

## 유한요소해석에 의한 헤밍 공정 변수연구

김형종<sup>†</sup> · 최원목<sup>\*</sup> · 임재규<sup>\*</sup> · 박춘달<sup>\*\*</sup> · 이우홍<sup>\*\*</sup> · 김현영<sup>\*\*\*</sup>  
(2003년 7월 7일 접수, 2004년 1월 3일 심사완료)

### A Parametric Study of the Hemming Process by Finite Element Analysis

Hyung-Jong Kim, Won-Mog Choi, Jae-Kyu Lim, Chun-Dal Park,  
Woo-Hong Lee and Heon-Young Kim

**Key Words:** Hemming(헤밍), Flanging(플랜징), Turn-down(턴다운), Warp(워프), Roll-in(롤인),  
Finite Element Analysis(유한요소해석), Smoothing Error(평활화오차)

#### Abstract

Implicit finite element analysis of the flat surface-straight edge hemming process is performed by using a commercial code ABAQUS/Standard. Methods of finite element modeling for springback simulation and contact pair definition are discussed. An optimal mesh system is chosen through the error analysis that is based on the smoothing of discontinuity in the state variables. This study has focused on the investigation of the influence of process parameters in flanging, pre-hemming and main hemming on final hem quality, which can be defined by turn-down, warp and roll-in. The parameters adopted in this parametric study are flange length, flange angle, flanging die corner radius, face angle and insertion angle of pre-hemming punch, and over-stroke of pre-hemming and main hemming punches.

#### 1. 서론

자동차 외관은 드로잉, 트리밍, 플랜징, 헤밍 등 일련의 공정을 거쳐 완성된다. 헤밍은 외관 제조공정의 마지막 단계로서 프리헤밍과 메인헤밍으로 구성되며, 도어나 후드, 트렁크 등의 내·외관 형상을 성형한 후 외관의 가장자리를 접어 내판과 접합하는 공정이다. 완성차의 외관에 대

한 품질은 주로 1차 성형공정보다는 플랜징이나 헤밍 등 2차 성형공정에서 좌우된다. 생산현장에서 헤밍 품질을 개선하기 위하여 여러 번의 금형 수정작업을 하게 되는데 이는 많은 시간과 비용을 요한다. 이러한 문제점을 해결하려면 완성차의 외관 품질에 대한 정확한 예측이 조기에 확보되어야 한다. 그러나 2차 성형공정에서 발생하는 미세한 외관 결함은 탄성회복과 같은 복잡한 현상에 기인하므로 실험적으로나 해석적으로나 그 예측이 매우 어렵다. 또한, 헤밍부의 굽힘반지름이 판재 두께보다도 작기 때문에, 유한요소해석 결과가 신뢰성을 가지기 위하여는 계산 효율을 고려한 요소망의 선택에 어려움이 따른다. 이러한 이유로 자동차 외관 성형공정의 유한요소해석이 이미 10여 년 전부터 적용되기 시작한 반면,<sup>(1,2)</sup> 플랜징과 헤밍 공정에 대하여는 국내외적으로 불과 5, 6년 전부터 유한요소해석 또는 실

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 강원대학교 기계-메카트로닉스 공학부

E-mail : khjong@kangwon.ac.kr  
TEL : (033)250-6314 FAX : (033)242-6013

<sup>\*</sup> 강원대학교 대학원

<sup>\*\*</sup> 회원, 현대자동차 금형기술개발팀

<sup>\*\*\*</sup> 회원, 강원대학교 기계-메카트로닉스공학부

험적 방법을 통한 접근이 시도되고 있다.<sup>(3-10)</sup>

국내에서는 Joo 등<sup>(3)</sup>이 처음으로 곡선부 헤밍 공정 시뮬레이션을 시도하여 플랜지 길이가 헤밍 품질에 미치는 영향을 분석하였다. Kim 등<sup>(4,5)</sup>은 평면변형을 모델로 대상으로 플랜지 길이, 판재의 재질, 프리헤밍 펀치 진입량이 헤밍 품질에 미치는 영향을 검토하였으며, 3차원 해석으로 면내 곡률과 플랜지 길이에 따른 헤밍 품질의 변화를 조사하였다. 국외에서는 Svensson 등<sup>(6-8)</sup>이 유한요소해석에서 셸 요소와 솔리드 요소의 선택과 시간적분법에 따른 해석결과의 차이를 비교하고, 최근에는 재료의 이방성이 롤인에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 분석하였다. Müderrisoğlu 등<sup>(9)</sup>은 알루미늄 판재의 헤밍에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, Livatyali 등<sup>(10)</sup>은 공정변수와 금형설계의 최적화를 통하여 헤밍 품질을 개선할 수 있는 방안을 연구하였다.

