

## 자동차 멤버 부품의 다공정 성형해석

박춘달<sup>1</sup>, 김병민<sup>1</sup>, 정완진<sup>#</sup>

### Multi Stage Simulations for Autobody Member Part

C. D. Park, B. M. Kim, W. J. Chung

(Received September 23, 2005)

#### Abstract

Most of automobile member parts experience severe springback problems because of their complicated shape and high yielding strength. Now it becomes imperative to develop an effective method to resolve these problems. However, there remain several obstacles to get accurate estimation of dimensional shape. Especially the effective algorithms to simulate sheet metal forming processes including drawing, trimming, flanging and springback is demanded for the multi stage simulation of automobile member parts. In this study, for the purpose of accurate springback calculation, a simulation program which is robust in springback analysis is developed. Favorable enhancement in computation time for springback analysis by using latest equation solving technique and robust solution convergence by continuation method are achieved with the program. In analysis, the multi processes of rear side member are simulated to verify the system. For the evaluation of springback accuracy practically, all conditions including boundary conditions for springback analysis and inspection conditions for dimensional accuracy are applied. The springback results of simulations show good agreement with the experiments.

**Key Words** : Multi-Stage Forming, Rear Side Member, Springback Simulation, High Strength Steel, Finite Element Analysis, Compensation.

#### 1. 서 론

지금의 자동차 산업환경은 배기가스의 감소 및 연비향상을 위한 경량화를 강력히 요구하고 있다. 이러한 경량화를 달성하면서 또한 충돌안정성을 만족시키는 저중량-고강성 차체의 개발은 기존에 사용해 왔던 제작 공법과 소재를 사용하여서는 대응하기 어렵기 때문에 보다 혁신적인 방법의 도입을 요구하고 있다.

자동차를 경량화하기 위한 방법은 크게 신공법적인 측면과 경량 소재적인 측면으로 크게 나눌 수 있는데, 하이드로포밍(hydroforming), 용접

블랭크(TWB), 레이저 용접 등의 신공법과 관련된 기술은 그 적용과정에서 시간과 비용이 많이 소요되지만, 알루미늄강판·주물, 고장력강판, 플라스틱 및 복합수지 등의 신소재를 이용하는 방법은 기존의 소재를 대체하여 소기의 목적을 달성함으로써 적용이 훨씬 용이하다. 최근에는 고장력강판의 개발 및 적용기술이 활발히 연구되고 있고, 금형제작 및 유지보수 기술도 향상되어 차체 부품에 고장력강판을 적용하는 사례가 급속히 증가하고 있다. 그러나 고장력강판은 일반강판에 비해 소재의 항복강도가 높기 때문에 스프링백(springback)이 과다하게 발생하여 금형제작의

1. 부산대학교 정밀기계공학과  
# 교신저자 : 서울산업대학교 금형설계학과  
E-mail : wjchung@snut.ac.kr

큰 문제점으로 작용한다. 특히, 차체구조를 형성하는 멤버 파트는 주로 U 자형의 단순한 형상이 대부분이므로 스프링백 현상이 더욱 두드러진다. 따라서, 고장력강판을 성형하기 위한 금형 제작에 있어서는 사전에 스프링백 거동을 예측하고 그 결과를 금형설계에 반영함으로써 금형제작시의 치수불량을 최소화해야 한다.

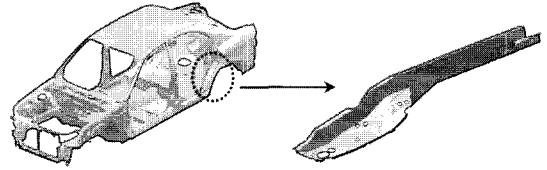


Fig. 1 The position of rear side member on the BIW

지금까지 대부분의 스프링백 해석은 동적 외연적 유한요소법(dynamic explicit FEM)에 의해 성형공정에서 발생하는 변형률과 응력을 해석하고, 정적 내연적 유한요소법(static implicit FEM)으로 스프링백 해석을 수행하였다. Mattiasson[1] 등은 수치해석적 변수가 스프링백 해석에 미치는 영향도를 분석하였다. 그리고 Chung[2] 등은 동적 효과가 스프링백 해석에 미치는 영향 등을 연구하였고, Lee[3] 등은 동적 유한요소법을 이용한 박판성형해석에서 수치해석적 인자가 스프링백에 미치는 영향도를 분석하였다. NUMISHEET 벤치마킹[4~5]에서 제안된 모델을 통하여 스프링백 현상에 대한 많은 연구가 이루어졌으며 그 효과도 입증되었다. Lee[6] 등은 자동차 멤버 판별에 대한 스프링백 해석을 수행하고 성형해석에 의한 스프링백 예측이 실제금형에 적용될 수 있음을 제시하였다.

