

유한요소해석과 실험의 비교를 통한 헤밍 공정에서의 턴다운 및 롤인 결함 예측

정헌철¹, 임재규², 김형종[#]

Prediction of Turn-down and Roll-in in Hemming Processes through the Comparison between FEA and Experiment

H. C. Jung, J. K. Lim, H. J. Kim

Abstract

Hemming process, composed of flanging, pre-hemming and main hemming, is the last one of a series of forming processes conducted on the automotive panels, having a great influence on the outward appearance of them. The hem quality can be quantitatively defined by the hemming defects including turn-down, warp and roll-in. However, it is difficult to evaluate and predict the hem quality through the experimental measurement or the numerical calculation since the size of defects is very small. This study is focused on how to simulate in the finite element analysis (FEA) the same conditions as in the experiment. The FEA result on turn-down, that was obtained from a finite element model including the spring element linked to the flanging pad, had a good correlation with the experimental data. It was found that the radius of curvature of the flange deeply affects the final hem quality and therefore high rigidity of forming tools and tight assembling tolerance are highly recommended. An over-stroke of the main hemming punch is also proposed to reduce the turn-down.

Key Words : Hemming, Flanging, Hem Quality, Turn-down, Roll-in, Finite Element Analysis

1. 서론

헤밍은 자동차 외판 성형공정의 최종 단계에서 플랜징-프리헤밍-메인헤밍 등 3 단계 공정을 통하여 내판과 외판의 가장자리를 접합하는 작업이다. 헤밍 결함에는 턴다운(turn-down), 워프(warp), 롤인(roll-in) 등이 있으며, 이들 결함의 여부나 대소는 제품의 성능에는 크게 관계하지 않으나, 완성차의 외판 품질과 부가가치를 결정하는 주요한 인자가 된다.

헤밍 품질을 개선하기 위한 금형 수정 작업의 반복은 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 최근 이

러한 시행착오를 줄이고 헤밍 결함을 미리 예측할 수 있도록 하기 위한 실험적, 수치해석적 기법의 개발에 많은 노력이 기울여지고 있다. 안덕찬 등[1]은 플랜지 길이와 프리헤밍 툴의 진입량이 롤인에 미치는 영향과, 롤인 양을 균일하게 할 수 있는 방안에 대해 연구하였고, Livatyali 등[2]은 공정변수와 금형설계의 최적화를 통하여 헤밍 품질 개선 방안을 제안하였다. Svensson 등[3]은 재료의 이방성이 롤인에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 분석하였다. 저자들은 앞선 연구에서 여러 가지 공정변수들이 턴다운 등 헤밍 품질에 미치는 영향을 조사한 변수연구를 수행한 바 있다[4].

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스 공학과

2. 춘천기능대학교

교신저자 : 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

E-mail:khjong@kangwon.ac.kr

턴다운이나 워프 등 수 내지 수십 μm 정도의 미세한 헤밍 결함은 유한요소해석을 통해서도 정확한 예측이 어려울 뿐 아니라 실험적인 측정도 쉽지 않은 문제로, 지금까지 이들 결함에 대한 연구 사례는 흔치 않다.

본 연구에서는 턴다운, 롤인 등 헤밍 결함의 조기 예측 기술의 확보를 목표로, 평면변형률 조건에서의 단순한 헤밍 공정 모델에 대하여 실험과 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 직접 설계 제작한 금형 세트를 사용하여 성형 실험을 한 후 미세결함을 정밀측정하고, 내연적(implicit) 유한요소 코드 ABAQUS/Standard[5]를 사용하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 특히, 실험에서와 동일한 조건에서 해석을 수행하면서 안정적인 수렴 해를 얻기 위한 해석기법을 확립하는데 초점을 맞추었다.