본 연구에서는 내연적(implicit) 유한요소 코드 ABAQUS/Standard<sup>(11)</sup>를 사용하여 평면-직선부(flat surface - straight edge) 헤밍 공정에 대한 일련의 평면변형률 해석을 수행하고, 턴다운(turn-down), 롤인(roll-in) 등 외관 품질을 좌우하는 헤밍 결합들을 정량적으로 분석하였다. 우선, 미세한 외관 결합의 발생을 구현하고 감지할 수 있도록 하기 위하여 적절한 요소망 구성, 스프링백 구현, 접촉 조건 처리 등 주요 해석기법을 확립하였다. 이를 바탕으로 플랜지 길이, 플랜지 다이 모서리 반지름, 플랜지 각, 프리헤밍 펀치의 면각 및 진입각, 프리헤밍 펀치 진입량, 메인헤밍 펀치 진입량 등 공정변수들이 헤밍 품질에 미치는 영향을 분석하기 위한 변수연구를 수행함으로써, 헤밍 품질을 조기에 예측하고 개선할 수 있는 기술을 확보하여 실제 자동차 설계에 적용할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 헤밍 공정 변수연구

2.1 공정변수의 정의

헤밍 품질에 영향을 미치는 공정변수는 매우 많지만, 본 연구에서는 그중 가장 대표적인 것으로서 Fig. 1~3에 표시한 7가지에 대하여 변수연구를 수행하였다. Fig. 1에는 플랜지 길이  $h$ , 플랜지 다이 반지름  $R_d$ , 플랜지 각  $\theta_f$ , 그리고 프리헤밍

펀치의 면각  $\alpha$  및 진입각  $\theta_p$  등 5가지 변수를 나타내었다. 특히, 플랜지 각은 대부분의 문헌에

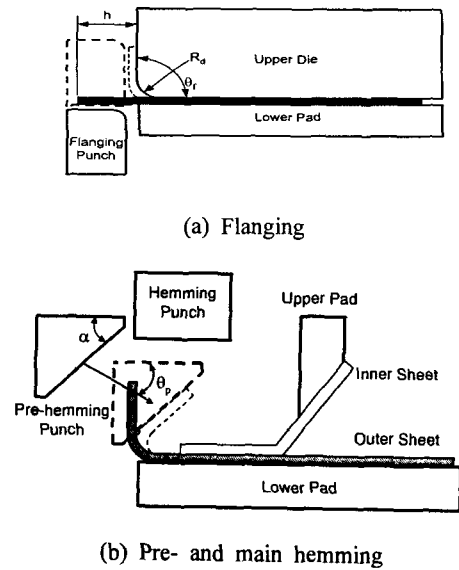


Fig. 1 Schematic diagram of hemming process

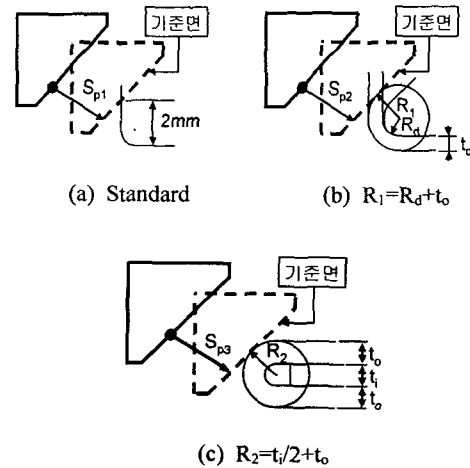


Fig. 2 Over-stroke of pre-hemming punch

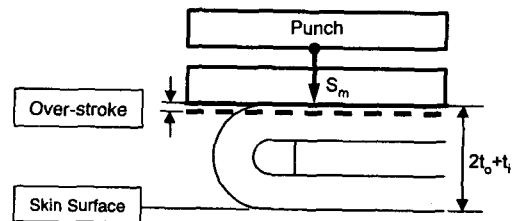


Fig. 3 Over-stroke of main hemming punch

Table 1 Process Parameters

Process	Parameter	Symbol (Unit)	Level
Flanging	Flange length	h(mm)	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5
	Flange die radius	R <sub>d</sub> (mm)	0.5, 1.0, 2.0, 3.0
	Flange angle	θ <sub>f</sub> (deg)	80, 90, 100, 110, 120
Pre-hemming	Face angle	α(deg)	35, 39, 43, 47, 51
	Insertion angle	θ <sub>p</sub> (deg)	35, 41, 47, 53, 59, 65
	Over-stroke	ΔS <sub>p</sub> (mm)	0.0, 0.138, 0.357
Main hemming	Over-stroke	ΔS <sub>m</sub> (mm)	0.0, 0.005, 0.01

\* 밑줄 친 값은 표준모델을 나타냄.

서 직각으로 설정하고 있으나, 실제 현장에서는 직각이 아닌 경우가 보통이며, 사실상 프리헤밍 편치 면각 및 진입각과의 조합이 중요한 변수가 되므로 본 변수연구에 포함하였다.

