

자동차 패널의 헤밍 공정 설계에 관한 연구

안덕찬* · 이경돈* · 인정제** · 김권희***

(2000년 9월 7일 접수)

A Study on the Design of Hemming Process for Automotive Body Panels

D. C. Ahn, K. D. Lee, J. J. Yin and K. H. Kim

Abstract

Typical automotive opening parts, i. e. hood, trunk lid and door, are made through the press operations such as drawing, trimming, flanging, and hemming. The dimensional accuracy of stamped panels is mainly dependent on the drawing operation. However, the gap between outer panels and opening parts, which is important to the appearance quality of the assembled body, is directly influenced by the flanging and hemming operation. In this study, the relation between the design parameters of the hemming operation and the defect of roll-in is shown. The effects of some design parameters on the gap are examined using CAE. Furthermore, the simulated results of the hemmed part of tailgate corner are shown and discussed.

Key Words : Hemming Process, Roll-In

1. 서론

자동차 차체의 오픈링 파트인 후드(hood), 트렁크 리드(trunk lid), 도어(door)는 제품 형상의 대부분을 성형하는 드로잉(drawing) 공정을 거쳐, 불필요한 부분을 잘라내는 트림밍(trimming), 제품의 외곽을 구부리는 플랜징(flanging), 내판과 외판을 결합하는 헤밍(hemming) 등의 성형공정을 거쳐 완성된다. 프레스 패널의 형상 정밀도는 드로잉 성형에서 대부분 좌우되지만 완성차 품질

의 직접적인 지표인 간격 및 단차 등은 드로잉 성형 이후 공정의 영향이 큰 경우가 많다.

최근 자동차의 외관 품질을 조기에 확보하기 위하여 플랜징, 헤밍과 같은 2차 성형공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 경우 GM, 폭스, 다임러-크라이슬러 및 스탬핑 업체, 대학 및 연구소 등이 혼소지업을 구성하여 스탬핑 관련기술 프로젝트의 세부과제 중 하나로 헤밍 공정에 대한 연구가 공동으로 수행되고 있으며 스웨덴의 볼보(VOLVO)사와 일본의 토요다(TOYOTA)

* 고등기술연구원 제품시스템연구실 CAD/CAM팀

** 인덕대학 기계설계과

*** 고려대학교 기계공학과

사의 경우 각각 헤밍 공정에 대한 연구가 진행되고 있는 것으로 알려져 있다. 오하이오(Ohio) 주립대학에서는 알루미늄 판재를 대상으로 면내곡률 반경과 플랜지 길이를 변화시키며 벤딩, 플랜징, 헤밍 공정에 대한 실험을 수행하고 공정 단계별 성형력과 스프링백에 미치는 영향을 검토하였다.^(1,2) 국내에서는 울산대학교 기계공학과에서 프론트 도어 곡선부의 헤밍 공정을 내연적 해석 방법을 이용하여 시뮬레이션하고 플랜지 길이가 롤인 등 헤밍 품질에 미치는 영향을 검토하였다.⁽³⁾ 고려대학교 기계공학과에서는 다구찌 실험계획법을 이용하여 롤인(헤밍 후 제품 외곽선이 플랜징 공정 후보다 말려 들어가는 현상)과 리코일(헤밍 후 외곽선이 내판쪽으로 오목하게 들어가는 현상)에 대하여 헤밍 공정 변수들의 기여도를 검토하였으며, 제품 설계 변수인 면내/외 곡률과 플랜지 길이가 롤인과 리코일에 미치는 영향을 실험과 해석적 방법을 통하여 연구하였다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 헤밍 공정 설계 기술 개발과 관련하여 2차원 모델을 대상으로 플랜지 길이, 블랭크 재질, 프리 헤밍 툴 진입량이 롤인에 미치는 영향을 검토하였으며, 3차원 모델을 대상으로 면내곡률과 플랜지 길이에 따른 롤인을 검토하였다. 또한, 양산차 테일게이트(tailgate) 코너 헤밍부를 모델링하고 공정 해석을 통하여 헤밍 공정시 문제점을 고찰하고 이에 따른 수정 방안을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 헤밍 공정의 주요 설계인자와 결함 유형

