

부분모델 합성법을 이용한 자동차 외판의 헤밍 공정에 대한 3 차원 유한요소해석

김현영* · 임희택* · 김형중* · 이우홍** · 박춘달**
(2003년 10월 22일 접수)

3-Dimensional Finite Element Analysis of Hemming for Automotive Outer Panels by Part Model Assembling Method

H. Y. Kim, H. T. Lim, H. J. Kim, W. H. Lee and C. D. Park

Abstract

Hemming is the last forming process in stamping and determines external quality of automotive outer panels. Few numerical approaches using 3-dimensional finite element model have been applied to a hemming process due to small element size which is needed to express the bending behavior of the sheet around small die corner and comparatively big model size of automotive opening parts, such as side door, back door and trunk lid etc. In this study, part model assembling method is suggested and applied to the 3-dimensional finite element simulation of flanging and hemming process for an automotive front hood.

Key Words : Finite Element Analysis, Part Model Assembling Method, Hemming Process, Automotive Outer Panel

1. 서 론

플랜징(flanging) 및 헤밍(hemming)은 스탬핑(stamping) 공정의 제일 마지막 단계로서, 버(burr)가 발생하는 날카로운 모서리 부분을 개선시키거나 다른 판재와 결합하는 역할 등을 한다. 자동차 차체에서 사이드 도어(side door), 백 도어(back door), 트렁크 리드(trunk lid)등의 여단이 부품들의 외판과 내판을 결합하는 역할을 하는 플랜징 및 헤밍은 결합부가 깨끗하고 간결하다는 장점을 갖는다. 자동차 패널 자체의 정밀도는 드로잉 공정에서 결정되지만 실제 완성차의 외판 품질은 후속공정인 플랜징 및 헤밍공정에서 결정되는 경우가 많다. 따라서 플랜징 및 헤밍은 자동차의 외판 품질

을 결정하는 중요한 공정으로 자동차의 상품성을 좌우하게 된다. 플랜징은 판재를 90° 굽히는 공정이며, 헤밍은 180° 또는 그 이상으로 시트를 굽히거나 접는 공정이다. 성형 공정 및 장치는 프레스나 굽힘 공정보다 복잡하고 많은 차이점을 가지고 있으며 주로 시행착오에 의해 금형 및 공정이 설계되고 있는 실정이다. 이 때문에 2 차 성형 공정인 플랜징 및 헤밍 공정 해석을 위한 지속적인 연구들이 진행되고 있지만 체계적인 연구들은 부족한 실정이다.

현재 플랜징 및 헤밍을 위한 유한요소해석에 대한 연구가 많이 수행되고 있지만 일반적으로 2 차원 단면 모델을 이용한 변수 연구⁽¹⁻⁵⁾만이 진행되었을 뿐, 전체 모델에 대한 해석은 진행되지 못

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

** 현대자동차㈜

하고 있다. 또한 외판 3차원 모델 해석이라고 해도 특정 부분에 대한 단순 모델을 통한 접근이 대부분이다.⁽⁶⁻⁷⁾

플랜징 및 헤밍 공정의 전체 모델 해석은 다음과 같은 어려움을 갖는다. 첫째, 플랜징 및 헤밍 해석은 바깥쪽의 접히는 모서리부분에서 과도한 굽힘(bending)이 일어나기 때문에 외연적(explicit) 유한요소법을 이용한 성형 해석시 과도한 굽힘을 표현하기 위해서 작은 요소로 모델링 해야 한다. 하지만 요소가 작으면 시간증분이 작아지기 때문에 많은 해석시간이 소요되는 또 다른 문제가 발생된다. 특히 사이드 도어, 백 도어, 트렁크 리드 등은 형상이 복잡하고 크기가 큰 부품으로 상당한 해석시간이 소요되기 때문에 요소가 작을 경우 해석 시간은 큰 부담으로 작용된다. 둘째, 중력처짐(gravity)공정과 드로잉(drawing), 트리밍(trimming), 플랜징, 헤밍의 연속 공정 해석을 수행할 경우 드로잉과 트리밍 공정 후의 요소 상태를 그대로 플랜징, 헤밍 공정 해석에 사용하게 된다. 이 경우 과도한 굽힘이 일어나는 모서리부분에서 요소의 뒤틀림(warpage)등이 발생하여 해석이 어렵고 해석이 되더라도 결과를 신뢰하기 힘들어진다.