링백 평가는 양산 부품 평가 방법인 갭(gap)과 플러쉬(flush)를 이용하여 평가하였다.

## 2. 해석 이론

본 프로그램에서 사용된 쉘요소(shell element)는 Zhu 와 Zacharia[9] 등에 의해 제안된 6 자유도 요소이며 기본적으로 Belytschko[10]등이 제시한 유사한 수식에서 발전한 쉘요소이다. 이 요소는 1 점 적분을 유지하면서도 면내 굽힘등의 변형특성을 크게 향상시켜 스프링백 해석에 적합하며, 동일한 적분점을 가지는 요소를 사용함으로써 성형해석과 스프링백 해석이 반복될 경우 오차를 최소화하면서 다공정 성형해석을 수행할 수 있는 잇점이 있다[11].

그러나 지금까지 대부분의 연구가 단일 성형공정에 대한 스프링백 거동만을 연구 하였고, 실제 다공정 성형(multi-stage forming)으로 제작되는 자동차 부품의 스프링백 거동에 대한 체계적인 연구는 제시되지 못하였다.

초기 잔류응력은 외력의 크기를 결정한다. 본 연구에서는 대변형 해석의 해의 수렴성을 고려하여 아래의 식을 적용하였다.

$$\mathbf{f}_\alpha^{ext} = (1-\alpha)\mathbf{T}^T \int_{\hat{\mathbf{B}}} \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{residual} d\Omega \quad (1)$$

따라서 본 연구에서는 다공정 성형해석을 위한 강건한 스프링백 해석 시스템 구현을 위하여, 박판 성형해석 전용 프로그램인 Z-STAMP[7]의 스프링백 모듈을 개발하였고, 이를 이용하여 스프링백 불량이 과다하게 발생하는 멤버 모델에 대해 적용하였다. 강건한 스프링백 해석을 위해 다중프론트 해석방법 (multi-frontal solving algorithm)과 불안정 스프링백 거동을 해결하기 위한 연속화기법 (continuation method)를 제안하였다[8].

여기서,  $\mathbf{f}_\alpha^{ext}$ ,  $\mathbf{T}$  그리고  $\hat{\mathbf{B}}$  는 각각 외력항, 변형률-변위 관계행렬, 좌표계 변환행렬이다. 또  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}_{residual}$  는 잔류응력,  $\alpha$  는 하중적용계수를 나타낸다.  $\alpha$  는 해의 수렴성에 따라 적절히 증가시켜나가게 되는데 0 에서부터 1 까지의 값을 적용하며, 1 이 적용되면 잔류응력이 완전히 적용된다.

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타난, 자동차 차체 부품중 BIW (Body In White)의 골조역할을 하는 리어 사이드멤버(rear side member)에 대해 다공정 해석을 수행하고, 공정별 성형문제 및 스프링백 보정량을 금형 제작에 적용하였다. 스프링백의 정확한 평가를 위해 양산 부품 측정시의 경계조건과 동일한 조건으로 스프링백 해석을 수행하였고, 스프

### 2.1 다중프론트 해석방법

다중프론트 기법(multifrontal method)는 Duff[12] 등에 의해 처음으로 소개되었으며, Irons[13]의 프론트 기법(frontal method)를 일반화한 개념으로 편리성과 경제성 등의 잇점에 의해 사용이 늘어나고 있다.

프론트 기법은 먼저 요소강성행렬(element stiffness matrices)와 절점력 벡터(nodal force vector)를 조합한 후, 요소 단위로 가우스 소거법(gaussian elimination)

또는 축차법(backsubstitution process)를 이용하여 미지수인 변위를 구하는 특수한 계산법이다. 이 방법은 강성 매트릭스와 절점력 벡터에 대해 전체 조합행렬을 사용하지 않기 때문에 컴퓨터 메모리 사용을 최소화할 수 있다.

