

## 등가 드로오비드를 적용한 Front Side Member 의 성형해석 및 충돌평가

송정한\* · 김기풍\* · 김승호\* · 허 훈\* · 김현섭\*\* · 홍석길\*\*

(2003년 5월 15일 접수)

### Forming Analysis of the Front Side Member using Equivalent Draw-bead for Crashworthiness Assessment

J. H. Song, K. P. Kim, S. H. Kim, H. Huh, H. S. Kim and S. G. Hong

#### Abstract

This paper is concerned with forming analysis of Front Side Members and effects of the forming analysis on crash analysis of an auto-body. For efficient forming analysis, equivalent draw-bead restraining forces are calculated with ABAQUS/Standard and then used as the boundary condition in forming simulation. In order to demonstrate the validity of the forming analysis, the thickness variation in the numerical simulation result is compared quantitatively with the one in the real product. Forming histories obtained from the forming analysis are utilized as the initial condition of the crash analysis for accurate assessment of the crashworthiness. Crashworthiness such as the load-carrying capacity, crash mode and the energy absorption is evaluated and investigated for the identification of forming effects.

**Key Words :** Front Side Member, Equivalent Draw-Bead, Forming Analysis, Crashworthiness

#### 1. 서 론

자동차 구조용 박판 부재들은 충돌 사고 시에 적절한 변형에 의하여 충돌에너지를 흡수하여 승객을 보호할 수 있도록 복잡한 형상으로 이루어져 있다. 이러한 역할을 하는 자동차 구조용 박판 부재들은 대부분 박판 성형 공정에 의하여 생산된다. 성형과정에서는 부재의 형상과 성형 조건에 따라 주름, 파단 등이 발생할 수 있고 변형이 집중되어 물성의 변화가 발생하고 두께 및 변형률 등의 분포가 불균일해진다. 성형과정에서 발생한 성형이력들은 박판부재의 충돌 특성에 영향을 주고, 성형효과를 고려하지 않은 부재의 충돌특성과

는 큰 차이를 보이게 된다. 그러나 기존의 많은 연구들은 부재의 성형 과정에서 발생하는 불균일한 두께 및 변형률 분포 등과 같은 부재의 성형이력을 고려하지 않고 부재의 설계단계에서 주어진 최종 형상만을 대상으로 충돌해석을 수행하여 왔다. 충돌 해석이 높은 신뢰성을 갖기 위해서는 정확한 박판성형 공정해석을 수행하여 성형이력을 확보하고 이를 충돌해석에 적용할 필요가 있다.<sup>(1-3)</sup>

본 논문에서는 차체 정면충돌 시 초기변형에 영향을 미치는 Front Side Member 의 성형해석을 통하여 성형이력을 계산하고 이를 충돌해석에 적용하였다. 정확한 성형이력의 계산을 위하여, 비

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 기아자동차 승용차체설계 3팀

1. 성형과정 후에 성형과정 시의 등가 구속력을 계산하고, 이를 부재의 성형해석에서 등가의 드로오비드 구속력으로 적용하였다. 계산된 성형해석 결과는 현품의 성형결과와 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 계산된 성형해석 결과는 Front Side Member 의 충돌해석에 적용하여 검토하였다. 성형효과를 고려하지 않은 부재의 충돌해석 결과와 변형형상, 충돌하중, 에너지 흡수량 등을 비교하여 성형효과가 충돌특성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. Front Side Member 의 성형해석

Front Side Member 는 Fig. 1 과 같이 7 개의 중요 부재로 구성되어 있으며, Table 1 에 재료와 두께를 명시하였다. 성형해석에서는 충돌특성에 직접적인 영향을 주는 4 개의 부재에 관하여 성형이력을 계산하였다. 우선, 성형해석을 수행하기 위하여 Front Side Member 의 각 부재의 성형에 부가되는 드로오비드의 구속력을 계산한 후, 계산된 구속력을 등가 드로오비드 구속력으로 부가하여 성형해석을 수행하였다. 드로오비드의 구속력은 정확한 계산을 위하여 내연적 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Standard 를 이용하였다. LS-DYNA3D 를 이용한 성형해석은 바인더랩 공정과 성형공정 2 단계로 나누어 해석을 수행하였다.

