

차량외판 프레스 헤밍공정의 유한요소해석 및 공정변수 최적화

김지훈¹ · 곽종환¹ · 김세호[#] · 주용현² · 신현식²

Finite Element Analysis and Parameter Optimization for the Press Hemming of Automotive Closures

J. H. Kim, J. H. Kwak, S. H. Kim, Y. H. Ju, H. S. Shin

(Received August 21, 2015 / Revised November 16, 2015 / Accepted November 20, 2015)

Abstract

In the current study, finite element analysis was conducted for the press hemming of automotive panels in order to predict various hemming defects such as roll-in and turn down. The analysis used the exact punch movement based on the cam location and considered the sealer between the inner and outer panels with an artificial contact thickness. The analysis results quantify the hemming defects especially at the flange edge in the matching region of the head lamp. A design of experiments along with the parameter study was used to obtain the optimum process parameters for minimizing hemming defects. The optimization process selects the intake angle, bending angle of the hemming punch, and the flange height of the outer panel. The optimum design process determines an appropriate tool angle and flange height to reduce the roll-in and turn-down as compared to the initial design.

Key Words : Press Hemming, Finite Element Analysis, Optimization, Process Parameter, DOE

1. 서 론

자동차의 차체 외판부를 구성하는 도어(door), 후드(Hood), 트렁크 리드(trunk lid) 등 부품들의 생산공정에 외판과 내판을 결합하는 프레스 헤밍(press hemming) 공정이 사용되며, 박판 성형품의 결합에 쓰이는 점 용접 및 선 용접에 비해 결합부가 간결하며, 안전성 측면에서 우수한 품질을 보인다. 부품의 형상 정밀도는 드로잉 공정에서 결정되지만 차량의 외판품질을 좌우하는 지표인 외판의 간격 및 단차 등은 후속공정인 플랜징과 헤밍공정의 영향이 크다[1, 2].

프레스 헤밍은 통상적으로 Fig. 1에 도시한 바와 같이 플랜징(flanging), 프리 헤밍(pre-hemming), 메

인 헤밍(main-hemming)의 3단계의 공정으로 이루어진다. 대표적인 불량으로는 Fig. 2와 같이 굽힘 부분이 말려들어가는 롤인(roll-in), 판재가 아래로 처지는 턴다운(turn-down)과 헤밍부의 내측부분이 국부적으로 오목해지는 워프(warp) 등이 있다[3]. 헤밍불량은 제품 형상정밀도에 결정적인 영향을 미치나 헤밍공정에 관련된 공정변수가 매우 많으며, 그 영향이 비선형적이므로 최적의 공정변수를 구하여 불량을 최소화하는 방안이 필요하다.

본 논문에서는 롤인, 턴다운 등 헤밍 결합의 예측을 위한 헤밍 공정의 유한요소해석을 실시하였다. 헤밍공정에서 발생하는 불량의 최소화를 위해 형상결합에 영향을 미치는 변수인 금형 진입각(intake angle), 굽힘각(bending angle), 플랜지 높이(flange

1. 대구대학교 대학원 기계공학과

2. 한국GM(주) 생산기술연구소

Corresponding Author : School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University, E-mail:mvksh@daegu.ac.kr