유한요소 해석 과정에서 다중프론트 기법에 의한 소거과정을 보면, 먼저 주어진 영역(domain)이 두 개의 부영역(subdomain)으로 나누어지고 각각의 부영역은 프론트를 가지며, 이러한 영역 분할이 반복적으로 이루어진다. 반복적인 영역분할이 끝나면 각 부영역의 내부자유도(internal D.O.F.)가 프론트 기법에 의해 먼저 제거된다. 내부자유도가 모두 제거되면 각 부영역의 경계자유도(interface D.O.F.)가 새로운 프론트가 되고, 반복적으로 서로 합병이 이루어진다. 이러한 합병의 과정에서 완전히 조합된 자유도는 즉시 제거된다.

### 2.2 연속화 기법

불안정성이 발생하면 선형화된 유한요소 방정식의 강성행렬은 한계점(limit point)에서 특이점(singularity)이 발생하여 Newton-Raphson 방법에 의한 해를 얻을 수 없다. 박판재가 성형후 급형으로부터 취출 되었을때 주름이 발생할 수 있으므로 이러한 현상을 스프링백 해석시 고려할 수 있어야 한다. Riks[14]등이 제안한 호-길이 방법(arc-length method)을 적용하여 특이점을 지나 해석을 계속할 수 있으며 이 때 평형방정식은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$g(\mathbf{P}, \lambda) = \mathbf{q}_i(\mathbf{p}) - \lambda \mathbf{q}_{ref} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{q}_i$  는 변위  $\mathbf{p}$  의 함수인 내력,  $\mathbf{q}_{ref}$  는 외력 벡터, 그리고 스칼라  $\lambda$  는 하중계수이다. 이를 증분식으로 다시 표현하면 아래와 같다.

$$(\Delta \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{p} + \Delta \lambda^2 \psi^2 \mathbf{q}_{ref}^T \mathbf{q}_{ref}) - \Delta \lambda^2 = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\Delta$  는 증분량을 나타낸다. 하중과 변위의 비를 나타내는 파라미터  $\psi$  를 정의하는 방법에 따라 호-길이 방법은 여러 가지로 변형될 수 있으며 본 연구에서는 일반화 변위법(generalized displacement method)을 적용하였다.

## 3. 리어 사이드 멤버의 다공정 해석

### 3.1 리어 사이드 멤버의 성형결함

차체를 구성하는 판넬 중 차량 중량을 지탱하고 BIW의 골조 역할을 하는 멤버류(member) 판넬은 대체로 긴 채널형이고 끝단이 열린 단면을 가지고 있어 강성이 약하므로 스프링백이 많이 발생한다. 그 중에서 가장 사이즈가 큰 리어 사이드 멤버는 Fig. 1에서와 같이 뒷좌석 아래쪽부터 트렁크까지를 연결하여 차량의 뒤쪽 무게를 지탱하고 후방충돌시의 승객보호를 위해 설계된 부품으로서 길이가 약 1000mm 이상이고 뒷바퀴와의 간섭을 피하기 위해 3차원으로 굽은 형상을 가져 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 벽젓힘(springback, go), 벽힘(recoil), 비틀림(twist) 등의 대표적인 스프링백 불량이 과도하게 발생한다. 따라서, 치수정도 확보를 위한 제작기간과 공수가 많이 소요된다. 대표적인 스프링백 발생 메커니즘에 대해 Fig. 3~Fig. 5에 도시하였다.

### 3.2 리어 사이드 멤버의 성형해석

리어 사이드 멤버 부품의 성형 공정은 부품의 전체적인 형상을 성형하기 위한 드로잉 공정(drawing operation), 불필요 부분의 절단을 위한 트