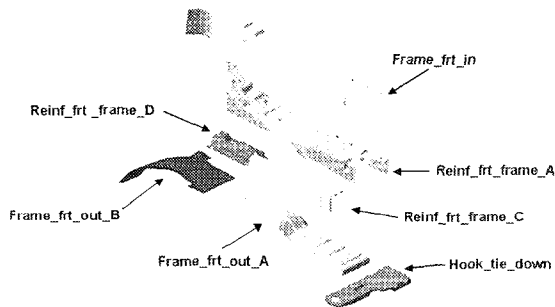


Fig. 1 Composition of panels in Front Side Member

### 2.1 드로오비드 성형해석 및 구속력 계산

드로오비드는 박판 성형공정 중 바인더랩 공정과 스탬핑 공정시에 판재의 유입량을 조절하기 위해 사용하고 있다. 이러한 드로오비드의 형상은 상대적으로 금형의 다른 부분들에 비해 그 크기가 매우 작기 때문에, 유한요소법을 이용한 성형해석에서는 일반적으로 모델링을 하지 않고 등가

의 구속력을 부가하는 등가 드로오비드라는 개념을 도입하여 바인더랩 공정 이후의 성형 공정에서 구속력으로 드로오비드를 대체한다.<sup>(4)</sup>

Triantafyllidis<sup>(5-6)</sup> 등은 마찰계수, 비드 형상, 물성치 등의 인자들이 영향을 미치는지 연구하였고, Cao 와 boyce<sup>(7)</sup> 는 드로오비드의 깊이에 따른 연구를 수행하였다. Choi 와 Huh<sup>(8)</sup> 는 판재의 길이에 따라 파라미터 연구를 수행하였으며, Park 과 Huh<sup>(9)</sup> 등은 원형비드의 형상 파라미터에 따른 구속력, 마찰계수 및 판재의 길이, 비드의 경사등에 따른 구속력 변화를 연구하고 이를 실제 성형 공정에서 등가의 경계조건을 부가하였다. 원형 비드 외에도 사다리꼴 비드와 사각형 비드에 대해서도 성형해석이 수행되었으며<sup>(10)</sup>, You<sup>(11)</sup> 등은 이동경화(Kinematic hardening)를 고려한 구속력을 계산하였다. 본 절에서는 Front Side Member 의 성형해석을 수행하기 위하여 각 부재의 성형해석에 적용할 드로오비드의 등가 구속력을 계산하였다.

Table 1 Materials and initial thickness of panels in the Front Side Member

Part	Material	Thickness (mm)
Frame_frft_in	SPRC40	1.6
Frame_frft_out_A	SPRC40	1.2
Frame_frft_out_B	SPRC40	1.2
Reinf_frft_frame_A	SAPH38	0.9
Reinf_frft_frame_C	SPRC45	2.0
Reinf_frft_frame_D	SPRC45	1.6
Hook_tie_down	SPRC45	2.0

드로오비드 성형 공정에 관한 탄소성 유한요소 해석을 수행하기 위하여 Fig. 2 에 도시된 부재의 금형 모델로부터 비드의 형상데이터를 추출하고 이를 바탕으로 드로오비드 펀치와 금형의 모델링을 수행하였다. 각 부재의 성형특성에 따라 각각 다른 크기와 형상의 드로오비드가 사용되었다. 본 논문에서는 보다 정확한 박판 성형공정의 해석을 위하여 바인더랩 공정과 인발공정을 모두 해석하여 등가 드로오비드의 구속력을 계산하였고, 등가 드로오비드를 이용한 경계조건을 Front Side Member 의 성형공정 해석에 적용하였다. 각 성형 부재에 사용된 원형 비드 및 사각 비드의 기본형상은 Fig. 3 과 같다. 각 부재의 성형에는 대부분 원

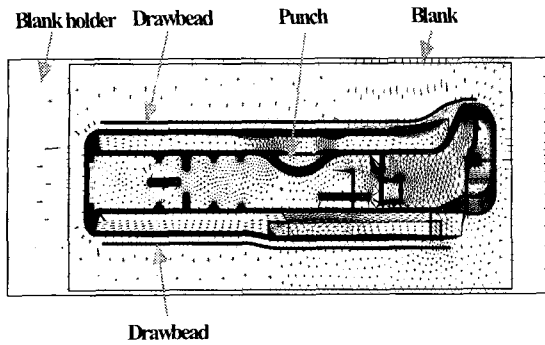


Fig. 2 Location of drawbeads in the sheet metal forming die for a frt\_frame\_in

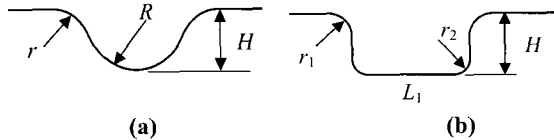


Fig. 3 Schematic shapes of drawbeads in the Front Side Member: (a) circular drawbead; (b) rectangular drawbead.

형 비드가 사용되고 있으며, reinf\_fit\_frame\_A 성형에서는 원형 비드와 함께 큰 구속력을 추가하는 사각 비드가 부분적으로 사용되고 있다. 각 부재별 원형 비드 및 사각 비드의 형상 치수는 Table 2 와 Table 3 에 정리하였다.

