

유한요소해석을 이용한 롤러헤밍 공정의 변형기구 분석

노재동¹ · 곽종환² · 김세호[#] · 주용현³ · 김정호³ · 신현식³

Deformation Mechanism of the Roller Hemming Process with the Finite Element Analysis

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

(Received August 9, 2016 / Revised September 13, 2016 / Accepted September 19, 2016)

Abstract

In this paper, a three-dimensional part model is constructed for the finite element analysis of hemming models where hemming defects frequently occur. The roller path is modeled as the boundary condition with the one-dimensional beam element and the revolute joint model. With the constructed part model and the roller movement, a finite element analysis has been pursued in order to identify the hemming load and hemming defects such as wrinkling in the flange region. The analysis result shows that the maximum hemming load occurs in the intake situation while oscillatory behavior of the load is found especially when hemming the curved model because of wrinkle generation. This paper compares the amplitude and the period of wrinkle between the analysis result and the experiment, which shows good agreement with each other.

Key Words : Roller Hemming, Deformation Mechanism, Finite Element Analysis, Hemming Load, Wrinkling Pattern

1. 서론

차체를 구성하는 무빙 파트(moving part)인 후드, 트렁크 리드, 도어 등은 프레스 성형공정 이후 외관의 플랜지부를 가압하여 내관과 기계적 결합하는 방식인 헤밍(hemming) 공법을 사용하여 완제품을 생산한다.[1] 기존의 프레스금형 등을 이용한 헤밍공법은 복잡한 자동차부품 생산에 유연하게 대응하기 어려운 문제가 있어 로봇을 이용한 롤러 헤밍(roller hemming) 공법이 1970년대부터 발전해 왔다. 롤러 헤밍을 사용할 경우 롤러의 형상 교체 및 로봇팔의 경로지정에 따라 유연하게 생산에 대응할 수 있는 이점을 가지고 있다. 현재의 현재의 롤러헤밍 공법은 현장에서 시행오차 방법에 의한 공정설계가 수

행되고 있어 대상이 변경될 경우 적용에 많은 시간과 비용이 필요하다. 따라서, 단시간의 공정 및 롤러설계를 위해서는 보다 체계적인 설계방법의 구축이 필요하다. 이를 위해서는 롤러 헤밍공정의 유한요소해석 등의 도입이 필수적이다[2, 3].

헤밍공정에서 발생하는 주요 형상결함은 Fig. 1과 같이 롤인(roll-in), 턴다운(turn-down), 주름, 파단, 면품질 등의 불량으로 구분할 수 있다[1]. 기존의 프레스 헤밍공법이나 테이블탑 공법은 롤인과 턴다운 및 면품질 불량이 심각한 반면 롤러 헤밍공법은 주름불량이 심각하게 발생한다.

본 논문에서는 차량의 무빙 파트인 트렁크 리드(trunk lid)의 롤러헤밍 공정에서의 형상결함을 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 해석 시간의 단

1. ㈜화신 기술연구소

2. 오토폼 코리아㈜

3. 한국GM㈜ 생산기술연구소

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

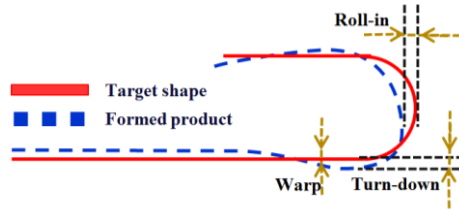


Fig. 1 Shape defects from the hemming process[1]

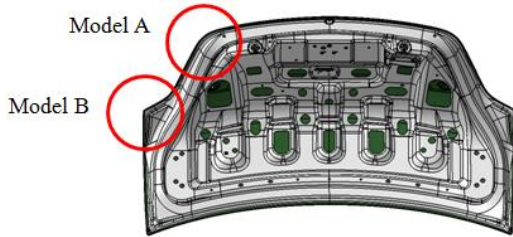


Fig. 2 Trunk-lid used in the finite element simulation

Table 1 Mechanical properties of the CR4

YS(MPa)	155	\bar{R}	2.01
K(MPa)	524.0	n	0.23

측을 위하여 면외곡률을 제거한 경우와 고려한 경우의 단순모델을 구성하고 롤러의 3차원 궤적을 구현하였다. 제안된 기법을 이용하여 롤러헤밍 공정중의 변형기구 및 주름 발생에 초점을 둔 불량 재현에 관하여 집중적으로 분석하였다. 또한 과도한 헤밍 하중과 하중 진동 등의 공정불량에 대해서도 분석하였다.