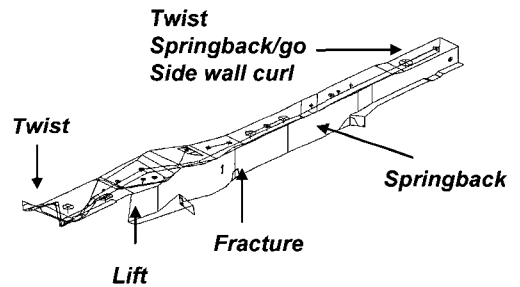


Fig. 2 The representative defects of rear side member

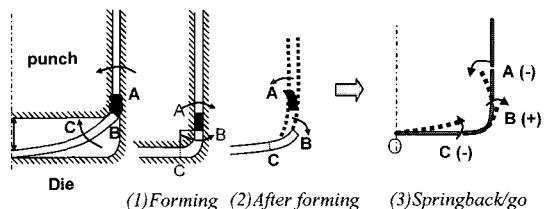


Fig. 3 Mechanism of springback/go

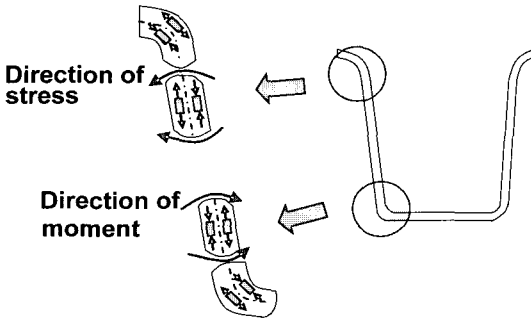


Fig. 4 Mechanism of side wall curl

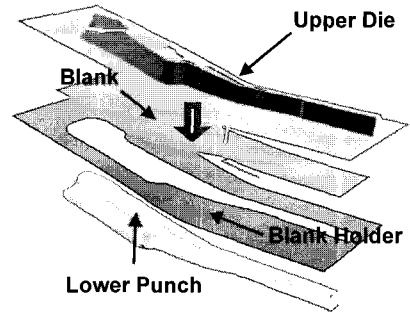


Fig. 7 Modeling of tools for drawing operation

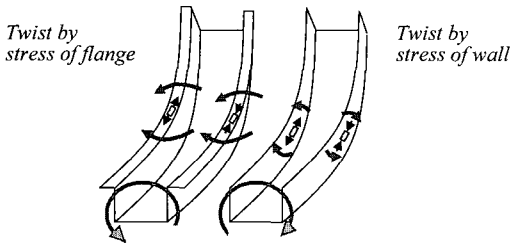


Fig. 5 Mechanism of twist

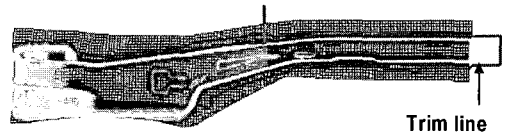


Fig. 8 Modeling of trim line for trimming operation

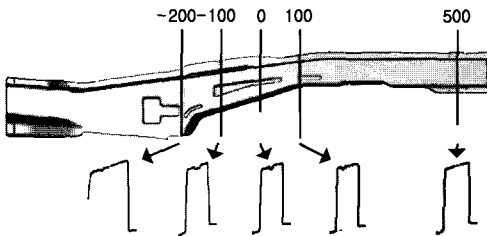


Fig. 6 Shapes of the rear side member panel and important sections

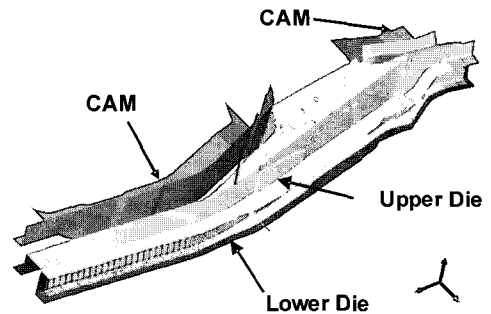


Fig. 9 Modeling of tools for flanging operation

리밍 공정(trimming operation) 그리고 타 부품과의 조립 등을 위한 플랜지 공정(flanging operation)으로 구성된다. Fig. 6은 리어 사이드 멤버의 형상과 주요 단면을 나타내고 있다. 드로잉 공정의 성형 해석을 위한 금형과 소재 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 드로잉 공정에서 나타나는 성형불량은 주로 파단(fracture), 주름(wrinkling) 그리고 선밀림(slip line)등이 대표적이다.

