

유한요소해석에 의한 자동차 도어패널의 헤밍 결함 평가

서오석¹ · 전강윤¹ · 이철홍² · 김현영[#]

Numerical Evaluation of Hemming Defects Found on Automotive Door Panels

O. S. Seo, K. Y. Jeon, C. H. Rhie, H. Y. Kim

(Received April 7, 2015 / Revised April 22, 2015 / Accepted May 4, 2015)

Abstract

Hemming is used to connect two sheet metal components by folding the edge of an outer panel around an inner panel to create a smooth edge. The minimization of hemming defects is critical to the final quality of automobile products because hemming is one of the last operations during fabrication. Designing the hemmed part is not easy and is influenced by the geometry of the bent part. Therefore, the main problem for automotive parts is dimensional accuracy since formed products often deviate geometrically due to large springback. Few numerical approaches using 3-dimensional finite element model have been applied to hemming due to the small element size which is needed to properly capture the bending behavior of the sheet around small die corner and the comparatively big size of automotive opening parts, such as doors, hoods and deck lids. The current study concentrates on the 3-dimensional numerical simulation of hemming for an automotive door. The relationship between the design parameters of the hemming operation and the height difference defect is shown. Quality improvement of the automotive door can be increased through the study of model parameters.

Key Words : Hemming, Pre-hemming, Main-hemming, Height Difference, Springback, Numerical Analysis

1. 서론

자동차의 외판(outer panel)은 드로잉(drawing), 트리밍(trimming), 플랜징(flanging), 헤밍(hemming) 등 일련의 공정을 거쳐 완성된다. 자동차 패널 차체의 정밀도는 드로잉 공정에서 결정되지만 실제 완성차의 외판 품질은 후속공정인 헤밍 공정에서 결정된다[1]. 헤밍이란 성형 공정의 제일 마지막 단계로서, 프리헤밍(pre-hemming)과 메인헤밍(main-hemming)으로 구성되며 성형된 외판과 내판(inner panel)을 결합하거나 외판 끝단을 접는 공정으로 부품의 강성을 높이고 외판 품질을 확보할 수 있다. 따라서 상품성을

좌우하게 되며 절단면에서 발생하는 버(ber)나 날카로운 부분으로부터 승객의 안전을 보호하기 때문에 도어(door)나 후드(hood), 트렁크 리드(trunk lid)와 같이 무빙 파트에 적용된다. 하지만 헤밍 시 판재는 두께 방향으로 인장과 압축이 동시에 발생하게 되고 인장과 압축력은 굽힘 후의 탄성회복(springback)을 일으키는데 이러한 현상으로 제품의 치수정밀도가 저하되며 외판의 미세굴곡을 발생 시키는 원인이 된다. 또한 헤밍 부의 형상 및 플랜지(flange)의 길이에 따라 국부적인 굽힘 강성이 달라져서 원하는 형상으로 정밀하게 결합하는 것이 어렵다. 이러한 문제는 제품 성능에 관계없이 경쟁력을 떨어뜨

1. 강원대학교 기계의용공학과

2. 현대자동차

Corresponding Author : Mechanical & Biomedical Engineering,
Kangwon National University, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