Fig. 2는 프리헤밍 편치 진입량 S<sub>p</sub>에 대한 3가지 정의 방법을 나타낸 것이다. (a)는 플랜징 후 기준면, 즉 외관과 내관의 접촉면으로부터 수직으로 2 mm 되는 지점까지 편치가 진입하는 것을 나타내며, 현장에서 실제 적용하고 있으므로 이를 표준진입량으로 정의하였다. (b), (c)는 각각 프리헤밍 시 굽힘부의 바깥면이 형성하는 곡률반지름 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>에 접하는 접점까지 프리헤밍 편치가 진입하는 경우를 나타내는데, 이들의 경우 표준진입량보다 큰 행정을 필요로 하며, 그 과행정(over-stroke) ΔS<sub>p</sub>를 변수로 정의하여 변수연구를 수행하였다.

Fig. 3에서는 메인헤밍 편치가 스킨면으로부터 외관 두께(t<sub>o</sub>)의 2 배와 내관 두께(t<sub>i</sub>)의 합 위치까지 진입하는 것을 표준진입량으로 정하고, 그 이상 진입하는 것을 과행정 ΔS<sub>m</sub>으로 정의하였다.

Table 1은 변수연구에 사용된 공정변수와 그 범위를 나타낸 것이다. 각 변수가 헤밍 품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 밑줄로 표시한 h = 10 mm, R<sub>d</sub> = 0.5 mm, θ<sub>f</sub> = 90°, α = 43°, θ<sub>p</sub> = 47°, ΔS<sub>p</sub> = 0.0 mm, ΔS<sub>m</sub> = 0.0 mm 인 경우를 표준모델로 설정하고, 이를 기준으로 변수를 하나씩 변화시켜가면서 해석과 변수연구를 수행하였다.

2.2 헤밍 품질의 정의

헤밍 공정에서 발생하는 대표적인 외관 결함은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 스킨면(skin surface), 즉 외관 표면에서 끝 부분이 바깥쪽으로 볼록하

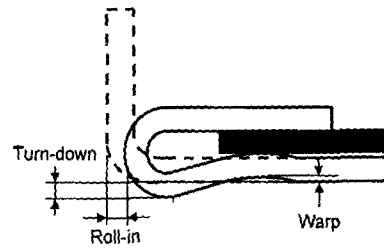


Fig. 4 Definition of hemming defects

게 튀어나오는 '턴다운(turn-down)과 안쪽으로 들려 올라가는 턴업(turn-up), 국부적으로 오목하게 들어가는 워프(warp), 그리고 가장자리가 플랜지 위치로부터 안쪽으로 밀려들어가거나 바깥쪽으로 밀려나오는 롤인(roll-in)과 롤아웃(roll-out) 등이 있다. 턴다운, 턴업, 워프는 보통 수십 μm 정도의 크기로, 조립이나 기능에는 별 문제를 일으키지 않으나 미관상의 품질에는 결코 무시할 수 없는 민감한 문제를 유발한다. 롤인과 롤아웃은 제품의 외관치수를 수백 μm에서 1 mm 이상까지 변화시킬 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 모델링

헤밍부의 곡률반지름은 판재 두께보다도 얇은 0.5 mm 정도에 지나지 않으므로, 헤밍 품질을 좌우하는 이 부분의 국부변형을 정확히 해석하려면 3차원 모델로는 여전히 어려운 점이 많은 것이 사실이다. 이점을 고려할 때 외관 결함의 정밀한 예측을 위하여는 제품 윤곽선이 직선에 가까운 부분의 단면을 2차원적으로 모델링 하여 평면 변형을 문제로 단순화하는 것이 현실적으로 타당하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 ABAQUS/Standard<sup>(11)</sup>를 사용하여 일련의 헤밍 공정에 대한 2차원 해석을 수행하였다. Fig. 5는 주요 치수와 금형 각부의 초기위치를 표시한 유한요소 모델이다. 하형 패드는 플랜지 공정에서는 500 N의 힘이 가해지는 블랭크홀더의 역할을 하며, 헤밍 공정에서는 변위가 구속된 다이의 역할을 하게 된다. 헤밍 공정에서 상형 패드는 변위로 구속된다. 판재-금형 및 외관-내관 사이의 모든 접촉면에는 마찰계수 0.15의 Coulomb 마찰력이 작용하는 것으로 가정하였다.

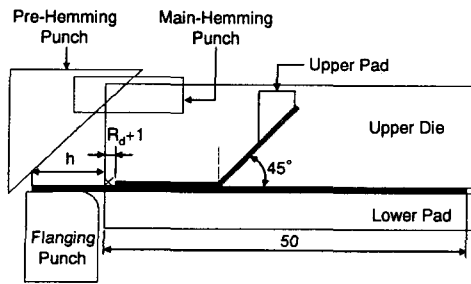


Fig. 5 Finite element model

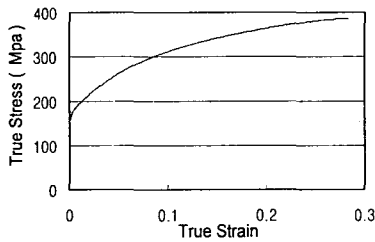


Fig. 6 Stress-strain curve of SPcEN

성형해석에 사용한 외판과 내판은 두께가 각각 0.8, 0.6 mm인 SPcEN 강판 재료로, 종탄성계수는 200 GPa, Poisson 비는 0.3이다. 응력-변형을 곡선은 Fig. 6에 나타낸 것과 같으며, 283개의 자료점으로 입력하였다.