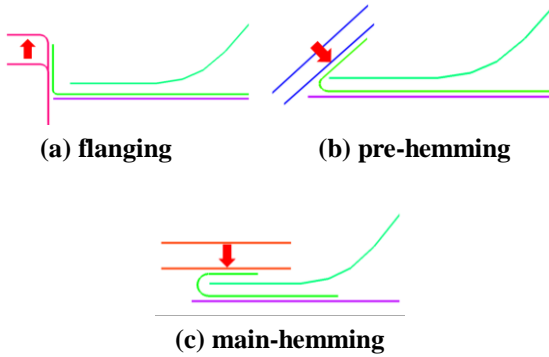


Fig. 1 Schematic illustration of the press-hemming process

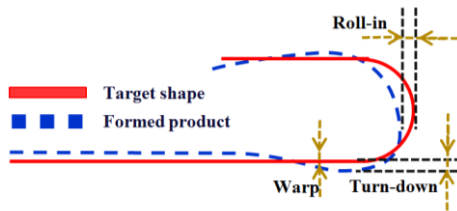


Fig. 2 Shape defects from the hemming process

height) 등을 설계변수로 선정하고 해석을 실시하였다. 제품의 목표 형상 대비 각 공정변수가 헤밍 불량에 미치는 영향을 파악하고 실험계획법을 사용하여 최적의 공정변수를 선정하였다.

2. 헤밍공정의 해석조건

2.1 제품 및 공정개요

본 논문의 대상은 Fig. 3에 도시된 중형 승용차량의 후드(Hood) 조립품이다. 소재는 외판과 내판용으로 각각 CR180B2와 CR3을 사용하였으며, 두께는 각각 0.6mm와 0.5mm이다. 본 제품은 드로우 공정과 플랜징 공정이 수행된 후, 플랜지를 중간형상으로 굽히는 프리 헤밍 공정을 거쳐 완전 성형하여 내판과 외판을 결합하는 메인 헤밍 공정으로 조립된다.

프리 헤밍 성형을 위하여 Fig. 3에 도시한 바와 같이 4개의 영역에서 모서리부를 성형하는 캠과 상하 및 좌우방향을 성형하는 캠 등 총 2종의 캠을 사용한다. CAM#3와 CAM#4가 상하에서 진입하며, CAM#2가 좌우에서 진입한다. 최종적으로 CAM#1과 CAM#5가 모서리부를 성형한다. 본 논문에서는 CAM#1, 2, 3 영역을 관심부로 구분하고 결과를 분석하였다. 메인 헤밍 공정에서는 수직방향으로 금형이 하강하여 내판과 외판의 결합이 완료된다.

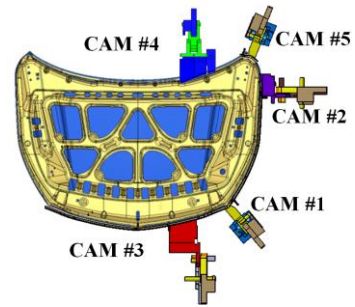


Fig. 3 Shape of the hood assembly and the cams used for the finite element analysis of the hemming process

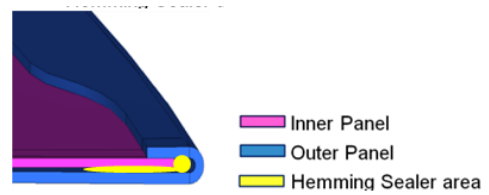


Fig. 4 Schematic illustration of the sealer part

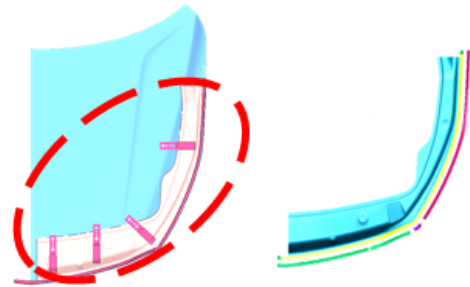


Fig. 5 Shape of the half model for the analysis of the hemming process

프리 헤밍과 메인 헤밍 공정은 하형이 고정된 상태에서 패드가 내판에 29.64kN의 패딩력을 부과하고 헤밍 펀치가 이동하여 성형을 진행한다. Fig. 4와 같이 내판과 외판의 결합부 사이에는 방수 및 기밀성을 위하여 두께 약 0.3mm의 실러(sealer)를 도포하며, 이를 해석과정에서 고려하여야 한다.