리며 외관 품질을 저하시키는 요인이 된다. 대표적인 품질 결함에는 외판의 바깥쪽 표면에서 끝 부분이 아래로 처지는 턴다운(turn-down), 위로 오목하게 들어가는 워프(warp), 플랜지 위치로부터 안쪽으로 밀려 들어가는 롤인(roll-in)등이 있다. 이러한 결함을 해결하고 품질 향상을 위해 자동차 제조업체는 아직까지 경험으로 축적된 데이터를 바탕으로 문제를 해결하고 있으며 최근에는 해석을 통한 문제 접근을 시도 하고 있다. 국내에서는 2000년대 초반부터 플랜징 및 헤밍 유한요소해석에 대한 연구가 수행되고 있다. 김현영[2] 외 4명은 자동차 외판의 플랜징과 헤밍 유한요소해석을 수행하였고, 특히 요소의 재구성 및 mapping 방법, 부분모델을 이용한 해석방안에 대하여 논의하였다. 또한 부분모델 합성법을 적용하여 중력 처짐부터 스프링백까지 연속적인 성형 공정에 대한 해석 가능성을 확인하였다. 김형중[3] 외 5명은 요소망, 접촉조건 등 헤밍 공정과 품질의 정밀한 예측에 요구되는 해석 기법을 확립하고 주요 공정변수가 헤밍 품질에 미치는 영향성을 분석하기 위해 변수연구를 수행하였다. 이선봉[4] 외 2명은 헤밍 결함을 줄이기 위한 형상변화의 정량적인 분석과 공정설계 방법을 제시하였다. 국외에서는 H. Livatyali [5] 등은 헤밍공정 시 발생하는 결함 중 롤인과 돌아웃 그리고 주름 발생을 예측 하였으며 서로 상호 작용하는 요소를 평가하였다. Guohua Zhang [6] 등은 유한요소해석을 통해 헤밍 해석을 수행하였고 단순한 모델을 이용해 실험계획법을 적용하여 헤밍 공정에 미치는 주요 인자를 확인하였다. 그리고 헤밍 공정에서 발생하는 메커니즘을 설명하고 헤밍공정의 결함을 줄이기 위해 유한요소법 기반으로 개발 된 최적화 방법을 제시하였다. 하지만 이러한 연구는 2차원 단면 모델을 이용한 변수연구만이 진행 되었을 뿐, 전체 모델에 대한 해석은 진행되지 못 하였으며 외판 3차원 모델 해석이라고 해도 특정 부분에 대한 단순 모델을 통한 접근이 대부분이다. 이러한 이유는 헤밍 시 바깥쪽으로 접히는 모서리 부분에서 판재의 두께보다 작은 반경을 갖는 과도한 굽힘이 일어나기 때문이다. 외연적 알고리즘(explicit algorithm) 유한요소법을 이용한 헤밍 해석 시 이를 표현하기 위해서 작은 요소로 모델링을 진행하는데 요소가 작으면 시간증분이 작아지기 때문에 많은 해석시간이 소요된다. 특히 도어 및 트렁크 리드 등은 형상이 복잡하고 크기가 큰

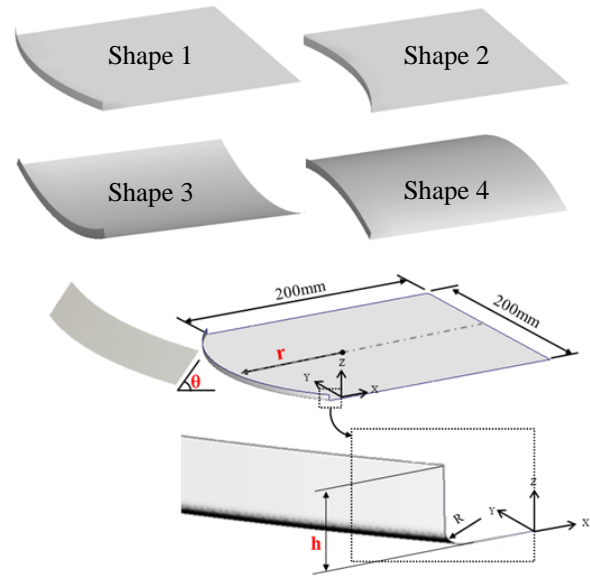


Fig. 1 The simple model shape for case study

Table 1 Parameters for case study of hemming

Symbol	Parameter value
h	5, 7, 9mm
r	150, 200, 250, 300, 350, 400mm
θ	40, 50, 60, 70°

부품으로 상당한 해석 시간이 소요되는 문제를 갖고 있다. 또한 프리 헤밍과 메인 헤밍 등 연속 공정 해석 수행 시 굽힘 부위에서 요소의 뒤틀림 등이 발생하여 해석이 어렵고 해석이 되더라도 결과를 신뢰하기 힘들다.

본 연구에서는 프리헤밍, 메인헤밍 그리고 스프링백 공정을 연속적으로 수행하기 위한 3차원 유한요소해석 모델링 방안을 제시하여 자동차 도어의 헤밍 해석을 수행하였다. 플랜지 길이, 외판의 곡률형상 그리고 프리헤밍의 면 각에 대한 헤밍 변수 연구를 진행하고 헤밍 결함 중 단차(height difference)에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과를 도어 외판에 적용하여 헤밍 해석을 수행 하였고 단차 측정값과 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 또한 단차를 줄이기 위한 방안을 제시하였다.