드로오비드 성형해석을 위한 판재의 유한요소 모델은 성형과정에서의 굽힘을 잘 묘사할 수 있도록 4 개의 층(Layer)으로 구성하였다. 판재의 길이는 500 mm 로 가정하였다. 부재와 금형사이의 마찰은 쿨롬 모델(Colomb friction model)을 사용하였으며, 마찰계수는 0.15 를 추가하였다. 해석에 사용한 각 판재의 물성을 Table 4 에 정리하였다.

박판성형 공정에서 드로오비드에 의한 금속의 유동량 조절은 드로오비드의 종합적인 구속력에 의하여 이루어진다. 이러한 드로오비드 구속력 계산을 위하여 본 논문에서는 비드 성형공정 시 변위 경계조건은 대칭선의 절점들을 축 방향에 대하여 구속하였으며, 인발 공정에서는 판재가 축 방향으로만 움직인다고 가정하고 대칭선의 절점들을 축 방향에 대해서만 변위 경계조건을 추가하였으며, 금형과 접촉된 절점들에 대해서는 마찰을 고려하여 드로오비드의 종합적인 구속력을 계산하였다. 판재의 인발량은 실제 성형공정을 고려하여 10mm 로 결정하였다.

Table 2 Geometric dimensions of circular shape drawbeads in the Front Side Member

Part	Drawbead	R	r	H
Frame_frt_in	Circular	4.8	6.2	3.0
Frame_frt_out_A	Circular	4.0	5.2	6.0
Reinf_frt_frame_A	Circular 1	4.5	3.8	3.2
	Circular 2	4.5	3.8	5.2
Reinf_frt_frame_C	Circular 1	6.5	4.7	3.0
	Circular 2	6.5	4.7	5.0
	Circular3	6.5	4.7	6.0

Table 3 Geometric dimensions of rectangular shape drawbead in the Front Side Member

Part	H	L	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>
Reinf_frt_frame_A	6.0	7.65	2.18	1.5

Table 4 Flow stress curve of material for forming analysis

Material	Flow stress curve
SPRC 40	$\bar{\sigma} = 734.7(0.01 + \bar{\epsilon})^{0.245}$ (MPa)
SAPH 38	$\bar{\sigma} = 768.5(0.023 + \bar{\epsilon})^{0.285}$ (MPa)
SPRC 45	$\bar{\sigma} = 823.8(0.012 + \bar{\epsilon})^{0.229}$ (MPa)

사용되는 원형 비드는 1.6mm 두께의 판재를 비드 펀치가 3mm 만큼 내려갈 때까지 해석을 수행하였으며, Fig. 4 에는 비드 행정 1mm 마다의 성형과정을 나타내었다. 원형 비드는 펀치 행정 초반에 비드 펀치가 내려오에 따라 펀치를 중심으로 양 옆의 블랭크가 들리다가 행정이 증가하면서 비드 펀치에 의하여 구속이 되고 있으며, 이러한 구속력으로 성형공정에서 판재의 유입을 조절한다. Fig. 5 에 비드 성형 후 인발 과정을 도시하였다.

비드 성형공정에서 reinf\_fit\_frame\_A 의 성형에서 사용되는 사각 비드는 0.9mm 두께의 판재를 비

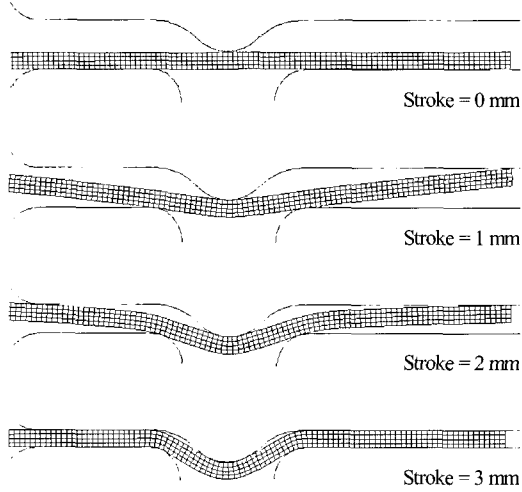


Fig. 4 Deformed shapes of the blank during the bead formation process of circular drawbead

