

헤밍 공정에서의 미세 결함 평가 및 예측에 관한 연구

김형종[#] · 정헌철¹ · 임재규²

Study on the Evaluation and Prediction of Micro-Defects in the Hemming Process

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

(Received May 12, 2005)

Abstract

The 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 greater influence on the outward appearance of cars rather than on their performance. The hem quality can be quantitatively defined by the hemming defects including turn-down/up, warp and roll-in/out. However, it is difficult to evaluate and predict the hem quality through an experimental measurement or a numerical calculation since the size of defects is very small. This study aims to precisely evaluate the hemming defects, especially turn-down and roll-in, through numerical and experimental approaches and to investigate the influence of process parameters on the hem quality, focused on how to simulate the same conditions as in the experiment by the finite element analysis (FEA). The FEA results on the turn-down and roll-in obtained from a model composed of the optimum-sized elements, including a spring element linked to the flanging pad, and given the double master contact condition between the inner and outer panels, had a good correlation with the experimental data. It is thought possible to make an early estimate of the hem quality in a practical automotive design by applying the methodology proposed in this study.

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

1. 서 론

헤밍은 자동차 외관 성형공정의 최종 단계에서 플랜징-프리헤밍-메인헤밍 등 3 단계 공정을 통하여 내판과 외판의 가장자리를 접합하는 작업이다. 헤밍공정 후의 제품 품질은 헤밍 결함의 크기에 따라 좌우되며, 이들 결함의 여부나 대소는 제품의 성능에는 크게 영향을 미치지 않으나, 완성차의 외관 품질과 부가 가치를 결정하는 주요한 인자가 된다. Fig. 1은 실제 공정에서 주로 나타나는

결합들을 도시한 것이다. 스킨면(skin surface), 즉 외판 바깥쪽 표면에 생기는 턴다운(turn-down)과 워프(warp)는 수십 μm 정도의 미세 결함이며, 끝단이 플랜지 위치로부터 안쪽으로 밀려들어가 치수변화를 일으키는 롤인(roll-in)은 0.5~1.0mm의 크기를 가진다. 이외에도 턴다운 및 롤아웃과 각각 반대로 생기는 턴업(turn-up)과 롤아웃(roll-out) 등이 있으며, 알루미늄 재료의 경우 표면이 거칠어지는 오렌지필(orange peel) 현상이 발생하는 경우도 있다. 이들 결함 중에서 가장 흔히 발생하는

교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부
E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과
2. 춘천기능대학 컴퓨터응용기계과

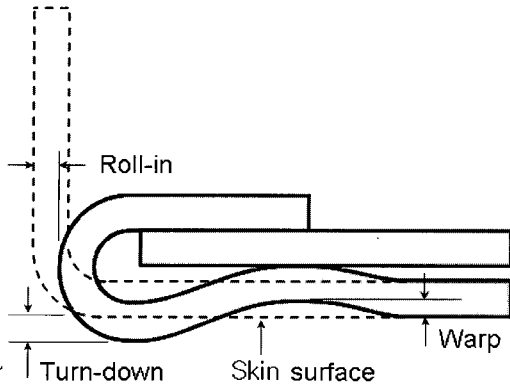


Fig. 1 Definition of hemming defects

것은 턴다운과 롤인이며, 본 연구에서도 이들 두 가지에 초점을 맞추었다.

