

간이 모델을 이용한 헤밍 공정 변수 연구 및 헤밍 품질 평가

최원목* · 임재규* · 박춘달** · 김형종***

Parametric Study of Hemming Process and Evaluation of Hem Quality Using Simple Models

W. M. Choi, J. K. Lim, C. D. Park and H. J. Kim

Abstract

Hem quality can be determined mainly by turn-down and roll-in. Turn-down, that is created by the elastic recovery, can't be easily detected and measured since it is usually as small as 0.03mm. This study is focused on the precise evaluation of the hemming defects through analytical and experimental approaches, and on the investigation of the influence of process parameters on the final hem quality. Implicit finite element analysis of plane-strain hemming process is performed by using a commercial code ABAQUS/Standard. Experiment and measurement is also carried out for steel and aluminium sheet metals, and the results are compared with those of analysis.

Key Words : Hemming, Flanging, Finite element analysis, Hem quality, Turn-down, Roll-in

1. 서 론

헤밍은 도어, 트렁크 리드, 후드 등 자동차 여닫이 부품 제조공정의 마지막 단계로서, 성형된 내·외관의 가장자리를 접합하는 공정이다. 플랜징, 프리헤밍, 메인헤밍의 3공정으로 이루어지며, 제품의 기능이나 조립 문제와는 큰 관련이 없으나 완성차의 외관 품질에 작지 않은 영향을 미치므로 최근 들어 그 중요성이 부각되고 있다. 헤밍 결함은 복잡한 탄성회복 메커니즘에 의한 미소변형에 기인하므로 해석이나 실험에 의한 예측과 측정이 매우 어렵다.

최근 차체 경량화를 위하여 그 적용 범위를 넓혀가고 있는 알루미늄 소재는 일반적으로 강판에 비하여 성형성이 나쁘게다 오렌지필(orange peel)과 같은 특이한 외관 결함이 발생한다. 생산현장에서는 헤밍 품질을 개선하기 위하여 여러 번의 금형 수정작업을 하게 되는데 이는 많은 시간과 비용을 요한다. 이러한 이유로 헤밍 품질의 조기 예측을 위한 체계적인 기술이 필요하게 됨에 따라 수년 전부터 국내외적으로 유한요소해석 또는 실험적 방법을 통한 접근이 시도되고 있다. 국내에서는 주식재 등⁽¹⁾과 김권희 등⁽²⁾, 국외에서는 Svensson 등⁽³⁾과 Altan 등⁽⁴⁾의 연구팀에 의하여 이 분야의 연구기반이 정립되어가고 있다.

* 강원대학교 대학원
** 현대자동차 금형기술개발팀
*** 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

본 연구에서는 평면변형을 모델 실험을 위한 금형세트를 직접 설계·제작하여 강판과 알루미늄판에 대하여 실험과 측정을 수행하고, 그 결과를 ABAQUS/Standard⁽⁵⁾를 이용한 2차원 해석 결과와 비교함으로써, 턴다운(turn-down)과 같은 미세한 헤밍 결함의 평가를 위한 해석적, 실험적 접근을 시도하였다. 또한, 플랜징 다이 반경과 플랜지 길이 등 주요 공정변수들이 헤밍 품질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 변수연구를 실시하였다. 특히, 헤밍 전 단계인 드로잉 공정에서 발생하는 예변형률(pre-strain)을 고려했을 때 그 결과에 미치는 영향을 해석과 실험을 통하여 분석하였다.

2. 실험

2.1 공정변수

헤밍 품질에 영향을 미치는 것으로 알려진 공정변수들은 상당히 많으나⁽¹⁻⁴⁶⁾, 본 연구에서 채택한 변수는 Fig. 1(a)의 플랜징 다이 반경(R_d)과 플랜지 길이(h) 등 2가지에다 헤밍 선에 직각방향의 예변형률(ϵ_0)을 포함시켰다. Table 1에 주요 공정변수들의 수준과 표준 모델을 표시하였다. 표준 모델에 대하여는 실험과 해석 결과를 비교하였으며, 알루미늄 재료에 대하여는 표준모델에서 변수를 하나씩 변화시켜 가면서 그 변수가 헤밍 품질에 미치는 영향을 조사하였다. 강판의 경우는 이미 저자들의 앞선 연구⁽⁶⁾에서 변수연구가 수행된 바 있다.