2. 헤밍 공정 변수 연구

2.1 공정 변수

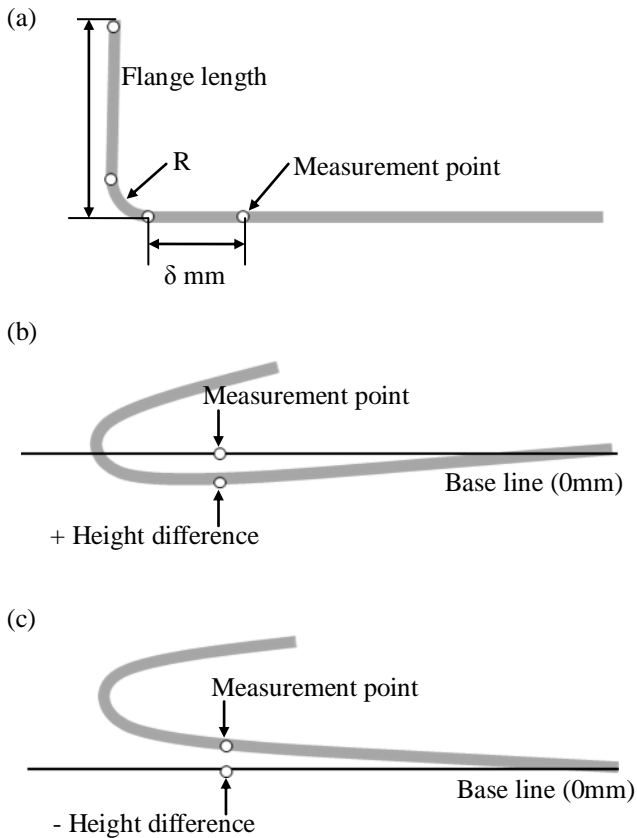


Fig. 2 The measurement method of height difference (a) and definition of height difference: + height difference (b) and - height difference (c)

헤밍 결함은 차체 성능에 기계적인 영향을 미치지 않으나, 완성차의 외관 품질을 좌우한다. 본 연구에서는 외관의 끝부분이 위로 들리고, 아래로 처지는 결함을 단차라고 정의하였다. 이러한 결함의 원인은 연속 공정에 의해 발생하는 헤밍부의 복잡한 잔류응력과 탄성회복 그리고 플랜지 길이 및 다이 반경 등 제품의 기하학적 형상이 주요 원인인 것으로 알려져 있다. 따라서 단차를 예측하기 위해 4개의 패널 형상에 대해 변수 연구를 수행하였다. 변수로는 플랜지 길이(h), 헤밍 부 곡률 형상(r), 프리 헤밍 펀치의 면 각(Θ)이다. 플랜지 길이는 2mm 간격으로 3단계, 헤밍 부 곡률은 50mm 간격으로 6 단계, 프리 헤밍 펀치의 면각은 10° 간격으로 4단계로 진행하였다. 패널 형상과 공정 변수를 Fig. 1에 나타내었고, Table 1에 변수값을 나타내었다.

각 변수들이 단차에 미치는 영향을 조사하기 위해 $h=7\text{mm}$, $r=300\text{mm}$, $\Theta=50^\circ$ 를 기준으로 하여 변수 연구

를 수행하였다. 단차는 플랜징 후 형상에서 곡률을 제외한 δmm 떨어진 지점에서 측정하였고 기준선 아래로 처지면 + 단차, 기준선 위로 들리면- 단차라 정의 하였다. 단차의 정의와 측정 방법을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 변수 연구 결과

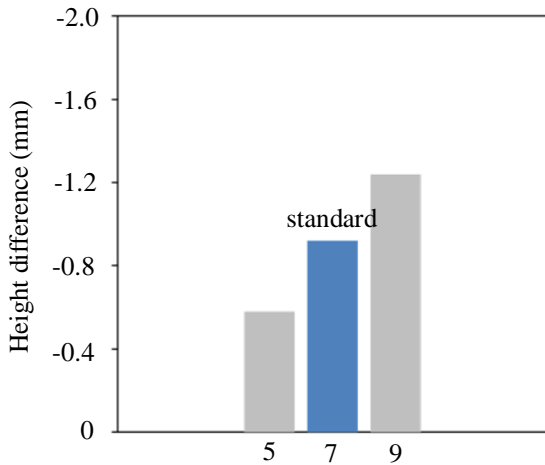
헤밍 후 각 인자에 따른 영향성을 비교하기 위해 헤밍 부에서의 응력 분포를 확인하였고, 응력 분포에 따라 발생하는 단차 정도를 비교하였다.