헤밍 품질을 개선하기 위한 금형 수정 작업의 반복은 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 최근 이러한 시행착오를 줄이고 헤밍 결함을 미리 예측할 수 있도록 하기 위한 실험적, 수치해석적 기법의 개발에 많은 노력이 기울여지고 있다. 국내에서는 우선 주석재 등[1]이 곡선부 헤밍 공정 시뮬레이션을 통하여 헤밍 품질에 미치는 플랜지 길이 등의 영향을 분석하였고, 김권희 등[2]은 평면변형률 모델을 이용하여 판재의 재질, 펀치 진입량 등이 헤밍 품질에 미치는 영향을 연구하였다. 김현영 등[3]은 3차원 부분 모델을 이용하여 헤밍 공정의 유한요소해석을 시도하였으며, 안덕찬 등[4]은 플랜지 길이, 프리헤밍 톨의 진입량이 롤인에 미치는 영향과 롤인을 균일하게 할 수 있는 방안에 대하여 연구하였다. 한편, 김병민 등[5]은 캔 제품의 치수변형을 방지하기 위한 최적 헤밍 공정 연구와 헤밍 공정시 나타나는 결함의 정량적 분석을 시도하였다. 국외에서는 Svensson 등[6-7]이 재료의 이방성이 롤인에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 분석하였고, Livatyali 등[8-9]은 공정변수와 금형설계의 최적화를 통하여 헤밍 품질 개선 방안을 제안하였으며, Müderrisoğlu 등[10]은 알루미늄 판재를 사용한 헤밍 공정의 실험적 연구를 수행하였다. 저자들의 앞선 연구에서는 다양한 공정변수들이 턴다운, 롤인 등의 헤밍 품질에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 공정변수 연구를 수행한 바 있다[11~12].

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 헤밍 결함의 평가 및 조기에측 기술 확보와 헤밍 품질 개선을 위하여 평면변형률 조건의 간이 헤밍공정 모델에 대하여 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 직접 설계·제작한 금형 세트를 사용하여 성형 실험을 한 후 미세결함을 정밀측정하고, 유한요소해석 결과와 비교하였다. 또한, 공정변수들이 헤밍 품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 단일변수 분석과 실험계획법에 의한 조합변수 연구를 수행하였다.

2. 변수 연구

2.1.1 변수 연구

헤밍 품질에 영향을 미치는 공정변수는 Fig. 2의 공정 개념도에 표시된 것과 같이 매우 다양하며, 변수의 선택은 헤밍 품질의 연구에 매우 중요한 영향을 미친다. 변수 연구는 저자들을 포함한 많은 연구자들에 의하여 수행된 바 있다. 본 연구에서는 Table 1에 정리된 변수들에 대하여 표준모델을 기준으로 변수들을 1개씩 변경하면서 각 변수들이 헤밍 품질에 미치는 영향을 해석과 실험의 비교를 통해 분석하였다. 표준모델은 Table에 밑줄로 표시한 수준을 가진다.

2.2 실험계획법

변수 연구에 있어 각각의 변수가 개별적으로 미치는 영향과 함께 조합된 변수들의 상호작용으로 인한 영향도 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 1 변수 연구에서 얻어진 결과들을 분석하여 헤밍 품질에 유의한 영향을 미치지 않거나 영향을 쉽게 예측할 수 있는 변수들을 제외하고, 플랜지 길이와 프리헤밍 펀치 변각 및 진입각 등 3가지의 변수 조합에 대하여 실험계획법을 사용하여 변수 연구를 수행하였다. Table 2와 같이 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 작성하여 9가지 조합을 만들고, ABAQUS/Standard[13]를 사용한 유한요소해석을 통하여 각 변수 조합에 대한 턴다운과 롤인 양을 계산하였다. 공정변수 연구의 결과는 Taguchi법[14]을 사용한 망소(smaller-the-better) 특성에 대한 S/N비(signal-to-noise ratio)로 평가하였고, 이를 바탕으로 최적의 헤밍 공정을 도출하였다.

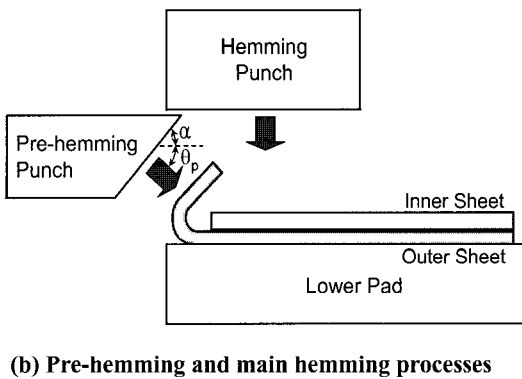
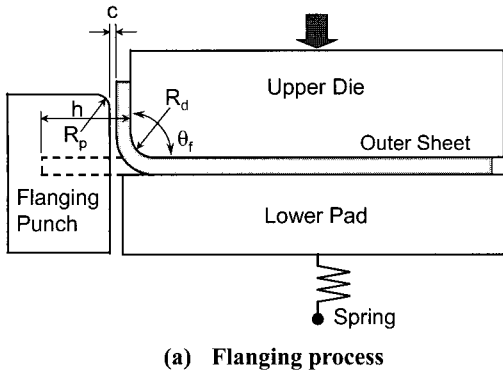