헤밍 공정은 Fig. 1과 같이 플랜지가 접힌 외판 안쪽에 내판을 위치시키고 플랜지를 프리헤밍하여 45도로 굽힌 후 헤밍 펀치로 눌러 내판과 완전히 고정되게 소성변형을 시키는 것이다. Fig. 2는 헤밍 공정 후 발생하는 대표적인 결함을 나타낸 것으로 헤밍 후 탄성 복원에 의해 끝단부가 들리는 턴업(turn up)과 아래로 휘는 턴다운(turn down), 헤밍부 인근에서 외판이 제품면 안쪽으로 변형하는 리코일(recoil), 그리고 외판이 플랜징 공정 후 블랭크 위치보다 말려 들어가는 롤인(roll-in)과 말려 나오는 롤아웃(roll-out) 등이 있다.⁽⁵⁾ 헤밍 공정 설계에서는 이러한 결함들을 최소화시켜 차체 외관 품질을 확보하는 것이 중요하다.

헤밍 품질에 영향을 주는 인자는 다양하며, 이 인자들은 제품 설계인자와 공정 설계인자로 분류된다. Fig. 3

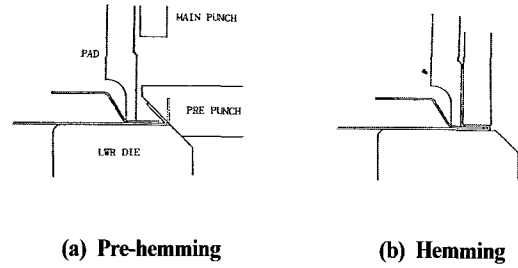


Fig. 1 Process of Hemming Operation

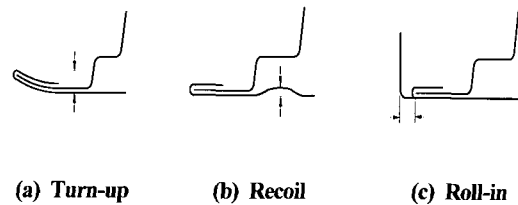
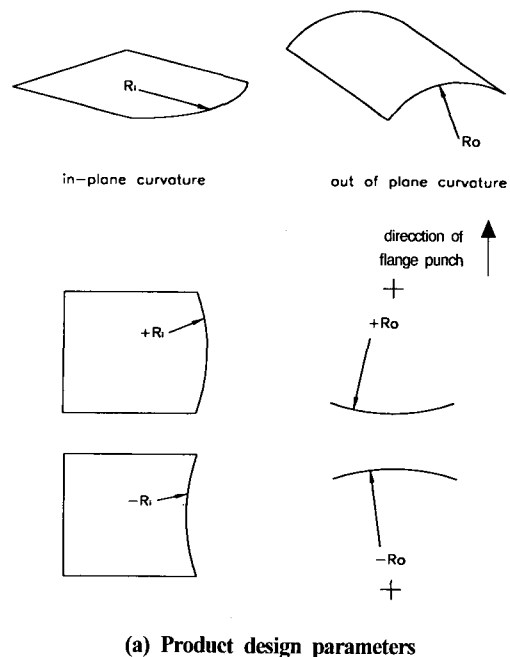
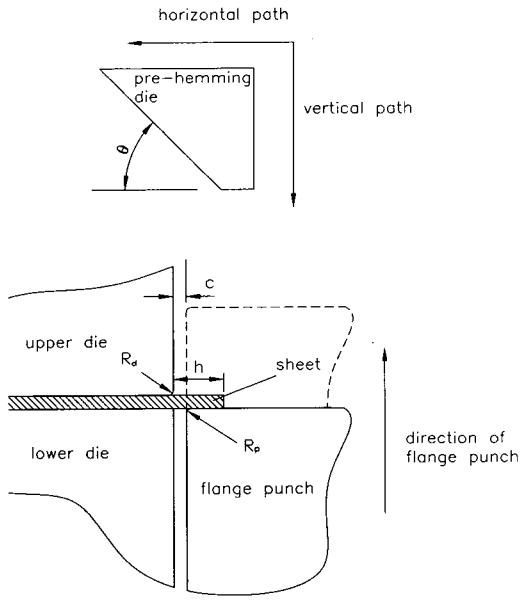


