

## 금형 변형을 고려한 자동차 펜더패널의 성형해석

송민재<sup>1</sup> · 김영탁<sup>#</sup>

### Forming Analysis of Automotive Fender Panel Considering Die Deformation

M. J. Song, Y. T. Keum

(Received June 12, 2006)

#### Abstract

In order to see the effect of die deformation on the forming analysis of sheet metals, the draw-ins, strains, and spring-backs of an automotive fender panels are numerically simulated by considering the die deformation found by the simultaneous structural analysis of press and dies. By coupling the forming analysis and the structural analysis, the die deformation is simultaneously taken into account in the forming process. Furthermore, for the consideration of load difference transferred among the upper die, punch, and blank holder due to the changes in sheet thickness, the gap elements are employed instead of the blank sheet in the structural analysis. The numerical simulation results of an automotive fender draw panel are compared with the measurements. The comparison of the forming and spring-back analysis results between the rigid die and the deformed die shows that the consideration of tool deformation can predict more accurately the forming and spring-back of sheet metals.

**Key Words** : Fender Panel, Press/Die, Simultaneous Analysis, Gap Element, Draw-in, Springback

#### 1. 서 론

최근 자동차 업계에서는 급변하는 시장 환경에 대응함과 동시에 국제적 경쟁력을 확보하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 적기에 고객이 요구하는 자동차를 생산하기 위해서는 신차 개발 기간의 단축이 무엇보다 중요하다. 자동차의 차체는 300 여개의 프레스 성형품으로 이루어지는데 신차 개발기간을 결정하는 주요 요인 중 하나는 이들 프레스 성형품을 생산하기 위한 금형 개발의 리드타임이다. 초기 금형으로부터 양산용 최종 금형을 만들어 내는 과정은 아직도 숙련된 기술자의 시행착오에 의존하고 있다. 이러한 시행착오의 주요 원인 중 하나는 금형의 탄성 변형이다. 성형이

원활히 이루어지기 위해서는 금형 상하형 간의 간극이 일정하게 유지되어야 한다. 그러나 금형에 프레스 등에 의한 성형 하중이 가해지면 탄성변형에 의한 국부적인 변형이 발생하여 간극의 변화가 생긴다. 성형 해석은 다이, 펀치, 블랭크 홀더를 강체로 가정하여 해석을 수행하기 때문에 탄성 변형에 의한 금형의 변형을 고려하지 못하게 된다. 금형의 변형은 금형 간극의 변화가 생기고 변화된 간극은 블랭크와 금형의 접촉부에 높은 압력을 발생시키며 성형 불구합 현상을 발생시킬 뿐만 아니라 스프링백의 예측 정밀도를 저하시키는 주요 인자의 하나이다. 따라서 성형 불구합을 감소시키고 스프링백의 예측 정밀도를 향상시키기 위해서는 금형 형상의 변형을 고려한 성

1. 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과

# 교신저자 : 한양대학교 기계공학부

E-mail : ytkeum@hanyang.ac.kr

형해석이 요구된다. 유한요소법에 의한 자동차용 패널의 금형 구조해석과 성형해석의 많은 연구사례가 발표되었으나 금형 구조해석을 성형해석에 도입하지는 못했다. 금형 구조해석은 성형품질 향상과 제작공수 절감을 위해 설계 단계에서 금형의 강성이 균일하게 분포되도록 연구되고 있다 [1~3]. 인정제 등[4]은 드로우 금형의 구조해석을 위한 모델링 기법을 제안하여 펀치의 드로우 금형 구조해석에 적용하였고 발란스 블록을 이용하여 블랭크 홀더의 굽힘 변형을 최소화하기 위한 방안을 연구하였다. 서대운 등[5]은 공정 적용에 중점을 두고 접촉문제를 고려한 금형구조의 탄성 유한요소법을 제시하였다. 송민재 등[6]은 자동차 복동 프레스 금형의 프레스/금형 구조해석을 수행하고 블랭크 홀더 라이저의 최적 구조를 제안하였다. 자동차 외부 패널의 성형해석의 연구사례로는 박용국[7]은 프린트 도어의 드로잉 공정을 해석하여 실제 자동차 박판 성형에의 적용가능성을 검토하였다. 또한, 성형해석을 이용하여 자동차 패널 생산용 프레스 금형 제작공정의 개선을 제안하였다. 정기욱 등[8]은 상용 프로그램인 Pam-stamp 를 이용하여 자동차 펜더 패널의 전공정 해석을 수행하고 비드의 형상 조절을 통해 블랭크 유입량을 실제 트라이 아웃용 패널의 블랭크 유입량과 같도록 조절하였고 이후 공정에서의 스프링백량을 측정하여 실제 형상과 해석 결과를 비교하였다.