Fig. 2 Schematic of the hemming processes

3. 실험 및 측정

실험은 플랜징, 프리헤밍, 메인헤밍의 연속공정으로 이루어진다. 시편 재료는 두께 0.7mm의 SPCEN 강판으로, 길이는 외판이 100mm, 내판이 98.5mm이며, 폭은 내·외판 모두 50mm이다. 내·외판의 상대적 위치를 정확히 유지하도록 하기 위하여 각 시편에 2개씩의 구멍을 가공하고, 금형에 설치된 안내 핀에 삽입하여 성형하였다. 금형 세트는 직접 설계·제작하였으며, 100ton 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 2mm의 정삭 블록을 시편 좌우에 설치하여 펀치가 블록 면에 닿을 때까지 성형하는 방법을 사용하였다. 메인헤밍 공정에서 펀치 행정을 제어

Table 1 Process parameters

Process	Parameters	Symbol	Value
Flanging	Flange length	h	5.0, 7.5, <u>10.0</u> , 12.5, 15.0 mm
	Flange angle	θ_f	90° (fixed)
	Die radius	R_d	0.25, <u>0.5</u> , 1.0 mm
	Punch radius	R_p	2.5 mm (fixed)
	Clearance	c	0.0, <u>0.05</u> , 0.1, 0.2 mm
Pre-hemming	Face angle	α	35, <u>43</u> , 51°
	Insertion angle	θ_p	35, <u>47</u> , 59, 90°
Main hemming	Over-stroke	Δs_m	0, 0.001, 0.002 mm

Table 2 Table of orthogonal arrays

No.	Parameters		
	Flange length (mm)	Face angle (deg)	Insertion angle (deg)
1	5	35	35
2	10	43	47
3	15	51	59
4	5	43	59
5	10	51	35
6	15	35	47
7	5	51	47
8	10	35	59
9	15	43	35

하기는 매우 어려우므로 펀치하중이 200 kN에 달할 때까지 성형하였다

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

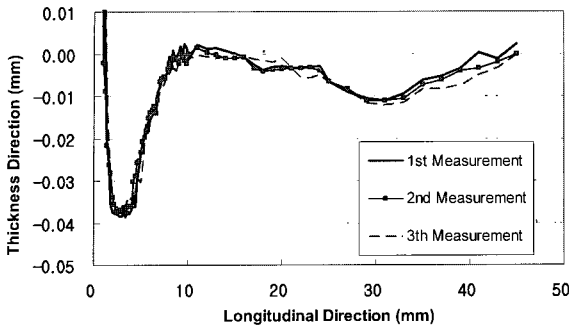


Fig. 3 Enlarged profile of skin surface

4. 유한요소해석

저자들의 선행 연구[11~12]에서는 턴다운의 경우 측정값보다 30% 이상 작은 해석 결과를 얻은 바 있으며, 롤인의 경우는 해석 결과가 4% 정도 더 큰 것으로 나타났다. 본 연구는 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(500N) 패드력을 가하는 방법 대신 스프링 요소를 사용하였고, 실험적으로 측정된 스프링 상수(440kN/m)를 적용하였다. 또한, 펀치와 상형 다이와의 수평틈새(clearance)를 0 으로 모델링 하였을 때 실제로는 나타나지 않는 역스프링백 현상이 나타났으며 이를 규명하기 위하여 실험 도중 플랜지부의 확대 사진을 촬영하고 그 디지털 영상으로부터 틈새를 측정된 결과 0.05mm 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 스프링백 해석을 수행하기 위하여 금형과 소재와의 접촉조건을 제거(‘deactivate’)하는 방법을 사용하였다. 한편, 소재 두께보다 얇은 헤밍부의 요소망을 효율적으로 구성하기 위하여 유효변형률의 평활화 오차 분석을 수행하고, 이에 근거한 최적 요소망을 도출, 해석에 적용하였다[11,15].