Fig. 2 Typical Hemming defects

(a)은 제품 설계인자를 도시한 것으로 면내곡률, 면외곡률, 재질, 블랭크 두께 등이 있으며, 공정 설계인자는 Fig. 3(b)와 같이 여러 가지 공정변수가 포함된다.^(4,5) Table 1에 이러한 제품 설계인자와 공정 설계인자를 나타내었다.



(a) Product design parameters



(b) Process design parameters

Fig. 3 Design parameters of hemming process

Table 1 Design parameters of hemming process

	Parameters	Symbol
Product Design Parameter	In-plane curvature	R_i
	Out of plane curvature	R_o
	Material	-
	Thickness of blank	t
	Flange length	h
Process Design Parameter	Flange die corner radius	R_d
	Flange punch corner radius	R_p
	Flange punch/die clearance	c
	Pre-hemming tool path	-
	Pre-hemming tool motion timing	-
	Pre-hemming tool insertion position	s
	Pre-hemming tool face angle	θ
	Pre-hemming tool insertion angle	Θ
	Pre-hemming tool split position	-
	Hemming pad pressure	p

2.2 롤인에 대한 설계인자의 영향

2.2.1 플랜지 길이, 블랭크 재질과 프리헤밍 툴 진입량

플랜지 길이(h), 블랭크 재질과 프리헤밍 툴 진입량(s)이 롤인에 미치는 영향을 2차원 모델을 이용하여 검토하였다. 해석에 사용된 블랭크의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 블랭크는 쉘 요소로 모델링하였으며, 요소 크기는 1×1mm로 2단계의 적용 세분화를 적용하였다. Fig. 4는 프리헤밍 툴의 설계 기준을 나타낸 것으로 플랜지 반경을 기준으로 블랭크가 45도로 굽혀지는 것을 가정하여 프리헤밍 툴의 최종 위치를 설계한다.⁽⁵⁾ 금형과 블랭크 사이의 마찰계수는 0.15로 가정하였으며, 모든 툴의 속도는 1m/s로 적용하였다. 기타 공정 변수값으로 플랜지 다이 반경(R_d)은 0.2mm, 플랜지 펀치 반경(R_p)은 1mm, 플랜지 다이/펀치 간격(c)은 0.02mm, 프리헤밍 툴의 면각도(θ)는 45도, 프리헤밍 툴의 진입각도(Θ)는 60도, 헤밍 패드 압력(p)은 3MPa로 설정하였다. 헤밍 공정 해석은 상용 프로그램인 PAM STAMPTM를 사용하였다.

Table 2 Mechanical properties of steel and Al blanks

Material	Property	t	YS	K	ϵ_o	n	R
		(mm)	(MPa)	(MPa)			
Steel	inner	0.7	167	550	0.00433	0.219	1.71
	outer	0.7	229.4	621.6	0.01467	0.236	1.55
Al	inner	1.0	126.7	595.2	0.00891	0.3278	0.71
	outer	1.0	118.1	606.3	0.01073	0.3608	0.745

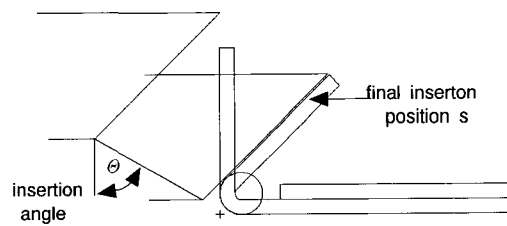
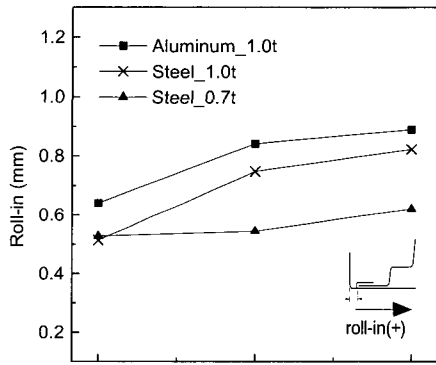