2.2 유한요소해석 모델

2.2.1 부분 해석모델 생성

본 논문에서는 해석시간의 단축을 위하여 Fig. 5에 도시된 바와 같이 금형과 소재의 접촉면적을 고려하여 하형의 형상을 따라 헤밍에 영향을 주는 관심부를 절단한 부분 해석모델(half model)을 제작하고 각 캠 부위별 공정변수에 의해 발생하는 헤밍품질을 예측하였다.

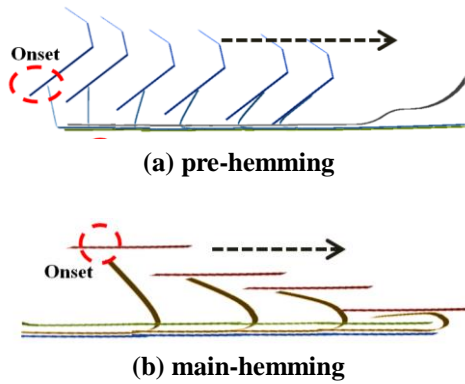
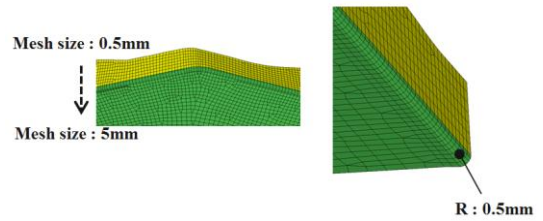


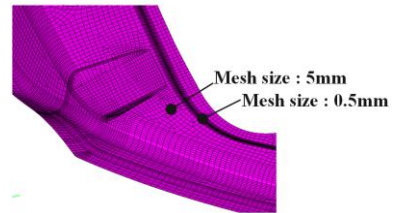
Fig. 6 Sequential deformed shape of the inner and the outer panels during the hemming process

Table 1 Mechanical properties of the blank

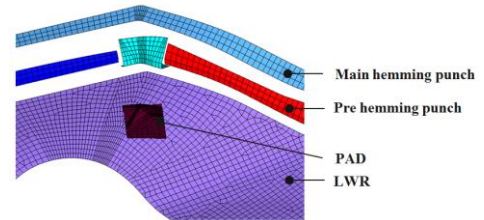
	Outer panel	Inner panel
UTS(MPa)	320	300
YS(MPa)	200	168
n	0.21	0.225
R-value	1.6	1.65
FLD ₀	25%	24%



(a) outer panel



(b) inner panel



(c) tools

Fig. 8 Guidelines for the finite element discretization of the panels and the tools

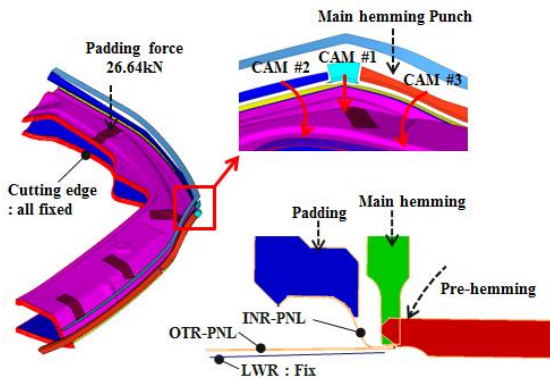


Fig. 7 Boundary conditions for the analysis of the hemming process

2.2.2 유한요소모델 구성

프레스 성형 및 플랜징 공정이 종료된 후의 제품을 초기상태로 가정하고 Fig. 6과 같이 프리 헤밍 단계부터 해석을 실시하였다. 사용된 소재의 기계적 물성을 Table 1에 도시하였다. 외판과 내판은 변형체로 가정하여 BLT 셀요소[4]로 모델링하였으며, 금형은 강체로 가정하였다. 내외판은 평면이방성을 고려한 Hill의 1948 항복방정식[5]을 사용하였다.

Fig. 7에 해석에 사용된 경계조건을 도식화하였다.