본 연구에서는 금형의 변형이 성형해석에 미치는 영향을 고려하기 위하여 드로우 공정에서 자동차용 펜더 패널의 금형 구조해석과 성형해석을 연계하여 해석하였다. 프레스와 금형의 상호작용을 고려하기 위하여 프레스와 금형을 일체로 모델링하였고 성형해석 결과에서 얻은 패널의 두께 정보를 gap 요소로 대체하여 구조해석을 수행하고 각 금형의 응력 및 변형을 구하였다. 구조해석을 통하여 변형된 금형의 형상을 성형해석에 도입하여 패널의 유입량, 변형률, 스프링백을 구하였고 강제 금형으로 해석한 결과와 비교하였다. 그리고 변형 금형과 강제금형의 성형해석 결과를 유입량의 실측치와 비교하여 성형해석을 수행하였다.

## 2. 프레스/금형 구조해석

### 2.1 프레스/금형 구조해석 모델링

차체 패널을 성형하기 위한 드로우 다이는 Fig. 1

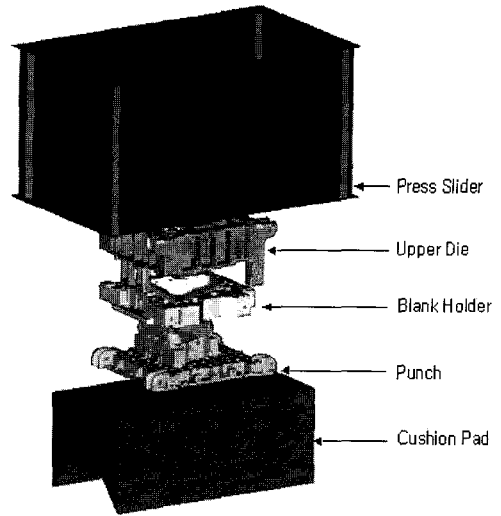


Fig. 1 Solid model of die structure

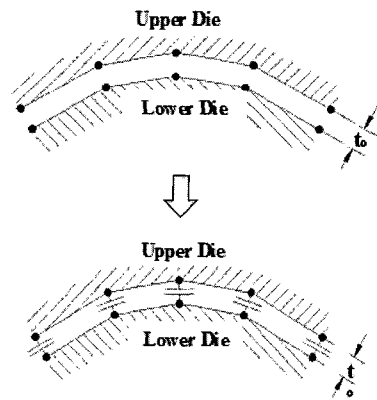


Fig. 2 Equivalent contact modeling

에 나타난 바와 같이 주물 구조로 이루어진 상형 다이, 펀치, 블랭크 홀더, 프레스 슬라이더 및 쿠션 패드로 이루어진다. 그림에서와 같이 상형 다이는 프레스에 고정되어 함께 하강하는 반면 펀치는 완전히 고정되어 지지된다. 또한 블랭크 홀더는 상형 다이와 펀치의 사이에서 블랭크를 지지하는 역할을 한다. 프레스의 하중은 상형 다이를 통해 블랭크 홀더와 펀치에 성형 과정에 따라 다르게 전달되어진다.

