

# 원형디스크 지지 방식의 롤피어싱 공정의 유한요소해석

심상현<sup>1</sup> · 조재민<sup>1</sup> · 이민철<sup>2</sup> · 전만수<sup>#</sup>

## Finite Element Analysis of a Roll Piercing Process Equipped with Diecher's Guiding Discs

S. H. Shim, J. M. Cho, M. C. Lee, M. S. Joun

(Received September 1, 2011 / Revised January 4, 2012 / Accepted January 6, 2012)

### Abstract

In this paper, a Mannesmann roll piercing process equipped with Diecher's guiding discs is investigated using a rigid-thermoviscoplastic finite elements method with intelligent remeshing capability and tetrahedral elements. The analysis model is presented and the approach is applied to a Mannesmann roll piercing process found in the literature. Details about the remeshing criterion as well as mesh density control are given. The present predictions are compared with the predictions found in the literature, showing that the two predictions are in close agreement in terms of the deformed shape. However, it is emphasized that the present approach has the distinct strength in predicting details of final shape.

**Key Words** : Seamless Pipes, Mannesmann Roll Piercing, Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Analysis

### 1. 서 론

상업용 금속 파이프에는 용접파이프(welded pipes)[1]와 무용접파이프(seamless pipes)[2] 두 종류가 있다. 용접파이프는 박판 또는 후판재를 굽혀서 기본적인 형상을 성형하고 연결부위를 따라 용접하여 만든다. 반면에 무용접파이프는 Mannesmann 효과[2]를 이용하여 봉재를 길이방향으로 피어싱하여 만든다. 용접파이프는 제조원가가 적고 제조가 용이하기 때문에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 용접파이프는 무용접파이프에 비하여 신뢰성이 떨어지고 강도가 낮은 문제가 있다. Mannesmann 효과는 압축 성형 시에 발생하는 인장응력 상태에서 발생하는 일종의 결합적 요소이지만 롤피어싱에서는 구멍의 생성을 유도하며, 그 구멍이 원하는 형상으로 성형되는 과정에서 파이프의 금속

조직을 미세화하며 균일화하므로 무용접파이프의 품질은 향상된다. 이런 이유로 고압 및 고신뢰성이 요구되는 목적으로 무용접파이프가 주로 사용되고 있다.

일반적으로 무용접파이프의 제조공정은 롤피어싱 또는 천공롤링(pierce rolling)과 후속공정으로 이루어진다. 후속공정에는 신장롤링(elongation rolling), 축소롤링(reduction rolling) 등이 포함된다. 롤피어싱은 봉재로부터 두꺼운 파이프를 제조하는 공정이며, 신장롤링은 두꺼운 파이프로부터 얇은 파이프를 제조하는 공정이고, 축소롤링은 최종적인 제품을 제조하는 공정이다. 무용접파이프의 제조 공정에서 롤피어싱 공정은 후속공정에 지대한 영향을 미치므로 산업계의 주요 관심사는 롤피어싱 공정이다.

대표적인 천공기술로는 크게 세 가지 종류가

1. 경상대학교 기계공학과 대학원

2. 경상대학교 연구교수

# 교신저자: 경상대학교 기계공학부/공학연구원,

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

있다[3]. 즉, 프레스롤피어싱(press roll piercing[4]), 바렐형 회전 피어싱(barrel-type rotary piercing[5~8]), 콘타입형 회전 피어싱(cone-type rotary piercing [3,9, 10])이 그것이다. 바렐형 회전 피어싱은 Mannesmann 피어싱으로 널리 알려져 있으며, 이 공정에서 롤의 형상은 바렐 형상을 하고 있다. Mannesmann 피어싱은 Mannesmann 효과, 즉 소재의 중심부에서 발생하는 인장응력과 관련이 크다. 이 문제는 많은 연구자들에 의해 연구되었으며, 아직 주요 관심사가 되고 있다[2].

Mannesmann 피어싱 공정은 사용하는 롤의 수와 소재를 지지하는 방식에 따라 다소의 차이가 있다. 롤을 세 개 사용할 경우, 지지하는 장치가 불필요한 반면, 롤이 두 개일 경우 소재를 압연 축과 일치시키기 위한 지지 장치가 필요하다. 지지 장치로는 Mannesmann 방식의 롤, Stiefel 방식의 평판, Diescher 방식의 디스크 등의 세 방법이 있다[7].