2. 부분 평면모델 헤밍 공정해석

2.1 제품 개요

본 논문의 대상은 Fig. 2에 도시한 중형 승용차의 트렁크 리드(trunk lid) 조립품이다. 연구의 대상 부위는 테일램프(tail lamp) 매칭부로 곡률부위 반경이 매우 작고 곡률이 복잡하여 헤밍성형이 어려운 부위이다. 소재는 외판과 내판용으로 모두 CR4를 사용하였으며, 두께는 모두 0.7mm 이다. 사용된 소재의 기계적 물성을 Table 1에 도시하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 eta/DYNAFORM[4]을 사용하였다.

2.2 부분 평면 해석모델

롤러 헤밍공정의 특성상 차체부품의 헤밍 전구간의 롤러의 궤적을 추적하여 해석이 이루어져야 하

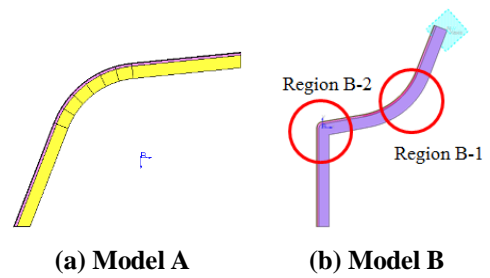


Fig. 3 Construction of the plane part model for roller-hemming analysis

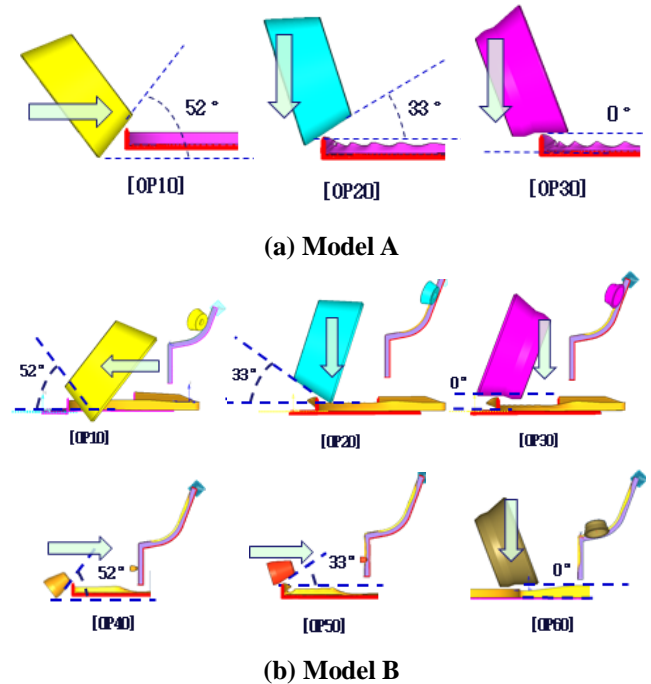


Fig. 4 Schematic illustration of the roller hemming process

므로 일반적인 성형해석보다 전체모델을 해석하기 위한 시간이 과도하게 소요된다. 1차적으로 불량이 가장 많이 발생하는 부위의 면외곡률을 제거하고 플랜지를 제외한 영역을 2차원으로 단순화하여 Fig. 3과 같이 2개의 부분 평면 해석모델로 추출하였다.