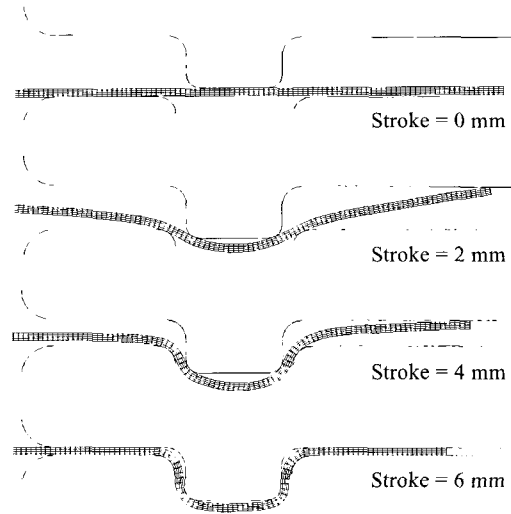


Fig. 6 Deformed shapes of the blank during the bead formation process of rectangular drawbead

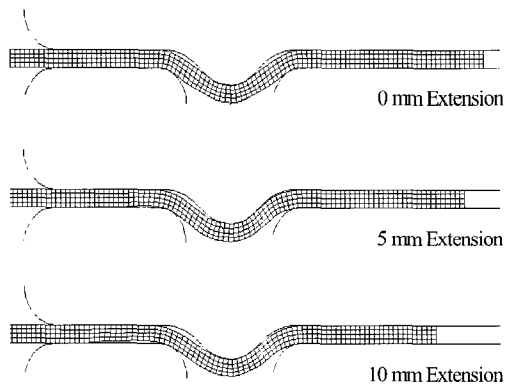


Fig. 5 Deformed shapes of the blank during the drawing process of circular drawbead in frame\_fr1\_in

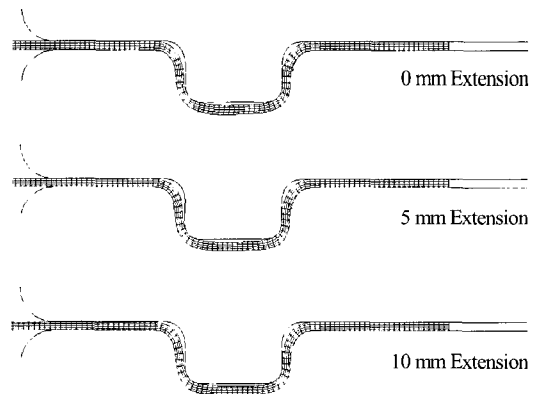
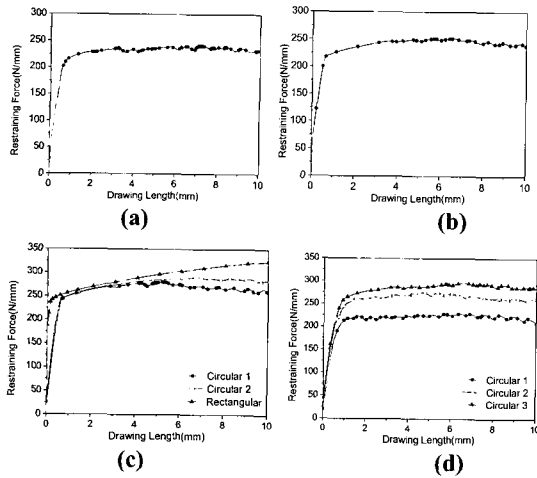


Fig. 7 Deformed shapes of the blank during the drawing process of rectangular drawbead

드로오비드가 6mm 만큼 내려갈 때 까지 수행하였으며, 펀치 행정 2mm 마다의 변형형상을 Fig. 6 에 도시하였다. 사각 비드 역시 펀치 행정 초반 에 펀치를 중심으로 블랭크의 양 옆부분이 들리다가 구속되며, 원형 비드와 비교하여 급형과 맞는 재료의 면적이 넓기 때문에 성형되는 동안 다이 벽면부위에서 변형이 크게 발생하고 있다.

reinfrtframe\_A 의 사각 비드에 대한 인발은 Fig. 7 에 도시하였다. Fig. 5 에 도시된 원형 비드와 비교하여 사각 비드는 인발과정에서 끝 자유단의 유입이 상대적으로 적게 발생하고 있으며, 이는 사각 비드의 구속력이 크다는 사실을 의미한다.