본 연구에서는 내·외판 3차원 전체 모델을 이용하였으며 플랜징 및 헤밍 공정을 포함한 연속 공정의 유한요소해석을 수행하였다. 플랜징 및 헤밍 공정을 위한 유한요소해석에서 모델링(modeling) 방안, 요소 재구성 및 맵핑(mapping)방법, 부분모델을 이용한 플랜징 및 헤밍 해석 방안을 제시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 외연적 코드 프로그램인 PAM-STAMP™을 사용하였다. Fig. 1은 연구에서 진행된 부분 모델을 이용한 3차원 전체 모델 해석의 흐름도를 보여준다.

2. 플랜징/헤밍 공정과 유한요소모델링

플랜징 및 헤밍 공정은 일반적으로 다음과 같은 3단계 공정으로 구성된다. 1 단계 공정은 Fig. 2(a)처럼 외판을 지면에서 수직으로 약 90° 굽히는 것이다. 2 단계 공정은 외판을 Fig. 2(b)와 같이 프리헤밍 펀치(pre-hemming punch)에 의해서 약 45°의 각도로 누르는 것이다. 3 단계 공정은 Fig. 2(c)처럼 외판의 프리헤밍된 부분을 180°가 되도록 완전히 접어 내판과 외판을 결합하는 것이다.

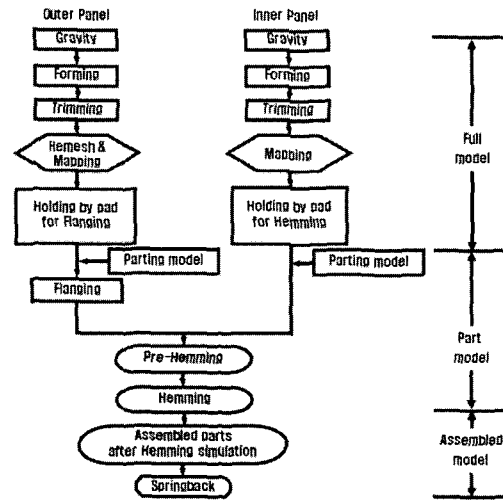
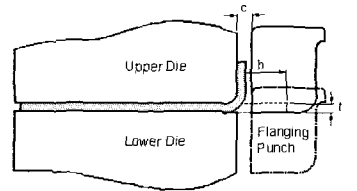
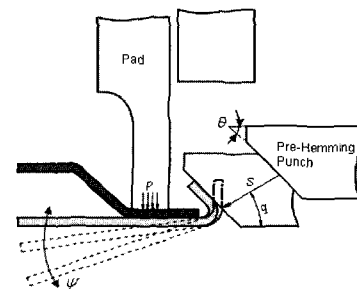


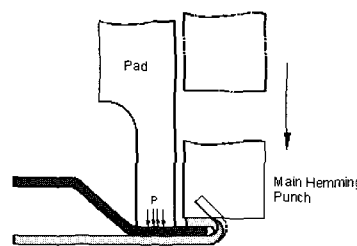
Fig. 1 Flow chart of flanging/hemming process