### 2.2 접촉해석 모델링

성형이 진행됨에 따라 블랭크의 두께는 변화하게 된다. 따라서 블랭크 두께의 변화를 감안한 접촉 경계조건의 설정은 필수적이다. 금형 구조해석

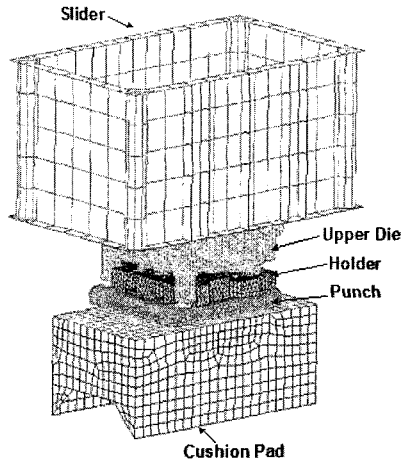


Fig. 3 F.E. model of press/die structure.

을 하기 위해서는 금형 상하형의 간극이 일정하도록 요소분할을 하는 것이 필수적이다. Fig. 2 는 블랭크 요소 대신 금형 상하 간극의 두 절점을 gap 요소로 연결한 등가 접촉해석 모델이다. 이 경우 블랭크의 초기두께는 접촉해석 과정에서 일정하게 유지된다. 따라서 정확하면서도 단순화된 접촉해석을 하기 위해서는 gap 요소를 사용한 등가 접촉해석 모델을 사용하는 것이 타당하다.

2.3 프레스/금형 연동 해석 모델링

Fig. 3 은 프레스 금형의 일체 구조해석을 수행하기 위한 모델에 대한 정보를 요약하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 금형의 구조는 프레스 슬라이더, 상형 다이, 블랭크 홀더, 펀치, 및 쿠션 패드로 이루어져 있다. 유한요소 모델은 133,618 개의 2 차 사면체 솔리드 요소와 3118 개의 2 차 사각형 쉘 요소로 구성되어있다. 성형해석의 결과를 고려하기 위해 2.2 절에서 기술한 바와 같이 gap 요소를 사용하였으며, 적용된 블랭크 홀딩력은 75 ton 이고 성형 하중은 875 ton 이다. 해석은 I-DEAS 를 사용하여 선형해석을 수행하였다. Table 1 에서 사용된 요소 및 하중조건을 요약하여 나타내었다.

2.4 파트별 변형 및 응력

Fig. 4~Fig. 6 은 프레스/금형 FE 모델의 구조해석 결과이다. Table 2 는 해석결과의 최소값과 최대값을 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 4 는 상형 다이의 수직 방향 변형 및 응력 분포를 나타낸 것이다. 프레스 슬라이더와 접촉하는 상형 다이 밑

Table 1 Summary of F.E. model

Upper Die	Quadratic	44,969
Blank Holder	Tetrahedron	36,788
Punch	Solid elements	42,785
Press Slider	Quadratic 4-node	1,027
Cushion Pad	Sell elements	2,091
Balance Block	Gap and Rigid elements	10
Distance Block		4
Bottom Block		21
Cushion Pin	Spring Elements	22
Forming Force(ton)	875	
Blank Holding Force(ton)	75	

Table 2 Analysis result of press and die assembly

	Effective Stress(MPa)		Displacement(mm)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Blank Holder	0.099	429	0.017	0.153
Upper Die	0.093	648	0.014	0.516
Punch	0.001	553	0.019	0.197

