소재 유입 각도 등 다이 페이스 설계 평가에 필수적인 데이터를 제공하고, 특히 성형 해석 시 초기 펀치 접촉 위치가 바인더랩 형상에 따라 결정되기 때문에 성형 해석 결과에 큰 영향을 미친다.

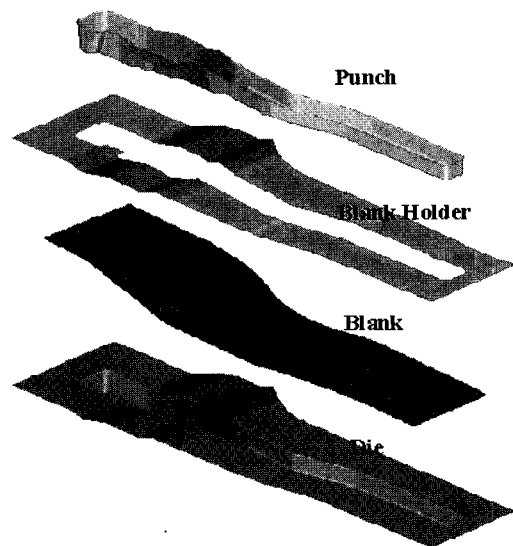


Fig. 3 Modelling of the 1st drawing process of a car part with vertical walls

본 연구는 성형 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 성형해석에 앞서 바인더랩 해석을 수행하였다. Fig. 4는 블랭크 호울더 곡면에 밀착된 블랭크의 바인더랩 형상을 보여주고 있다. 길이 방향 양쪽 끝단부에서의 약간의 드로인을 제외하면 블랭크 이동은 크지 않은 것을 볼 수 있다.

3.2 성형 해석

Fig. 5는 단계별 성형형상이다. 최종 성형(time=1.334e-2sec)시 블랭크 상부의 드로인이 하부의 드로인보다 크고 좌측 끝단부 드로인이 크게 발생한 것을 볼 수 있다. 최종 성형 시 두께변형률 분포는 Fig. 6에 나타내었다. F 부분에서 최소두께인 0.82mm가 관찰되었고, 플랜지부와 펀치접촉부는 균일한 두께 분포를 보이고 있으며, 그림 상에서 잘 나타나 있지 않지만 벽부에 인장이 집중되어 벽부 두께가 많이 얇아졌다.

해석결과와 타당성 및 정당성을 검증하기 위하여 실제 제품의 두께측정 결과와 해석결과를 비교해 보았다.

