유한요소해석을 이용한 하이브리드 헤밍과 롤러 헤밍의 비교

조덕상1 · 오명환2 · 김래형2 · 김지훈3,#

Comparison of Hybrid Hemming and Roller Hemming Using Finite Element Analysis

D. S. Jo, M. H. Oh, R. H. Kim, J. H. Kim

(Received April 23, 2021 / Revised May 25, 2021 / Accepted May 28, 2021)

Abstract

In this study, the hybrid and roller hemming processes of aluminum alloy sheets were compared using the finite element analysis. The aluminum alloy 6014-T4 sheet with a thickness of 1 mm was used for the hemming process. The mechanical properties of the aluminum sheet obtained through a uniaxial tensile test were used for the simulation. The finite element analysis of hybrid and roller hemming was performed using a commercial software (ABAQUS) by the use of the mechanical properties. The finite element simulation results showed that the hybrid hemming holds an advantage over the roller hemming in terms of the dimensional accuracy

Keywords: Aluminum alloy, Finite element analysis, Hybrid hemming, Roller hemming

1. 서 론

최근 자동차 산업은 연비 향상을 목적으로 차체 경량화에 관심이 많다. 이를 목적으로 차체를 구성 하는 파트인 후드, 트렁크 리드, 도어 등에 알루미 늄 소재를 사용하고 있으며 무빙 파트 조립 공법의 하나인 헤밍 공법 또한 알루미늄 소재의 적용을 위 해 연구개발이 진행되고 있다. 헤밍공법은 차체의 아웃터 패널과 이너 패널을 일정한 장치를 이용하 여 아웃터 패널의 플랜지를 접는 공법이다.

기존의 프레스금형이나 테이블탑을 이용한 헤밍 공정은 헤밍 펀치가 전체 헤밍 구간을 동시 가압하 는 면 접촉식 방식이다. 하지만, 복잡한 자동차부품 에 적용하기 힘들기 때문에 복잡한 형상의 자동차 부품에는 로봇을 이용한 롤러헤밍 공정을 사용한다. 롤러헤밍은 테이블탑 헤밍과 달리 롤러가 헤밍 플 랜지를 가압하며 헤밍 라인을 따라 이동하는 점 접촉식 가압 방식이다. 최근에는 테이블탑 헤밍공정과 롤러헤밍공정을 함께 사용하는 하이브리드 헤밍공정이 연구되고 있다. Fig. 1은 하이브리드 헤밍 공정의 절차를 묘사하였다. 1번째 단계로 플랜징(flanging)을 하여 원하는 각도 (90°)로 편치를 이용하여 테이블탑 헤밍한다. 2번째로 프리헤밍(pre hemming) 단계에서는 최종 형상으로 만들기 전에 시편을 이너(Inner) 판재안에 위치시키고 30°~60°로 지그(jig)를이용하여 헤밍한다. 마지막 3번째로 롤러(roller)를이용하여 프리헤밍이 끝난 소재를 최종 롤러헤밍한다.

헤밍공정에서 발생하는 주된 불량은 Fig. 2와 같이 롤인(roll-in), 턴다운(turn-down), 주름, 파단 등의 불 량이 있다.[1] 테이블탑 헤밍공법은 롤인과 턴다운 및 면품질 불량이 흔히 발생하며 롤러 헤밍공법은 주름불량이 흔히 발생한다. 이러한 불량들을 예측 및 해소하기 위하여 헤밍 공정에서의 유한요소해석 이 필요하다.[2-4]

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail : kimjh@pusan.ac.kr

ORCID: 0000-0001-9334-0503

^{1.} 부산대학교 기계공학부, 대학원생

^{2.} 성우하이텍 R&D 본부 선행기술팀, 책임연구원

^{3.} 부산대학교 기계공학부, 교수

본 연구에서는 하이브리드 헤밍 공정의 이점을 확인하기 위하여 기존의 롤러 헤밍 공정과의 형상 결함과 헤밍품질의 척도인 헤밍갭(hemming gap)의 차이를 상용소프트웨어 ABAQUS프로그램을 이용하여 직선형상의 알루미늄 6014-T4시편의 하이브리드헤밍 공정을 분석하였다.