드로잉 공정 후, 플랜지 공정에서 성형될 부분의 실장 길이를 전개하여 만든 트림라인(Fig. 8)을 이용하여 성형된 판넬을 트리밍 한다. 그런 다음

Fig. 9에 나타난 바와 같이 플랜지 공정을 수행하여 제품 성형을 마무리 하게 된다. 최종 공정인 플랜지 공정에서는 스프링백 발생과 플랜지 부분의 국부적 파단 및 주름이 발생하게 된다. 본 연구에서는 플랜지 성형이 완료된후 부품의 탄성 회복량을 예측하였다. 스프링백 결과의 분석을 통하여 금형의 보정값을 결정할 수 있었으며 이를 금형 설계에 적용하였다. 다공정 성형해석을 위한 유한요소 모델링 조건을 Table 1에 나타내었다. 그리고 본 연구에 사용된 소재 물성치를 Table 2에 나타내었다.

**Table 1 Modeling conditions for simulations**

Classification	Blank Size(mm) (Number of element)		Forming Velocity (m/s)
	Initial Step	Last Step	
Forming Analysis	8 (6,608)	2 (69,401)	10
Springback Analysis	1	1	2

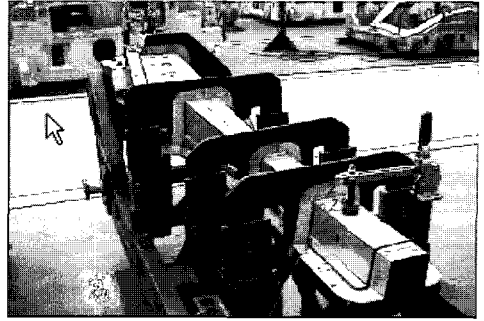
**Table 2 Mechanical properties of SPRC 340**

Item	Value
Yield strength (MPa)	280
Tensile strength(MPa)	337
Elongation (%)	35
Hardening exponent, $n$	0.16
Plastic strain ratio, $r$	1.54
Friction coefficient, $\mu$	0.15

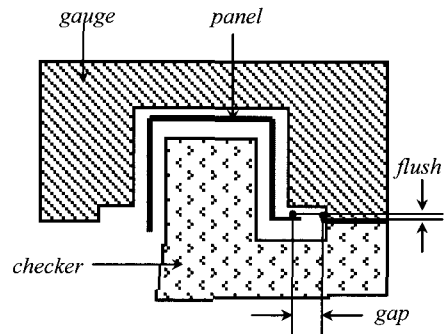
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 치수정밀도 측정

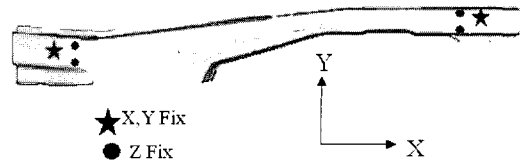
프레스 성형에 의한 자동차부품 제작의 치수정도 평가는 각 부품마다의 전용 체커(checker)를 사용하여 측정후 미리 결정된 허용공차와의 만족여부에 의해 평가된다. 리어 사이드 멤버의 치수정도를 측정하기 위한 체커를 Fig. 10에 나타내었다. 통상적으로 체커는 수지를 이용하여 제작하는데 그 이유는 수지는 일단 형상을 갖추고 굳힌 이후에는 거의 변형이 발생하지 않고, 가공도 용이하여 제작중 모델변경에 대한 대응성등이 뛰어나기 때문이다. 체커를 사용하여 측정하고 관리하는 치수정도 평가항목은 갭(gap)과 플러쉬(flush) 두 종류이며, 차체조립 공정에서 로봇을 이용한 스팟(spot) 용접시 정확한 용접위치와 용접강도를 확보하기 위해 각각의 부품이 최소한 만족시켜야 할 관리공차에 이용된다. 갭과 플러쉬의 도식적인 정의를 Fig. 11에 나타내었다. 갭은 다공정을 거쳐 제작된 프레스 부품의 경계가 설계도면에서 관리하는 허용 공차를 만족하는가를 평가하는 것이고 플러쉬란 완성 부품 경계의 높이가 설계도면에서 관리하는 허용 공차를 만족하는가를 평가하는 값이다. 이러한 갭과 플러쉬는 대량생산을 위한 자동차 조립 공정에 있어 자동화에 의한 작업효율성을 향상시키고, 용접점에서의 정확한 용접에 의해 차체 강성 유지를 반드시 만족해야할 사항이