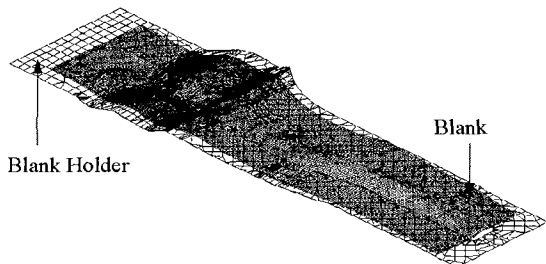


Fig. 4 Binderwrap blank shape

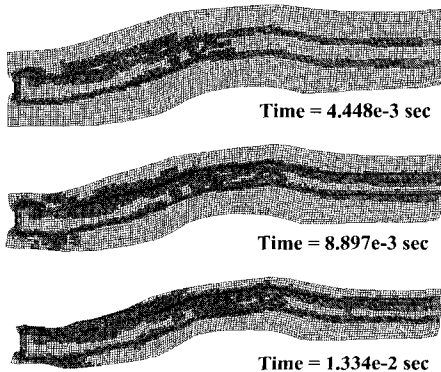


Fig. 5 Formed shapes associated with forming time

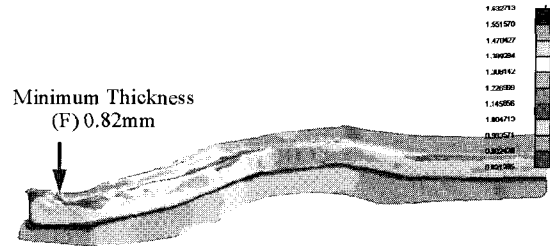


Fig. 6 Thickness distribution at the final forming stage

두께는 17개 단면을 각각 100mm 간격으로 분할하고 각 단면은 A, B, C, D, E의 5개 지점으로 분류하여 84지점의 두께를 초음파 두께 측정기와 마이크로미터로 측정하였다. A와 E는 플랜지부, B와 D는 비접촉 벽부, E는 펀치접촉부의 중앙지점을 각각 나타낸다. Fig. 7은 분할된 단면 중 10, 13, 16단면의 해석 및 측정결과를 비교한 그림이다. 10단면과 13단면은 해석치와 측정치가 크기 및 경향 면에서 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 16단면은 다른 단면에 비해 실험치와 측정치의 오차가 큰 것을 볼 수 있다. 이 부분에서 해석치와 측정치가 약 13%의 오차를 보여 부품 전체에 걸쳐 오차가 가장 크게 발생하였다. 이 부분은 실제 금형에서 TD 도금을 한 부분이며, 현장에서 실제로 생산할 때 윤활유를 도포하여 마찰을 최소화하는 부분이다. 그러나, 해석 시 해석 프로그램 등의 한계로 이를 모델링 하지 못한 것이 오차의 주원인인 것으로 생각된다. 성형해석은 부품 전체에 걸쳐 측정치가 10% 내외의 오차를 갖지만 전체적으로 성형형상 및 두께분포를 실제와 유사하게 예측하였다.

성형양부를 평가하기 위해 성형한계도에 해석된 변형률을 도시하였다(Fig. 8참조). F 부분의 변형률은 성형한

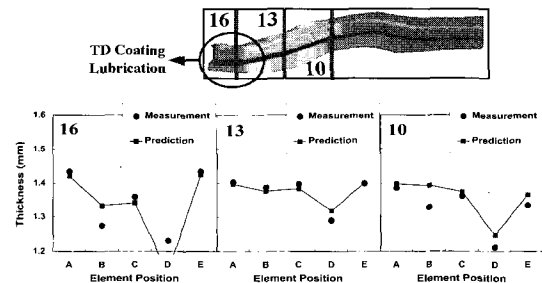


Fig. 7 Comparison of thickness distribution between measurement and FEM prediction

계선 상부에 존재하여 F 부분에서 파단이 발생함을 예상할 수 있으며, 실제 패널 성형에서도 F 부분에 파단이 발생하였고 파단위치도 해석결과와 잘 일치함을 볼 수 있다(Fig. 8 참조). 해석결과가 파단 위치 및 파단 경향을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 파단 부위는 X방향으로의 변형에 비해 Y방향으로의 변형양이 작아 X방향의 과도한 인장으로 파단이 발생하였다. 따라서, X방향으로의 드로인을 향상시키면 F 부분에서의 파단을 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.3 3차원 스프링백 해석

바인더랩 및 성형해석 결과를 입력데이터로 사용하여 내연적 방법으로 1공정 성형품의 스프링백 해석을 수행하고, 블랭크 홀딩력 및 마찰계수 변경에 따른 스프링백 차이를 비교하였다. 스프링백 해석결과를 평가하기 위해 해석된 3차원 형상 및 단면의 벽젓힘을 비교하는 방법이 일반적으로 사용되고 있지만 이러한 방법만으로는 스프링백의 정량적인 분석 및 평가가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 스프링백 해석결과를 평가방법을 제안하고 이러한 방법에 따라 해석결과를 분석하였다.