Fig. 1 Hybrid roller hemming process

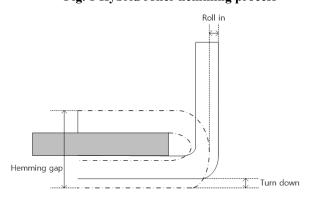


Fig. 2 Types of defects in the hemming process

2. 실 험

2.1 일축 인장 실험

인장 시험 시편은 두께 1 mm 알루미늄 6014-T4 소재를 ASTM E8 standard 시험편을 압연방향을 기준으로 0°, 45°, 90° 각도로 각각 와이어 가공하여 제작하였다. 인장시험은 방향별로 진행하였고 소재의 항복강도 및 이방성 계수를 측정하였다. 측정된 인장곡선은 Fig. 3와 같고 소재의 기계적물성은 Table 1과 같다.

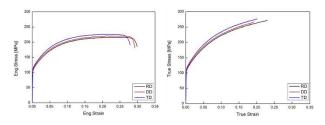


Fig. 3 Measured tensile stress-strain curve of AA6014-T4

Table 1 Mechanical property of AA6014-T4

| Average condition | Elastic Modulus [GPa] | Yield Stress [MPa] | Ultimate Tensile strength [MPa] | Elongation [%] | R- value |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------|
| RD | 66.13 | 112.9 | 218.0 | 31 | 0.567 |
| DD | 68.55 | 114.6 | 222.0 | 29.5 | 0.455 |
| TD | 63.98 | 119.6 | 228.1 | 27 | 0.748 |

3. 유한요소 모델링

3.1 재료 물성

이번 연구에서 사용한 알루미늄 판재의 경우 큰이방성을 가지고 있기 때문에 이방성을 고려한 식(1)의 Hill 항복함수를 사용하였다[5]. 등방경화법칙으로는 Swift 모델과 Voce 모델이 주로 사용된다. Swift 모델은 유효변형률이 누적하면 계속해서 유효응력이 증가하는 형태이며, Voce모델은 유효응력이수렴하는 형태이다. 이번 논문에서는 식(2)와 같은 Swift 모델을 사용하였다.

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \bar{\sigma}^2$$
 (1)

$$\sigma = a(\varepsilon - \varepsilon_0)^b \tag{2}$$

여기서, F, G, H, L, M, N, a, b, ε_0 는 재료 상수이 며, σ_{ij} 는 응력텐서의 성분, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력이다. Hill 항복 함수 계수는 R-value를 기준으로 도출하였고 전단응력에 해당하는 변수를 정량화 하기 위하여 재료상수 L, M, N이 같다고 가정하였다. 재료상수는 Table 3, Table 4와 같다.

Table 3 Material constant of Hill yield function

| _ | F | G | Н | L | М | N |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.481 | 0.625 | 0.375 | 1.106 | 1.106 | 1.106 |

Table 4 Material constant of swift model

| а | b | \mathcal{E}_0 | |
|-------|--------|-----------------|--|
| 411.7 | 0.2745 | -0.007645 | |

3.2 유한 요소 모델

상용 유한 요소 해석 프로그램 Abaqus를 사용하여 하이브리드 헤밍 공정과 롤러 헤밍 공정을 구현하였다. 시편은 8 절점 육면체 요소(C3D8R)로 구성하였다. 시편을 제외한 롤러, 다이, 지그, 펀치는 강체(rigid body)로 설정하였다. 시편의 요소크기는 0.2×0.2×0.2 mm³, 펀치와 시편의 마찰계수는 0.15, 지그와 시편의 마찰계수 역시 0.15, 롤러와 시편의 마찰계수는 0으로 설정하였다. 유한요소해석 시간을 단축하기 위하여 Mass scaling은 100,000으로 진행하였고 Fig. 4과 Fig.5과 같이 하이브리드 헤밍 공정과롤러 헤밍 공정을 모델링하였다.

Fig. 6은 3단계의 하이브리드 헤밍 공정을 묘사하였다. 첫번째 단계에서는 두께 1 mm, 크기 200 mm×25 mm의 시편을 플랜징길이 9 mm가 되게 플랜징한다. 경계조건은 시편과 접촉되는 punch와 die에게 surface to surface contact조건을 사용하였다. 두번째 단계에서는 플랜징이 완료된 시편을 지그가 접촉하여 원하는 각도인 30°로 프리헤밍한다. 첫번째 단계와 마찬가지로 시편과 접촉되는 지그와 이너판재에 surface to surface contact조건을 사용하였다. 마지막단계에서는 롤러에 180 kgf의 하중을 부여하여 가압한후 80 mm/s의 속도로 롤러 헤밍하여 공정을 완료하였다. 롤러 헤밍 공정에서는 하이브리드 헤밍 두번째 공정에서 사용하였던 지그대신 롤러를 사용하여프리헤밍 공정을 하였다. 롤러 헤밍에서의 공정조건은 하이브리드 헤밍 공정조건과 같다.