2.3 롤러헤밍 공정조건

롤러의 형상 및 굽힘각은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 각 공정별로 상이하게 설계된다. Model A의 제1,2공정은 동일 롤러에 굽힘각을 상이하게 부과하여 프리헤밍을 실시하며, 제3공정은 수직방향으로 롤러를 진입시켜 최종 메인헤밍을 실시한다. Model B의

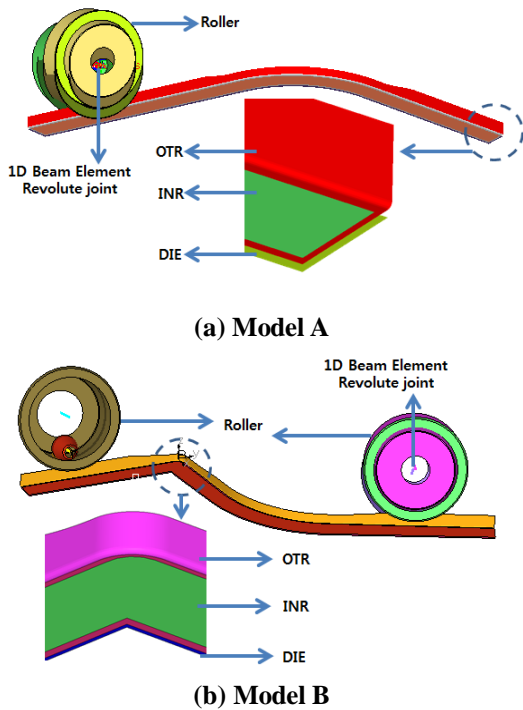


Fig. 5 Finite element model for the roller hemming process

경우 제1~3공정까지 영역 B-1의 오목구간을 헤밍성형하며, 제4~6공정에서는 영역 B-2을 중심으로 헤밍이 실시된다. 롤러의 형상은 제1~2공정과 제4~5공정이 동일하며, 메인헤밍 단계의 3공정과 6공정이 서로 동일하다.

2.4 공정해석용 유한요소모델

공정해석을 위한 유한요소모델을 Fig. 5에 도시하였다. 롤러와 다이는 표면 정보만을 이용하여 쉘(shell)요소로 모델링하고, 강체로 가정하였다. 롤러의 회전운동과 평행이동을 구현하기 위하여 1차원 보요소(Hughes-Liu beam element)[5]를 사용하여 반경 15mm의 원통 형상을 모델링하고, 회전 조인트(revolute joint)를 적용하여 모델링하였다.

내판과 외판으로 구분되는 블랭크는 BLT 셀요소[6]를 사용하여 모델링하였고, 두께 방향 적분점 수는 5개로 설정하였다. 내외판은 수직이방성을 고려한 Hill의 1948 항복방정식[7]을 사용하였다. 외판은 곡선 구간과 플랜지부가 급히 변형하는 곡률부의 요소를 15° 간격으로 분할하였다. 롤러의 요소는 3° 간격으로 분할하여 원통형상을 모사하였다.

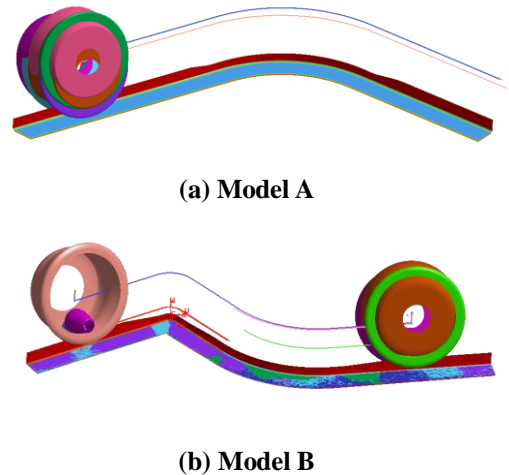


Fig. 6 Calculated roller path for the finite element analysis

요소의 최소길이가 외판 블랭크의 두께보다 작아 발생하는 외연적 해석에서의 불안정성을 감소시키기 위해 적응형 요소분할(adaptive mesh refinement)을 실시하지 않았다. 내판의 요소는 변형에 직접적인 관계가 없으므로 적응형 요소분할을 실시하지 않았다.

2.5 롤러 궤적 구현

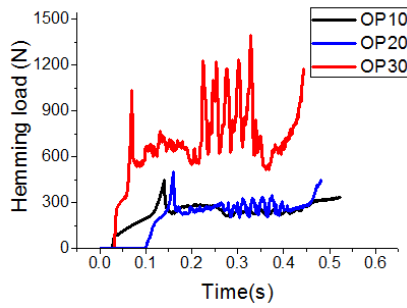
롤러의 운동궤적은 Fig. 6에 도시한 바와 같이 부과된다. 롤러의 궤적은 플랜지와 외판 사이의 길이 방향 절점들을 하나의 곡선으로 만들어 롤러의 무게중심까지 오프셋(offset)하여 생성한다. 생성된 곡선을 이용하여 각 공정별 시간에 따른 롤러의 이동 궤적을 계산하였다.