**Fig.10 Checker for measuring gap and flush of rear side member panel**



**Fig.11 Definitions of gap and flush on the checker**



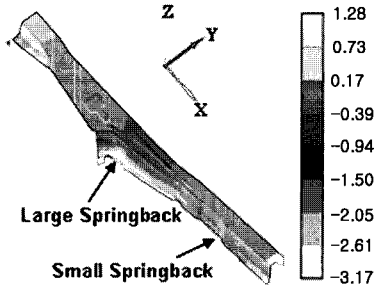
**Fig.12 Boundary conditions for springback analysis**

다. 따라서, 프레스 금형을 제작할때 가장 중요한 품질 평가 항목중 하나이다.

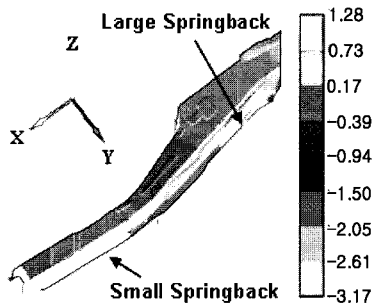
본 연구에서는 스프링백 해석을 이용하여 플랜지 공정후의 변형량을 구하고 이를 금형제작에 반영하였으며, 완성 판넬에서의 갭과 플러쉬를 측정하여 두 결과를 비교 평가하였다

##### 4.2 성형해석 결과

스프링백 해석에 있어 강제 운동을 제어하기 위한 경계조건(boundary conditions)은 해석결과에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 실제판넬의 갭과 플러쉬를 측정하는 체커상의 경계조건을 그대로 이용하여 스프링백 해석 경계조건으로 설정하



(a) -Y direction (+: spring go, -: spring back)



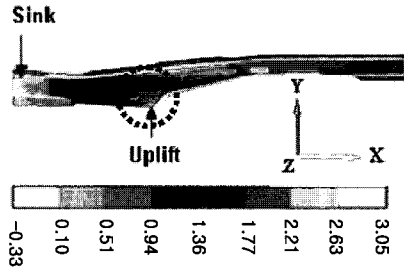
(b) +Y direction (+: spring back, -: spring go)

Fig.13 Springback displacement in Y direction

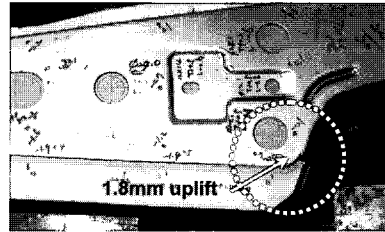
였다. 체커의 고정 조건을 반영한 스프링백 해석의 경계조건을 Fig. 12에 나타내었다.

리어 사이드 멤버의 드로잉 공정, 트리밍 공정 및 플랜지 공정의 성형해석 및 스프링백 해석을 수행한 후 그 결과를 Fig. 13, 14에 나타내었다. 벽젓힘의 변형은 Y축의 변위로 관찰할 수 있으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 단면의 중심을 기준으로 Y축 변위가 양쪽에 반대로 나타나므로 Fig. 13(a)에서 Y변위가 (-) 값이면 스프링백을 나타내고 반대로 (+) 값이면 스프링 고를 나타낸다. Fig. 13(b)에 대해서는 Y변위가 (-) 값이면 스프링 고를 나타내고 반대로 (+) 값이면 스프링백을 나타낸다. 성형해석 결과로부터 플랜지 성형 후 완성 부품에서는 대체로 스프링백이 많이 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 리어 사이드 멤버의 성형시 나타나는 일반적인 변형 양상과 잘 일치한다.

리어 사이드 멤버의 플랜지 성형해석 결과로부터 Z축 변위를 Fig. 14에 나타내었다. 이 그림은 판넬 상단면의 꺼짐 및 들림에 의한 변형을 표현하며, 실 판넬 과도 잘 일치한다.