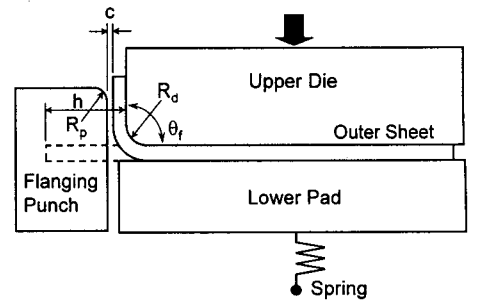
2. 실험

2.1 실험 모델

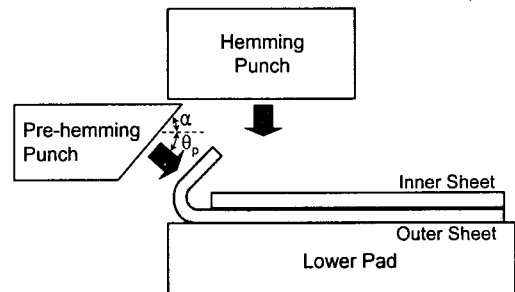
헤밍 품질에 영향을 미치는 공정변수는 Fig. 1의 공정 개념도에 표시된 것과 같이 매우 많으며, 이들에 대한 변수연구는 저자들을 포함한 많은 연구자들에 의하여 수행된 바 있다. 본 연구에서는 Table 1에 정리된 변수 조합을 가진 표준모델에 대하여 실험과 유한요소해석을 진행하였다.

2.2 헤밍 결함의 정의

헤밍 결함은 Fig. 2에 도시한 것과 같이 스킨면(skin surface), 즉 외판 바깥쪽 표면이 불룩하게 튀어나오는 턴다운(turn-down)과 오목하게 들어가는



(a) Flanging process



(b) Pre-hemming and main hemming processes

Fig. 1 Schematic of the hemming processes

턴업(turn-up), 그 옆에서 국부적으로 오목하게 들어가는 워프(warp), 그리고 끝단이 플랜지 위치로부터 안쪽으로 밀려들어가는 롤인(roll-in)과 밀려나오는 롤아웃(roll-out) 등이 있다. 알루미늄의 경우 표면이 거칠어지는 오렌지필(orange peel) 현상이 발생하는 경우도 있다. 이들 결함 중에서 가장 흔히 발생하는 것은 턴다운과 롤인이며, 본 연구에서도 이들 두 가지에 초점을 맞추었다.

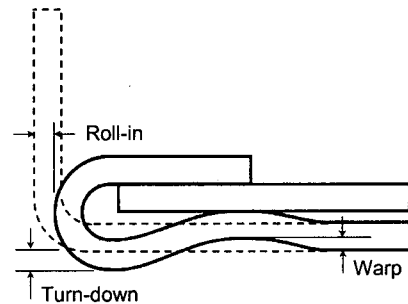


Fig. 2 Definition of hemming defects

Table 1 Process parameters of the standard model

Process	Parameter	Symbol	Value
Flanging	Flange length	h	10mm
	Flange angle	θ_f	90°
	Die radius	R_d	0.5mm
	Punch radius	R_p	2.5mm
	Clearance	c	0.05mm
Pre-hemming	Face angle	α	43°
	Insertion angle	θ_p	47°

2.3 실험 및 측정

실험은 플랜징, 프리헤밍, 메인헤밍의 연속공정으로 이루어진다. 시편 재료는 두께 0.7 mm의

SPCEN 강판으로, 길이는 외판이 100 mm, 내판이 98.5 mm 이며, 폭은 내·외판 모두 50 mm 이다. 내·외판의 상대적 위치를 정확히 유지하도록 하기 위하여 각 시편에 2 개씩의 구멍을 가공하고, 금형에 설치된 안내 핀에 삽입하여 성형하였다. 금형 세트는 직접 설계·제작하였으며, 100 ton 유압프레스에 장착하여 실험하였다.

플랜징 공정에서는 하형 패드에 스프링을 설치하여, 상형 다이가 내려와 플랜징 작업이 이루어질 때 패드압력을 가할 수 있도록 하였다. 프리헤밍 공정에서의 펀치행정 제어는 하형 패드 위에 두께 2 mm 의 정삭 블록을 시편 좌우에 설치하여 펀치가 블록 면에 닿을 때까지 성형하는 방법을 사용하였다. 메인헤밍 공정에서 펀치 행정을 제어하기는 매우 어려우므로 펀치하중이 200 kN 에 달할 때까지 성형하였다.