(a) Flanging process



(b) Pre-hemming process



(c) Hemming process

Fig. 2 Process of flanging/hemming operation

중력처짐, 드로잉, 트리밍의 스탬핑 공정이 완료된 자동차 후드 외관은 Fig. 3(a)처럼 플랜징 코너부의 요소 상태가 균일하지 않고 요소의 크기도 커서 코너부의 굽힘을 해석할 수 없다. 이것은 드로잉 해석만을 고려해 요소를 구성하였기 때문이며 이 요소로 플랜징 해석을 진행하게 되면 굽힘 방향으로 정렬되지 않은 요소의 뒤틀림 등으로 신뢰할 수 없는 결과를 얻게 되거나 해석 자체가 불가능 할 수도 있다. 만약 이 문제를 해결하기 위해 성형 초기부터 플랜징 해석을 고려하여 플랜징 방향으로 정렬된 크기가 작은 유한요소로 해석을 진행한다면 상당한 해석시간이 필요하게 되며 스탬핑 공정 해석 후 요소가 틀의 플랜징 방향으로 정렬된다는 보장도 없을 것이다. 따라서 이 같은 문제가 발생되지 않도록 Fig. 3(b)처럼 1차 성형 해석시에는 일정한 크기의 요소로 구성된 블랭크를 이용하여 해석을 수행하고 플랜징 및 헤밍 해석에서는 코너부의 굽힘을 표현할 수 있도록 굽힘되는 방향으로 정렬된 새로운 요소를 재구성하였다. 그리고 요소를 재구성 후, 맵핑(mapping)을 이용하여 재구성하기 전 해석 결과를 플랜징 해석의 초기 조건으로 반영하였다. 모든 블랭크 요소는 Belytschko-Tsay Shell을 사용하였으며 맵핑은 PAM-STAMP™을 사용하였다. Fig. 4는 맵핑 전/후의 두께변형을 분포를 나타내며 두 결과는 거의 일치하고 있다.

3. 부분모델 합성법을 이용한 3차원 모델 해석

3.1 부분모델 합성법

플랜징 공정에서 외관은 패드에 의해 고정된 후 성형되기 때문에 공정 동안 외관 중 패드에 눌러있는 부분은 이동과 회전이 없는 상태라고 가정하였다. 따라서 패드의 안쪽은 플랜징에 영향을 주지 않을 것이므로 패드를 기준으로 패널 안쪽을 제외한 나머지 외곽에 대한 부분모델을 만들고, 이에 대한 플랜징 해석을 수행하였다 이렇게 전체 모델을 이용하지 않고 부분 모델을 이용함으로써 동시에 여러 부분 모델을 해석할 경우 해석시간을 줄일 수 있다.

이 방법은 외관의 전체모델을 패드로 고정하는 1 단계와 부분 모델로 해석하는 2 단계의 플랜징 공정으로 나눌 수 있다. 1 단계는 패딩되는 동안 외관의 변형을 해석하였으며, 2 단계는 패딩된 외관의 플랜징 부를 부분 모델로 분리하여 플랜

징 공정을 해석하였다. 외관은 패드를 기준으로 안쪽을 분리한 후, Fig. 5처럼 플랜징 부의 반지름과 후드의 곡률 반경에 따라 총 7개의 부분모델로 분리하였다. Table 1과 Fig. 6은 부분 모델을 위한 외관의 분할 기준이다.

부분모델을 이용할 때의 장점은 다음과 같다. 첫째, 전체모델을 총 7개로 분할하였기 때문에 각 부분 모델을 동시에 해석할 수 있다. 둘째, 부분 모델은 위치에 따라 플랜징 반경, 평면곡률(plane curvature)등의 조건이 다르기 때문에 각 부분 모델의 특징적인 문제점을 빨리 찾을 수 있고 문제 해결을 위해 다양한 변수 연구가 가능하다. Table 2는 플랜징 해석의 성형 조건이다. 마찰계수는 스탬핑 성형 해석에서 사용하는 0.15를 그대로 사용하였다.

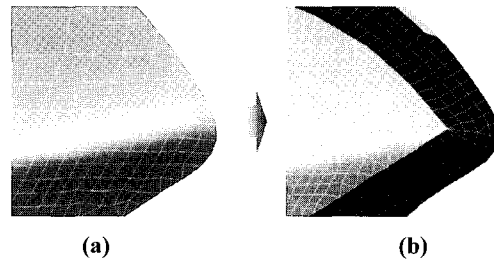


Fig. 3 Mesh regeneration for flanging simulation; (a) before mesh regeneration (b) after mesh regeneration