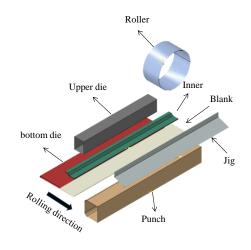


Fig. 4 Modeling of hybrid roller hemming process

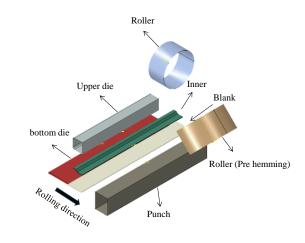


Fig. 5 Modeling of roller hemming process

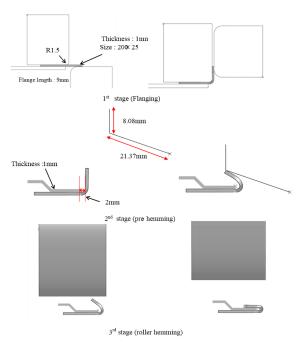


Fig. 6 Schematic models of hybrid roller hemming process

4. 결 과

4.1 유한 요소 해석

본 논문에서는 직선형상의 시편을 유한요소해석을 이용하여 하이브리드 해밍 공정과 롤러 해밍 공정을 같은 조건에서 구현하였고 그 결과를 비교하였다. 서론에서 언급하였듯이 3단계중 첫번째인 플랜징단계부터 진행하였다. Fig. 7과 같이 최대 변형률은 0.272로 나타났고 플랜징 목표각도 90°에서 93°로 조금의 스프링백이 일어나는 것을 알 수 있었다.

플랜징단계는 하이브리드 헤밍 공정과 롤러 헤밍 공정이 동일하기 때문에 롤러 헤밍 공정은 생략하 였다.

두번째 단계인 프리헤밍에서는 최대 변형률은 0.480으로 나타났고 플랜징단계와 마찬가지로 Fig. 8과 같이 목표각도 30°에서 35°로 조금의 스프링백이일어났다. 또한, 헤밍품질의 기준인 롤인은 0.6 mm로 나타나는 것을 알 수 있었다. Fig. 9 (a)는 롤러 헤밍 공정의 유한요소해석 결과이다. Fig. 9 (a)와 Fig. 9 (b)를 비교하여보면 하이브리드 헤밍 공정에 비하여롤러 헤밍 공정이 많은 주름이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 금형이 동시에 소재에 변형을 가하는 하이브리드 헤밍과 달리 롤러가 순차적으로소재에 접촉하기 때문으로 판단된다.

하이브리드 헤밍의 마지막단계인 롤러헤밍에서는 시편 중앙부분에서 Fig. 10 (a)와 같이 최대변형률 0.500, 헤밍갭은 3.10 mm을 나타내는 것을 알 수 있

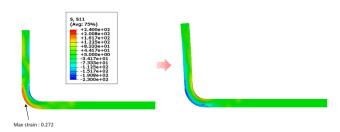


Fig. 7 Center section before and after springback after hybrid roller hemming flanging stage



Fig. 8 Center section before and after springback after hybrid roller hemming pre hemming stage

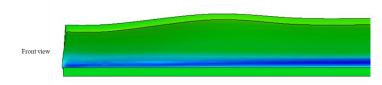


Fig. 9 (a) Comparison finite element analysis result: roller hemming process after pre hemming

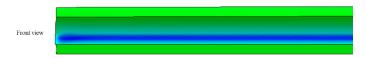


Fig. 9 (b) Comparison finite element analysis result: hybrid roller hemming process after pre hemming

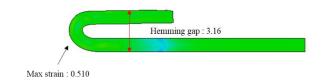


Fig. 10 (a) Finite element analysis result: center section of hybrid roller hemming process

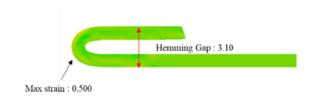


Fig. 10 (b) Finite element analysis result: center section of roller hemming process