3.2 요소망 구성

헤밍 공정의 유한요소해석에서 변형이 큰 외판, 특히 굽힘부 근처의 요소망은 그 크기나 배열에 따라 헤밍 품질의 예측값에 상당한 영향을 미친다. 이 부분은 다른 부분보다 요소망을 세밀히 나눠야 할 것이나, 해석능률과 변형의 집중도를 고려해 가장 적합한 요소망의 크기를 찾아야 할 필요가 있다.

유한요소해석에서 얻어지는 상태변수 값에 대한 오차는 정해와의 차이로 정의된다. 그러나 일반적으로 정해를 구할 수 없기 때문에, 절점평균법에 의하여 평활화(smoothing)한 값을 정해 대신 사용하는 방법을 생각할 수 있다.<sup>(12,13)</sup> 이는 요소 내의 적분점에서 계산된 상태변수의 값을 절점값으로 외삽(extrapolation)하고, 각 절점에서 그 절점을 포함하는 주위 요소들로부터 외삽된 절점값들을 적절히 평균한 다음, 다시 각 요소에 대하여

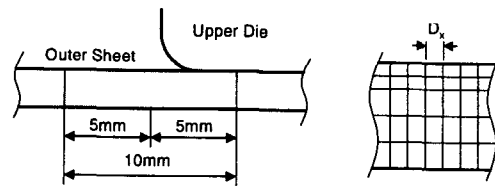


Fig. 7 Mesh system in the fine mesh zone

Table 2 Numerical Parameters

Parameter	Symbol (Unit)	Level
No. of Layers	$L_y$ (layers)	3, 4, 5, 6, 7
Size of element	$D_x$ (mm)	0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3

\* 밑줄 친 값은 표준모델을 나타냄.

이 절점평균값을 보간(interpolation)함으로써 적분점에서의 원래 값과의 차이, 즉 평활화오차를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 외판 두께방향의 요소층수와 길이방향의 요소크기의 최적값을 구하기 위하여, 각 요소에 대하여 식 (1)로 정의되는 유효변형을 평활화오차를 계산하고 요소망에 따른 비교·분석을 시도하였다.

$$E_{\epsilon}^{(m)} = \int_{V^{(m)}} |\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}^*| dV \quad (1)$$

여기서  $\bar{\epsilon}$ 는 각 요소의 적분점에서 계산된 유효변형률이며,  $\bar{\epsilon}^*$ 는 유효변형률의 절점평균값을 다시 적분점 값으로 보간한 값이다.

Fig. 7은 다른 부분보다 더 미세하게 분할된 굽힘부 근처 영역과 그 부분의 요소망을 확대한 그림이다. 두께방향으로는 0.04~0.4 mm 간격으로 3~7개 층으로 나누고, 길이방향으로는 0.075~0.3 mm의 크기로 분할하였다. 굽힘부 이외의 영역은 길이방향으로 1.2 mm의 크기로 요소망을 구성하였다.

Table 2는 해석을 수행한 수치변수 범위를 나타낸다. 한편, 변형이 작은 내판은 두께방향으로는 0.2 mm 씩 3개 층으로, 길이 방향으로는 0.76~1.2 mm 크기로 균일하게 요소를 나누었다.

Fig. 8은 여러 가지 요소망에 대한 유효변형률 평활화오차의 변화를 비교한 그림이다. (a)는 전체 요소에 대한 오차의 합, 그리고 (b)는 전체 요소 중 최대값을 각각 나타낸다. 2가지 모두 요소망이 세분될수록, 즉 요소층수( $L_y$ )가 많을수록, 요소

크기( $D_x$ )가 작을수록 전반적으로 오차가 감소하는 추세를 보이고 있으며, 특히  $L_y=5$  및  $D_x=0.15$  mm를 경계로 더 이상 요소망을 세분화더라도 오차의 감소추세가 급격히 완만해지는 것을 알 수 있다. 이러한 분석을 바탕으로 본 연구에서는 이들을 요소망 구성의 최적값으로 설정하고 이후의 변수연구를 수행하였다.