비교 결과 형상에 따라 단차의 크기는 다르게 나타났지만 경향은 동일하였다. 헤밍 부 곡률 형상과 프리헤밍 펀치의 면 각도에 대하여 뚜렷한 경향을 보이지 않았지만, 플랜지 길이에 대해서는 길이가 길어질수록 단차가 증가하는 경향을 보였다. 플랜지 길이에 따른 단차량 변화의 원인을 분석하고자 응력분포를 비교하였으며 플랜지 길이가 길어 질수록 외판의 응력 분포 면적이 증가하는 것을 확인 하였다. 따라서 응력이 분포하는 면적이 클수록 헤밍 후 큰 단차 발생을 유도하였다. 또한 응력이 작게 나타나는 구간에서도 탄성 회복량이 많아 단차가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 변수에 따른 단차량을 비교하여 Fig. 3에 나타내었고, 응력 분포를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

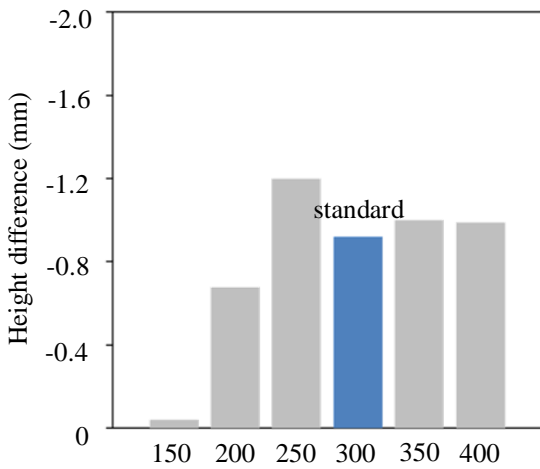
3. 헤밍 공정 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델링 및 경계조건

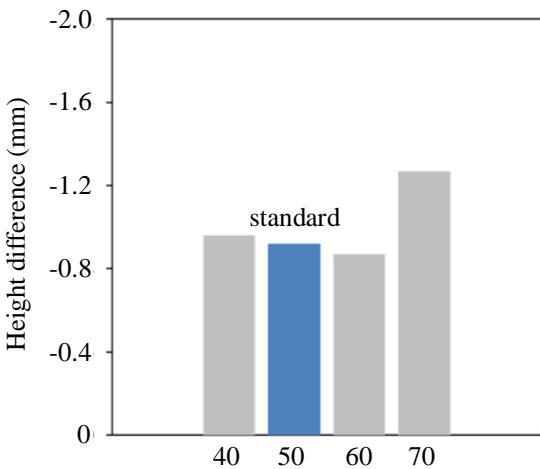
해석에 사용된 모델은 자동차 프론트 도어(front door)다. 플랜징 된 외판을 사용하였고 프리헤밍, 메인헤밍 그리고 스프링백 순서로 해석을 진행하였다. 외판의 플랜징 후 곡률은 Fig. 5와 같이 0.3mm 로 작기 때문에 곡률을 표현하기 위해서는 더 작은 요소 크기가 요구된다. 따라서 0.1mm 요소로 곡률을 표현하였고 단차에 영향을 미치는 플랜지부와 단차 측정 영역은 0.2mm 로 균일하게 요소를 구성하였다. 그리고 헤밍의 영향이 미치지 않는 구간은 점차 요소 크기를 크게 하여 최대 10mm 의 요소를 구성하여 해석 시간을 고려하였다. 또한 내판도 단차에 영향을 미치므로 헤밍 부 구간을 3mm 로 균일하게 요소를 구성하였다. 따라서 외판은 요소가 206,137개이며 내판은 6,843개 이다. 다이(die), 홀더(holder), 펀치(punch)는 강체(rigid body)로 구성하였다.