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

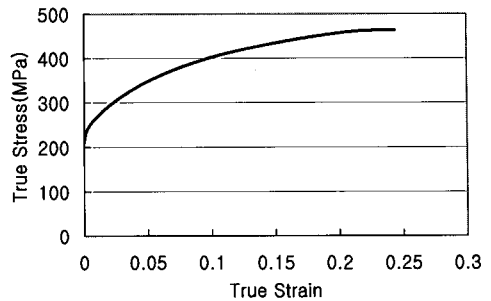


Fig. 4 Stress-strain curve of SPCEN sheet

5. 결과 및 고찰

5.1 실험과 해석의 비교

Fig. 5 는 플랜징, 프리헤밍, 메인헤밍의 각 공정에서 얻어진 표준모델 시편의 스프링백 후 측면형상을 스캔하여 해석 결과와 비교한 그림이다. 플랜징 및 프리헤밍 공정 후 스킨면과 플랜지가 이루는 각을 비교해 보면 실험과 해석 결과에 약간의 차이가 있음을 알 수 있으나, 이 작은 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 수직틈새와 펀치와 상형 다이 사이의 수평틈새가 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 수직틈새가 거의 발생하지 않았으나, 스프링 요소를 사용한 경우에는 실험과 거의 같은 틈새를 구현할 수 있었다. 턴다운 양은 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 실험적으로 측정된 값이 38.6 μ m 인데 비하여, 스프링 요소를 사용한 해석 결과는 32.3 μ m 로 약 16%의 차이를 나타내며, 스프링 요소를 사용하지 않고 패드력을 일정하게 모델링한 해석 결과(18.9 μ m)나 선형증가함수로 모델링한 해석 결과(23.4 μ m)에 비하여 훨씬 근접한 것으로 나타났다. 플랜징 공정에서의, 상형다이와 외판의 수직틈새가 헤밍 결함의 정량적 크기에 결정적인 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있다.