스프링백의 정성적인 관찰을 위해 2가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 블랭크 외곽선 형상변화를 관찰하는 방법이며, 두 번째 방법은 요소 법선벡터로 비틀림을 관찰하는 방법이다. Fig. 9는 스프링백 전후 성형형상의 최외곽 경계선들을 나타낸 그림이다. 멤버 중앙부에서 형상변화가 많아 최대 변위를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 멤버 중앙부에서 최대 12.7mm 정도의 변위를 나타내고 있다. Fig. 10은 비틀림 양을 비교하기 위하여 스프링백 전후 형상의 요소 법선벡터를 비교한 그림이다. 최대 비틀림 지점에서의 회전량은 3.3°이고 멤버 전체에 걸친 평균 회전량은 1.3°이다.

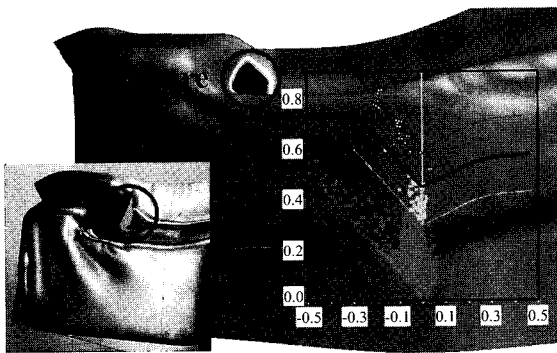


Fig. 8 Evaluation of fracture using FLD

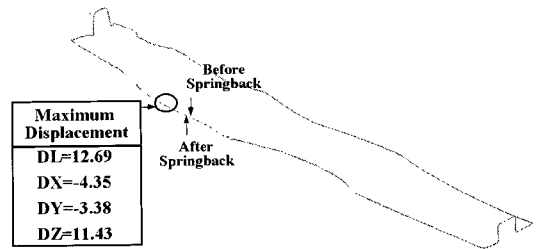


Fig. 9 Comparison of boundary lines between before and after springback

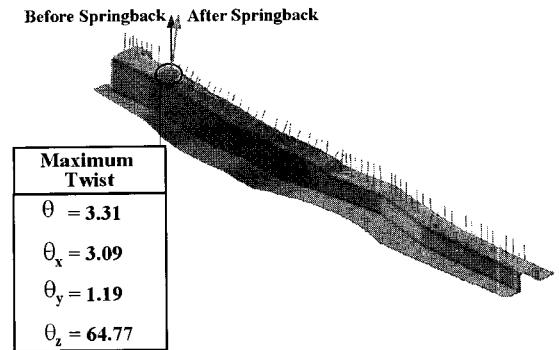


Fig.10 Comparison of mesh normal vectors between before and after springback

스프링백의 정량적인 평가를 위해 단면 벽젓힘을 관찰하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 2단면과 6단면의 스프링백 전후의 벽젓힘 결과를 비교한 그림이다. 2단면은 펀치 머리부로서 드로인이 많이 발생한 부분이며, 파단 부가 위치한 부분이다. 좌측벽부는 안쪽으로 우측 벽부는 바깥쪽으로 스프링백되어 벽젓힘 보다는 비틀림 현상이 더 심하게 발생한 것을 볼 수 있다. 플랜지부의 경우에 2단면보다 6단면이 스프링백양이 더 많은 것을 볼 수 있다. 6단면의 경우에도 비틀림 현상이 없다면 좌측 벽부가 반대 방향으로 스프링백 되는 것이 정상인데 이 부분은 비틀림 영향으로 벽부 안쪽 방향으로 스프링백 되었음을 볼 수 있다. 그 외 단면에서도 벽젓힘 보다는 비틀림이 더 강하게 발생하여 수직벽 부품의 경우에 비틀림으로 인한 치수정밀도 오차가 크게 발생할 것으로 예측된다.