Front Side Member 의 부재 성형에 이용되는 드로오비드에 대하여 인발공정에서의 구속력을 Fig. 8 에 도시하였다. 부재에 사용되는 비드 중에서 원형 비드는 모두 관재의 변위 경계조건에 따라 길이 방향으로 응력을 받기 때문에 구속력이 급격히 증가하다가 관재가 일정량의 변형에 도달하여, 급형 변형과 마찰에 의한 힘과 당기는 힘이 평형을 이루면 정상 상태에 도달하는 경향을 보이고 있다. reinfrtframe\_A 와 reinfrtframe\_C 의 원형비드는 드로오비드의 깊이가 증가할수록 이러한 정상 상태의 구속력이 크게 나타나고 있다. 그러나 reinfrtframe\_A 에 사용되는 사각 비드는



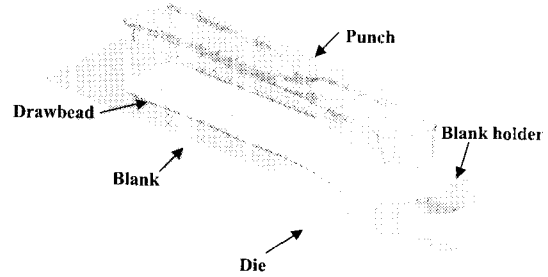
**Fig. 8** Restraining force with respect to the drawing length of drawbead in the Front Side Member : (a) frame\_frt\_in; (b) frame\_frt\_in; (c) reinf\_frt\_frame\_A ; (d) reinf\_frt\_frame\_C

**Table 5** Restraining forces of drawbeads in the Front Side Member.

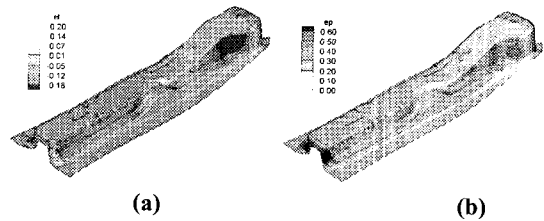
Part	Bead type	Restraining force
Frame_frt_in	Circular bead	226 N/mm
Frame_frt_out_A	Circular bead	243 N/mm
Reinf_frt_frame_A	Circular bead 1	246 N/mm
	Circular bead 2	271 N/mm
Reinf_frt_frame_C	Rectangular bead	294 N/mm
	Circular bead 1	217 N/mm
	Circular bead 2	235 N/mm
	Circular bead 3	278 N/mm

정상 상태에 도달하지 않고 구속력이 계속 증가하는 경향을 보인다. 이는 판재의 인발이 계속 이루어지고 있음을 의미하며, 이로 인하여 사각 드로오비드는 큰 구속력을 갖게 된다. 각 부재에 대한 정상상태에서의 드로오비드 구속력을 Table 5에 정리하였다.

2.2 Front Side Member의 성형공정 해석  
성형이력을 계산하기 위하여 Front Side Member를 구성하는 4개 부재의 성형해석을 수행하였다. 부재의 해석은 LS-DYNA3D를 이용하여 탄소성 해석으로 수행하였다. 판재와 금형사이의 마찰계수는 0.15, 블랭크 홀딩력은 100kN을 부과하였으



**Fig. 9** Initial setting of tools and the blank for the analysis of the frame\_frt\_in in the Front Side Member



**Fig. 10** Final forming results of the frame\_frt\_in: (a) distribution of the effective plastic strain; (b) distribution of the thickness strain

며 성형과정에서는 각 부재의 성형형상을 정밀하게 표현하기 위하여 적응형 격자 기법을 이용하였다. 앞 절에서 계산된 드로오비드의 구속력은 증가 드로오비드의 경계조건으로 적용하여 각 부재의 바인더랩 공정과 성형공정의 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 frame\_frt\_in의 금형시스템을 나타내는 그림이다. 블랭크홀더의 일부분인 드로오비드는 선으로 표시되어 있으며 앞 절에서 계산한 드로오비드의 구속력 226N/mm를 경계조건으로 부과하여 해석을 수행하였다. Fig. 10은 frame\_frt\_in의 성형 후의 유효 소성변형을 분포와 두께 분포를 도시한 것으로 부재의 끝단 측면부와 충돌 에너지 흡수를 위한 전방 홈부분에서 변형이 집중되어 크게 발생하고 있다.

Frame\_frt\_in에 관하여 증가의 드로오비드 경계조건을 적용한 성형해석 결과를 검증하기 위하여 실제 공정에서 성형 생산된 실품과 두께를 비교하였다. 그리고 드로오비드 경계조건을 부과하지 않고 해석을 수행한 모델과 비교하여 증가 경계조건 타당성을 검증하였다. 두께의 비교는 충돌 발생시에 변형이 쉽게 발생하도록 홈을 넣은 부분인 A-A'과 단면의 형상 변화가 크게 발생하는 B-B' 및 C-C'에서 수행하였으며, Fig. 11에 해석