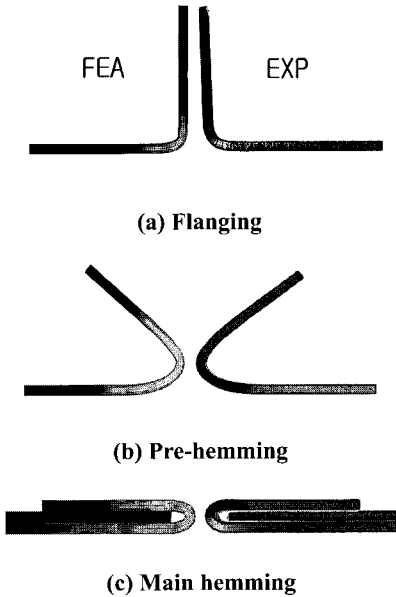


Fig. 5 Deformed shapes at each process

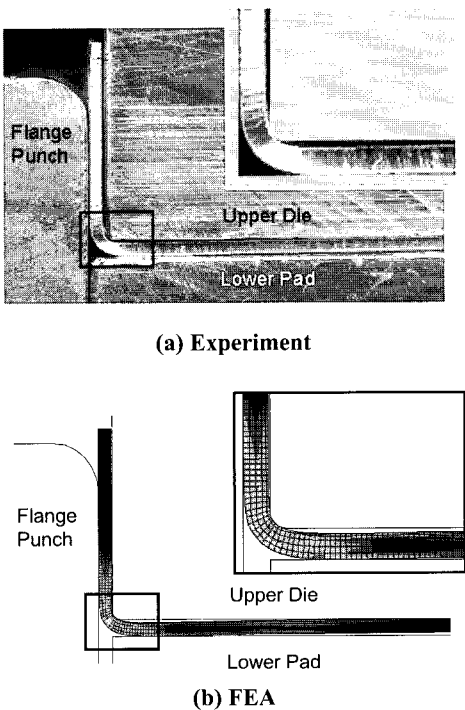


Fig. 6 Comparison of flanged shapes

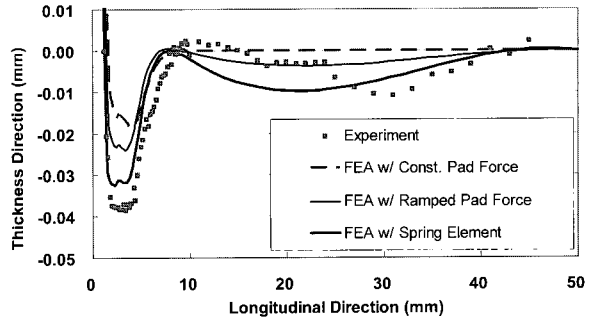


Fig. 7 Enlarged skin profiles

5.2 1 변수 연구

표준 모델을 기준으로 수행한 변수 연구 결과는 Fig. 8의 그래프에 정리한 바와 같다. 플랜지 길이에 따른 규칙적인 경향은 발견되지 않았지만, 실험과 해석 결과의 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 플랜지 길이가 7.5mm 일 때 턴다운과 롤인이 가장 큰 값을 나타냈으며, 이는 실제 공정 시 플랜지 길이의 선택에 중요한 기준이 될 것으로 판단된다. 프리헤밍 펀치의 면각은 35° 일 때 턴다운이 가장 작은 값을 나타낸 것을 제외하고 면각과 진입각이 턴다운과 롤인에 미치는 영향은 미세한 것으로 평가되었다. 플랜징 다이 반지름이 클수록 스프링백이 많이 일어나 턴다운과 롤인은 증가하는 경향을 보였고, 메인헤밍 펀치의 과행정을 0.002mm 정도만 가함으로써 턴다운을 10 μ m 정도 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이는 금형의 수정을 요하지 않고 손쉽게 헤밍 품질을 개선할 수 있는 방법이라 판단된다. 그림으로 따로 표시하지는 않았지만 플랜징 펀치와 상형다이 사이의 수평틈새는 플랜징 후의 굽힘부 형상에는 상당한 영향을 미치는데 반하여 헤밍 종료 후의 품질, 즉 턴다운과 롤인에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

해석으로 구한 턴다운의 정량적 양은 실험에서 보다 대체로 작은 값을 보이는데, 이 차이는 스프링백 현상의 정확한 구현 문제와 측정 과정의 오차, 금형의 강성과 조립 공차 등에 의한 것으로 판단된다. 턴다운보다 수십 배의 크기를 가진 롤인에 대하여는 대부분의 경우 실험값과 잘 일치하는 해석 결과를 얻을 수 있었다.