3. 부분 평면모델 해석결과 분석

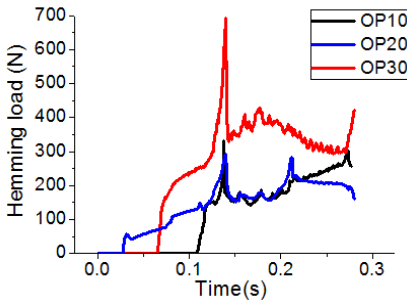
3.1 헤밍 하중

헤밍 하중은 롤러의 형상과 블랭크 소재에 따라 달라지며, 성형 중 플랜지가 국부적으로 인장과 압축을 반복적으로 받게 되어 크기와 진동량이 변화한다. 헤밍 변형기구의 설계가 잘못될 경우 롤러에 하중 진동 및 불안정성을 야기하고 롤러와 연결된 로봇 팔에도 구조적인 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 헤밍 하중은 공정 설계 시 주요 고려 사항이다.

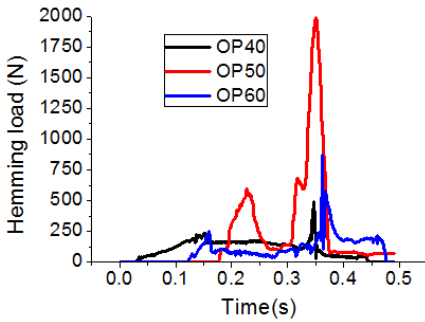
Fig. 7에 공정별 헤밍하중을 도시하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 헤밍이 진행되면서 플랜지



(a) Model A (convex region)



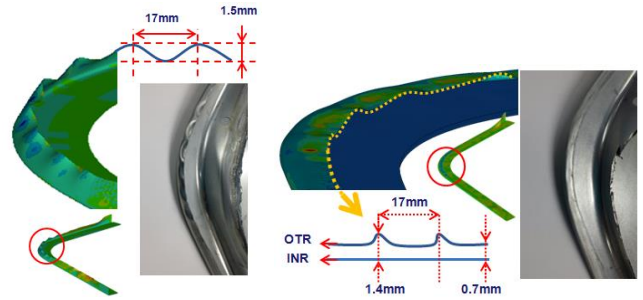
(b) Model B (concave region B-1)



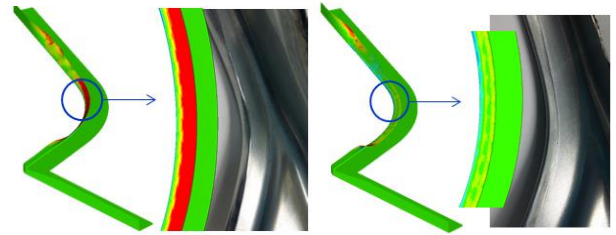
(c) Model B (sharp corner B-2)

Fig. 7 Change of the hemming load according to time from the finite element hemming analysis

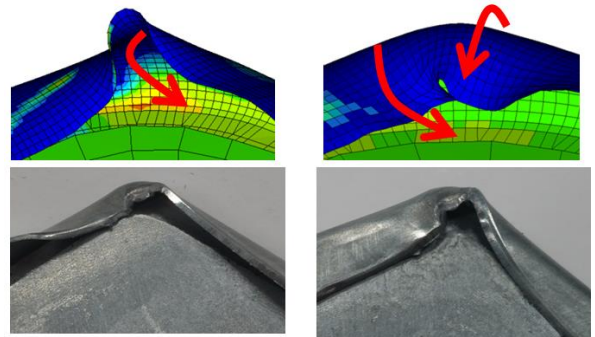
부의 굽힘강성 증가에 의하여 하중이 증가하게 된다. 또한, 플랜지의 주름발생 경향에 따라 하중 진동량의 형태가 변화하는 것을 알 수 있다. 볼록한 형상의 Model A는 소재의 압축으로 외판에 주름이 발생하여 과도한 하중 진동량이 발생되고, Model B의 영역 B-1은 오목한 형상으로 주름이 발생되지 않아 하중 크기가 작고 진동량이 거의 생기지 않는다. 코너부 반경이 작은 영역 B-2는 성형불량이 발생하며 이에 따라 과도한 헤밍 하중이 발생되었으며 로봇팔에 스프링 등 강성을 감소시킬 수 있는 부재가 필요함을 확인할 수 있었다.