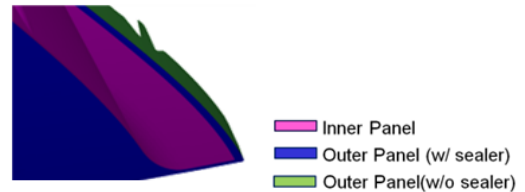


Fig. 9 Part division for the prediction of the contact force of sealer

헤밍이 수행되는 과정에서 대부분의 변형이 발생하는 외판 플랜지(Flange) 부의 굽힘 반경은 약 0.5mm로 정확한 형상의 모사를 위하여 요소 크기를 0.15~0.5mm로 설정하였다. 형상 변형에 따른 요소 재분할을 적용하지 않았다. 해석시간의 단축을 위하여 Fig. 8에 도시한 바와 같이 관심부 밖의 영역의 요소 길이를 5mm까지 증가시켜 모델을 작성하였다.

펀치의 속도는 3m/s로 설정하였다. 해석시간의 단축을 위해 밀도 증가법(Mass scaling)을 사용하였으며 밀도의 증가는 외판과 내판 질량의 최대 1%로 제한하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 LS-

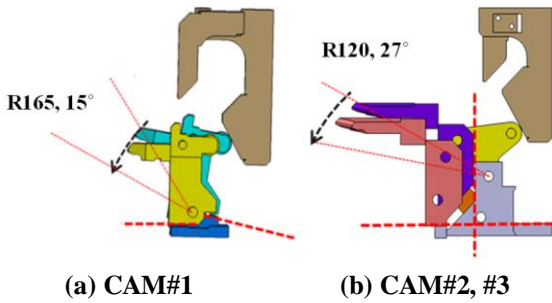


Fig.10 Cam movement for the pre-hemming stage

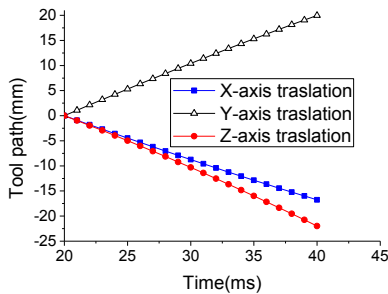


Fig.11 A typical curve of the cam movements according to time : CAM#1

DYNA v971 R6[6]을 활용하여 수행하였다.

헤밍공정은 외판과 내판의 결합부에 방수 및 기밀성을 위해 Fig. 4와 같이 실러를 도포한다. 해석 시 실러부를 통해 전달되는 접촉력을 구현하기 위해 Fig. 9와 같이 내판과 외판을 도포영역에 따라 분할하였다. 외판과 내판부의 접촉부에서 내판부에 도포 공간만큼 가상두께를 적용하였다.

2.3 프리 헤밍 공정조건

부분모델에서는 3개의 캠에 의하여 헤밍편치가 이동하여 프리헤밍 공정을 수행한다. 캠의 진입순서 및 궤적에 따라 성형품의 주름이나 소재의 겹침현상 또는 메인헤밍 공정에서 롤인과 턴다운이 변화하게 된다. 정확한 해석을 위해서는 사용된 캠의 궤적 및 진입 순서를 경계조건으로 부과하여야 한다. 본 논문에서는 캠에 관련된 경계조건을 반영하기 위하여 CATIA V5 DMU Kinematics[8]을 사용하여 시간에 따른 캠 운동정보를 추출하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 회전축을 중심으로 CAM#1과 CAM#2, #3는 각각 165mm와 120mm의 곡률반경으로 진입한다. 시간에 따른 캠 운동궤적의 예를 Fig. 11에 도시하였다.