턴다운은 0.001 mm 의 정밀도를 가진 디지털식 두께측정기(Mitutoyo μ -Checker) 와 X-Y 이송테이블을 사용하여 시편 중심선을 따라 외판 표면을 스캐닝 함으로써 측정하였고, 롤인은 시편의 펀치구멍에서 헤밍부 끝단까지의 거리를 버니어캘리퍼스로 측정하여 산출하였다. Fig. 3 은 동일한 시편을 3 회 측정한 결과를 비교한 그림으로, 외판 스킨면 윤곽을 길이방향에 비하여 두께방향으로 약 500 배 확대한 것이다. 측정오차에 기인한 요철은 있으나, 전체적인 윤곽선 형상과 턴다운 양을 평가하기에는 충분한 반복정밀도를 나타내고 있다.

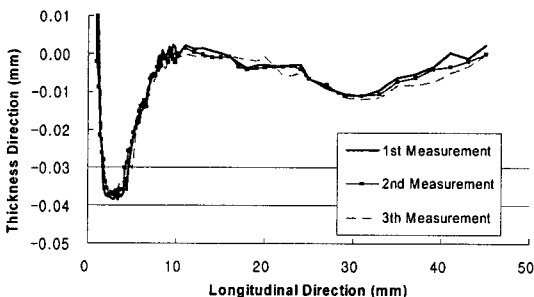


Fig. 3 Enlarged profile of skin surface

3. 유한요소해석

저자들의 선행 연구[4]에서는 턴다운의 경우 측정값보다 30% 이상 작은 해석 결과를 얻은 바 있

으며, 롤인의 경우는 해석 결과가 4% 정도 더 큰 것으로 나타났다. 본 연구는 특히 턴다운 양에서 실험과 해석의 차이를 나타내는 요인을 분석하여 실험과 동일한 공정조건에서의 해석을 구현하는데 중점을 두었다.

플랜징 공정의 경우 하형 패드에 설치된 스프링을 모델링 하기 위하여 일정한(500 N) 패드력을 가하는 방법 대신 스프링 요소를 사용하였고, 실험적으로 측정된 스프링 상수(440 kN/m)를 적용하였다. 또한, 펀치와 상형 다이와의 틈새를 0 으로 모델링 하였을 때 실제로는 나타나지 않는 역스프링백(spring-go) 현상이 나타났으며, 이를 규명하기 위하여 실험 도중 플랜지부의 확대사진을 촬영하고 그 디지털 영상으로부터 틈새를 측정된 결과 0.05 mm 정도임을 확인하였다. 이 틈새는 이후의 유한요소해석에 모두 적용하였다.

내판과 외판 사이의 접촉조건은 각 판에 ‘마스터’와 ‘슬레이브’를 동시에 적용하는, ‘double master contact’ 방식을 선택하였으며, 각 공정 후 역스프링백 해석을 수행하기 위하여 금형과 소재와의 접촉조건을 제거하는 방법을 사용하였다.

소재 두께보다 얇은 헤밍부의 요소망을 효율적으로 구성하기 위하여 유효변형률의 평활화 오차 분석을 수행하고, 이에 근거한 최적 요소망을 도출, 해석에 적용하였다[6].

Fig. 4 는 KS B 0801-13B 표준시편의 인장시험 결과로부터 얻은 응력-변형률 곡선으로, 유한요소해석 입력 데이터로 사용하였다.