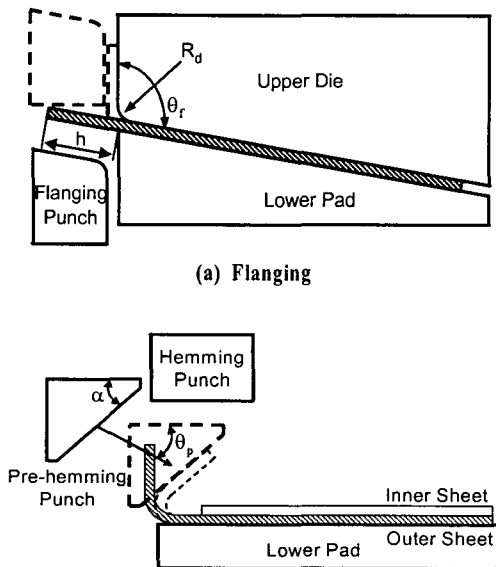


Fig. 1 Schematic diagrams of hemming processes

Table 1 Process Parameters

Process	Parameter	Symbol (Unit)	Level*	
Flanging	Flange die radius	R_d (mm)	<u>0.5</u> (steel), 1.0, 2.0(Al), 3.0	
	Flange length	h (mm)	8, 10, 12	
Pre-hemming	Face angle	α (deg)	<u>43</u> (fixed)	
	Insertion angle	θ_p (deg)	<u>47</u> (fixed)	
Pre-strain (Aluminum)			ϵ_0 (%)	<u>0</u> , 5, 10

* The levels of the standard model are underlined.

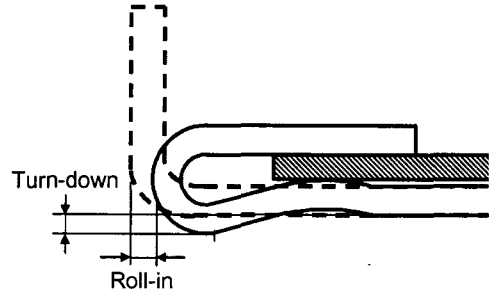


Fig. 2 Definition of hemming defects

2.2 헤밍 결함의 정의

헤밍 결함은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 스킨면(skin surface), 즉 외판 바깥쪽 표면에서 끝 부분이 볼록하게 튀어나오는 턴다운(turn-down)과 플랜지 위치로부터 안쪽으로 밀려들어가는 롤인(roll-in) 등 2가지가 대표적이며, 알루미늄 재료의 경우 헤밍부 표면이 매우 거칠어지는 오렌지필(orange peel) 현상이 발생할 때도 있다.

2.3 시편 준비 및 실험

시편은 길이(압연방향) 100 mm + h , 폭 50 mm의 직사각형이며, 플랜징 시 소재가 펀치와 다이 틈새로 빨려들어가는 것을 방지하기 위하여 2개의 구멍을 뚫고 핀으로 고정하였다. 예변형이 있는 시편은 170 mm × 70 mm의 소재를 준비하여 길이방향의 인장 예변형을 준 다음 소요 치수대로 재가공하였다. 이때 헤밍부가 가급적 원래 시편의 중앙에 오도록 하였다. 플랜징, 프리헤밍, 메인헤밍을 위한 금형세트를 설계·제작하고 유압프레스를 이용하여 연속공정 실험을 수행하였다.

3. 유한요소해석

헤밍 공정 해석에서 외판 굽힘부 부근은 변형의 집중도와 해석의 효율성을 고려하여 가장 적합한 요소망 크기를 선택해야 한다. 본 연구에서는 요소망 크기에 따른

오차해석⁽⁷⁾을 실시하여, 유효변형률에 대한 평활화오차가 더 이상 감소하지 않는 최적의 요소 크기를 결정하였다.

Fig. 3은 주요 치수와 금형 각부의 초기위치, 그리고 헤밍부의 요소망을 표시한 유한요소 모델이다. 하형 패드는 플랜징 공정에서는 500 N의 힘이 가해지는 블랭크홀더의 역할을 하며, 헤밍 공정에서는 변위가 구속되는 다이의 역할을 하게 된다. 매 공정 후 금형의 접촉조건을 제거하는('deactive') 방법으로 스프링백 해석을 수행하였고, 내판과 외판 사이의 접촉조건은 'double master contact' 방법을 택하였다.

성형해석에 사용한 두 재료의 주요 물성치와 마찰계수 및 소재 두께는 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 플랜징, 프리헤밍 및 메인헤밍의 각 공정에서 얻어진 시편의 측면을 1500 dpi의 해상도로 스캐닝하여 해석 결과와 비교한 그림이다. 육안으로 비교한 두 결과는 거의 일치하나, 프리헤밍에서 해석 결과는 플랜지 부가 거의 직선을 유지하고 있는 반면, 실험 결과는 'O' 표시된 부분에서 구부러져 해석과 약간의 차이를 나타내고 있다.