(a) Model A (convex region)



(b) Model B (concave region B-1) at OP10 and OP30



(c) Model B (sharp corner B-2) at OP40 and OP60

Fig. 8 Comparison of the deformed shape between the analysis and the experiment

3.2 변형 형상

해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 8에 도시한 바와 같이 시험결과와 변형의 경향을 비교하였다. Model A의 곡률 구간에서는 주름발생 경향이 예측되었으며, Model B의 영역 B-1에서는 주름발생이 예측되지 않았다. 영역 B-2에서는 매우 작은 코너부 반경과 낮은 플랜지에 의한 강성의 영향으로 수평으로 굽힘변형이 되지 않아 형상불량이 발생하는 것을 해석에서 예측하고 있으며, 시험에서도 유사한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4. 3차원 모델 해석

4.1 3차원 부분 모델 구성

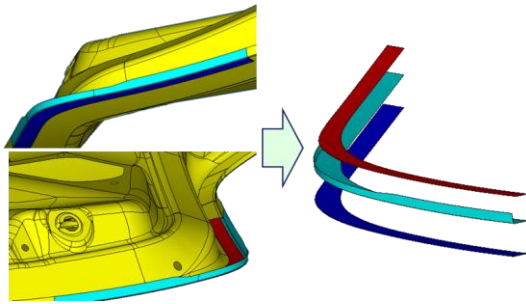


Fig. 9 Description of a three-dimensional part model for roller hemming analysis

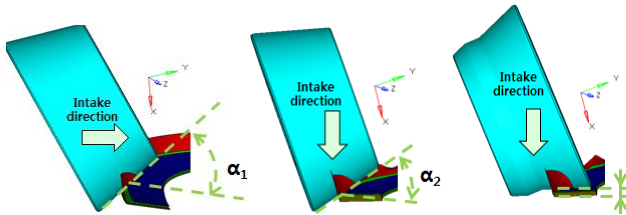
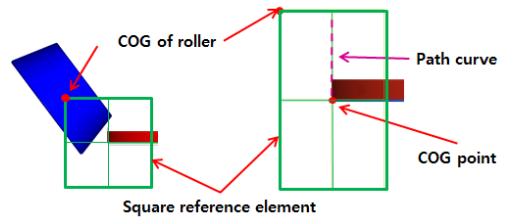


Fig. 10 Schematic illustration of the roller position and bending angle for the finite element analysis

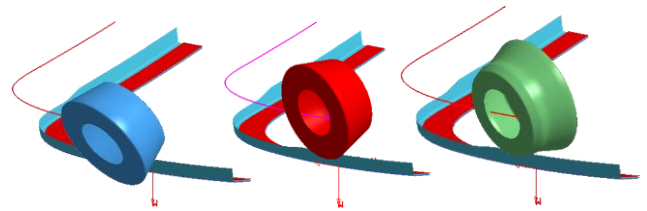
제3절에서는 헤밍공정 중 불량 발생 가능성이 높은 영역의 면외곡률을 제거하여 평면 부분모델을 제작하여 헤밍공정 중의 불량을 파악하였으며, 이를 활용한 공정변수의 최적설계 등에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 그러나, 일반적인 차체부품은 면외곡률을 포함하고 있어 헤밍공정의 변형기구를 파악하는 것은 한계가 있다. 본 절에서는 대상부품의 곡률을 반영하기 위한 해석을 부분모델을 활용하여 실시하였다. Fig. 9와 같이 트렁크 리드의 테일램프(tail lamp) 구간을 선정하여, 부분모델을 구성하고 해석을 실시하였다. 해석에 활용된 블랭크 재질 및 기타 조건은 모두 제3절과 동일하다.