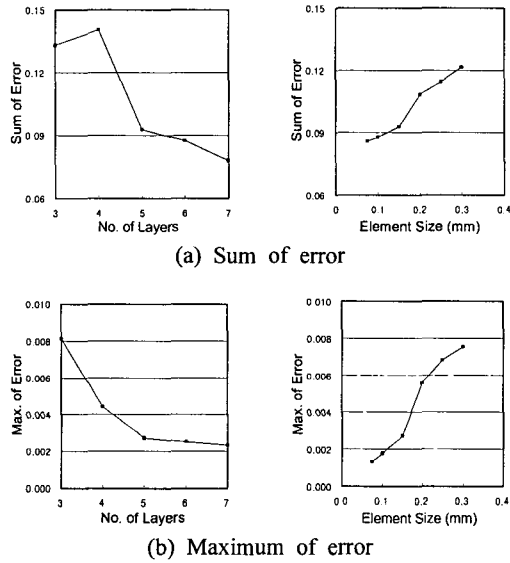


Fig. 8 Smoothing error in effective strain for different mesh systems

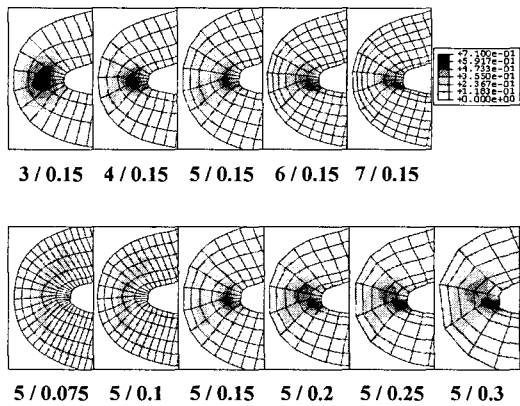


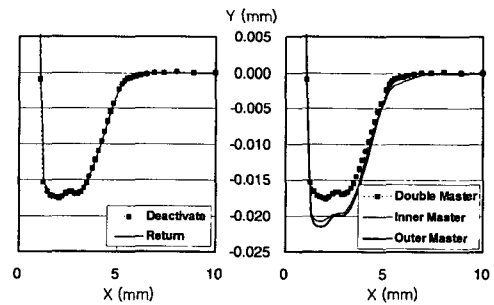
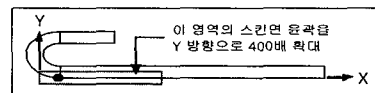
Fig. 9 Discontinuity in effective strain for different mesh systems ( $L_y/D_x$ )

Fig. 9는 ABAQUS 후처리로 볼 수 있는, 인접 요소간 유효변형률 불연속량의 분포이다. 이 불연속량도 평활화오차와 같은 개념으로서 해석 오차의 지표로 사용될 수 있다. 역시 요소망이 세분될수록 전반적으로 불연속량이 감소하는 추세를 보이고 있으며, 최대 불연속량은 모든 경우에 대하여 요소가 가장 많이 변형된 굽힘부 중립면 약간 안쪽에 발생하는 것을 알 수 있다.

3.3 해석 기법

3.3.1 스프링백

성형해석에서 스프링백 현상을 구현하는 방법으로 다음 2가지를 생각할 수 있다, 첫째는 판재와의 접촉조건을 유지하면서 금형을 서서히 후진시키는('return') 방법이며, 둘째는 금형과 판재사이의 접촉조건을 제거하는('deactivate') 방법이다. Fig. 10(a)는 이 2가지 방법으로 해석한 결과를 정밀하게 비교하기 위하여 스킨면 주요부의 윤곽을 두께방향(Y-축)으로 약 400배 확대한 그림이다. 턴다운이 18  $\mu$ m 정도의 크기로 발생한 것을 확실히 식별할 수 있으며, 스프링백 해석기법에 따른 차이는 거의 없는 것을 알 수 있다. 본 해석에는 실제 공정과 유사한 첫째 방법을 적용하였다.



(a) Springback (b) Contact pair

Fig. 10 Enlarged skin profiles obtained from two methods of springback simulation and three different choices of master surface

3.3.2 접촉조건

굽힘과 판재사이의 접촉조건을 정의할 때 일반적으로 강제인 금형을 마스터(master)로, 변형체인 판재를 슬레이브(slave)로 선택한다. 그러나 헤밍 공정에서와 같이 두개의 변형체가 접촉하는 경우에는 변형이 상대적으로 더 작은 내판을 마스터로 정의하는 것이 일반적이지만, 이 경우 마스터 표면의 수직벡터가 정의되지 않는 뾰족한 모서리가 존재하므로 내판 모서리에 적당한 크기의 라운딩 처리가 반드시 필요하다.

또한, 접촉부의 요소망이 더 세밀한 쪽(본 해석의 경우 외판)을 마스터로 정의하는 경우와, 마스터-슬레이브 관계를 서로 바꾸어 이중으로 정의하는 'double master contact'의 경우도 생각할 수 있다. Fig. 10(b)는 이 3가지 접촉 모델에 따른 해석결과를 비교하기 위하여 스킨면을 확대한 그림이다. 성형 후의 응력이나 변형률 분포는 외관상 거의 차이가 없는데도 불구하고 스프링백에 의한 미시적인 요철, 즉 턴다운의 차이는 상당함을 알 수 있다. 이러한 민감한 문제가 헤밍 품질의 정확한 예측을 어렵게 하는 주 요인이라 할 수 있다. 본 연구에서는 'double master contact' 조건으로 해석하였다.