공정변수 변경에 따른 스프링백 변화를 살피기 위하여 블랭크 홀딩력과 마찰계수를 변경하며 해석을 수행하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 각각 마찰계수와 블랭크 홀딩

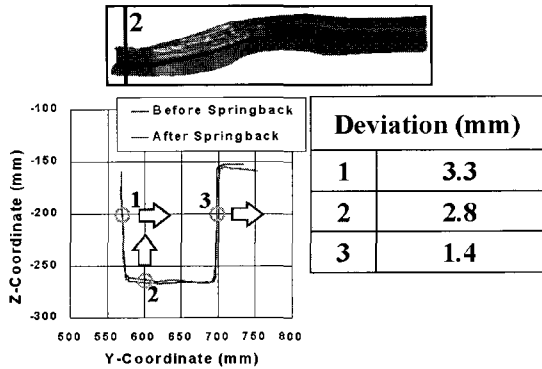


Fig. 11 Comparison of a sectional shape between before and after springback (Section 2)

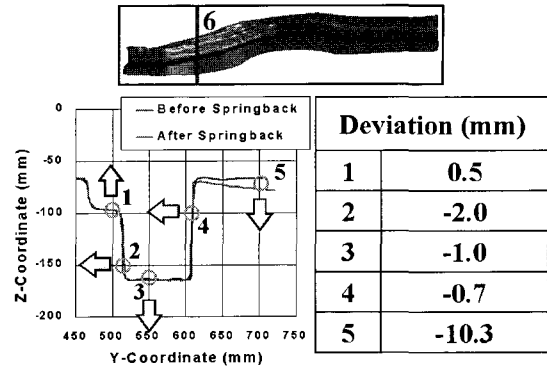


Fig. 12 Comparison of a sectional shape between before and after springback (Section 6)

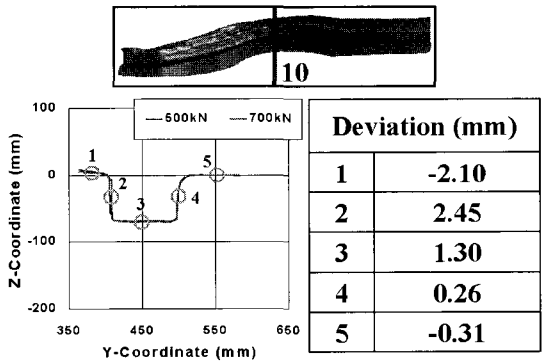


Fig. 13 Comparison of a sectional shape after springback with BHF's of 500kN and 700kN

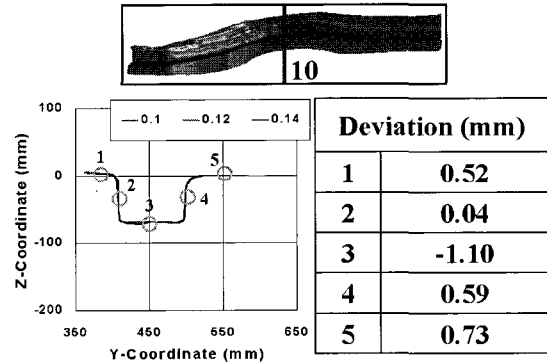


Fig. 14 Comparison of a sectional shape after springback with friction coefficients of 0.1, 0.12, and 0.14

력을 변경한 경우에 스프링백 차이가 가장 크게 나는 단면의 꺾힘량을 비교한 그림이다. 10단면에서는 500kN인 경우가 700kN인 경우보다 플랜지부 꺾힘이 더 크게 발생하여 블랭크 홀딩력을 높이면 스프링백양을 줄일 수 있다는 기존 연구결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 그 차이가 오차 한계에 머무르는 값으로서 큰 의미가 없었으며, 마찰계수(0.1/0.12/0.14) 변경에 따른 꺾힘량도 그 차이가 미미하여 거의 영향을 미치지 않았다. 이것은 크게 두 가지 이유 때문인 것으로 생각된다. 첫째는 수직벽 부품의 스프링백이 공정변수 영향보다는 기하학적 형상의 구속조건에 더 큰 영향을 받기 때문이며, 둘째는 외연적 해석방법을 이용한 성형해석이 공정변수 변경에 따른 응력해석에 민감하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 결과에 대한 명확한 검증은 위하여 실

패널의 형상 측정결과와 2개의 해석프로그램을 이용한 해석결과를 비교해보았다(Fig. 15 참조). 레이저 스캐너로 실패널을 스캔하여 점데이터를 수집한 후 이를 면데이터로 변환하여 측정결과를 가시화하였다. 전체적인 형상의 경우에 2개 프로그램의 해석결과가 측정결과와 거의 유사함을 볼 수 있다. 그러나, 스프링백양을 비교한 결과 해석결과는 측정결과보다 스프링백양을 과소하게 예측하고 있는 것을 알 수 있었다.