4.2 공정 조건

3차원 부분모델의 경우에도 면외곡률을 제거한 평면 부분모델과 동일한 방식으로 순차 성형하게 된다. Fig. 10에 제3단계 공정에서의 헤밍 롤러 및 굽힘각을 도시하였다. 면외곡률로 표현될 수 있는 헤밍각도를 가진 플랜지를 성형하기 위한 롤러의 기울기는 제품면 형상에 따라 바뀌게 된다. 따라서, 절대 좌표계로 롤러의 굽힘각을 제어할 수 없고 헤밍성형 중에 달라지는 헤밍각도에 따라 국부 좌표계를 이용해 굽힘각을 제어해야 한다.



(a) reference rectangular element



(b) calculated roller path

Fig. 11 Extraction of the roller path and application of the boundary condition for the roller movement

4.3 롤러 궤적 구현

롤러의 운동을 모사하기 위하여 롤러의 무게중심과 롤러의 궤적을 동일선상에 위치시키는 것이 필요하다. 이를 위하여 Fig. 11(a)와 같이 사각형 기준요소(reference element)를 생성하여 요소의 중심을 롤러궤적과 동일선상에 위치시키고 요소의 한쪽 끝절점을 롤러의 무게중심과 동일하게 일치시켰다. 기준요소를 롤러의 궤적에 따라 이동시키는 사전해석을 수행하여 롤러의 무게중심과 일치되어 있는 절점의 운동을 추출할 수 있다. 생성된 궤적을 롤러의 무게중심의 변위 경계조건으로 부과하고 해석을 수행하였다. Fig. 11(b)에 도시한 바와 같이 롤러가 운동 궤적을 벗어나지 않고 성공적으로 성형이 되었음을 확인할 수 있었다.

4.4 해석 결과

성형해석으로부터 도출된 헤밍 하중을 Fig. 12에 도시하였다. 제1공정의 최대하중은 820N이고, 전체적으로 반력의 진동량은 평면 부분모델에 비해 작지만 반력의 크기는 더 크게 나타났다. 제2공정의 최대하중은 540N이고, 반력의 진동량이 심하게 나타났다. 제 1공정에서 발생한 곡선구간의 주름에 의해 롤러와 플랜지간의 접촉이 불균일하게 발생하여 반력 진동량이 매우 크게 나타났다. 제3공정의 최대하중은 960N이고, 평면 부분모델에 비해 하중이 작게 나타났다. 하중 진동량은 국부적인 주름의 영향으로

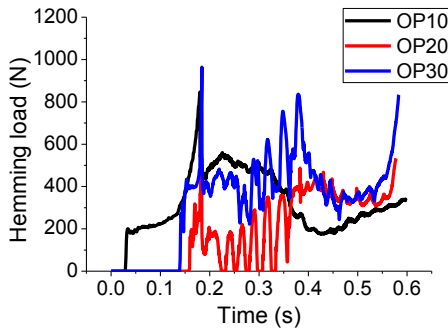
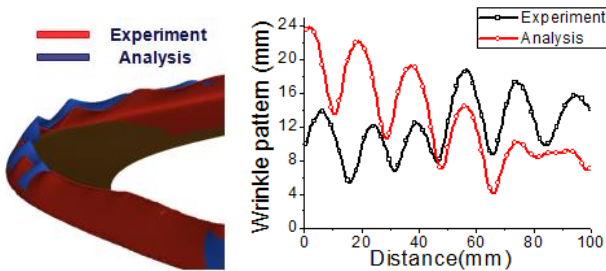
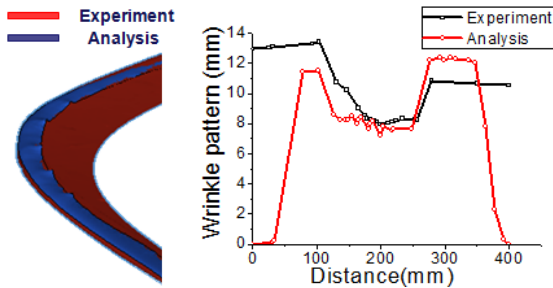


Fig.12 Change of the hemming load according to time from the finite element analysis



(a) OP10



(b) OP30

Fig.13 Comparison of deformed shape between the analysis and the experiment

곡선구간에서 더 커지는 경향을 보였다.