3.4 해석 결과 분석

Fig. 11은 표준모델에 대한, 각 공정에서의 유효 변형률 분포 양상을 보여준다. 굽힘부 근처에서 변형이 집중되며, 공정이 진행되면서 변형률이 점차 증가하여 최종공정에서 최대유효변형률이 1.6 정도에 달하게 된다. 스프링백 후에도 변형률 값은 거의 변화가 없다.

Fig. 12(a)는 성형이 끝난 직후 주응력의 분포를 나타낸 그림이다. A, B, C로 표시된 세 부분에 소재 길이방향의 큰 인장응력이 작용하고 있으며, 이로부터 헤밍 결함의 발생기구를 설명할 수 있다. A 부분에는 플랜징 후 프리헤밍과 메인헤밍으로 이어지는 일련의 공정에 의한 굽힘인장응력이 매 공정에서 지속적으로 관찰되었으나, B와 C 부분에 작용하는 응력은 메인헤밍에 의하여 발생한 것이다. Fig. 12(b)에 나타낸 바와 같이 스프링백 후 A는 헤밍 접합부의 벌어짐(g), B는 아래로 볼록한 턴다운, C는 아래로 처지는 굽힘부 또는 위로 오목하게 들어가는 워프를 각각 야기하는 원인이 된다.

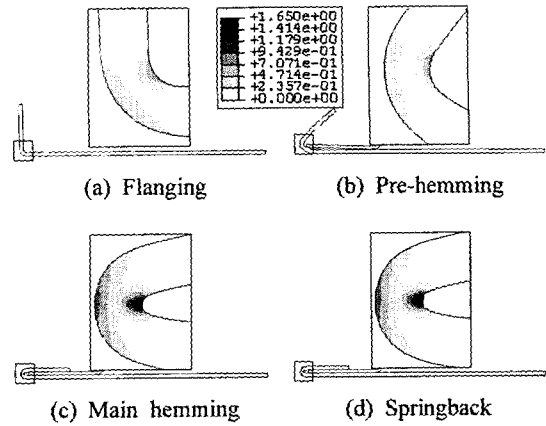
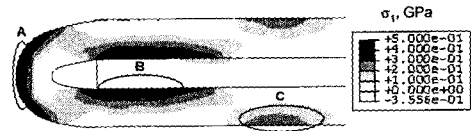
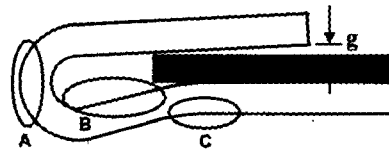


Fig. 11 Distribution of effective strain



(a) Distribution of principal stress before springback



(b) Effect of principal stress distribution

Fig. 12 Distribution of principal stress and its effect on final shape

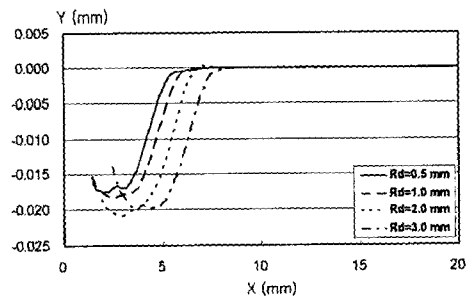


Fig. 13 Comparison of the enlarged skin profiles between models having different  $R_a$ 's