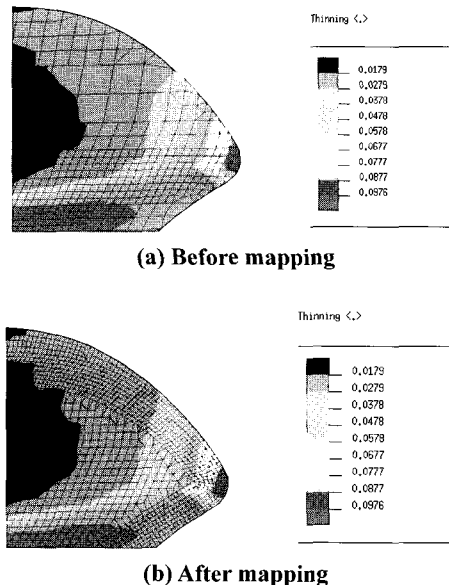


Fig. 4 Thinning distribution after mapping of outer Panel

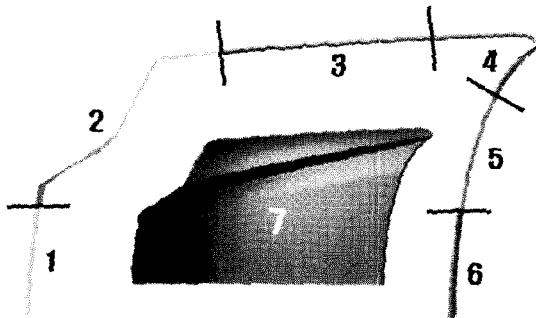
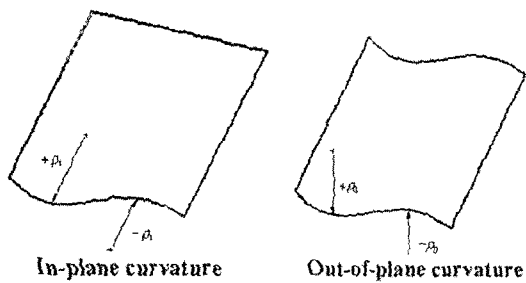


Fig. 5 Part models of outer panel for flanging and hemming simulation

Table 1 Characteristics of part models

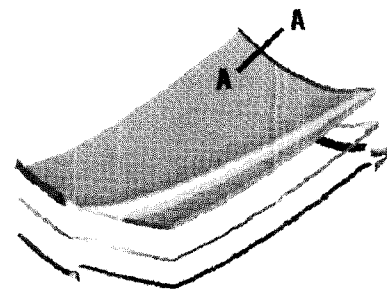
No	Flanging radius	Curvature type
1	2.5 mm	In plane curvature '+'
2	0.3 mm	Edge
3	0.3 mm	Out of plane curvature '-'
4	0.3 mm	Edge
5	2.5 mm	In plane curvature '-'
6	2.5 mm	In plane curvature '-'



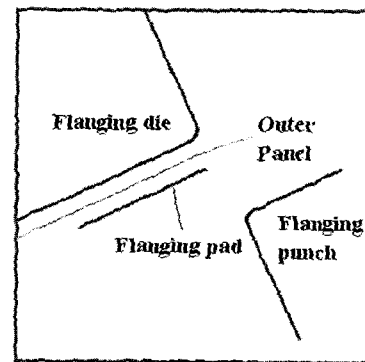
(a) In-plane (b) Out-of-plane
Fig. 6 In-plane and out-of-plane curvature

Table 2 Forming condition for flanging simulation

Flanging punch velocity	2 mm/msec
Flanging pad velocity	1 mm/msec
Flanging punch displacement	40 mm
Friction coeff.	0.15