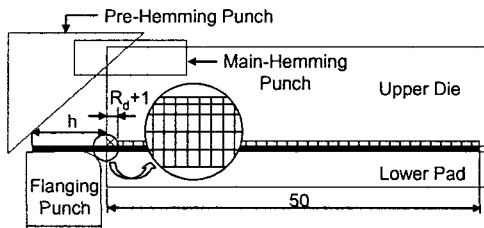


Fig. 3 Finite element model

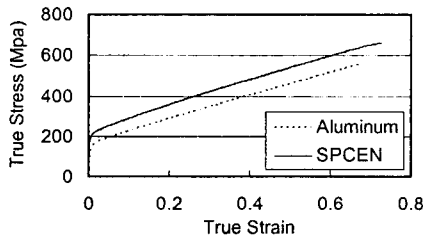


Fig. 4 Stress-strain curves

Table 2 Input values for finite element analysis

	E(GPa)	ν	μ	t_0 (mm)	t_f (mm)
Steel (SPCEN)	200	0.3	0.15	0.7	0.7
Aluminium	69	0.3	0.15	1.2	1.2

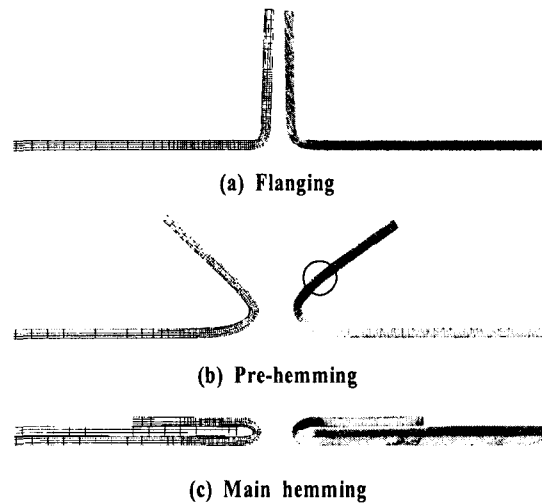


Fig. 5 Comparison of deformed shapes between FEA and experiment (Steel ; $R_d = 0.5$ mm, $h = 10$ mm)

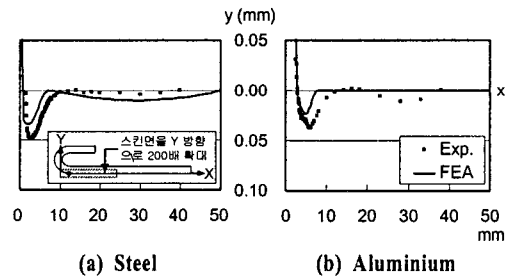


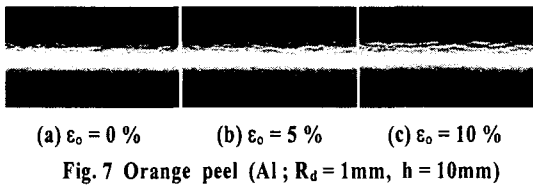
Fig. 6 Skin profile enlarged in thickness direction

Fig. 6은 턴다운 현상을 명확히 관찰하기 위하여 스킨면 윤곽선을 두께방향으로 약 200 배 확대한 그림이다. 측정은 0.001 mm의 정밀도를 가진 디지털 Mu-Checker와 X-Y 이송테이블을 사용하였다. 턴다운 양은 강판의 경우 실험과 해석에서 각각 49 μ m와 34 μ m로, 알루미늄판의 경우 38 μ m와 23 μ m로 나타났으며, 두 재료 모두 실험값이 해석 결과보다 약 15 μ m 정도 더 큰 것으로 측정되었다. 한편, 물인은 시편의 핀 구멍을 기준으로 헤밍부 끝단까지의 거리를 측정함으로써 평가할 수 있으며, 강판의 경우 실험값은 0.45 mm로 해석 결과 0.47 mm와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

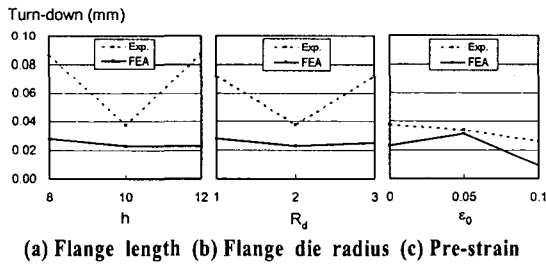
Fig. 7은 알루미늄 헤밍에서 예변형률이 증가함에 따라 헤밍부의 표면이 거칠어지는 오렌지필 현상도 더 심해지는 것을 보여준다. 오렌지필의 정도를 정량화하는 기준은 아직 알려지지 않고 있으나, 화상처리 기법을 응용하면 어느 정도 가능할 것으로 보인다.