(a) Flange length (mm)



(b) Panel radius (mm)



(c) Pre-hemming punch face angle (°)

Fig. 3 The comparison of height difference in accordance with the process parameters: flange length (a), panel radius (b) and pre-hemming punch face angle (c)

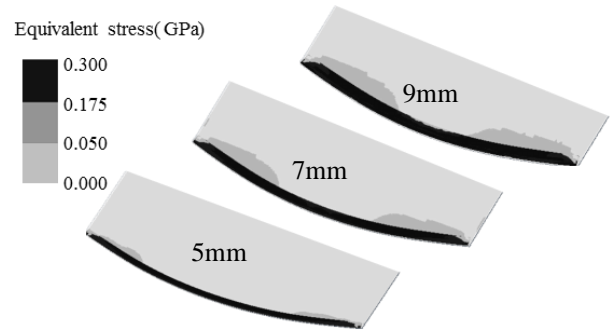


Fig. 4 Comparison of stress distribution for case study

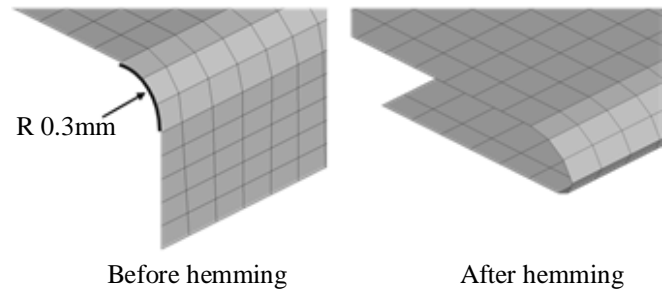


Fig. 5 The finite element modeling of hemming R part

Table 2 Parameters for Swift law [$\sigma=K(\epsilon_0+\epsilon_p)^n$]

Outer panel	$K=0.89(\text{GPa}), n=0.212, \epsilon_0=0.0066$
Inner panel	$K=0.52(\text{GPa}), n=0.221, \epsilon_0=0.009$

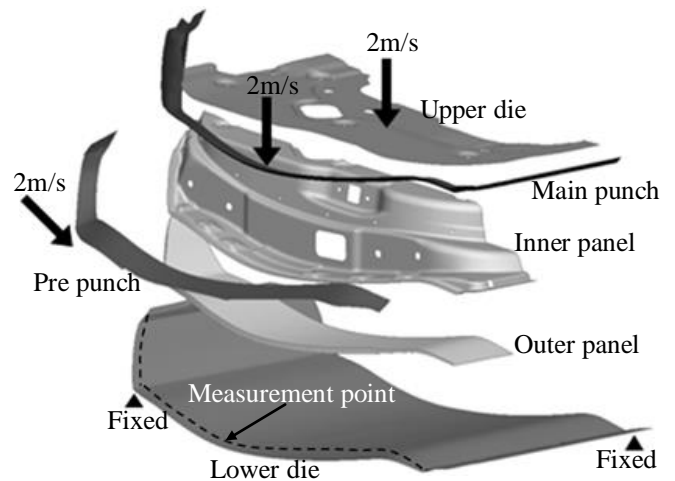


Fig. 6 The boundary condition of the hemming process

헤밍 공정에 사용된 재료는 외판 DP490과 내판 SGACEN이며 두께는 각각 0.75mm와 1.4mm 이다. 외판과 내판의 재료 물성 데이터는 현대자동차에서

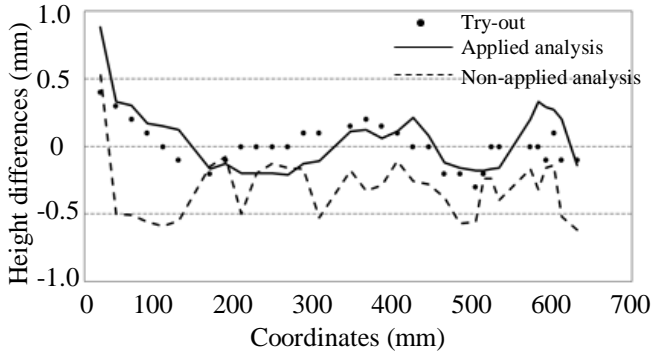


Fig. 7 The result of verification analysis

제공하였으며 Swift 식을 사용하여 해석에 적용하였다. 해석에 사용된 재료상수 값은 Table 2와 같다. 경계조건은 Fig. 6과 같으며 펀치의 속도는 2m/s 이다. 프리헤밍 펀치의 진입각은 50° 이다. 해석에 사용된 프로그램은 외연적 알고리즘 프로그램인 PAM-STAMP2012[7]가 사용되었다.