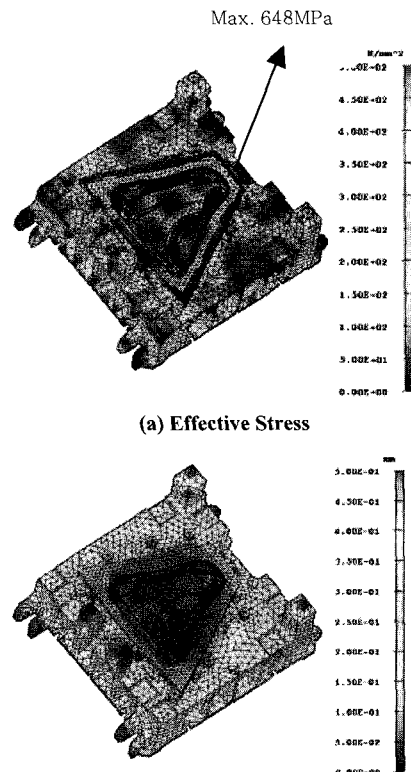
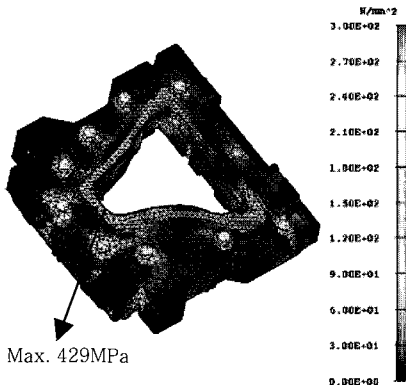
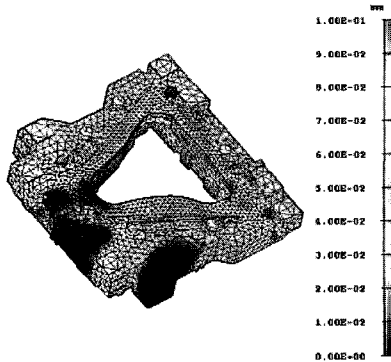


Fig. 4 Stress and deformation of upper die



(a) Effective Stress



(b) Deformation

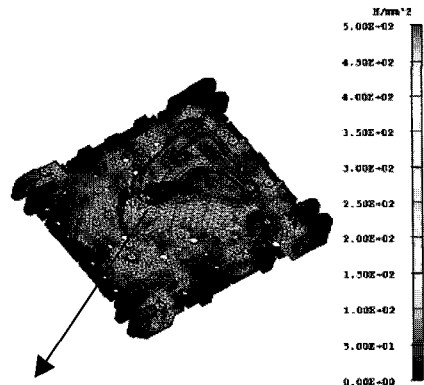
Fig. 5 Stress and deformation of blank holder

부분에서 큰 변형이 나타났으며 다이페이스 부분의 불균일한 응력집중 현상이 나타났고 발란스 블록과 디스턴스 블록에 응력집중 현상이 나타났다. Fig. 5는 블랭크 홀더의 응력 분포 및 수직 방향 변형을 나타낸 것이다. 블랭크 홀더의 앞부분에서 비교적 큰 변형이 나타났고 모든 발란스 블록에서 응력이 집중되어 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 펀치의 응력 분포 및 수직 방향 변형을 나타낸 것이다. 블랭크 홀더와 마찬가지로 펀치 앞부분에서 비교적 큰 변형이 나타났고 디스턴스 블록 및 보텀 블록에서 응력이 집중되어 있음을 알 수 있다.