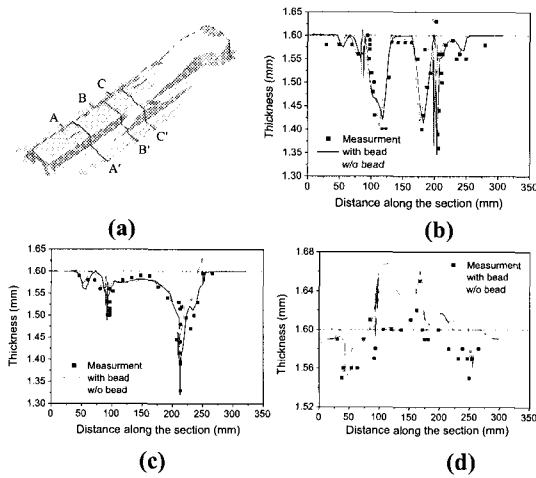


Fig. 11 Comparison of thickness distribution of the frame-front-in: (a) measured section; (b) section A-A'; (c) section B-B'; (d) section C-C'

결과와 비교하여 도시하였다. 전체적으로 등가 드로오비드를 적용한 성형해석 결과와 측정결과가 거의 일치한 분포를 보이고 있다. 이러한 실험과의 비교 결과는 본 논문에서 수행한 드로오비드의 구속력 계산 및 등가 드로오비드를 적용한 부재의 성형해석 결과가 정확성을 갖는다는 것을 설명한다. 특히 B-B' 및 C-C'에서는 실제 두께 측정 결과가 등가 드로오비드를 적용하여 해석한 결과와 유사한 경향을 보였다. 드로오비드를 사용하고 해석한 결과의 두께 분포는 측벽부 사이의 중간 부분에서 초기 두께 1.6mm 정도의 균일한 분포를 보여주고 있으나, 드로오비드 없이 해석한 경우에는 이 부분에서 판재의 유입이 더 많아지는 양상을 보여 두께가 초기 두께보다 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 본 논문에서 적용한 등가 드로오비드를 적용한 성형 해석이 등가 경계조건에 의하여 판재의 유입이 조절되어 실제 성형 조건을 적절하게 표현하고 있음을 의미한다.

다른 부재들의 성형해석도 위와 같은 방법을 이용하여 수행하였으며, 각 부재에 관하여 계산된 유효소성변형률 분포와 두께 분포를 충돌해석의 성형 이력으로 고려하였다.

### 3. 충돌해석에의 적용

#### 3.1 유한요소 모델링 및 성형이력의 적용

충돌해석을 위한 Front Side Member의 유한요소 모델은 Fig. 12와 같다. Front Side Member를 구성

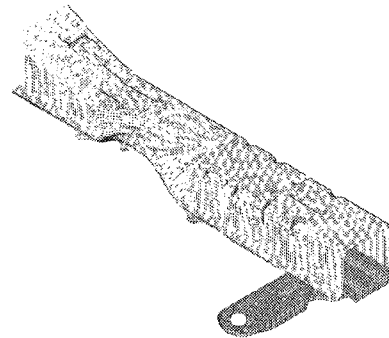


Fig. 12 Finite element model of the Front Side Member for crash analysis

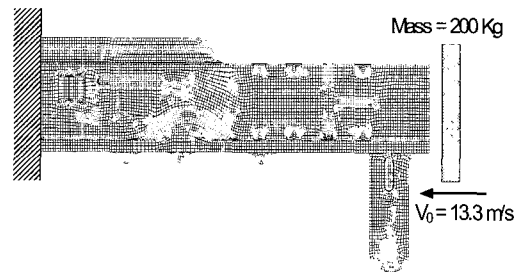


Fig. 13 Schematic diagram for crash analysis of the Front Side Member

하는 7개의 부재들에 대하여 전체적으로 29842개의 셀 요소와 30788개의 절점으로 유한요소 모델링을 수행하였다. Front Side Member의 충돌해석에 관한 경계조건은 Fig. 13과 같다. Front Side Member의 한쪽 끝단은 고정하고 다른 끝단에는 200kg의 강체가 13.3m/s의 초기속도로 30msec 동안 충돌하도록 하였다. 해석에 적용된 3가지 재료의 물성은 고속 변형의 효과를 정확히 묘사하기 위하여 다음과 같은 Johnson-Cook 물성모델<sup>(12)</sup>로 표현하였고, 각 재료에 관한 물성 상수는 Table 6에 나타내었다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\bar{\dot{\epsilon}}}{\bar{\dot{\epsilon}}_0} \right] \left[ 1 - T^{*m} \right] \quad (1)$$

$$\text{where, } T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}, \quad \bar{\dot{\epsilon}}_0 = 1 / \text{sec}$$

식 (1)에서  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $m$ 은 재료상수이고  $T_{melt}$ 는 재료의 녹는점,  $T_{room}$ 은 상온을 나타낸다.