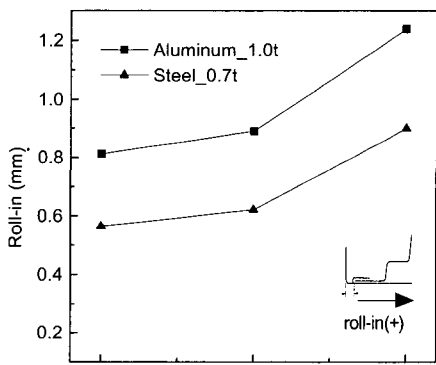
Fig. 4 Design standard of pre-hemming tool insertion position

Fig. 5(a)는 플랜지 길이에 대한 알루미늄과 스틸 블랭크 헤밍시 롤인량을 나타낸 것이다. 플랜지 길이가 6mm일 때, 1.0t 알루미늄 블랭크의 경우 롤인량이 0.84mm였으며, 1.0t 스틸 블랭크의 경우 0.75mm, 0.7t 스틸 블랭크의 경우 0.54mm로 예측되었다. 해석에서 스틸 블랭크 1.0t의 물성은 스틸 블랭크 0.7t 물성값을 이

용하였다. Fig. 5(a)에서 두께가 1.0t와 0.7t인 스틸 블랭크의 롤인량을 비교하면, 두께가 두꺼운 블랭크의 롤인량이 크다. 이러한 차이는 Fig. 6의 공정별 롤인량으로부터 두가지 원인에 기인하는 것을 알 수 있다. 첫째, 동일한 플랜지 다이 반경으로 플랜징을 수행한 경우 Fig. 7(a)과 같이 두께가 두꺼운 블랭크의 최외곽 반경이 얇은 블랭크 반경보다 크므로 외곽선이 보다 안쪽에 위치하며 둘째, Fig. 7(b)와 같이 내외관의 두께증가로 헤밍부에 말리는 소재가 더 많이 필요하기 때문이다. 두께가 1.0t로 동일한 경우, 알루미늄과 스틸을 사용한 헤밍시 Fig. 5(a)와 같이 재료의 강도가 상대적으로 낮은 알루미늄이 프리헤밍시 소재가 내관쪽으로 좀더 들어가 스틸재보다 롤인이 크게 예측되었다.



(a) Effect of flange length



(b) Effect of pre-hemming tool insertion

Fig. 5 Roll-in magnitude w.r.t flange length, material and pre-hemming tool insertion

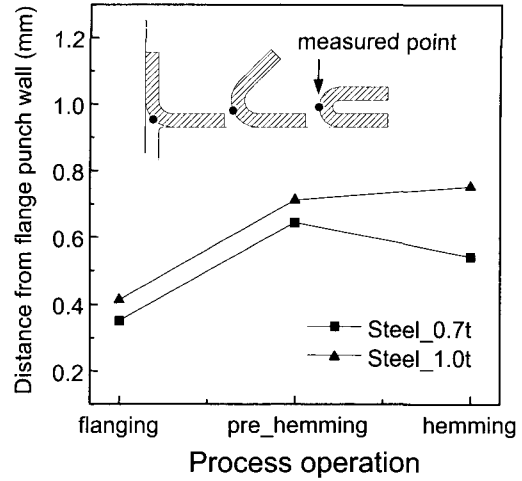
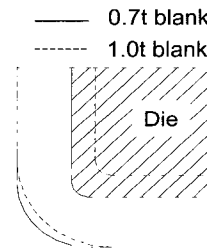
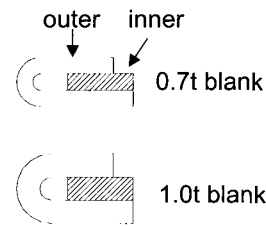