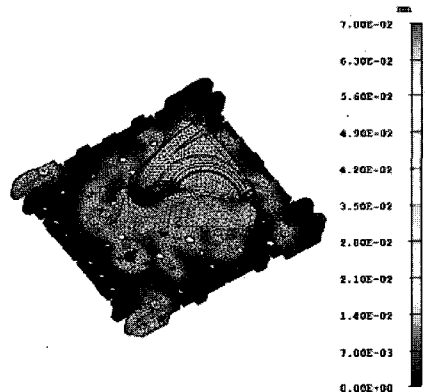
### 3. 성형해석

#### 3.1 변형 금형 기초 성형해석 절차

Fig. 7은 변형 금형 기초 성형해석의 절차를 나타낸 것이다. 금형 구조해석을 위하여 현단계의 금형형상으로 초기 성형해석을 수행하고 얻은 블



(a) Effective Stress



(b) Deformation

Fig. 6 Stress and deformation of punch

랭크 두께 정보로부터 블랭크 요소 대신에 gap 요소를 생성한다. 그리고 프레스/금형 연동 구조해석에서 생성된 변형 다이페이스의 형상은 성형해석에서 금형데이터로 사용된다. 변형된 다이페이스의 형상으로 재 성형해석하여 얻은 드로우인, 변형률 및 스프링백 등을 바로 직전 iteration의 금형형상으로 해석한 결과와 비교하여 전 iteration의 성형해석 결과와 현 iteration의 해석 결과가 일치하면 현단계의 변형 금형 기초 성형해석은 완료되고, 그렇지 않으면 성형해석과 구조해석이 양립할 때까지 해석은 반복된다

#### 3.2 모델링

성형해석은 초기 블랭크의 처짐현상을 구현하기 위해 중력 처짐해석을 수행하고, 블랭크 홀더와 다이에 의해 판재가 바인딩 되는 홀딩해석을 수행한 후, 최종성형해석을 수행하였다. 상형다이, 펀치 및 블랭크 홀더는 1차 삼각형 쉘 요소를 사

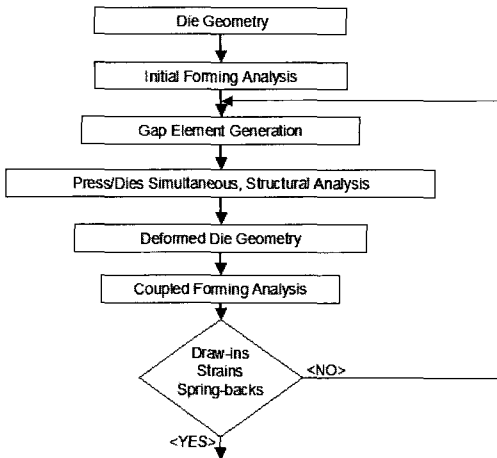


Fig. 7 Forming analysis flow considering die deformation

Table 3 F.E. model and boundary condition for forming analysis

	Finite Element Model		B.C.
Upper Die	3-node	5676	x,y:Fix, z:free
Blank Holder	shell	1226	x,y:Fix, z:free
Punch	element	4897	All Fix
Blank Sheet	4-node sell element	Min. Elem. 2x2mm	All Free
B. H. F	75 ton		
Punch Speed	5 m/s		
Holding Speed	2 m/s		

용하였으며 블랭크는 1 차 사각형 셀 요소를 사용하였다. Table 3 에 성형해석을 위한 유한요소 모델, 각 금형의 경계조건 및 하중 조건을 요약하여 나타내었다.

초기 성형 공정은 상형다이와 펀치의 접촉이 적어 금형 변형이 나타나지 않기 때문에 본 연구에서는 성형 공정이 90% 진행됐을 때 즉, 상형다이가 펀치와 블랭크 홀더 전면적에 하중을 전달하기 시작할 때, 금형의 변형이 일어나기 시작한다고 가정하였다. 강제 금형 해석은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 강제인 상형 다이와 펀치, 블랭크 홀더를 사용하여 전 성형공정을 해석하였고, 변형 금형 해석은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 구조해석에서 변형되지 않은 강제 금형으로 드로우 성형공정의 90%를 진행하고 나머지 10%의 성형공정 해석은 구조해석에 의해 변형된 다이, 펀치, 블랭크 홀더를 90% 까지 성형이 진행된 블랭크에 적용하여 수행되었다.