(a) Tool position



(b) Section A-A

Fig. 7 Tool position for flanging simulation

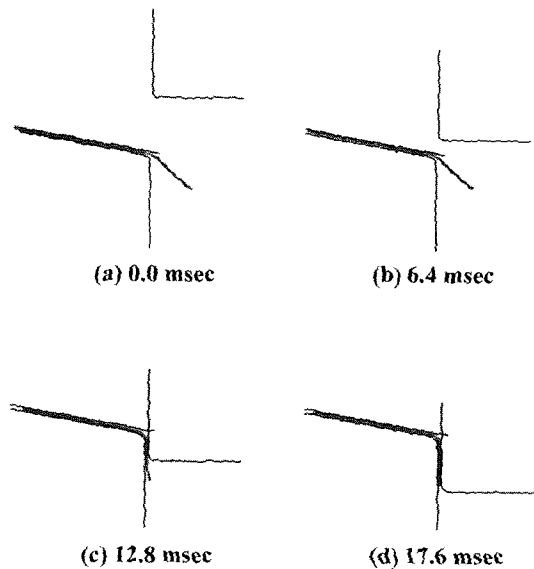


Fig. 8 Section view of flanging process

Fig. 7(a)는 플랜징 해석을 위한 유한요소모델이며, Fig. 7(b)는 유한요소모델의 section A-A 단면의 형상이다. Fig. 8은 플랜징 해석의 연속적인 단면 변형양상을 나타낸다. 각 부분모델에 대한 플랜징 해석 후, 각각의 변형을 조합하여 전체 변형양상을 구할 수 있다. 그러나 각 부분모델의 성형 후의 변형양상은 Fig. 9에 나타낸 것처럼 경계부분 끝단에서 플랜징 길이의 차이가 있음을 확인하였다. 부분모델 합성시 경계부분의 문제점은 각각의 부분모델의 곡률 및 형상의 차이뿐만 아니라, 해석시 부여한 대칭 경계조건으로 인하여 발생된 결과이다.

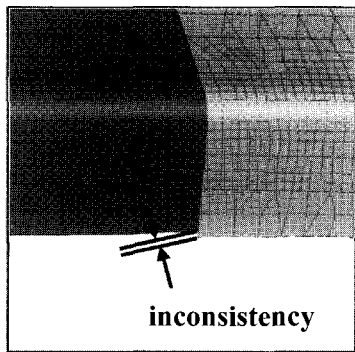
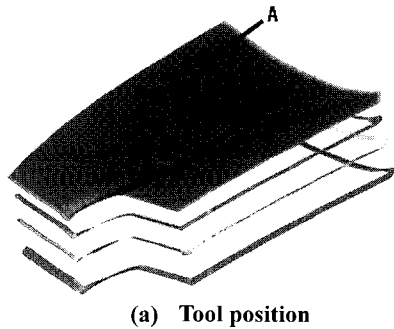
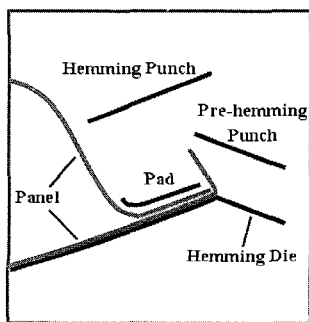


Fig. 9 Boundary inconsistency after flanging simulation



(a) Tool position



(b) Section A-A

Fig. 10 Tool position for hemming simulation

이 문제를 개선하기 위해 각 부분모델의 경계를 연장하여 주위의 부분 모델들과 중복되는 부분이 있도록 해 주었다. 그리고 플랜징 해석 후 부분모델의 중복된 부분은 제거하여 전체 모델을 구성하였다. 이렇게 구성된 전체모델에 각 부분모델의 해석 결과를 맵핑하여 전체 모델을 해석한 것과 같은 결과를 얻을 수 있었다. PAM-STAMP™을 사용하여 맵핑할 경우 전체모델에서 각 부분모델에 해당하는 곳에 해석 결과를 반영할 수 있다.

3.2 헤밍 공정 해석

헤밍공정에서도 플랜징 공정과 마찬가지로 내판을 패드로 고정된 후 성형하기 때문에 안쪽부분의 변형은 없다고 가정하였다. 따라서 외판 내부는 변형이 없을 것이므로 플랜징 된 외판의 부분 모델을 계속 사용하여 헤밍 해석을 수행하였다. 1 단계는 외판과 결합할 내판의 전체 모델을 헤밍 패드로 고정하는 해석을 수행하였다. 2 단계는 1 단계 해석이 끝난 내판을 플랜징 된 외판 부분 모델과 결합한 후 각 부분모델 헤밍 해석을 진행하였다.