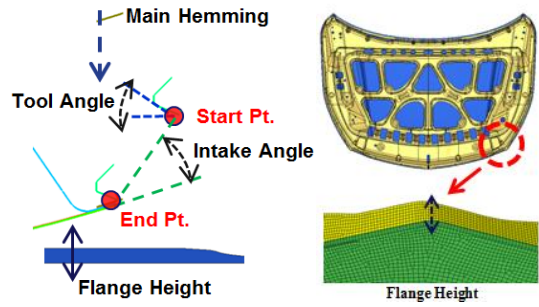


Fig.12 Definition of important process parameters in the pre-hemming process

Table 2 Process parameters applied in each cam

Design Variables	CAM#1	CAM#2	CAM#3
Intake Angle	35.6°	56.5°	56.5°
Tool Angle	30°	11°	22°
Flange Height	4.1mm	7.6mm	7.6mm

2.4 프리 헤밍 공정변수

헤밍 후 제품의 형상품질에 영향을 주는 헤밍 공정 변수로는 Fig. 12에 도시한 바와 같이 금형 진입 각, 굽힘각, 플랜지 높이를 들 수 있다. 각 캠에 적용된 공정변수를 Table 2에 정리하였다. 메인 헤밍은 금형이 수직방향으로 하향 운동을 하므로 별도의 공정변수를 분류하지 않았다. 이상의 조건을 이용하여 프리 헤밍과 메인 헤밍 공정의 유한요소해석을 수행하였으며 헤밍부에서 발생하는 불량을 분석하였다.

3. 헤밍공정의 불량 분석

헤밍공정의 유한요소해석 결과를 Fig. 13에 도시하였다. CAM#1 영역인 헤드램프 매칭부의 플랜지 끝에서 소재의 압축이 심하게 발생하여 주름 가능성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 헤밍 공정 종료 후 최대 0.1 mm의 스프링백이 발생함을 볼 수 있으며, 성형한계도 상의 파단은 예측되지 않았다. Fig. 14와 같이 굽힘선을 따라 60mm 간격으로 2차원 단면을 생성하고 Fig. 2에 도시한 기법을 사용하여 롤인과 턴다운 등 불량을 정량적으로 측정하였다. Fig. 15에 해석에서 예측된 불량을 도시하였다.

소재의 압축이 많이 발생하는 CAM#1의 영역인

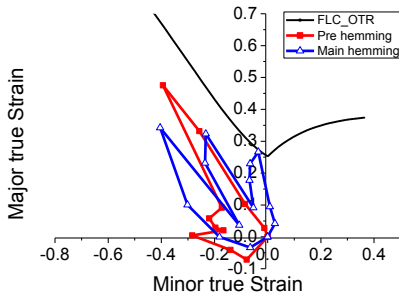
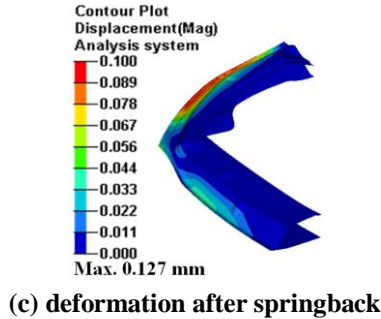
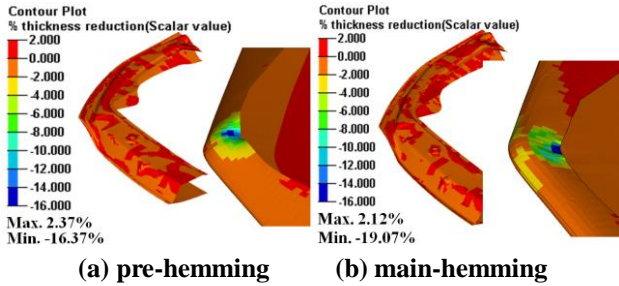