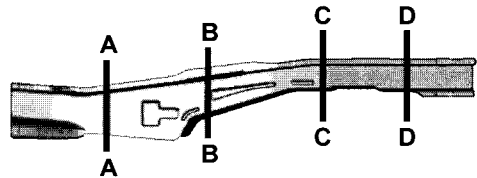


(a) Springback in Z direction from FE-simulation

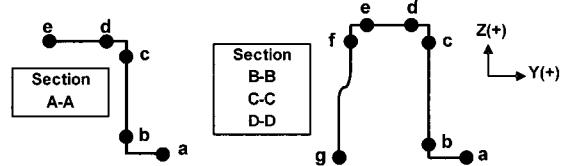


(b) Springback in Z direction from experiment

Fig.14 Comparison results of the springback in Z direction



(a) Sections for measurement in panel



(b) Points for measurement in each sections

Fig.15 Evaluation of springback simulation accuracy with experimental panel

스프링백 해석 결과를 통하여 리어 사이드 멤버의 스프링백 보정량(compensation value)을 결정하고 실제 금형 제작에 적용하였다. 보정량의 결정방법은 기존의 경험적 보정치와 해석적 보정치를 함께 고려하여 최종 보정치를 결정하였다. 보정치는 허용공차를 넘어선 수치만큼을 역으로 적용하기 위한 역보정 값으로 정하였다. 경험치와

해석치를 바탕으로 결정된 스프링백 보정량의 정도를 검증하기 위해 체커 위에 주요 단면을 결정하고 게이지를 설치하였다. 각 게이지 위치에 대한 스프링백 해석결과와 실험판 측정결과를 비교 분석하였다. 게이지의 위치와 각 단면에서의 측정 위치를 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 15 에서 게이지 A가 위치하는 곳의 단면은 한쪽이 열려있는 형태를 하고 있으며, 나머지 3개의 게이지 단면은 같은 형상을 하고 있어서 측정의 조건은 크게 2 가지이다. 측정부위를 나타내는 ㉑㉒㉓㉔에 대해서는 Y 축 변위량을, 플랜지부위 및 상단면부위를 나타내는 ㉕㉖㉗는 Z 축 변위를 측정하였다. 성형해석에 의한 스프링백 해석의 정도 평가를 위해 각 게이지에 의해 측정된 실험 판별의 거리를 기준으로 정하고, 허용공차를 고려한 성형해석 결과가 허용 공차를 만족하게 되는 경우를 OK, 만족하지 못한 경우를 NG 라고 정의하였다. 그 결과를 요약하면 Table 3 과 같다.

Table 3 의 결과로부터 26 개의 측정점 중에서 7 개의 예측불량이 발생하였다. 프레스 성형에 의한 양산 부품의 스프링백 해석 정밀도는 대략 73%의 해석신뢰도를 가진다고 말할 수 있다. 따라서 스프링백 해석 정밀도를 양산 판별 적용 조건에 따

라 정량적으로 평가해본 결과 다소 오차는 있지만, 모델의 복잡함이나 다공정 해석의 난해함을 감안해볼 때 좋은 결과라고 판단된다. 이러한 오차의 발생은 해석 시간의 한계에 따른 요소 크기의 제한, 플랜지 성형 시 플랜지부 구속조건의 부족 그리고 양산 금형을 대상으로함에 따른 성형 해석 조건과 양산금형 조건의 불일치 등이 그 원인이라고 사려된다. 그러나, 최근 더욱 고강력화가 추진되고 있는 금형 산업의 입장에서보면 하루속히 보다 고정도의 스프링백 해석 기술이 정착되어야 한다고 생각한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 다공정 성형의 효율적인 스프링백 해석 시스템의 구현을 위하여, 자동차 차체 부품 BIW의 골조 역할을 하는 리어 사이드 멤버에 대해 다공정 해석을 수행하였고 그 결과를 공정별 성형 문제 및 스프링백 보정량으로, 실제 금형 제작에 적용한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 박판 성형해석의 다중프론트 해석 방법의 적용 및 불안정 스프링백 거동을 해결하기 위한 연속화 기법은 대형 모델의 다공정 성형 및 스프링백 해석에 효과적임을 알 수 있었다.

(2) 스프링백 해석결과와 분석을 통하여 리어 사이드 멤버의 스프링백 보정량을 결정하였고 실제 금형 제작에 적용하였다. 그 결과 스프링백 해석 정밀도는 약 73%의 신뢰도를 나타냈고, 이 수치는 양산 금형에 대한 해석결과와 반영이 유효하다고 판단된다.