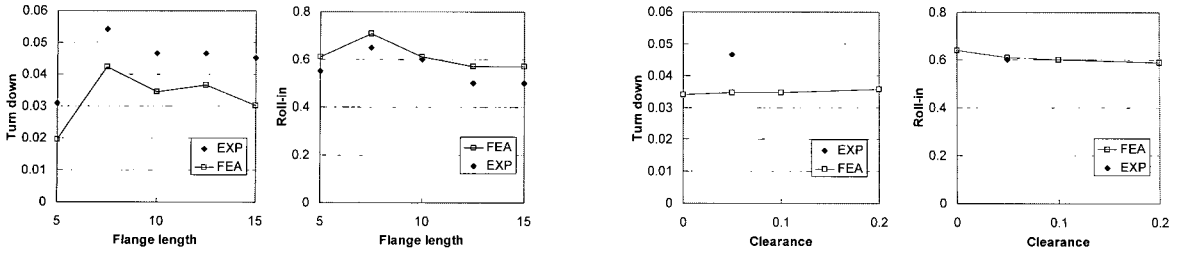
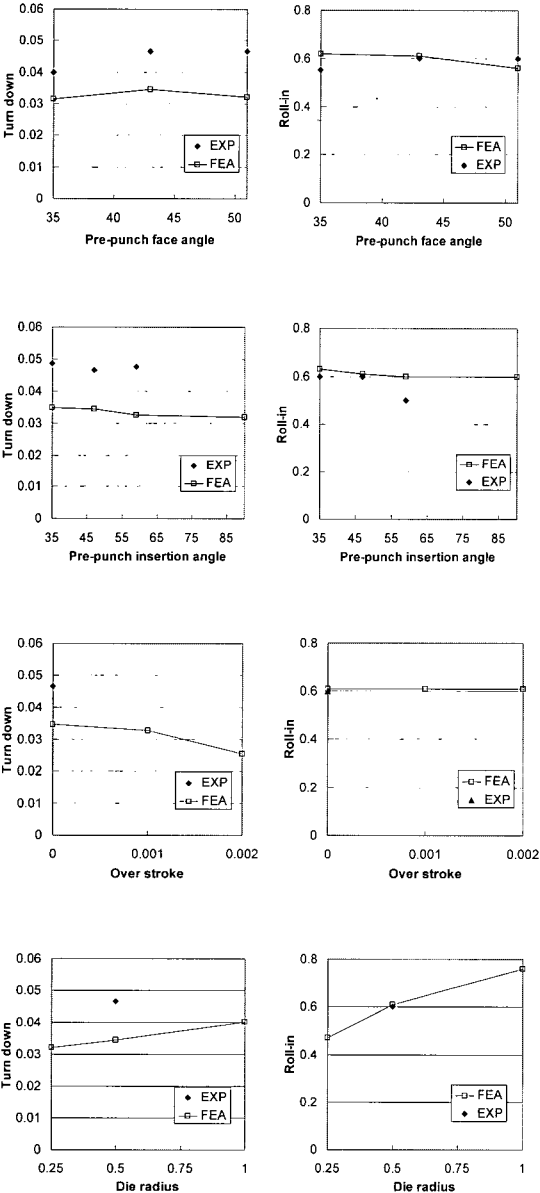


Fig. 8 Influence of process parameters



5.3 실험계획법

턴다운과 롤인에 대한 F-검정 결과, Table 3 과 Table 4의 분산분석표에 표시된 바와 같이 공정변수들 중 플랜지 길이가 턴다운에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 평가되었다. 롤인의 경우, 프리헤밍 펀치 진입각의 F-검정값은 다른 인자에 비하여 10 배 이상 작게 나타나, 진입각은 롤인에 대하여 유의하지 않은 인자로 판단된다.

Fig. 9는 턴다운에 대한 각 인자의 S/N비 합을 도식화한 그래프이다. S/N비의 합은 그 값이 클수록 헤밍 품질에 효과적으로 작용한다고 볼 수 있다. 플랜지 길이(h)의 1수준, 프리헤밍 펀치 면각(α)의 1수준, 프리헤밍 펀치 진입각(θ_p)의 1수준이 가장 큰 값을 나타냈으며, 그 결과 턴다운 양의 최소화를 위한 조합은 플랜지 길이 5mm, 프리헤밍 펀치 면각 35°, 프리헤밍 펀치 진입각이 35°인 경우임을 알 수 있다.

Fig. 10은 롤인에 대한 각 인자의 S/N비 합을 나타낸 것으로, 롤인 결함을 최소화하기 위한 최적의 조합은 플랜지 길이 15mm, 프리헤밍 펀치 면각 35°, 펀치 진입각이 47°가 됨을 확인할 수 있다.