해석에서 얻은 변형 형상이 실제 헤밍 공정을 잘 예측하는가를 검증하기 위하여 시험성형에서 얻은 시제품의 형상과 비교하였다. 광학식 3차원 스캐너를 통하여 시제품의 형상데이터를 추출하였고, 주름 발생의 경향과 크기를 해석결과와 비교하였다. Fig. 13에 도시한 바와 같이 플랜지 끝부분의 변위를 비교하였으며, 제1공정에서는 플랜지부 주름높이와 패턴은 시험과 정성적으로 잘 일치하는 경향을 보인다. 주름 높이의 오차가 50% 정도로 크게 나온 반

면 주름 주기는 12%의 오차로 해석에서 비교적 잘 예측하고 있음을 확인하였다. 최종 헤밍성형에서는 주름발생 경향이 과대평가되고 있으며 시험결과와의 측정 시 시제품의 부분형상 추출을 위한 제품 절단시의 미소변형, 측정점 차이에 의하여 정확한 평가가 어려웠다.

5. 결론

본 논문에서는 롤러 헤밍 공정의 3차원 해석방법을 제안하였다. 이를 위하여 해석모델 구성 및 경계조건 부여, 시험과 비교 및 분석 등을 수행하였으며, 실제 공법설계에의 적용가능성을 확인하였다. 본 논문에서 수행된 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 차량 트렁크 리드의 롤러 헤밍 해석을 위한 평면 부분모델을 구성하였으며, 평면상의 헤밍 궤적을 구현하였다. 성형의 문제점 및 불량률을 정량적으로 나타내기 위하여 헤밍 하중과 성형 후 제품의 플랜지 끝에서 나타나는 주름을 정량화하였으며, 실제 제품과 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다.

(2) 양산 헤밍 공정에서 발생하는 변형기구의 정확한 예측을 위하여 3차원 부분모델을 구성하였으며, 기준요소를 활용한 3차원 헤밍 궤적을 구현하였다. 헤밍 공정해석결과와 시험결과를 비교했을 때 정성적으로 유사한 결과가 도출되었다.

(3) 평면 부분모델의 경우 제품의 면외곡률을 제거하여 변형을 단순화시켜 제품과 롤러형상 등 공정변수의 초기 설계 시에 효과적으로 활용할 수 있으며, 3차원 부분모델의 경우 불량률이 집중적으로 발생하는 구간에 적용하여 정확한 헤밍 성형성 등을 판정하는데 활용이 가능할 것으로 예상된다.

(4) 헤밍공정에서 발생하는 주름의 예측 정확성을 주로 파악한 결과 정성적으로 잘 일치하는 결과를 보였으나, 주름 높이 등의 불량 크기에 대한 예측정확도가 상대적으로 낮아지는 경향을 보였다. 이의 해결을 위하여 해석 변수의 최적화 등의 추가연구가 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

[1] J. H. Kim, J. H. Kwak, S. H. Kim, Y. H. Ju, H. S. Shin, 2016, Finite Element Analysis and Parameter Optimization for the Press Hemming of Automotive

- Closures, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 1, pp. 29~35.
- [2] B. Jonkers, 2006, Simulation of the Robot Roller Hemming Process, Master Thesis, University of Twente, Netherland.
- [3] S. H. Kim, M. S. Kim, J. D. Rho, Y. H. Ju, J. H. Kim, H. S. Shin, 2012, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. Autumn Conf., Kor. Soc. Precis. Eng., Seoul, Korea, pp. 557~558.
- [4] ETA Inc., eta/ DYNIFORM 5.8 User's Manual, 2011.
- [5] T. Hughes, W. Liu, 1981, Nonlinear Finite Element Analysis of Shells: Part I. Two-Dimensional Shells, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 27, No. 2, pp. 167~181.
- [6] T. Belytschko, J. Lin, C. Tsay, 1984, Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 42, No. 2, pp. 225~251.
- [7] 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.
- [8] J. D. Rho, 2014, Optimum Process Parameter Design for Roller Hemming with Finite Element Analysis and Design of Experiment, M. S. Thesis, Daegu University, Gyeongbuk, Korea.