고 롤러헤밍에서는 Fig. 10 (b)와 같이 시편 중앙부분에서 최대변형률 0.510, 헤밍갭은 3.16 mm을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 11의 유한요소해석결과를 볼 때 하이브리드 헤밍과 롤러헤밍 모두 형상결함은 없는 것으로 판단된다. 위치마다 헤밍갭을 비교한 Fig. 12를 보면, 하이브리드 헤밍공정에 비해 롤러 헤밍 공정은 미세한 주름을 확인할 수 있고 양 끝부분의 헤밍갭은 0.05 mm 차이가 발생했다. 이는 프리헤밍 단계에서 발생한 주름이 원인으로 판단된다. 프리헤밍 단계에서 발생하는 주름은 직선이 아닌 곡선이나 모서리형상의 헤밍에서 그 영향이 더 커질 수 있다.

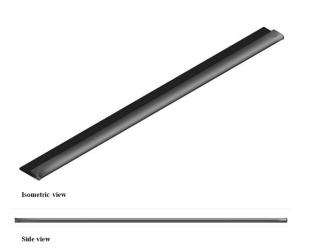


Fig. 11 (a) Finite element analysis result: hybrid roller hemming process

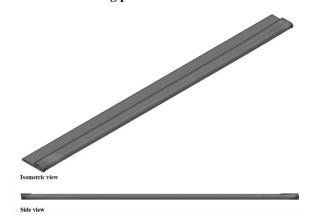


Fig. 11 (b) Finite element analysis result: roller hemming process

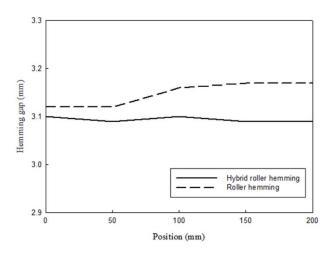


Fig. 12 Comparison of hemming gap between hybrid roller hemming process and roller hemming process

5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 6014-T4 두께 1 mm 판재를 이용하여 하이브리드 헤밍 공정과 롤러헤밍 공정을 유한요소 해석하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다. 본 논문에서 수행된 연구내용을 요약하면다음과 같다.

- (1) 하이브리드 헤밍과 롤러 헤밍의 유한요소 해석을 통해서 플랜징 단계, 프리헤밍 단계, 최종 단계의 형상을 예측할 수 있었다.
- (2) 하이브리드 헤밍 공정과 롤러 헤밍 공정의 프리헤밍 단계에서의 유한요소해석결과를 비교하여보면 하이브리드 헤밍 공정의 경우에는 주름과 같은 형상결함이 발생하지 않지만 롤러 헤밍 공정의경우에는 큰 주름이 발생하였다. 이는 롤러 헤밍의경우 순차적으로 시편에 접촉하면서 주름을 발생시키기 때문이다.
- (3) 하이브리드 헤밍 공정과 롤러 헤밍 공정의 롤 러헤밍 단계에서의 유한요소해석결과를 비교하여 보면 롤러 헤밍 공정의 경우 높이 차이가 더 크게 발생한다.

직선형상에서 최종 형상은 결함이 없지만, 곡선, 모서리 같은 형상의 혜밍 공정에서는 롤러가 유발 하는 주름의 영향이 더 크게 나타날 수 있다. 롤러 하중, 플랜징길이 등의 공정 조건이 형상에 미치는 영향에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 자동차부품기업활력제 고사업으로 지원된 연구결과입니다. (경량화 알루미늄 차체부품 및 소재 성형 실용화 기 술 개발, 20007428).

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 https://doi.org/10.5228/KSTP.25.1.29
- [2] B. Jonkers, 2006, Simulation of the Robot Roller Hemming Process, Master Thesis, University of Twente,

Netherland.

- [3] Zhengwei Gu, Gang Wang, Ge Yu, 2020, Investigation on Fracture of a 6014-T4 Aluminum Alloy sheet in the Flanging and Hemming Process Based on Numerical and Experimental Methods, metals, Vol.10 pp.81 ~ 95. Doi:10.3390/met10010081
- [4] J. D. Rho, J. H. Kwak, S. H. Kim, Y. H. Ju, J. H. Kim, H. S. Shin, 2016, Deformation Mechanism of the Roller
- Hemming Process with the Finite Element Analysis, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 5, pp.325 \sim 331 https://doi.org/10.5228/KSTP.2016.25.5.325
- [5] 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 https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045