2개 프로그램의 해석결과는 형상, 두께분포, 스프링백양에 있어 차이가 매우 작아 2개 프로그램의 해석결과는 비슷한 정확도를 가진 것으로 생각된다. 이는 2개 프로그램이 외연적 성형 해석과 내연적 스프링백 해석을 순차적으로 수행하는 동일한 알고리즘을 갖고 있으며, 접촉처리 알고리즘도 유사하기 때문인 것으로 생각된다.

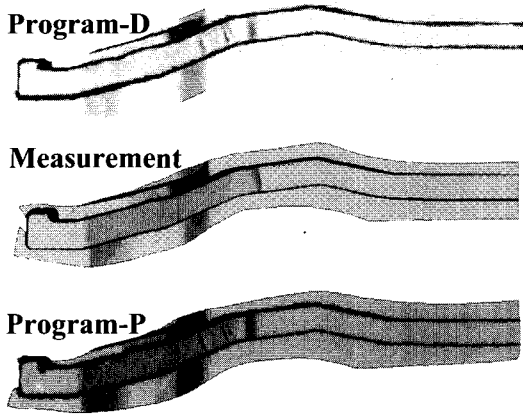


Fig. 15 Comparison of shapes after springback among measured surface and predicted surfaces by program-D and program-P

### 3.4 2차원 스프링백 해석

본 연구는 A-A와 B-B의 2개 단면에 대해 내연적 방법으로 2차원 성형해석 및 스프링백 해석을 수행하였다. 스프링백 해석의 경계조건은 단면의 중앙 절점에 고정 경계조건을, 그 절점의 좌우 두 절점에는 z-방향 변위 고정 경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 단면 A-A에서는 양쪽 플랜지 부분이 모두 처지는 스프링백이 발생했음을 볼 수 있다(Fig. 16 참조). 단면 B-B에서는 좌측 플랜지 부분이 우측 플랜지 부분보다 상대적으로 적은 양의 벽젓힘이 발생했음을 볼 수 있는데, 이는 좌측 펀치 곡률 부분에서의 스프링백 양이 좌측 다이 곡률 부분에서의 스프링백 양보다 상대적으로 작기 때문인 것으로 생각된다(Fig. 17 참조). 해석된 2개 단면에서 모두 벽젓힘이 내부에서 외부쪽으로 발생하고 있음을 볼 수 있으며, 이는 금형 단면의 기하학적 형상과 소재 물성 특성으로는 당연한 결과이다. 그러나, 3차원 해석에서는 비틀림이 벽젓힘보다 우세하여 벽젓힘이 외부에서 내부쪽으로 발생하는 것처럼 스프링백이 발생하였다. 즉, 이러한 단면의 경우에 2차원 해석과 3차원 해석의 경향이 정반대로 나타나게 된다. 즉, 2차원 해석의 경우에 빠르게 해석결과를 확인할 수 있는 장점이 있지만 그 적용에 있어 수직벽 부품과 같이 비틀림이 크게 발생하는 제품에 대해서는 해석결과 분석 시 주의가 필요함을 알 수 있다.