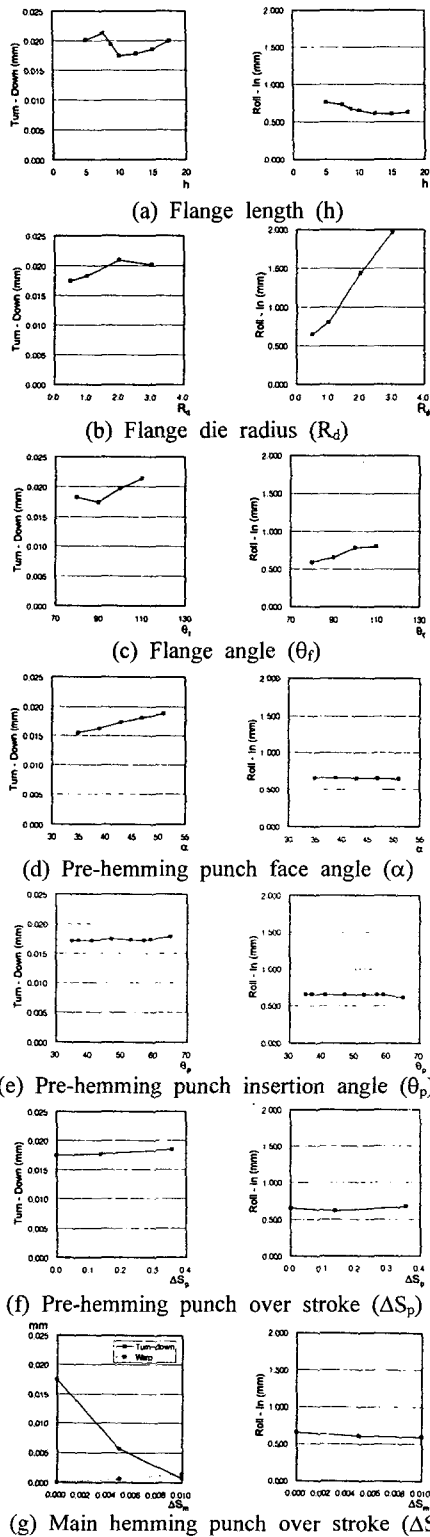


Fig. 14 Influences of process parameters on hem quality

3.5 변수연구 결과

Fig. 13은 여러 가지 공정조건 중 플랜지 다이 반지름  $R_d$ 에 따른 스킨면 윤곽을 확대하여 비교한 그림이다.  $R_d$ 가 커질수록 턴다운 양이 대체로 증가하며, 그 위치가 헤밍부 안쪽(오른쪽)으로 이동하는 것을 알 수 있다. 턴다운 위치의 이동은 롤인 양이 증가하여 헤밍부가 안쪽으로 밀려들어 오기 때문이다.

Fig. 14는 각 공정변수의 변화가 헤밍 품질, 즉 턴다운과 롤인에 미치는 영향을 그래프로 나타낸 그림이다. (a)는 플랜지 길이  $h$ 가 10~15 mm까지 변할 때 턴다운은 단조 증가하고 10 mm 이내에서는 불규칙적인 양상을 보이고 있으나, 롤인은 전체범위 내에서 단조 감소하는 것을 보여준다. Fig. 14(b)에서는 Fig. 13의 윤곽선 확대 그림에서 보인 것과 같이 플랜지 다이 모서리반지름  $R_d$ 가 2 mm일 때 턴다운이 최대가 됨을 알 수 있다. 특히,  $R_d$ 가 커짐에 따라 롤인은 급격히 증가하여  $R_d = 3$  mm일 때 무려 2 mm에 달하고 있어 심각한 외형치수 불량을 야기할 것으로 예측된다. (c)는 플랜지 각  $\theta_f$ 가 90°일 때 턴다운은 최소가 되며, 대체로  $\theta_f$ 가 증가할수록 턴다운과 롤인이 증가하는 것을 보여준다. (d)는 프리헤밍 펀치 면각  $\alpha$ 가 35~51°까지 커질 때 턴다운은 단조 증가하나 롤인의 변화는 거의 없음을 보여주고 있다. (e)로부터는 프리헤밍 펀치 진입각  $\theta_p$ 의 변화에 따른 턴다운, 롤인의 차이가 매우 미미한 사실을 확인할 수 있다. (f)에서 보는 바와 같이 프리헤밍 펀치 과행정  $\Delta S_p$ 가 증가할 때 턴다운은 단조 증가하나 증가폭은 매우 작으며, 롤인에는 거의 영향을 미치지 않는다. (g)에서는 메인헤밍 펀치 과행정  $\Delta S_m$ 을 0.01 mm까지 증가시킬 때 턴다운이 급격히 감소하여 그 감소효과가 약 16.7  $\mu$ m에 달하는 반면에, 다른 공정변수의 변화에서는 나타나지 않았던 워프가 2  $\mu$ m 정도의 크기로 발생한 것을 관찰할 수 있다. 롤인에 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다.

Table 3에 각 공정변수들이 범위 내에서 턴다운과 롤인에 미치는 최대 변화폭을 비교·정리하였다. 턴다운과 롤인에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 각각 메인헤밍 펀치 과행정과 플랜지 다이 모서리 반지름이며, 프리헤밍 펀치 진입각과 과행정은 헤밍 품질에 거의 영향을 미치지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, 플랜지 길이와 플랜지

Table 3 Evaluation of the effect of parameters

Parameter	Symbol	Maximum difference	
		Turn-down ( $\mu\text{m}$ )	Roll-in (mm)
Flange length	h	3.9 [M]	0.16 [M]
Flange die radius	$R_d$	3.4 [M]	1.31 [L]
Flange angle	$\theta_f$	3.9 [M]	0.21 [M]
Face angle	$\alpha$	3.5 [M]	0.01 [S]
Insertion angle	$\theta_p$	0.7 [S]	0.05 [S]
Pre-hemming over-stroke	$\Delta S_p$	1.0 [S]	0.02 [S]
Main hemming over-stroke	$\Delta S_m$	16.7 [L]	0.06 [S]

\* 3 levels of influence : [L] large, [M] medium, [S] small

각은 턴다운과 롤인에 모두 유의할 만한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 요소망, 스프링백, 접촉조건 등 헤밍 공정의 시뮬레이션과 헤밍 품질의 정밀한 예측에 요구되는 해석기법을 확립하고, 주요 공정변수가 헤밍 품질에 미치는 영향을 분석하기 위한 변수연구를 수행하였다. 주요 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

(1) 절점평균법에 바탕을 둔 평활화오차 분석을 통하여 계산효율을 고려한 최적 요소망, 즉 외판 두께방향 요소층수와 길이방향 요소크기에 대한 최적값을 구하고 이를 변수연구에 적용하였다.