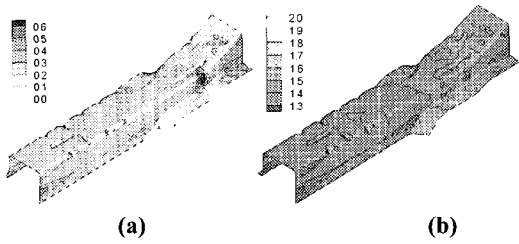


Fig. 14 Mapping from the forming analysis of frame\_frt\_in: (a) effective plastic strain; (b) thickness

Table 6 Material constants in the Johnson-Cook constitutive relation

Material constant	SAPH 38	SPRC 40	SPRC 45
A (MPa)	295.5	294.1	345.1
B (MPa)	550.39	667.5	703.2
n	0.576	0.622	0.6
C	0.039	0.06	0.046
m	0.43	0.375	0.33

충돌해석에서 성형이력을 적용하기 위하여 성형해석에서 얻은 유효 소성변형률 분포와 두께의 분포를 충돌해석을 위한 유한요소 모델에 사상하였다. Fig. 14 는 성형해석을 frame\_frt\_in 부재에 관한 사상결과를 나타낸 것이다.

### 3.2 Front Side Member 의 충돌해석

Front Side Member 의 충돌해석은 4 가지 경우에 관하여 수행하였다. 먼저 성형해석에서 계산된 성형결과를 고려하여 충돌해석을 수행하고, 성형효과를 고려하지 않은 경우와 비교하였다. 또한 유효 소성변형률만 고려한 경우와 두께 분포만을 적용한 경우에 관하여 각각 충돌해석을 수행하고, 각각의 성형결과가 충돌해석에 미치는 영향을 비교, 평가하였다.

Fig. 15 에 성형효과를 고려하지 않은 경우와 유효소성변형률과 두께 분포의 모든 성형효과를 고려한 경우의 변형 형상을 비교하여 도시하였다. 성형공정에서 나타나는 성형이력은 Front Side Member 의 충돌 변형에 영향을 주어 변형 형상의 차이를 유발한다. 흠이 있는 부분의 상면부의 변형은 성형효과를 고려한 경우가 크게 나타나지만, 하면부의 변형은 성형효과를 고려하지 않은 경우에 크게 나타났다. 흠이 있는 부분의 전체적인 변

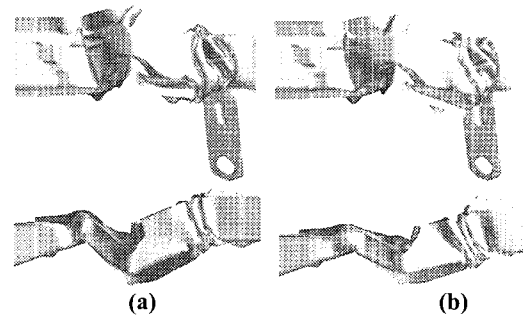


Fig. 15 Comparison of deformed shapes of the Front Side Member: (a) without forming results; (b) with all forming results

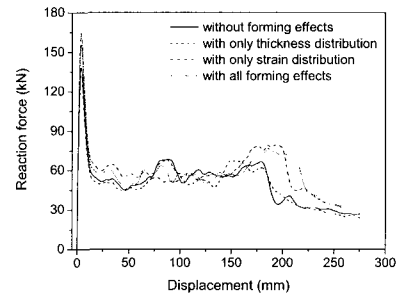


Fig. 16 Reaction force for crash analysis of the Front Side Member

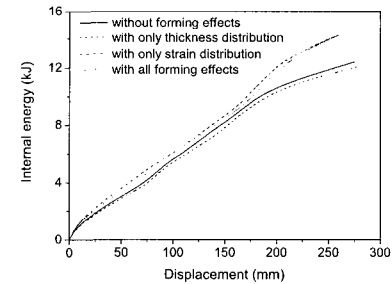


Fig. 17 Comparison of energy absorbed in the Front Side Member

형은 성형효과를 고려한 경우에 크게 발생하며 중간 부분의 변형은 성형효과를 고려하지 않은 경우에 굽힘이 크게 발생하고 있다.

Fig. 16 은 변형량에 따른 충돌하중을 도시하였다. 이 결과는 유효 소성변형률은 초기 최대하중을 증대시키지만, 불균일한 두께 분포는 초기 최대하중을 감소시킨다는 것을 설명한다. 성형공정에서 나타난 변형률 경화에 의하여 최대하중이 증가하고, 불균일한 두께 분포는 초기 결함의 역할을 하여 최대하중을 감소시켰다.