3.2 헤밍 해석 정도 검증

플랜징 공정을 거친 도어 외판은 헤밍 부 라인을 따라 미세한 단차가 발생한다. 따라서 1/10mm의 정밀도를 가진 측정장비를 이용해 플랜징 공정을 거친 도어 외판의 단차를 측정하였고, 이를 이용해 플랜징 후 단차가 헤밍 공정에 미치는 영향도를 평가하기 위해 단차를 적용한 해석과 적용하지 않은 해석을 비교하여 헤밍 해석의 정도 평가를 실시하였다. 플랜징 후 단차를 적용하지 않은 모델의 해석결과와 시제품 측정값의 상관관계를 분석한 결과 36.4%이고, 플랜징 후 단차를 적용한 모델과 시제품 측정값의 상관관계를 분석한 결과 63.0%로 단차를 적용한 결과가 좋아지는 것을 확인 하였다. 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

4. 헤밍 품질 개선 해석

변수연구를 통해 헤밍 공정 시 성형품질에 미치는 영향을 확인한 결과 플랜지 길이가 단차에 가장 영향력 있는 인자임을 확인하였다. 따라서 단차가 크게 발생하는 구간의 플랜지 길이를 Fig. 8과 같이 3가지 변수로 변경하였고 플랜징 후 도어 외판에 단차를 적용하여 유한요소 모델을 구성하고 품질 개선 해석을 실시하였다. 변수 1은 구간 420~580에서 플랜지 길이의 최소길이를 6mm가 되도록 곡선

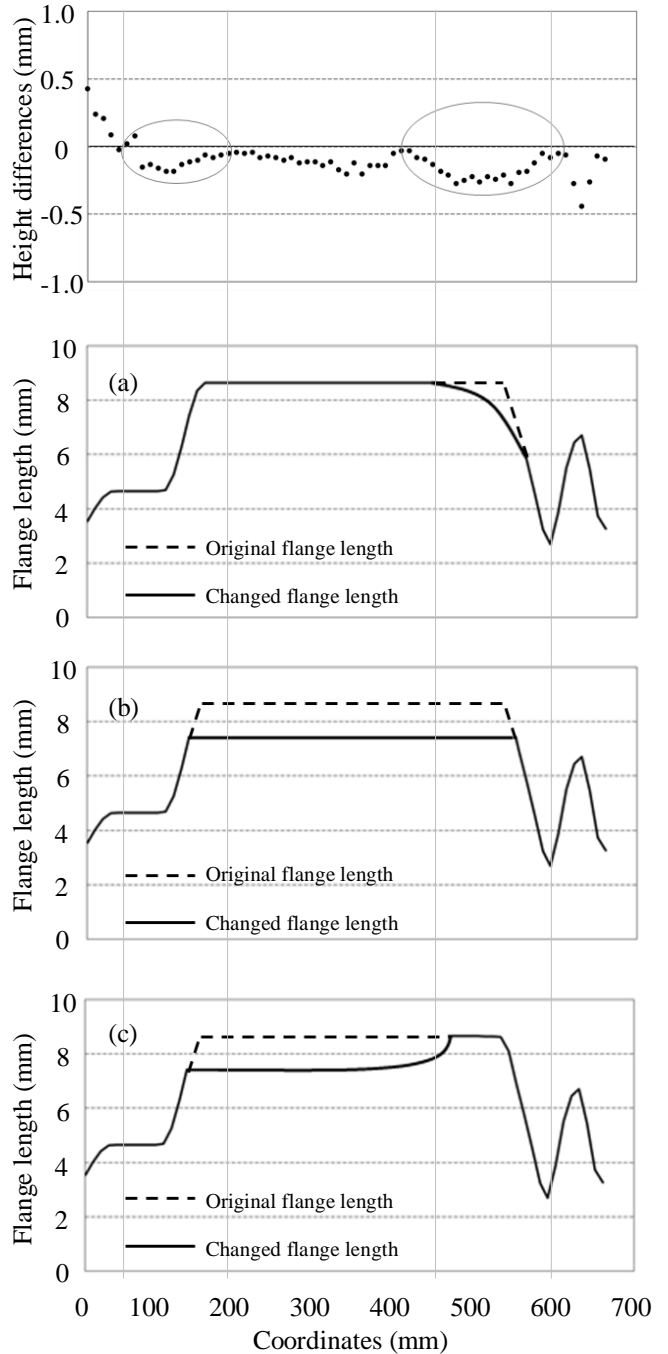


Fig. 8 Change of the flange length: case 1 (a), case 2 (b) and case 3 (c)