무용접파이프는 주로 가스 및 석유산업에 이용되고 있으며, 고강도 및 고품질의 요구에 부응하기 위한 난성형 재료 등으로 적용이 넓어지고 있다. 이에 따라 공정의 상세한 분석과 이를 바탕으로 한 최적 공정 조건의 결정 등을 포함한 공정설계 기술이 공정 개발의 성패를 좌우하고 있다. 관련 산업 현장의 요구는 파이프의 내부 품질과 맨드릴의 마모수명을 고려한 피어싱 시의 맨드릴의 위치를 결정하는 방법으로 요약된다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 많은 연구자들이 해석 기술, 특히 유한요소해석 기술의 접목을 시도하였다.

Urbanski 와 Kazanecki[11]는 2 차원 유한요소법을 이용하여 롤피어싱에 관한 연구를 시도하였다. 그러나 실제 롤피어싱 공정은 복잡한 3 차원 공정이므로 2 차원 접근방법은 공정설계 목적으로의 적용에 이르지 못하였다. Mori 등[5]은 일반화된 평면변형 모델링 기법을 이용한 간소화된 3 차원 강소성 유한요소법을 이용하여 롤피어싱 공정을 해석하였다. 이 방법에서는 롤피어싱 공정을 물단조 공정으로 근사화되었으며, 압연 방향으로의 소재의 연신은 단면에서 일정하다고 가정하였다. Mori 등의 연구결과는 플라스틱인(plasticine)을 이용한 실험결과와 잘 일치하는 것으로 보고되었다. Komori [6]는 3 차원 강소성 유한요소법을 이용하여 Mannesmann 피어싱 공정을 정상상태의 가정하에서 해석하였으며, 해석 결과가 플라스틱인(plasticine)의

실험결과와 잘 맞다는 사실을 발표하였다. 그리고 주요 변수가 공정에 미치는 영향을 분석하였다. Pater[7] 등은 Diescher 의 지지 장치를 이용한 롤피어싱 공정에 대한 연계해석을 실시하였다. Pater 등은 육면체요소망을 사용하였으며, 육면체요소망이 안고 있는 요소망재구성상의 한계에 기인하는 것으로 추정되는 주요 부위의 형상의 변화가 크게 나타났다.

본 논문에서는 사면체요소망을 이용한 지능적 요소망재구성기법과 강열점소성 유한요소법을 이용하여 Pater 등[7]이 연구한 것과 동일한 공정을 대상으로 유한요소해석을 실시하고 그 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 디스크 지지 Mannesmann롤피어싱 공정의 유한요소해석

Fig. 1에서 보는 바와 같이 디스크 지지 Mannesmann 롤피어싱 공정은 원형 중실 소재, 두 개의 드럼형상의 작업롤(work roll), 두 개의 디스크 형상의 지지롤, 피어싱 목적의 맨드릴로 구성된다. 해석 목적의 소재의 길이는 적절하게 작게 하되, 뒷부분의 요동을 막기 위한 장치 또는 조건이 필요하다. 본 논문에서는 초기에 후미에서 소재를 밀어 안착을 유도하고 흔들림을 방지하기 위한 목적으로 파이프 형태의 미는 금형(pusher)을사용하였다.

Pater 등[7]은 소재 후미에서 소재를 단순히 밀어주는 금형을 사용하였으나, 본 논문에서는 파이프 형태의 미는 금형을 통하여 흔들림이 발생하

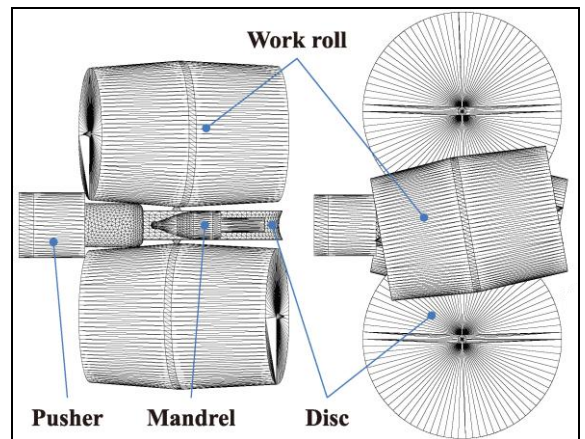


Fig. 1 Analysis model of a roll piercing process

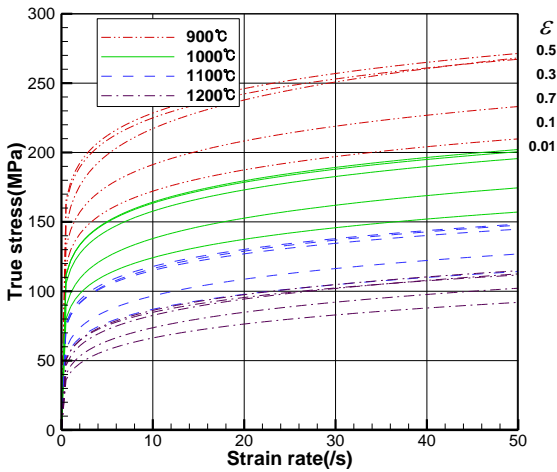


Fig. 2 Flow stress information

지 않도록 하였다. 미는 금형은 실제 소재의 이송 속도보다 작게 하며, 작업롤과의 접촉이 발생하여 정상적으로 롤피어싱이 이루어지면 인장력에 의하여 분리되도록 하였다.