Table 3 ANOVA table for turn down

Parameter	SS	DOF	MS	F-test
A(h)	94.582	2	47.291	0.926
B(α)	69.371	2	34.658	0.679
C(θ_p)	90.180	2	45.090	0.883
Error	102.095	2	51.047	
Total	356.228	8		

Table 4 ANOVA table for roll-in

Parameter	SS	DOF	MS	F-test
A(h)	6.737	2	3.369	2.267
B(α)	3.291	2	1.646	1.108
C(θ_p)	0.448	2	0.224	0.151
Error	2.973	2	1.486	
Total	13.449	8		

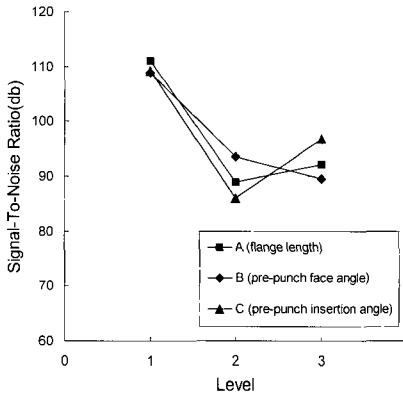


Fig. 9 Average response graph for turn down

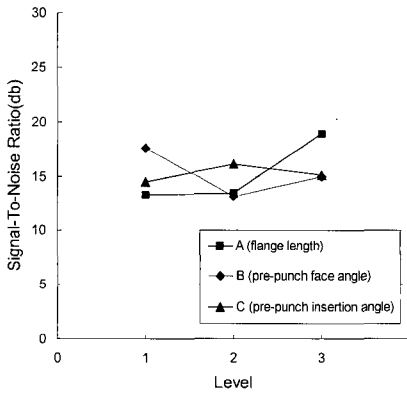


Fig.10 Average response graph for roll-in

Fig. 11 은 플랜지 길이가 5mm 인 경우의 프리헤밍 펀치 면각과 진입각에 따른 턴다운 양을 나타낸 그래프이다. 펀치 진입각에 의한 영향은 극히 미미하나, 펀치 면각의 변화에 따른 차이는 상당함을 알 수 있다. 즉, 면각이 작을수록 턴다운 양이 급격히 감소하여, 면각이 35°일 경우 턴다운은 3.3 μ m 에 불과한 것으로 나타났다. 반면에 면각이 51°인 경우 턴다운은 43.4 μ m 로 그 10 배 이상의

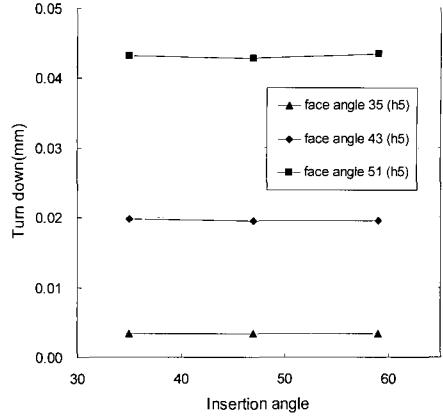


Fig.11 Influence of face angle and insertion angle for flange length of 5mm

차이를 나타냈다. 이러한 결과는 본 연구에서 다룬 변수 범위 중에서 플랜지 길이가 5mm 인 경우에만 나타났으며, 실제 공정에서의 적용 시 중요하고 고려 요인이 될 것으로 판단된다.

6. 결론

일련의 헤밍공정에 대한 실험과 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 비교함으로써 턴다운, 롤인 등 헤밍 결함의 정량적 평가와 예측의 가능성을 확인하였다. 실험계획법을 사용한 공정변수 연구로 헤밍 결함을 개선할 수 있는 최적의 공정 조건을 도출하였고, 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 좌우하는 요인임을 확인하였다. 스프링 요소를 사용하여 하형 패드력을 모델링 함으로써 실험과 동일한 조건, 즉 수직تم새를 해석으로 구현할 수 있었으며, 그 결과로 턴다운, 롤인 등 헤밍 결함의 크기를 정확하게 예측할 수 있었다.