으로 변경하였고, 변수 2는 플랜지 길이가 8.66mm로 일정한 구간을 7mm로 변경하였다. 변수 3은 130~350구간의 플랜지 길이를 7mm로 변경하였다. 플랜지 길이를 변경 후 동일한 조건으로 해석을 진행하였다. 변수 1 해석결과 단차가 크게 나타난 구간인 420~580 과 50~170 구간에서 단차가 감소하였

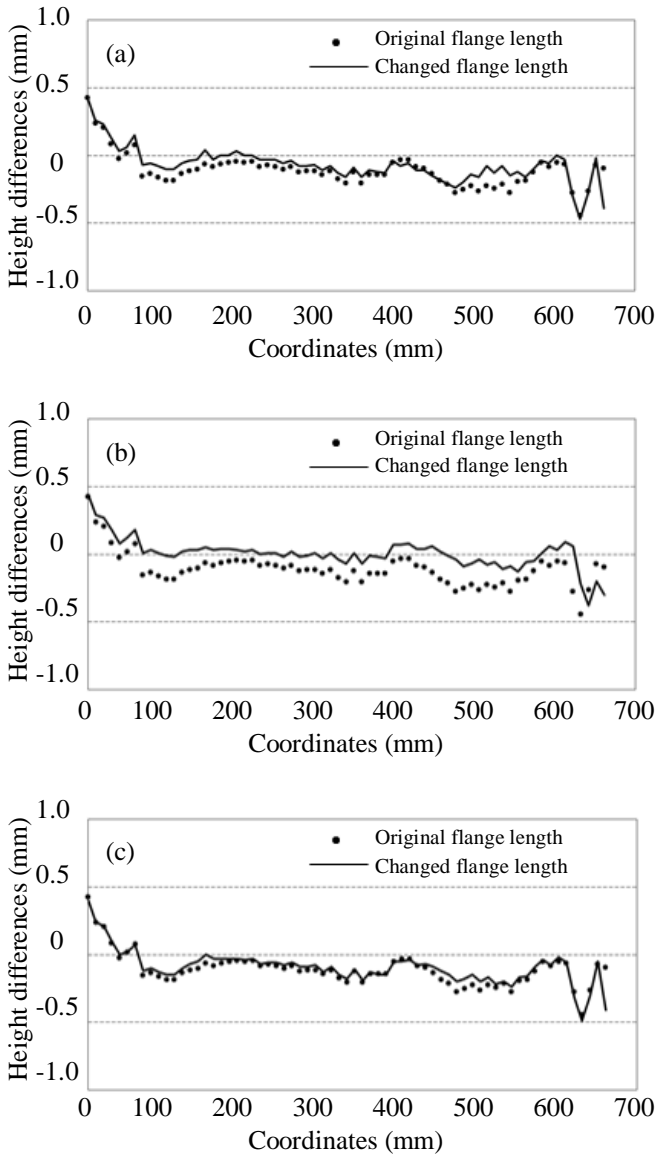


Fig. 9 Comparison of the analysis results of original flange length and changed flange length: case 1 (a), case 2 (b) and case 3 (c)

고, 변수 2는 전구간에서 단차가 감소하는 경향을 나타내었다. 변수 3은 420~580 구간에서 단차가 감소 하였다. 따라서 플랜지 길이의 변경에 따라 단차량을 감소 시킬 수 있었으며 플랜지 길이를 전체적으로 줄인 b의 결과가 가장 작은 단차량을 보였다. 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 도어 헤밍 시 직선 부 및 곡선 부

에서 발생하는 헤밍 품질 불량원인을 분석하기 위해 자동차 도어 헤밍 공정의 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 3차원 유한요소 해석 시 해석 시간을 단축하기 위한 유한요소 모델링 방안을 제시하였으며 시제품 결과와 비교하여 헤밍 해석의 신뢰성을 평가하였다. 또한 변수연구를 통해 단차 결함에 미치는 인자를 확인하였고 이를 통해 헤밍 품질 개선안을 제시하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 3차원 유한요소해석을 통하여 헤밍 공정을 구현하였으며 모델링 방법 및 해석 기법을 제안하였다.

(2) 플랜지 길이, 헤밍 부 면곡률, 프리 헤밍 펀치의 면 각도의 영향인자를 분석하기 위해 변수연구를 수행하였으며 플랜지 길이가 가장 큰 영향성을 보였다.

(3) 헤밍 해석 결과의 정도 검증을 위해 시제품과 비교하였다. 플랜징 후 단차 적용 결과와 단차 미적용 결과를 비교하였고 적용한 해석 결과가 시제품 결과와 유사함을 확인하였다.