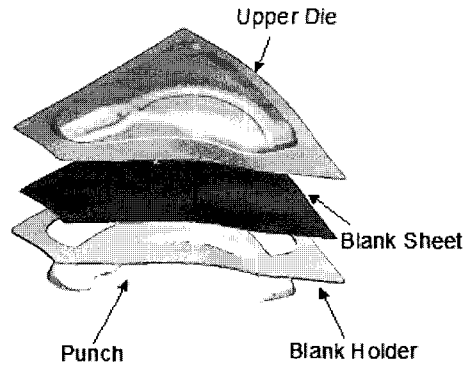


Fig. 8 Layout of draw dies for forming analysis based on rigid tools

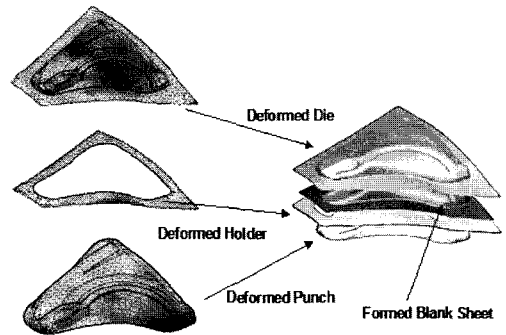


Fig. 9 Layout of draw dies for forming analysis based on deformed tools

### 3.3 해석 결과

#### 3.3.1 드로우인

Fig. 10 은 강제 금형의 해석 결과와 변형 금형의 유입량의 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 변형 금형과 강제금형은 금형의 탄성변형에 의한 간극의 차이로 최대 10mm 의 유입량 차이가 발생됨을 알 수 있었고 실제 금형과 패널을 tryout 하여 측정된 유입량 결과와 비교하여 볼 때 탄성 변형된 변형 금형이 실측치에 더 가까움을 알 수 있었다. Fig. 11 은 Fig 10 의 12 곳의 측정 위치에 따른 유입량의 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 변형 금형의 해석 결과가 강제 금형보다 실측치와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### 3.3.2 스프링백

Fig. 12 과 Fig. 13 은 강제 금형과 변형 금형과의 성형해석 결과를 바탕으로 스프링백 해석을 수행하여 수직 방향의 스프링백의 분포를 나타낸 것