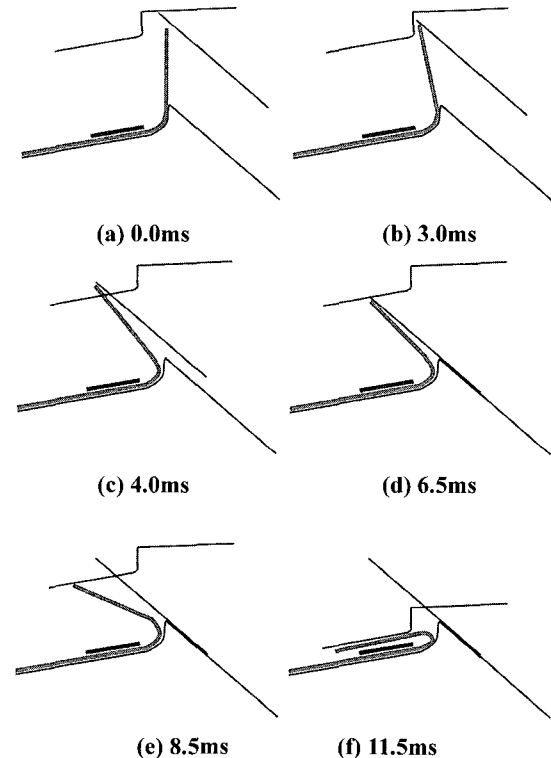
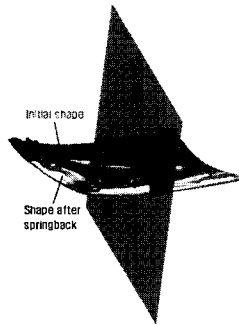


Fig. 11 Section view of hemming process

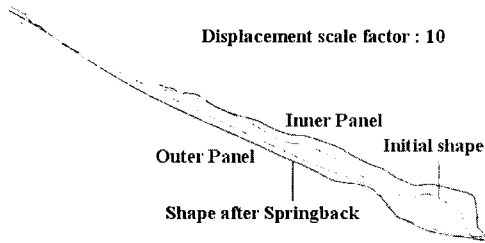
Fig. 10은 헤밍 툴과 단면형상이다. Fig. 11은 부분모델에 대한 헤밍공정의 연속적인 단면 형상 변화를 보여준다. 내판을 외판의 플랜징 부가 180°로 완전히 덮어 헤밍 공정을 완료하였다. 총 7개의 부분 모델을 사용하여 헤밍 해석을 수행하였다.

3.3 스프링백 해석

플랜징 및 헤밍 공정 해석이 완료된 7개의 외판 부분 모델과 내판을 결합하여 3차원 전체 모델을 구성하였다. 내/외판이 결합된 전체 모델을 구성하여 스프링백 해석을 수행하였다. 이때 PAM-STAMP™에서 제공하는 별도의 강성요소를 이용하여 내/외판 결합부의 변위 경계 조건을 표현하였다.⁽⁸⁾



(a) Springback result



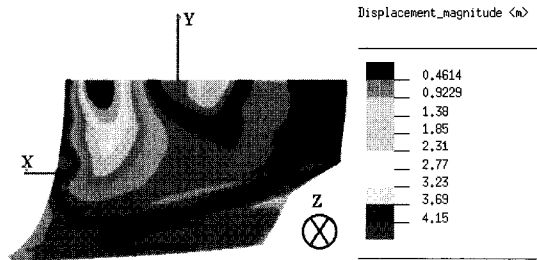
(b) Section view

Fig. 12 Comparison of shape before springback and Shape after springback

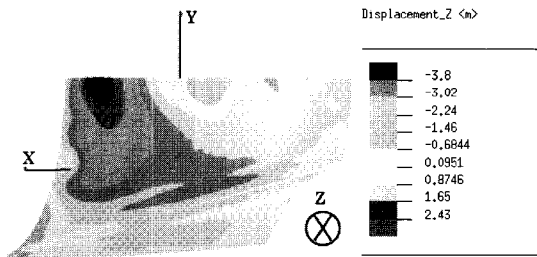
Table 3 Element constitution for springback simulation

	Outer panel	Inner panel
No. of element	133,956	135,004
Element min. size	0.5 x 0.5 (mm x mm)	2 x 2 (mm x mm)