Fig. 6 Roll-in magnitude after flanging, pre-hemming and hemming



(a) Blank shape after flanging



(b) Blank shape after hemming

Fig. 7 Effect of blank thickness on roll-in

Fig. 5(b)는 프리헤밍 툴 진입량에 대한 롤인량을 나타낸 것으로 프리헤밍 툴의 진입량이 증가되면 블랭크가 내관쪽으로 보다 많이 밀려 들어가 롤인량이 증가되었다. Fig. 8은 프리헤밍 툴 진입량에 따른 프리헤밍 완료 후 블랭크 변형 형상을 나타내는 데, 프리헤밍 툴이 기준 위치에서 +0.5mm까지 진입한 경우, 프리헤밍 툴이 과도하게 블랭크 하단부를 밀고 들어가 아우터 블랭크가 좌굴되는 현상이 발생되었으며, 이러한 좌굴은 헤밍 공정 완료 후 탄성복원에 의해 제품면에 Fig. 2(b)와 같은

리코일(recoil)을 유발할 것으로 사료된다. 따라서, 적절한 프리헤밍 툴 진입량을 계산하여 외판에 이러한 결함이 발생되지 않도록 공정을 설계하는 것이 필요하다.

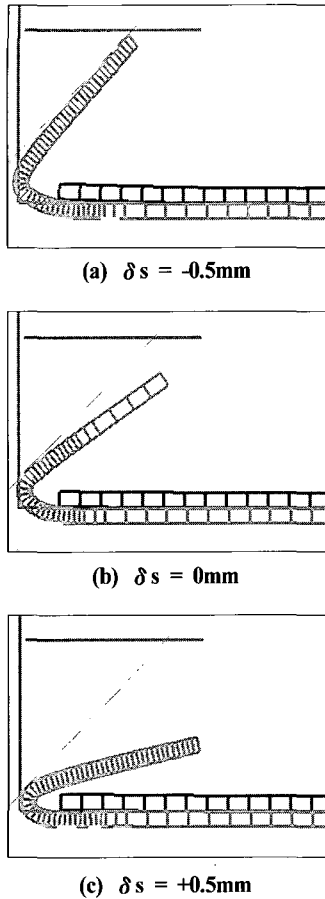
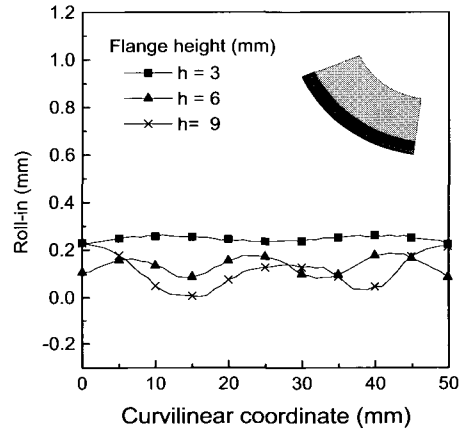


Fig. 8 Deformed blank shapes after pre-hemming

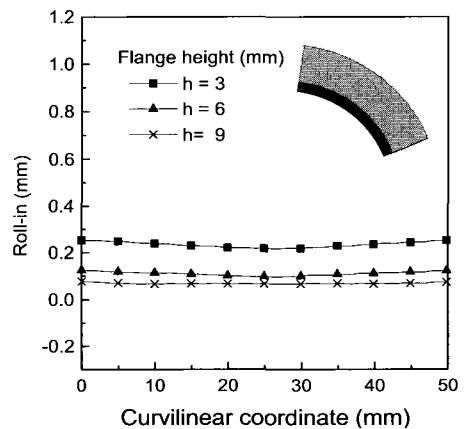
2.2.2 면내곡률과 플랜지 길이

면내곡률이 롤인에 미치는 영향을 검토하기 위해 면내 곡률반경이 일정한 경우에 대하여 플랜지 길이를 변화시키며 해석을 수행하였다. 곡률반경은 50mm로 설정하였고 볼록(convex)과 오목(concave) 형상의 헤밍을 수행하였다. 반경 방향의 요소 길이는 1mm로 모델링하였으며, 성형 중 2단계의 적층 세분화로 최소 0.25mm로 분할된다. 모델은 부채꼴 모양으로 내부각이 60도를 갖도록 모델링하였다. 경계부에는 원주 방향의 대칭경계 조건을 부여하였다. 한편, 해석시간의 단축을 위해 질량 증가 계수(mass scaling factor)를 0.5로 부가하였다.⁽⁶⁾ 질량 증가 계수의 사용으로 2단계 요소 분할부에 질량이 대략 36배 증가하였다. 공정 중 툴의 속도는 1m/s로 부