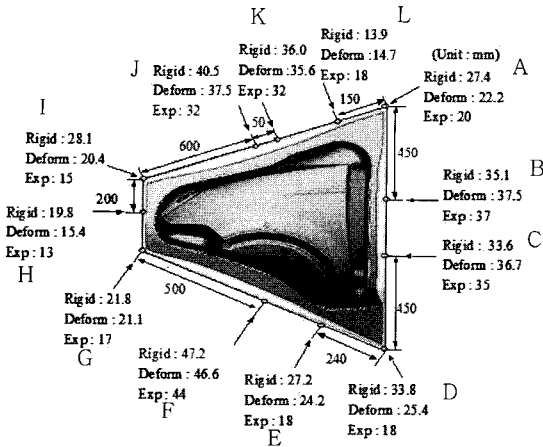


Fig.10 Comparison of Draw-ins Between Rigid and Deformed Tool Analyses

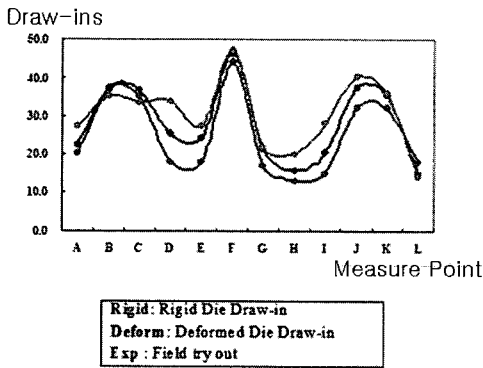


Fig.11 Comparison of draw-ins between rigid and deformed tool analyses

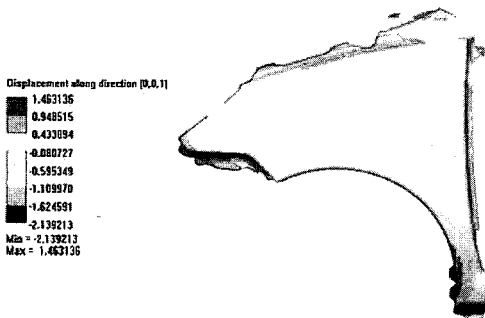


Fig.12 Springback obtained from rigid tool analysis

이다. 스프링백이 크게 발생한 부분을 대상으로 관찰하여 볼 때 변형 금형을 사용한 성형해석의 결과는 강제 금형을 사용한 성형해석의 결과보다

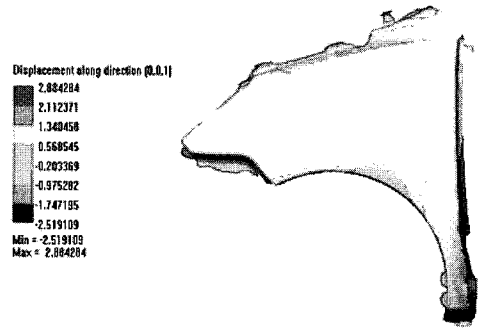


Fig.13 Springback distribution obtained from deformed tool analysis

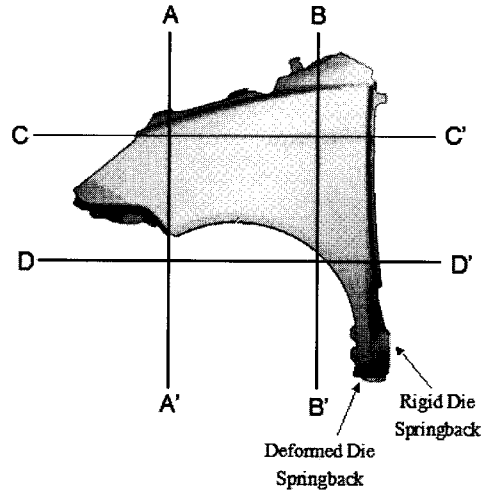


Fig.14 Sections to compare spring-back between rigid and deformed tool analyses

스프링백이 대부분 큰 분포를 나타내고 있다. 이것은 변형된 금형을 사용하여 성형해석한 패널의 두께 분포 및 변형량 및 유입량의 차이로 인하여 스프링백 결과도 많은 차이가 있음을 나타내는 것이다.

Fig. 14 는 강제 금형과 변형금형 해석 결과의 스프링백을 비교하기 위해 선정한 펜더 단면선을 나타내고 있다. Fig. 15 는 Fig. 14 에서 보여준 단면들의 스프링백 해석 결과이며, 부분적으로 차이는 있지만 전체적으로 변형금형 해석 결과가 강제 금형 해석결과 보다 스프링백이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