Fig. 12(a)는 전체 모델의 스프링백 해석 전 형상과 스프링백 해석 후 형상을 오버랩 시킨 것이다. Fig. 12(b)는 Fig. 12(a)의 단면에 대한 스프링백 해석 전 형상과 스프링백 해석 후 형상을 비교한 것이다. Table 3은 스프링백 해석시 구성된 내판과 외판의 요소 총 개수와 크기를 나타낸다. Fig. 13(a)는 전체 스프링백 크기를 보여준다. 후드의 뒷부분 가운데가 약 4.25mm로 가장 크게 나타난다. 이 스프링백의 경향은 Fig. 13(b)에서 보듯이 Z방향 스프링백과 일치하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 13(a)에서 최대 스프링백이 발생하는 지점을 Fig. 13(b)에서 살펴보면 음의 Z방향으로 탄성회복이 나타나는 것을 알 수 있다. 이 두 결과로 후드의 뒷부분 안쪽이 음의 Z방향으로 최대 스프링백이 발생하는 것을 예상할 수 있었다. 이 결과는 실험을 통하여 증명하지는 않았지만 실제 후드에서 발생하는 스프링백과 같은 경향을 가지고 있음을 확인하였다.



(a) Displacement magnitude (mm)



(b) Displacement Z (mm)

Fig. 13 Comparison of displacement magnitude and displacement Z

4. 결론

본 연구에서는 "자동차 외판의 3차원 전체 모델을 이용하여 플랜징 및 헤밍공정에 대한 유한요

소해석을 수행하였으며, 특히 요소의 재구성 및 맵핑방법, 부분모델 합성법을 이용한 플랜징 및 헤밍 해석 방안을 제시하였다. 부분모델 합성법을 적용한 3차원 전체 모델의 플랜징 및 헤밍 해석 방법의 정립을 통해 중력처짐부터 스프링백까지 연속적인 성형 공정에 대한 해석 가능성을 확인하였다.

(1) 요소의 재구성과 맵핑 기법을 이용하여 스탬핑 해석과 연계한 플랜징 및 헤밍 해석을 수행하였다. 플랜징 및 헤밍 해석에서는 스탬핑 해석 결과로부터 얻어진 요소시스템을 사용할 수 없기 때문에 새로운 요소시스템의 구성이 필요하다. 이때 맵핑 기법을 이용하여 두께분포 및 변형률 등의 스탬핑 공정의 결과를 플랜징 및 헤밍 해석에 반영하였다.

(2) 플랜징 및 헤밍 공정을 위한 3차원 유한요소해석에서 모델링(modeling) 방안, 요소 재구성 및 맵핑(mapping)방법, 부분모델합성을 이용한 플랜징 및 헤밍 해석 방안을 제시하였다

(3) 자동차 프론트 후드의 플랜징 및 헤밍공정 해석 후, 7개의 부분모델을 합성하여 3차원 전체 모델을 구성하였다. 이 전체 모델을 이용하여 스프링백 해석을 수행하였으며, 해석 결과는 실제 결과와 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Mats Svensson and Kjell Mttiasson, 2000, "Simulation

of hemming of automotive body components with the explicit FE-method.", European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelon.

(2) A. Müderrisoğlu, T. Altan, et. al., 1996, "Bending, Flanging, and Hemming of Aluminium Sheet-An Experimental Study", J. of Mat 'Is Proc. Tech., vol. 59, pp. 10~17.

(3) H. Livatyali, A. Muderrisoglu, M.A. Ahmetoglu, N. Akgerman, G.L. Kinzel, T. Altan, 2000, "Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design, Journal of processing Technology 98, pp. 41~52.

(4) 김권희, 한규희, 권태훈, 1999 "Elastic Springback in Hemming Process", Proc. of 5th HANPAM, Hankook ESI, pp. 399~404.

(5) 안덕찬, 김권희, 이경돈, 인정재, 2000, "자동차 패널의 헤밍 공정 설계에 관한 연구", 한국소성가공학회지, pp. 624~630.

(6) 주식재, 최해석, 1998, "도어 내외판 헤밍 시뮬레이션", MARC User's Forum 98, pp. 147~153.

(7) Mats Sevansson, Kjell Mattiasson, 2002, "Three-dimensional of hemming with explicit FE-method", Journal of Materials Processing Technology 128, pp. 142~154.

(8) PAM-STAMP Reference Manual, version 2000, PAM-SYSTEM INTERNATIONAL S.A.