Fig.13 Analysis result obtained from the finite element hemming analysis

700~850mm 구간 사이에서 롤인과 턴다운 등 형상 불량률이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 각 단면별 불량경향을 살펴보면 헤드램프 매칭부를 성형하는 CAM#1 영역의 중앙단면에서 턴다운과 롤아웃(roll-out)이 발생하고 양쪽으로 갈수록 롤인과 턴업(turn-up) 현상이 발생한다. CAM#1 중앙 영역의 경향이 타 영역과 상이한 현상은 매칭부 중앙의 플랜지 높이가 낮아 동일한 굽힘 변형부과 시 플랜지 내측의 가공경화 현상이 크고 면내 곡률에 의해 소재의 압축변형이 크게 발생하기 때문이다. 직선부에 해당하는 CAM#2 영역의 경우 압축변형이 발생하는 오목한 면외 곡률이 존재하기 때문에 중앙 단면에서는 롤아웃과 턴다운 현상이 발생하고 양쪽 단면상에서는 턴업과 롤인 현상이 발생한다. 반면 다른 부

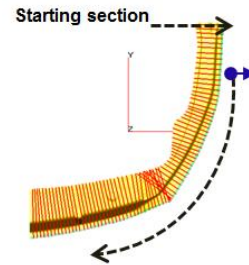
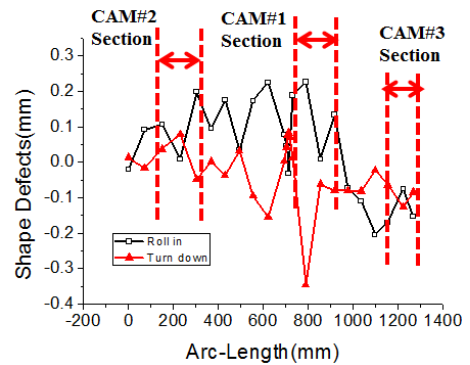
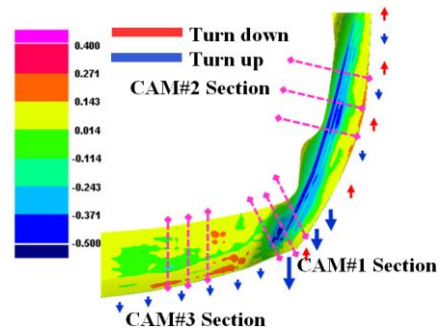


Fig.14 Measuring sections for the amounts of roll-in and flush



(a) measurement result



(b) shape error

Fig.15 Quantitative shape defects between the analysis result and the product shape

위와 다르게 상대적으로 면외 곡률과 면내 곡률이 모두 작은 CAM#3 부위에서는 3개 단면에서 동일하게 롤아웃과 턴업 현상이 발생하여 불량률이 각 단면에서 유사하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

4. 헤밍 공정변수 최적설계

4.1 최적 공정변수 선택

최적의 공정변수를 도출하기 위하여 변수연구를 실시하였다. 사용된 공정변수는 프리헤밍 공정에 적용되는 3가지로 Fig. 12에 정의한 플랜지의 높이(H),

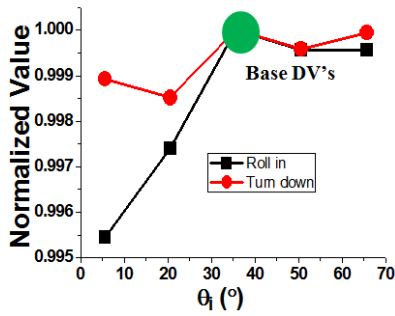


Fig.16 Change of the normalized shape defects according to the intake angle of CAM#1