가하였으며 소재와 금형 사이의 마찰계수는 0.15로 가정하였다. 블랭크 재질은 Table 2의 스틸재를 사용하였다. Fig. 9는 플랜지 길이에 대한 롤인량을 각 모델에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 면내곡률이 볼록한 경우 플랜지 길이가 길수록 롤인량의 진폭이 증가되는 경향을 나타내었는데, 이것은 볼록부 헤밍시 외판의 플랜지가 내판쪽으로 접히면서 원주 방향의 압축 변형으로 주름이 발생되며, 발생된 주름으로 헤밍시 블랭크가 불균일하게 접히기 때문이다. 플랜지 길이가 3mm인 경우 주름이 거의 발생되지 않아 롤인량이 대략 0.23mm로 비교적 균일하였다. 한편, 플랜지 길이가 3mm인 직선부의 롤인량 0.54mm(Fig. 5(a))와 비교하면, 볼록부 헤밍시 블랭크의 압축변형에 따른 저항으로 롤인이 0.31mm 작게 발생되었다.



(a) In-plane, convex curvature



(b) In-plane, concave curvature

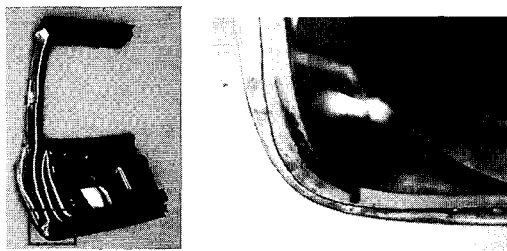
Fig. 9 Roll-in magnitude w.r.t in-plane curvature and flange length

면내곡률이 오목한 경우 외판의 플랜지가 내판쪽으로 접히면서 원주 방향으로 신장 변형되며, Fig. 9(b)와 같이 균일한 롤인량 분포를 갖으며 접히었다. 면내곡률이 오목한 경우에 있어서도 블랭크가 내판쪽으로 접히면서 발생하는 인장변형에 대한 저항으로 직선부보다 롤인량이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

2.3 현장 문제 적용 - 테일게이트 코너 헤밍해석

양산차의 테일게이트(tailgate) 코너부에 대한 헤밍 공정 해석을 수행하고 이때 발생하는 문제점과 해결방안에 대하여 검토하였다. Fig. 10은 테일게이트 전체 형상과 코너 헤밍부를 확대한 사진으로 코너 헤밍부는 반경이 약 50mm인 볼록한 면내 곡률반경을 갖고 있다.

Fig. 11은 제품 외곽선을 일정하게 7mm 읍셀하여 트림한 블랭크의 헤밍 후 변형 형상과 코너부 플랜지 길이 수정한 블랭크의 변형 형상을 나타낸다. Fig. 11에서 보여주는 것과 같이 플랜지 길이 수정으로 코너의 주름이 거의 제거되었다. Fig. 12는 초기 블랭크와 수정된 블랭크 그리고 수정된 블랭크에 대하여 프리헤밍 툴 진입량을 초기 위치보다 +0.5mm로 증가시킨 경우의 헤밍 후 롤인량을 나타낸다. 프리헤밍 툴 진입량을 증가시켜 코너부와 직선부의 롤인량차를 다소 줄일 수 있었으나, 롤인량을 보다 균일하게 하기 위해 진입량을 +0.5mm 이상 증가시킨 경우 Fig. 8(c)와 같이 외판 하단부에 좌굴이 발생되었다. 따라서, 균일한 롤인량 확보를 위해서는 플랜지 금형 설계시 직선부와 곡선부의 롤인 차이를 고려하여 이에 따른 보정량을 부가하여 설계한다.