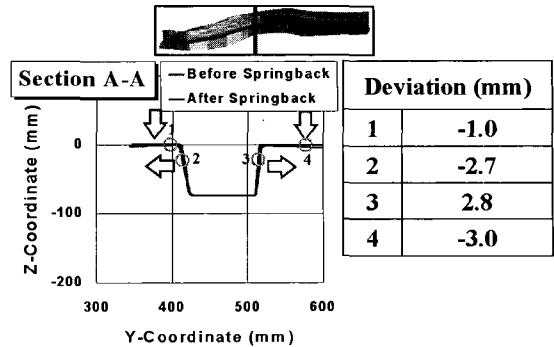


Fig. 16 Comparison of a sectional shape between before and after springback (Section A-A)

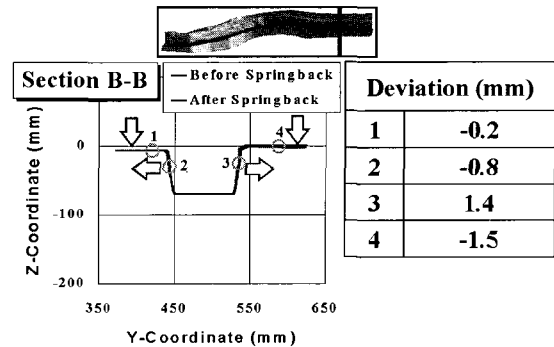


Fig. 17 Comparison of a sectional shape between before and after springback (Section B-B)

## 4. 결론

본 연구는 자동차 수직벽 부품의 컴퓨터 성형해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 외연적 방법을 적용한 성형해석 결과는 두께분포의 경우에 측정결과와 약 10% 내외의 오차를 가져 해석 결과의 신뢰도가 높음을 알 수 있었다.

(2) 내연적 방법을 적용한 스프링백 해석결과는 실제 결과보다 스프링백 양을 작게 예측하지만 경향은 잘 예측하였다.

(3) 외연적 방법의 성형해석과 내연적 방법의 스프링백 해석을 수행하는 경우에 서로 다른 프로그램을 사용한 경우에도 해석결과의 차이가 작았다.

(4) 블랭크 홀딩력과 마찰계수 변경이 스프링백에 미치는 영향이 거의 없었기 때문에 공정변수 변경에 따른 스프링백 차이는 비교할 수 없었다.

(5) 수직벽 부품은 스프링백으로 비틀림이 크게 발생하여 2차원과 3차원 스프링백 해석결과가 서로 달랐다. 따라서, 비틀림이 큰 패널의 경우에 2차원 및 3차원 스프링백 해석결과 평가시 주의를 기울여야 함을 알 수 있었다.

(6) 수직벽 부품은 과도한 스프링백으로 인한 치수정밀도 불량에 예상된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Montmayeur, N. and Staub, C., 1999, "Springback Prediction with OPTRIS", NUMISHEET'99, pp. 41~46.
- (2) Park, D. W., Kang, J. J., Hong, J. P., and Oh, S. I., 1999, "Springback Simulation by Combination Method of Explicit and Implicit FEM", NUMISHEET'99, pp. 35~40.
- (3) He, N., 1996, "Springback Simulation in Sheet Metal Forming", NUMISHEET'96, pp. 308~315.
- (4) Joannic, D. and Gelin J. C., 1999, "Shape Defects in Sheet Metal Forming Operations after Springback", NUMISHEET'99, pp. 29~34.
- (5) Wang, C. T., Kinzel, G. L., and Altan, T., 1993, "Process Simulation and Springback Control in Plane Strain Sheet Bending", SAE930280, pp. 45~54.
- (6) 김충식, 정완진, 1998, "박판성형을 위한 탄성복원해석의 수치적 모사", 제2회 박판성형 심포지엄 논문집, pp. 9~16.
- (7) Han, S. S. and Park, K. C., Hill, 1996, "An Investigation of the Factors Influencing Springback by Empirical and Simulative Techniques", NUMISHEET'96, pp. 53~57.
- (8) Lee, S. W. and Yang, D. Y., 1998, "An Assessment of Numerical Parameters Influencing Springback in Explicit Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 80-81, pp. 60~67.
- (9) Keum, Y. T. and Lee, K. B., 2000, "Sectional Finite Element Analysis of Forming Processes for Aluminum-Alloy Sheet Metals", Int. J. Mech. Sci., Vol. 42(12), pp. 1911~1933.