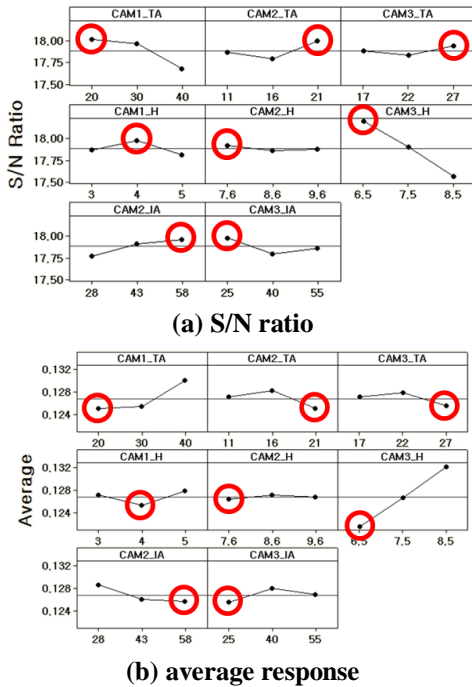


Fig.17 Plot of S/N ratio and average according to the process parameters

진입각(θ_1), 굽힘각(θ_2)이다. 3개의 캠에서 적정 공정변수 범위를 파악하기 위해 각각 1개의 공정변수를 6 수준으로 변화시키고 타 변수를 고정하여 해석을 수행하였다. 각 공정변수의 기본모델의 값에서의 섭동량은 굽힘각, 진입각, 플랜지 높이에 대하여 각각 5°, 15°, 1mm로 하였다. 해석 결과 Fig. 16에 나타낸 바와 같이 CAM#1의 진입각이 초기모델인 35.6°의 경우 불량률이 최소이며, 공정변수를 변화시킬수록 불량률이 증가하는 것으로 나타났다. 추후 공정변수 최적화 수행 시 CAM#1의 진입각은 대상에서 제외하였다. 기초 변수연구에서 얻은 결과를 활용하고 실험계

Table 3 Optimum process parameters obtained from the design of experiment

Design Variables	CAM#1	CAM#2	CAM#3
Intake Angle	36°	71.5°	41.5°
Tool Angle	20°	21°	27°
Flange Height	4.1mm	7.6mm	6.6mm

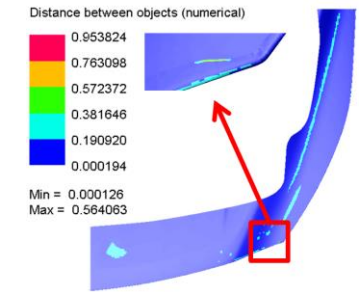
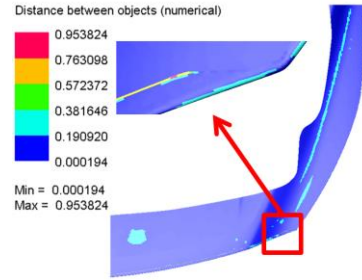


Fig.18 Comparison of shape errors before and after optimization

획법을 이용하여 해석결과를 토대로 각 공정변수를 3수준으로 설정하고 직교배열표를 생성하여 해석을 수행하였다. 신호대 잡음비(S/N ratio) 계산 시 망소 특성을 적용하였으며, Fig. 17에 신호대 잡음비와 평균값을 도시하였다. CAM#1 영역에서는 굽힘각이 20°로 감소하였을 때와 플랜지 높이가 초기모델과 동일한 경우 불량률의 크기가 가장 작게 나타났다. CAM#2 영역에서는 굽힘각이 21°로 증가하고, 진입각은 71.5°로 증가하며, 플랜지의 높이가 초기모델과 동일한 경우 불량률이 최소값을 나타내었다. CAM#3 영역에서는 진입각이 27°로 증가하고, 진입각은 25°로 감소하며, 플랜지 높이가 6.6mm로 감소시킨 경우 불량률이 감소하는 경향을 보였다. 이상의 최적 공정변수 조합을 Table 3에 도시하였다.