(3) 해석시간의 한계 및 형상조건의 불리함등의 이유로 양산 금형에서의 스프링백 정밀도는 만족스럽지는 않았으며 향후 이러한 문제점을 해결하기 위한 노력이 기대된다.

### 참 고 문 헌

[1] K. Mattiasson, P. Thilderkvist, A. Strange, A. Samuelsson, 1995, Simulation of Springback in Sheet Metal Forming, Proceedings of NUMIFORM'95, edited by S. Shen and P. R. Dawson, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 637~641.

[2] W. J. Chung, J. W. Cho, B. Belytscko, 1996, A Study on the Dynamic Effects of Dynamic Explicit FEM in Sheet Metal Forming Analysis, Proceedings of

**Table 3 Verification of springback simulation using experimental panel in multi-stage forming**

Sections	Point	Tolerance	Simulation Result	Remark
A-A	㉑	±0.7	+0.548	OK
	㉒	↑	+0.710	NG
	㉓	↑	-0.105	OK
	㉔	↑	+0.289	OK
	㉕	↑	+0.965	NG
B-B	㉖	±0.7	+0.406	OK
	㉗	↑	-0.614	OK
	㉘	↑	-0.516	OK
	㉙	↑	-0.117	OK
	㉚	↑	+1.427	NG
	㉛	1.0~0.5	+1.952	NG
	㉜	↑	+2.592	NG
C-C	㉝	±0.7	+0.455	OK
	㉞	↑	+0.098	OK
	㉟	↑	-0.016	OK
	㊱	↑	-0.128	OK
	㊲	↑	-0.209	OK
	㊳	1.0~0.5	+0.650	OK
	㊴	↑	+1.507	NG
D-D	㊵	±0.7	+0.674	OK
	㊶	↑	+0.107	OK
	㊷	↑	+0.190	OK
	㊸	↑	+0.010	OK
	㊹	↑	-0.065	OK
	㊺	1.0~0.5	+0.248	OK
	㊻	↑	+1.515	NG
Total	The number of NG/The number of measurement			7/26

- NUMISHEET'96, pp. 444~464.
- [3] S. W. Lee, 1997, Elastoplastic/Explicit Finite Element Formulation and Applications to Sheet Metal Working with Springback, Ph.D.Thesis, KAIST, Taejon, KOREA.
- [4] A. Makinouchi, E. Nakamachi, E. Onate, R. H. Wagoner, 1993, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference NUMISHEET'93, Isehara Japan.
- [5] J. K. Lee, G. L. Kinzel, R. H. Wagoner, 1996, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference NUMISHEET'96, Ohio State University, USA.
- [6] J. M. Lee, B. J. Ahn, Y. T. Keum, 1997, A Study on the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Forming Processes of an Automotive Panel, J. of KSTP, Vol.6, No.2, pp. 152~160.
- [7] Z-STAMP 매뉴얼.
- [8] W. Y. Yang, S. Y. Lee, Y. T. Keum, J. Y. Hwang, C. S. Yoon, C. S. Shin, W. S. Cho, 2003, Springback Control in the Forming Processes for High-strength Steel Sheets, J. of KSTP, Vol. 12, No. 8, pp. 718~723.
- [9] Zhu, T. Zacharia, 1996, A New One-Point Quadrature, Quadrilateral Shell Element with Drilling Degrees of Freedom, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 136, pp. 165~22.
- [10] T. Belytschko, C. Tsay, 1983, A Stabilization Procedure for the Quadrilateral Plate Element with One-Point Quadrature, Int. J. Numer. Methods Engs., 19, pp. 405~419.
- [11] W. J. Chung, A Finite Element Analysis of Springback in Sheet Metal Forming, KSME-A, 23, pp. 2197~2208.
- [12] I. S. Duff, J. K. Reid, 1973, The Multifrontal Solutions of Indefinite Sparse Symmetric Linear Equations, ACM Trans. Math. Software, 9, pp. 302~325.
- [13] B. M. Irons, 1970, A Frontal Solution Program for Finite Element Analysis, Int. J. Numer. Methods Engs., 2, pp. 5~32.
- [14] E. Riks, 1979, An Incremental Approach to the Solution of Snapping and Buckling Problems, Int. J. Solids and Structure, 5, pp. 529~559.