(4) 자동차 도어의 헤밍 해석 시 플랜징 후의 단차를 고려하고 플랜지의 길이 변경에 따라 헤밍 품질 개선의 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 현대자동차와 한국연구재단 Bk21 플러스 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(강원대학교, No. 22A20130012864).

REFERENCES

[1] P. G. Kim, S. H. Park, 2012, A Study on Improvement of Bending Quality of Hemmed Plates in Sheet Metal Forming, J. Kor. Soc. Precision Eng., Vol. 29, No. 12, pp. 1360~1367.
 [2] H. Y. Kim, H. T. Lim, H. J. Kim, W. H. Lee, C.D. Park, 2004, 3-Dimensional Finite Element Analysis of Hemming for Automotive Outer Panels by Part Model Assembling Method, Trans. Mater. Process., Vol. 13, No. 2, pp. 115~121.
 [3] H. J. Kim, W. M. Choi, J. K. Lim, C. D. Park, W. H. Lee, H. Y. Kim, 2004, Parametric Study of the

- Hemming Process by Finite Element Analysis, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 28, No. 2, pp. 149~157.
- [4] S. B. Lee, D. H. Kim, B. M. Kim, 2002, Hemming Process Design of the Permalloy Shielding Can for the Stiffness and Shape Accuracy, J. Kor. Soc. Precision Eng., Vol. 19, No. 5, pp. 29~35.
- [5] H. Livatyali, T. Laxhuber, T. Altan, 2004, Experimental Investigation of Forming Defects in Flat Surface-convex Edge Hemming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 146, No. 1, pp. 20~27.
- [6] G. Zhang, S. Jack Hu, X. Wu, 2003, Numerical Analysis and Optimization of Hemming Processes, J. Manufac. Processes, Vol. 5, No. 1, pp. 87~96.
- [7] www.esi-group.com, PAM-STAMP2012
- [8] P. Jimbert, I. Eguia, I. Perez, M. A. Gutierrez, I. Hurtado, 2011, Analysis and Comparative Study of Factors Affecting Quality in the Hemming of 6016T4AA Performed by Means of Electromagnetic Forming and Process Characterization, J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 5, pp. 916~924.
- [9] 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, J. Mater. Process. Technol., Vol. 98, No. 1, pp. 41~52.
- [10] S. Li, X. Hu, Y. Zhao, Z. Lin, N. Xu, 2011, Cyclic Hardening Behavior of Roller Hemming in the Case of Aluminum Alloy Sheets, Mater. Des., Vol. 32, No. 4, pp. 2308~2316.
- [11] H. J. Kim, H. C. Jung, J. K. Lim, 2005, Study on the Evaluation and Prediction of Micro-Defects in the Hemming Process, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 6, pp. 533~540.
- [12] G. H. Kim, S. H. Lee, B. M. Kim, 2008, The Die Design of STS304 Bezel Frame for The Strength Reinforcement in Hemming Process, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 6, pp. 436~442.
- [13] D. J. Kim, Y. J. Song, H. Chung, Y. H. Han, 2006, Automatic Generation of Timing Chart for Car Panel Hemming Die Design, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 7, pp. 496~503.
- [14] D. C. Ahn, K. D. Lee, J. J. Yin, K. H. Kim, 2000, A Study on the Design of Hemming Process for Automotive Body Panels, Trans. Mater. Process., Vol. 9, No. 67, pp. 624~630.
- [15] N. Le Maoût, S. Thuillier, P. Y. Manach, 2010, Drawing, Flanging and Hemming of Metallic Thin Sheets: A Multi-step Process, Mater. Des., Vol. 31, No. 6, pp. 2725~2736.
- [16] N. Le Maoût, S. Thuillier, P. Y. Manach, 2009, Aluminum Alloy Damage Evolution for Different Strain Paths-Application to Hemming Process, Eng. Fracture Mech., Vol. 76, No. 9, pp. 1202~1214.
- [17] Z. Hamedon, K. Mori, Y. Abe, 2014, Hemming for Joining High Strength Steel Sheets, Procedia Eng., Vol. 81, pp. 2074~2079.
- [18] H. Livatyali, S. J. Larris, 2004, Experimental Investigation on Forming Defects in Flat Surface-Convex Edge Hemming: Roll, Recoil and Warp, J. Mater. Process. Technol., Vol. 153-154, pp. 913~919.