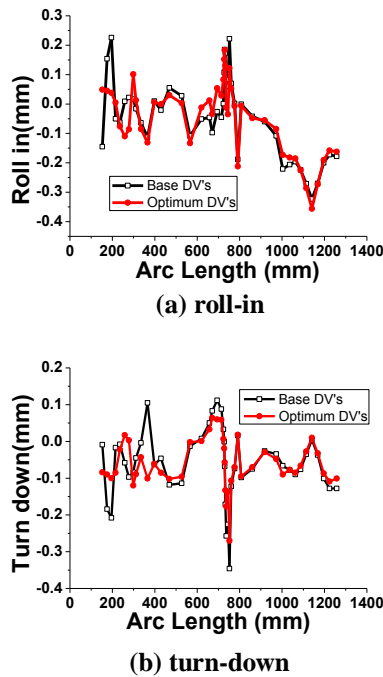


Fig.19 Comparison of the amounts of roll-in and turn-down before and after optimization

4.2 공정조건 검증해석

실험계획법을 이용하여 구한 최적 공정변수의 적용성을 검증하기 위하여 재해석을 실시하고, 최적모델의 형상정밀도를 확인하였다. Fig. 18에 초기모델 및 최적모델의 형상오차 비교와 최대 변형이 발생한 부위를 도시하였다. 두 모델 모두 헤드램프 매칭부의 플랜지 끝에서 최대 변형이 발생하였다. 초기모델과 최적모델의 경우 각각 0.95mm와 0.52mm의 최대변형이 발생하여 최적화 후 약 0.44mm 감소한 것을 확인할 수 있다. Fig. 19에 초기모델 및 최적모델의 롤인과 턴다운을 측정하여 도시하였다. 최적모델의 경우 CAM#2 성형영역인 0~250mm 구간에서 롤인과 턴다운이 각각 0.2mm와 0.1mm 수준으로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 헤드램프 매칭부에 해당하는 700~850mm 구간에서도 턴다운이 약 0.1mm 감소한 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 프레스 헤밍공정의 3차원 유한요소해석을 위하여 부분모델의 생성, 캠의 이동에 의한 금형운동 추출, 실러부 표현 등 예측의 정확도를 높이기 위한 해석기법을 제안하였다. 또한, 해

석 및 실험계획법을 활용하여 헤밍공정의 주요공정변수들의 경향을 파악하고 불량률 감소시키기 위한 최적 공정변수를 도출하였다. 본 논문에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 차량 후드 조립품의 프레스 헤밍 해석을 위한 부분모델을 구성하였으며, 헤밍 실러부 구현 및 프리 헤밍 공정에 캠의 시간에 따른 궤적을 구현하였다. 헤밍 불량률 정량적으로 나타내기 위해 제품의 굽힘부 부근에서 일어나는 롤인과 턴다운을 측정 하였다.

(2) 프리 헤밍공정 공정변수를 캠의 진입각과 굽힘량, 플랜지 높이로 선정하여 캠 영역에 따라 구분하여 분석하였다. 분석된 결과를 바탕으로 실험 계획법을 통해 유사한 프레스 헤밍공정에 적용할 수 있는 최적의 공정조건을 제시하였다.

(3) 최적 공정조건과 초기 공정조건을 비교한 결과, 최적 공정조건을 사용할 경우 초기 공정조건에 비해 롤인과 턴다운이 각각 최대 0.2mm, 0.1mm로 감소하여 최적 공정조건의 타당성을 검증하였다.

REFERENCES

- [1] 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. 6, pp. 624~630.
- [2] H. Y. Kim, H. T. Lim, K. Y. Choi, W. H. Lee, C. D. Park, 2002, Finite Element Modeling of Flanging/Hemming Process for Automotive Panels, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 5, pp. 103~107.
- [3] H. C. Jung, J. K. Lim, H. J. Kim, 2005, Prediction of Turn-down and Roll-in in Hemming Processes through the Comparison between FEA and Experiment, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 5, pp. 101~105.
- [4] T. Belytschko, J. I. Lin, C. Tsay, 1984, Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 42, No. 2, pp. 225~251.
- [5] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [6] LSTC, LS-DYNA 971 Keyword User's Manual, 2011.
- [7] Dassault Systemes, CATIA DMU Kinematics Simulator User's Guide, 2000.