(2) 스프링백 현상의 구현과 경계조건 및 접촉조건의 처리를 위한 해석기법을 확립하고, 이를 변수연구에 적용하였다.

(3) 스프링백 전의 주응력 분포상태를 분석함으로써 헤밍 접합부의 벌어짐, 턴다운, 워프 등 헤밍 결함의 발생기구를 규명하였다.

(4) 적용된 모든 조합과 범위에 대하여 턴업과 롤아웃 현상은 발생하지 않았다. 또한, 워프는 상형패드의 위치와 패드압력, 그리고 메인 헤밍 펀치의 과행정이 원인이나, 본 해석에서는 상형패드에 압력을 가하지 않고 변위를 구속하는 경계조건을 적용하였으므로, 메인헤밍 펀치 과행정을 0.01 mm까지 준 경우 외에는 워프가 발생하지 않았다. 최근 생산현장에서 상형패드를 사용하지 않는 경우가 점차 많아지는 점을 감안하면 메인

헤밍 펀치의 압력을 지나치게 가하지 않는 한 워프는 발생하지 않을 것으로 예측된다.

(5) 일반적으로 한 공정변수의 값이 변할 때 턴다운은 불규칙적으로 변하는 구간이 있으나, 롤인은 전 범위에서 거의 단조 증가하거나 단조 감소하는 것으로 나타났다.

(6) 적용된 변수 범위에서 헤밍 품질에 영향을 크게 미치는 순서대로 공정변수를 나열하면 턴다운의 경우 메인헤밍 펀치 과행정이 가장 큰 영향을 미치며, 다음으로는 플랜지 길이와 플랜지 각, 프리헤밍 펀치 면각, 플랜지 다이 모서리반지름 등의 차례이다. 롤인의 경우는 플랜지 다이 모서리반지름이 가장 큰 영향을 미치고, 플랜지 각, 플랜지 길이가 그 다음인 것으로 나타났다. 프리헤밍 펀치의 진입각과 과행정은 헤밍 품질에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, H. Y. and Kim, J. J., 1994, "Prediction of Springback and Formability in 3-D Stamping by an Explicit Code," *J. of the KSTP*, Vol. 3, No. 1, pp. 84~96.
- (2) Jung, D. W., 1998, "The Dynamic Explicit Analysis of Auto-body Panel Stamping Process and Investigating Parameter Affects of Dynamic Analysis," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 22, No. 2, pp. 380~390.
- (3) Joo, S. J. and Choi, H. S., 1998, "Hemming Simulation of Automotive Door Inner and Outer," *Proc. of MARC User's Forum*, pp. 148~153.
- (4) Kim, K. H., Han, K. H. and Kwon, T. H., 1999, "Elastic Springback in Hemming Process," *Proc. of 5th HANPAM*, Hankook ESI, pp. 399~404.
- (5) Ahn, D. C., Lee, K. D., Yin, J. J. and Kim, K. H., 2000, "A Study on the Design of Hemming Process for Automotive Body Panels," *KSTP Trans. of Materials Processing.*, Vol. 9, No. 6, pp. 624~630.
- (6) Svensson, M. and Mattiasson, K., 2000, "Simulation of Hemming of Automotive Body Components with the Explicit FE-Method," *Proc. of ECCOMAS 2000*, Barcelona, Spain.
- (7) Svensson, M. and Mattiasson, K., 2000, "Simulation



- of Hemming with Different Element Formulations and Time Integration Methods," *Proc. of NUMIFORM 2001*.
- (8) Svensson, M. and Mattiasson, K., 2002, "The Influence of Anisotropy on the Roll-in in Hemming, A Comparison between FE- Simulation and Practical Tests," *Proc. of NUMISHEET 2002*, pp. 261~266.
- (9) Mderrisođlu, A., Murata, M., Ahmetođlu, M. A., Kinzel, G. L. and Altan, T., 1996, "Bending, Flanging, and Hemming of Aluminium Sheet - An Experimental Study," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 10~17.
- (10) Livatyali, H., Mderrisođlu, A., Ahmetođlu, M. A., Akgerman, N., Kinzel, G. L. and Altan, T., 2000, "Improvement of Hem Quality by Optimizing Flanging and Pre-hemming Operations Using Computer Aided Die Design," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 98, pp. 41~52.
- (11) HKS Inc., 2002, *ABAQUS User's Manual*, Ver. 6.3.
- (12) Zienkiewicz, O. C. and Zhu, J. Z., 1987, "A Simple Error Estimator and Adaptive Procedure for Practical Engineering Analysis," *Int. J. of Numerical Methods for Engineering*, Vol. 24, pp. 337~357.
- (13) Kim, H. J. and Kim, N., 1995, "Remeshing Criterion for Large Deformation Finite Element Analysis Based on the Error Calculation," *KSTP Trans. of Materials Processing*, Vol. 4, No. 1, pp. 92~104.