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

(3) 표준 모델을 기준으로 1 변수 연구를 수행한 결과 플랜지 길이가 7.5mm 일 때 턴다운과 롤인

모두 가장 큰 값을 나타냈으며, 실제 공정에서의 변수 선택에 중요한 기준이 될 것으로 판단된다. 프리헤밍 편치의 면각과 진입각이 헤밍 품질에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 평가되었으며, 플랜징 다이 반지름이 클수록 턴다운과 롤인 양이 증가하는 것으로 나타났다. 메인헤밍 편치에 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.

(4) 롤인의 정량적 양은 실험과 해석 결과에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 다른 연구에서와 마찬가지로 롤인과 같은 비교적 큰 결함은 유한요소해석으로 상당히 정확한 예측이 가능함을 확인하였다.

(5) 실험계획법을 사용하여 변수 연구를 수행한 결과, 턴다운은 플랜지 길이 5mm, 프리헤밍 편치 면각 35°, 진입각 35°일 때, 그리고 롤인은 플랜지 길이 15mm, 편치 면각 35°일 때가 최적의 공정변수 조합인 것으로 평가되었다.

(6) 플랜지 길이가 5mm 인 경우에 한하여 턴다운 양은 프리헤밍 편치 면각이 작아짐에 따라 큰 폭으로 감소하는 양상을 보였다. 이 현상은 실제 공정에의 적용 시 중요하게 고려해야 할 요인으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 주석재, 최해석, 1998, 도어 내외판 헤밍 시뮬레이션, MARC User's Forum 98, pp. 148~153.
- [2] 김권희, 한규희, 권태훈, 1999, Elastic Springback in Hemming Process, Proc. of 5th HANPAM, Hankook ESI, pp. 399~404.
- [3] 김현영, 임희택, 김형중, 이우홍, 박춘달, 2003, 부분모델 합성법을 이용한 자동차 외판의 헤밍 공정에 대한 3 차원 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp. 115~121.
- [4] 안덕찬, 이경돈, 인정제, 김권희, 2000, 자동차 패널의 헤밍 공정 설계에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 6 호, pp. 624~630.
- [5] 이선봉, 김동환, 김병민, 2002, 퍼널로이 실딩 캔의 강성증대 및 형상 정밀도를 위한 최적 헤밍 공정설계, 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 5 호, pp. 29~35.
- [6] M. Svensson, K. Mattiasson, 2000, Simulation of Hemming with Different Element Formulations and Time Integration Methods, Proc. of NUMIFORM 2001.
- [7] M. Svensson, 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.
- [8] H. Livatyali, A. Müderrisoğlu, M. A. Ahmetoğlu, N. Akgerman, G. L. Kinzel, T. Altan, 2001, Improvement of hem quality by optimizing flanging and prehemming operations using computer aided die design, J. of Mat'ls Proc. Tech., Vol.98, pp. 41~52.
- [9] H. Livatyali, T. Altan, 2001, Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design Methods, J. of Mat'ls Proc. Tech., Vol.117, pp. 262~268.
- [10] A. Müderrisoğlu, M. Murata, M. A. Ahmetoğlu, G. L. Kinzel, Altan, 1996, Bending, Flanging, and Hemming of Aluminium Sheet an Experimental Study, J. of Mat'ls Proc. Tech., Vol.59, pp.10~17.
- [11] 김형중, 최원목, 임재규, 박춘달, 이우홍, 김현영, 2004, 유한요소해석에 의한 헤밍 공정 변수연구, 대한기계학회논문집 A 권, 제 28 권 제 2 호, pp. 149~157.
- [12] 최원목, 임재규, 박춘달, 김형중, 2003, 간이 모델을 이용한 헤밍 공정 변수 연구 및 헤밍 품질 평가, 한국소성가공학회 03 추계학술대 회논문집, pp. 113~116.
- [13] HKS Inc., 2002, ABAQUS/Standard User's Manual, version 6.3.
- [14] 박성현, 1998, 현대실험계획법, 민영사.
- [15] 김형중, 김낙수, 1995, Remeshing Criterion for Large Deformation Finite Element Analysis Based on the Error Calculation, KSTP Trans. of Mat'ls Proc., Vol. 4, No. 1, pp. 92~104.