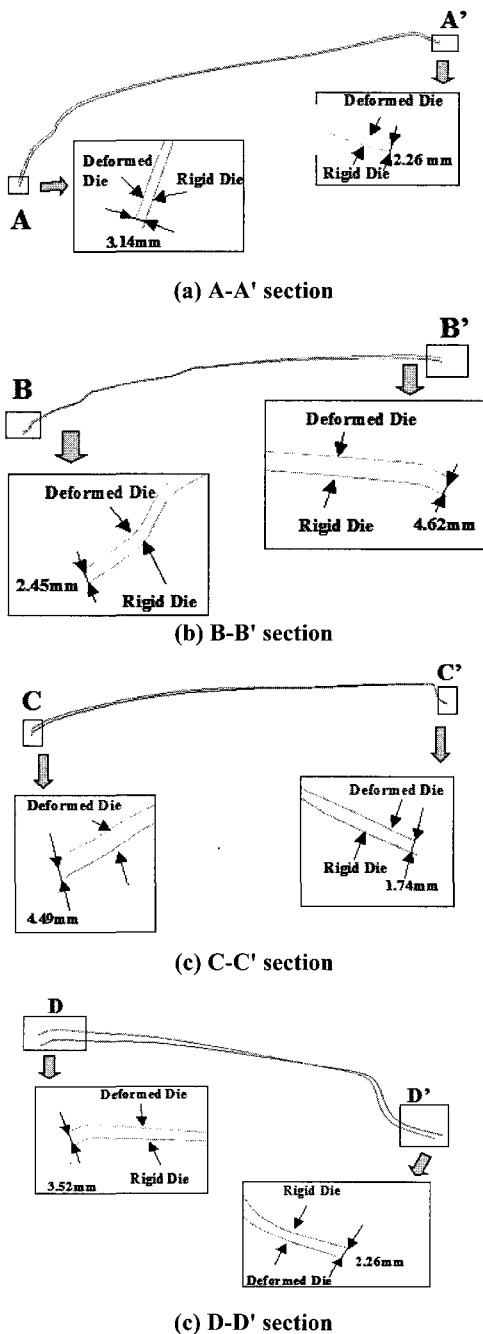


Fig.15 Comparison of spring-backs in 4 sections shown in Fig 14 between rigid and deformed tool analyses

#### 4. 결 론

구조해석과 성형해석을 연계하여 금형의 변형

을 고려한 자동차용 펜더패널의 성형 및 스프링백 해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 프레스와 금형의 연동 구조 해석으로 금형의 각 파트별 응력 및 변형 분포를 얻었다.

(2) 구조해석으로 얻은 변형 금형 도형을 성형해석에 도입하고 드로우 패널의 변형을 및 유입량의 고정도 성형 및 스프링백 해석을 수행하였다. 강제 금형보다 실측치에 가까운 결과를 나타내었다.

(3) 변형 금형을 사용한 해석에서 강제 금형 해석보다 스프링백이 크게 발생하였다.

#### 후 기

본 연구는 GM Daewoo Auto & Technology Co.의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 지원해 주신 박진수 상무님, 최오영 부장님, 송명환 차장님, 황의정 차장님, 권성오 차장님께 깊은 감사를 드리고, 기술적 토론과 협력을 아끼지 않으신 이인규 대리님, 안병찬 대리님, 안인혁 대리님께도 감사를 드립니다. 또한, 본 연구에 이르기까지 많은 조언을 해 주신 PF Tech Co. 이승열 박사님과 CE&T Co. 이종문 사장님께도 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. Becchio, A Chiara, R. Fileccia, M. Mastrocola, 1998, Use of FEM in the drawing die structure design, SAE paper 982274, pp. 35~39.
- [2] B. Singh, G. Davis, P. Haigh, 1996, Applications of casting design and manufacturing technologies to reduce body tooling cost and lead time, IBEC'96 Body Assembly & Manufacturing, pp. 1~5.
- [3] M. Farielo, G. Belingardi, 1997, Considerations on the role of the actual blank holder in the generation of the restraining force, SAE paper 970988, pp. 262~267
- [4] 인정제, 신용승, 김현영, 2001, 차체용 드로우 다이의 블랭크 홀더 굽힘 변형 해석, 한국공작기계학회논문집 제 10 권 제 3 호, pp. 68~74.
- [5] 서대윤, 이민철, 전만수, 1998, 보강링에 의하여 예압된 냉간단조금형구조의 탄성유한요소 해석, 한국소성가공학회지 제 7 권 제 4 호, pp. 347~353.

- [6] 송민재, 김영탁, 이종문, 이인규, 송명환, 박진수, 2004, 자동차 펜더 패널 복동 프레스 금형 구조해석, 한국자동차공학회 2004 년 추계학술대회 논문집, pp. 1153~1158.
- [7] 박용국, 1998, 프런트 도어의 드로잉 공정해석과 프레스 금형 제작공정에 관한 연구, 한국소성가공학회지 제 7 권 제 6 호, pp. 586~ 592.
- [8] 정기욱, 이종문, 김영탁, 이승열, 안인혁, 황의정, 박진수, 2004, 자동차 패널 전 스탬핑 공정의 시뮬레이션과 현장 트라이아웃, 한국소성가공학회 2004 년도 추계학술대회 논문집, pp. 164~167.