Fig. 17 은 압괴거리에 따른 에너지 흡수량을 도시하였다. 에너지 흡수량의 분포도 성형 효과에

따라 동일한 경향을 보이고 있다. 변형이 작은 경우에는 성형효과를 고려한 경우의 에너지 흡수량이 성형효과를 고려하지 않은 경우에 비하여 약 5.3% 증대되었고, 160mm 이후에는 성형효과를 고려한 경우에 에너지 흡수량이 크게 증대되었다. 200mm 변형에서는 약 10.2%, 250mm 변형에서는 약 17.3%의 에너지 흡수량의 증대가 나타났다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 등가 드로우비드를 적용하여 박판 성형 공정에서 생산되는 Front Side Member 의 성형해석을 수행하여 성형이력을 계산한 후 이를 충돌해석에 적용하여 차체의 충돌해석에서 성형이력의 영향 및 효과를 검토하였다.

Front Side Member 의 성형해석에서는 우선 드로우비드의 등가 구속력을 계산한 후 이를 적용하여 부재의 성형해석을 수행하였다. 그리고 실제 공정에서 성형 생산된 실품과의 두께 비교를 통하여 등가 경계조건 및 성형해석의 정확성을 검증하였다. 성형해석에서 계산된 성형결과는 충돌해석의 초기 조건으로 적용하였다. 직접 성형해석에서 계산된 유효 소성변형률 분포와 두께 분포를 적용하여 성형효과를 고려한 Front Side Member 의 충돌 특성을 평가하였다. 그 결과 성형효과를 고려하면 변형거동이 변화하고 에너지 흡수량은 변위가 100mm 일 때에 5.3%, 변위가 250 mm 일 때에는 17.3% 정도가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 성형결과 중에서 유효 소성변형률은 에너지 흡수능력의 증대에 큰 영향을 주었다. 두께 분포는 초기 결합의 역할을 하여 충돌하중과 에너지 흡수능력을 저하시켰다. 따라서 성형공정에서 제작되는 Front Side Member 의 변형형상, 충돌하중 및 에너지 흡수능력을 정확하게 예측하기 위하여는 충돌해석 시에 성형이력을 고려하는 것이 필수적인 것으로 평가되었다.

#### 참고 문헌

(1) Dutton, T., Irebu, S., Sturt, R., Kellicut, A., Cowell, B. and Kavikondala, K., 1999, "The Effect of Forming on the Crashworthiness of Vehicles with Hydroformed Frame Siderails," SAE pp. 1999-01-3208.

(2) Kim, K. P. and Huh, H., 2003, "Collapse Analysis of an Auto-Body Structure by a Finite Element

Limit Method, Proc. 6th USNCCM, Dearborn, U.S.A., pp. 737~742.

(3) Mikami, H., Suzuki, H., Ishizawa, M. and Matsuoka, Y., 1999, "Crash Simulation Considered Influence of Stamping," Proc. HANPAM'99, Seoul, Korea, pp. 187~200.

(4) Meinders, T., Geijselers, H. J. M. and Huétink, J., 1999, "Equivalent Drawbead Performance in Deep Drawing Simulations," Proc. NUMISHEET' 99, Besancon, France, pp. 243~248.

(5) Triantafyllidis, N., Maker, B. and Samanta, S. K., 1986, "An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming: Part I-Problem Formulation", J. Engr. Mater. Technol., Vol. 108, pp. 321~327.

(6) Triantafyllidis, N., Maker, B., Samanta, S. K. and Grab, G., 1987, "An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming: Part II-Experimental Verification", J. Engr. Mater. Technol., Vol. 109, pp. 164~170.

(7) Cao, J. and Boyce, M. C., 1993, "Drawbead Penetration as a Control Element of Material Flow", SAE 930517, Sheet-Metal and Stamping Symposium, Detroit.

(8) Choi, T. H., Huh, H., Chun, B. K. and Lee, J. H., 1997 "Draw-bead Simulation by an Elasto-Plastic Finite Element Method with Directional Reduced Integration", J. Mater. Process. Technol., Vol. 63, pp. 666~671.

(9) 박종세, 김승호, 허 훈, 2002, " 박판 성형공정에서의 등가 경계조건 계산을 위한 드로우비드 성형의 탄소성 유한요소 해석-Part I : 등가 경계조건 계산", 한국소성가공학회지, 제 11 권 제 6 호, pp. 503~512.

(10) 정동원, 이상제, 2000, "드로우비드 형상에 따른 박판 성형 공정에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A, Vol. 24, No.6, pp. 1624~1632.

(11) You, Y., Hong, P. Y., and Yu, R. X., 1998, "Calculation of Drawbead Restraining Forces associated with Kinematic Hardening Rule", proc. NUMIFORM'98, pp. 235~242.

(12) Johnson, G. R. and Cook, W. H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," Proc. 7th International Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983, pp. 541~547.