Fig. 8은 각 공정변수가 턴다운에 미치는 영향을 도시한 그래프이다. 모든 변수에 대하여 변수값에 따른 턴다운 양의 변화는 실험과 해석에서 그 경향은 비슷하나 실험값이 상당한 더 크게 나타났다. 이는 측정상의 필연적인 오차뿐만 아니라 해석상 스프링백의 정확한 구현이 여전히 어려운 점 등에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 예변형이 없는 경우와 10%의 예변형이 있는 경우에 프리헤밍 후의 단면형상이 상당한 차이가 있음을 보여준다. 이 차이는 결국 최종 제품에서의 스킨면 미세형상에 영향을 끼치게 되며, Fig. 10에서 이를 확인할 수 있다. 실험과 해석의 차이는 Fig. 6에서와 비슷한 정도로 나타났으나, 두 결과 모두 예변형이 있을 경우 턴다운 양이 상당히 감소함을 보여준다. 따라서 헤밍 품질의 정확한 예측을 위하여는 헤밍 공정 해석 시 드로잉 공정에서 발생하는 변형량을 고려해야 함을 알 수 있다.

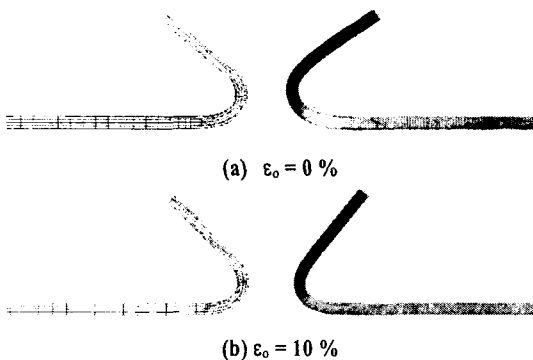


(a) $\epsilon_0 = 0\%$ (b) $\epsilon_0 = 5\%$ (c) $\epsilon_0 = 10\%$
Fig. 7 Orange peel (Al; $R_d = 1\text{mm}$, $h = 10\text{mm}$)



(a) Flange length (b) Flange die radius (c) Pre-strain

Fig. 8 Influence of process parameters on turn-down (Al)



(a) $\epsilon_0 = 0\%$ (b) $\epsilon_0 = 10\%$
Fig. 9 Influence of pre-strain on the pre-hemmed shape (Al; $R_d = 2\text{mm}$, $h = 10\text{mm}$)

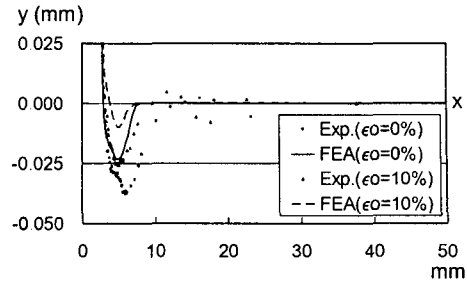


Fig. 10 Influence of pre-strain on the final skin profile

5. 결론

강과 알루미늄 두 소재에 대하여 평면변형률 조건하의 헤밍 공정 실험과 유한요소해석을 수행하고, 그 결과의 비교를 통하여 미세한 헤밍 결함의 평가를 시도하였다. 또한, 주요 공정변수가 헤밍 품질에 미치는 영향을 분석하였다. 그 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 턴다운의 경우 두 재료 모두 실험값이 해석값보다 약 $15\mu\text{m}$ 정도 더 크게 평가되었으나, 롤인의 경우는 거의 일치하는 결과를 얻었다. 턴다운의 차이는 스킨면 측정에 포함된 오차와 유한요소해석에서 스프링백의 정확한 구현에 따르는 문제점에 기인하는 것으로 판단된다.
- (2) 알루미늄에 대한 변수연구 결과, 변수값에 따른 턴다운 양의 변화에 유의할 만한 경향은 발견되지 않았다.
- (3) 알루미늄 소재의 경우 헤밍부 바깥쪽 표면에 오렌지피 현상이 발생할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.
- (4) 드로잉 공정에서의 변형을 고려할 때 프리헤밍 후의 단면 형상에 큰 차이를 나타내며, 이는 곧 최종 제품의 턴다운 양을 상당히 감소시킴을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) 주석재, 최해석, 1998, Proc. of MARC User's Forum, pp. 148~153.
- (2) 안덕찬, 이경돈, 인정제, 김권희, 2000, 한국소성가공학회지, 제9권 제6호, pp. 624~630
- (3) Svensson, M. and Mattiasson, K., 2000, Proc. of ECCOMAS 2000, Barcelona, Spain.
- (4) A. Müderrisoğlu, T. Altan, et. al., 1996, J. of Mat's Proc. Tech., Vol. 59, pp. 10~17.
- (5) HKS Inc., 2002, ABAQUS User's Manual, Ver. 6.3.
- (6) 최원목, 박춘달, 이우홍, 김형중, 2002, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 175~178.
- (7) 김형중, 김낙수, 1995, 한국소성가공학회지, 제4권 제1호, pp. 92~104.