(a) Tailgate (b) Corner hemmed part
Fig. 10 Hemmed corner part of tailgate

3. 결 론

(1) 헤밍공정의 2차원 해석에서 프리헤밍 툴 진입량이 클수록, 플랜지 길이가 길수록 롤인량이 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, 소재의 재질과 두께가 롤인에 미치는 영향을 고려한 공정 설계가 요구된다.

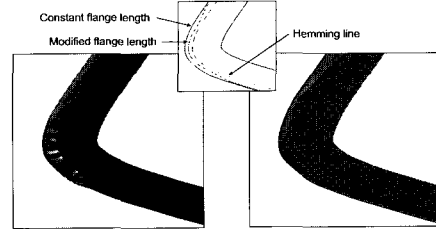


Fig. 11 Deformed blank shapes of hemmed corner part of tailgate

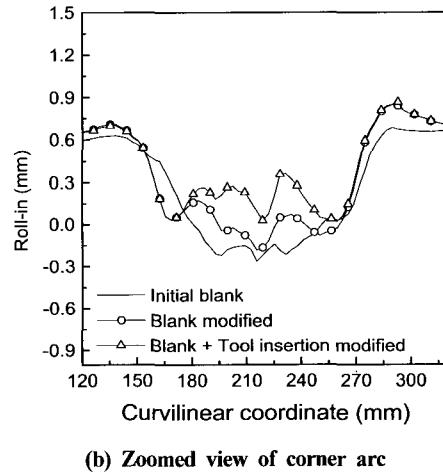
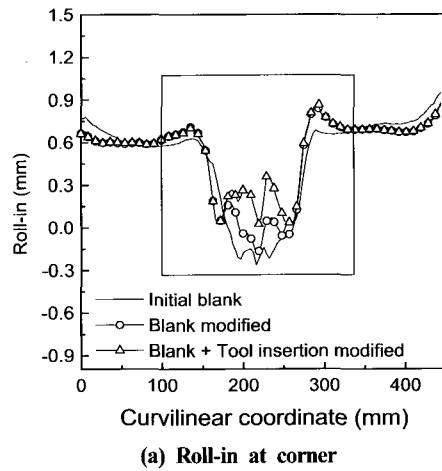


Fig. 12 Roll-in magnitude of tailgate corner

(2) 면내곡률을 갖는 형상의 헤밍 공정을 분석하여 볼록한 50mm 곡률반경을 갖는 경우 플랜지 길이를 3mm 정도로 설계하는 것이 바람직하며, 오목한 50mm 곡률반경을 갖는 경우 플랜지 길이를 3mm 이상 설계하는 것

이 가능하다.

(3) 양산차 테일게이트 코너부에 대한 헤밍 공정 해석을 수행하고 플랜지 길이와 프리헤밍 톨 진입량의 수정을 통해 제품 외곽선을 따라 롤인량을 균일하게 하는 방안을 검토하였다. 향후 보다 다양한 공정 변수에 대하여 헤밍 품질에 미치는 영향에 관한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1999년도 대우자동차 생산기술연구소 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Attila Muderrisoglu, Makoto Murata, Mustafa A. Ahmetoglu, Gary Kinzel, Taylan Altan, 1996, "Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet an experimental study", Journal of Material Processing Technology, pp.10~17.
- (2) Attila Muderrisoglu, Haydar Livatyali, Mustafa Ahmetoglu, Taylan Altan, 1997, "Computer Aided Design for Bending, Flanging and Hemming of Steels and Aluminum Alloys", Proceedings of the PMA METALFORM '97 Symposium, pp.151~165.
- (3) 주석재, 최해석, 1998, "도어 내외판 헤밍 시뮬레이션", MARC User's Forum 98, pp.147~153.
- (4) 김권희, 2000, "Sensitivity Analysis of Hemming Process", 제5회 HP/KODIC 기계설계해석(MCAE) 세미나.
- (5) Die design standards, "Hemming Die", 대우자동차.
- (6) PAMSTAMP REFERENCE MANUAL, 1998.