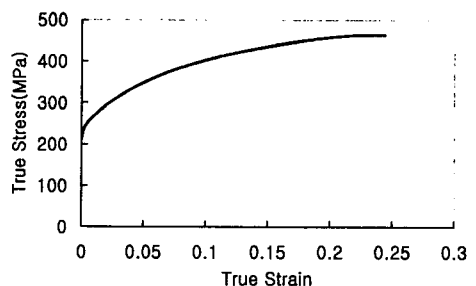


Fig. 4 Stress-strain curve

4. 결과 및 고찰

Fig. 5 는 플랜징, 프리헤밍, 메인헤밍의 각 공정에서 얻어진 시편의 역스프링백 후 측면형상을 스캔하여 해석 결과와 비교한 그림이다. 플랜징

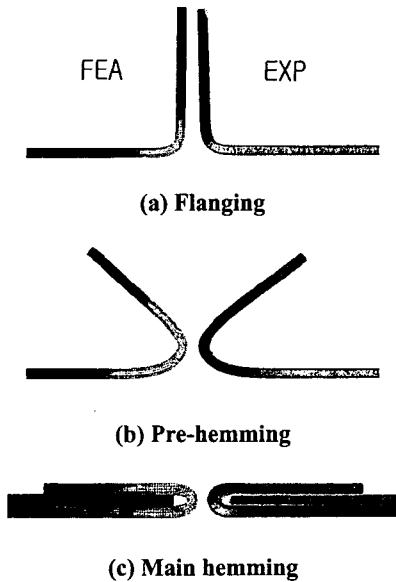
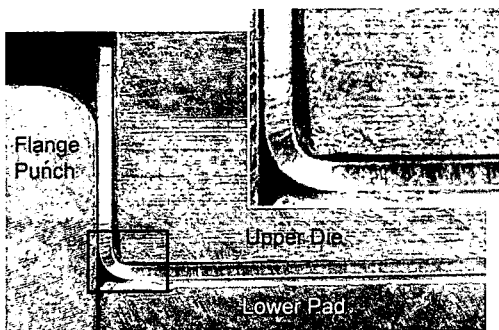
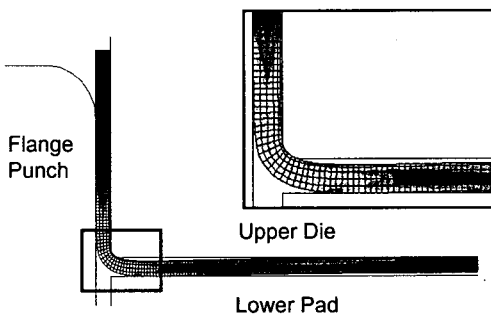


Fig. 5 Deformed shapes at each process



(a) Experiment



(b) FEA

Fig. 6 Comparison of flanged shapes

및 프리헤밍 공정 후 스킨면과 플랜지가 이루는 각을 비교해 보면 실험과 해석 결과에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 이 각은 다음 성형공정에서 바로 감소하기 때문에 최종 결과에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보인다.

Fig. 6 은 플랜징 공정에서 실험과 해석으로 얻은 소재 단면형상을 비교한 그림이다. 실험 사진에서 외판과 상형 다이 사이의 수직 틈새와 펀치와 상형 다이 사이의 수평 틈새가 관찰되는데, 이들 틈새는 플랜지부의 곡률을 결정하는 기하학적 인자이다. 금형의 강성과 조립공차 및 스프링 강성에 따라 틈새의 크기에 차이는 있겠으나, 어떤 경우에도 완전하게 없애기는 어려울 것으로 판단된다.

본 연구에서 스프링 요소를 사용하지 않고 하중으로 제어한 해석에서는 수직 틈새가 거의 발생하지 않았으나, 스프링 요소를 사용한 경우에는 실험과 거의 같은 틈새를 구현할 수 있었다.

턴다운 양은 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 실험적으로 측정한 값이 $38.6 \mu\text{m}$ 인데 비하여, 스프링 요소를 사용한 해석 결과는 $32.3 \mu\text{m}$ 로 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 반면 스프링 요소를 사용하지 않고 패드력을 일정하게 모델링한 해석 결과($18.9 \mu\text{m}$)나 선형증가함수로 모델링한 해석 결과($23.4 \mu\text{m}$)는 실험값과 상당한 차이를 보인다. 플랜징 공정에서의, 상형다이와 외판의 틈새가 헤밍 결함의 정량적 크기에 결정적인 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있다.

메인헤밍 공정에서 펀치하중은 펀치행정에 따라 서서히 증가하다가 플랜지부 안쪽면이 내판과 완전히 접촉하는 순간부터 급격히 증가하게 된다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이 최종 펀치하중의 크기를 여러 가지로 변화시켰을 때 실험과 해석 모두 턴다운 양에 상당한 차이가 나타났다. 이로부터 메인헤밍 펀치에 과하중(overload) 또는 미소한 과행정(overstroke)을 부과하여 헤밍부에 정수압이 작용하도록 함으로써 턴다운 양을 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 500 kN의 과하중은 과행정 0.003 mm 정도에 해당한다.

한편, 롤인의 경우 실험과 해석이 각각 0.60 mm, 0.61 mm 로 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 다른 연구문헌에서와 마찬가지로 롤인과 같은 비교적 큰 결함은 유한요소해석으로 상당히 정확한 예측이 가능함을 확인하였다.

5. 결론

헤밍 전 공정에 대한 실험과 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 비교함으로써 턴다운, 롤인 등 헤밍 결함의 정량적 평가와 예측의 가능성을 확인하였다. 이를 통하여 미세 헤밍 결함의 감소를 위한 현실적 방안을 제시하였다. 본 연구의 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 플랜징 공정에서 굽힘부의 곡률반지름은 최종제품의 헤밍 품질을 크게 좌우하는 요인임을 확인하였다.

(2) 스프링백에 의한 헤밍 결함을 줄이기 위해서는 금형의 강성과 패드력을 높이고 조립공차를 최소화함으로써 플랜지부의 곡률반지름을 가급적 작게 성형하는 것이 필요하다.

(3) 메인헤밍 펀치에 미소한 과행정을 부과하여 헤밍부에 정수압이 작용하도록 함으로써 스프링백에 의한 턴다운 양을 상당히 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이 방법은 실제 공정에서 간단한 하중 또는 행정 제어만으로도 실현 가능한, 매우 효율적인 수단으로 판단된다.

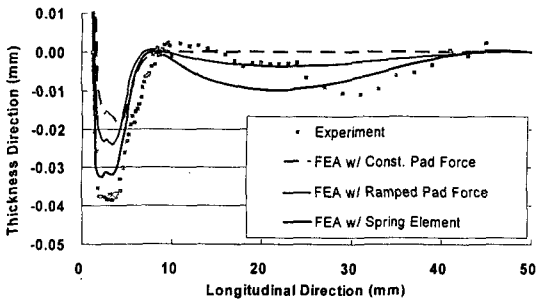


Fig. 7 Enlarged skin profiles

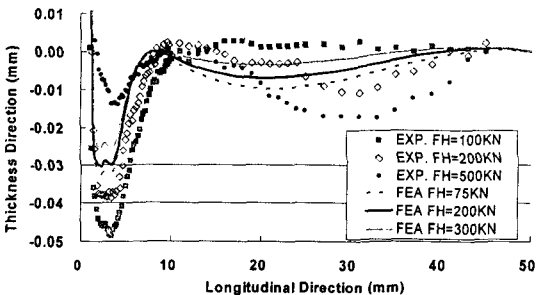


Fig. 8 Influence of main hemming punch overload

스프링 요소를 사용하여 하형 패드력을 모델링 함으로써, 실험과 동일한 조건으로 구현할 수 있었으며, 그 결과로 턴다운, 롤인 등 헤밍 결함의 크기를 정확하게 예측할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 안덕찬, 이경돈, 인정제, 김권희, 2000, 자동차 패널의 헤밍공정 설계에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 6 호, pp. 624~630.
- [2] H. Livatyali, A. Müderrisoğlu, M. A. Ahmetoğlu, N. Akgerman, G. L. Kinzel, and T. Altan, 2001, Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design, J. of Mat's Proc. Tech., Vol.98, pp. 41~52.
- [3] M. Svensson and K. Mattiasson, 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
- [4] 김형중, 최원목, 임재규, 박춘달, 이우홍, 김현영, 2004, 유한요소해석에 의한 헤밍 공정 변수 연구, 대한기계학회논문집 A 권, 제 28 권 제 2 호, pp.149~157.
- [5] HKS Inc., 2002, ABAQUS/Standard User's Manual, version 6.3.
- [6] 김형중, 김낙수, 1995, Remeshing Criterion for Large Deformation Finite Element Analysis Based on the Error Calculation, KSTP Trans. of Mat's Proc., Vol. 4, No. 1, pp. 92~104.