Mannesmann 롤피어싱 공정의 해석을 위해서는 공정의 적절한 모델링이 선행되어야 한다. 일반적으로 물과 소재간의 접촉 상태를 정확하게 모델링하는 것은 용이하지 않다. 현재까지 실시된 대부분의 연구에서 물과 소재의 접촉조건으로 일정전단마찰법칙과 마찰상수 0.6을 사용하였으며, 실제적으로는 접촉조건을 부과한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서도 작업롤과 소재 사이에는 미끄럼이 발생하지 않는다고 가정하였다. 디스크형상의 지지롤과 소재 사이의 마찰은 일정전단마찰이 작용하는 것으로 가정하였으며, 마찰상수를 0.4로 가정하였다. 맨드릴이 힘의 평형에 의하여 자전하기 때문에 맨드릴과 소재 사이는 무마찰로 간주하였다.

본 논문에서 해석 대상으로 선택한 공정은 Pater 등 [7]이 해석한 공정과 동일하며, 주요 공정 변수는 다음과 같다.

- 소재 종류 : SUJ2(100Cr6)
- 유동응력 곡선 : Fig. 2
- 기초소재의 반경 : 60.0 mm
- 롤 회전 속도 : 60.0 rpm
- 가이드 롤 회전속도 : 6.8 rpm
- 초기 소재온도 : 1180.0℃
- 초기 맨드릴 온도 : 300.0℃
- 초기 작업롤, 가이드롤 온도 : 100.0℃

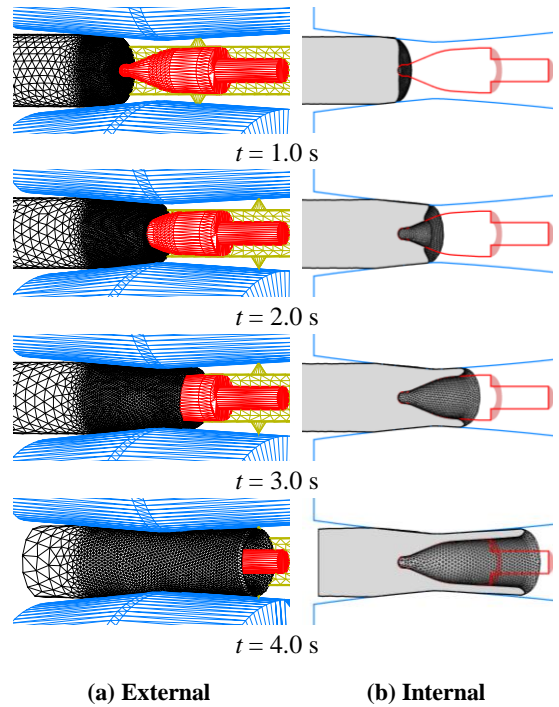


Fig. 3 History of deformation

성형 공정 해석은 AFDEX 3D을 [13] 이용하여 실시되었다. 사면체요소의 수를 50000개 내외가 되도록 하였고, Fig. 3에서 보는 바와 같이 소성변형 구간에서 요소밀도가 조밀하도록 하였다. 요소 조밀구간은 작업롤의 중심으로부터 입구측으로 70.0mm 떨어진 지점과 출구측으로 100.0mm 떨어진 지점 사이의 영역으로 정하였으며, 그 이외의 영역을 기준으로 한 요소 조밀구간의 요소밀도를 5배로 하였다. 요소의 최대허용 뒤틀림 각도가 179.9°에 도달하거나, 최대허용 각도변화율이 0.25 이거나, 소재가 금형에 침범할 수 있는 최대허용량이 0.5mm에 이르거나, 경계선분의 최대허용 길이 변화율이 2.5 보다 크게 되면 요소망재구성이 발생하도록 하였다. 해석결과를 얻는데 총 73회의 요소망재구성이 실시되었다.

주요 해석 결과를 Fig. 3~6에 나타내었다. Fig. 3은 변형 이력을 요소망 정보와 함께 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 외부의 변형 이력을 나타내며, Fig. 3(b)는 내부의 변형 이력을 나타내고 있다. Fig. 4는 주요 부위별 소재의 단면 형상을 나타내고 있으며 Fig. 3의 결과와 마찬가지로 기초 소재는 작업롤을 통과하는 순간 단면이 감소하지만 소재가

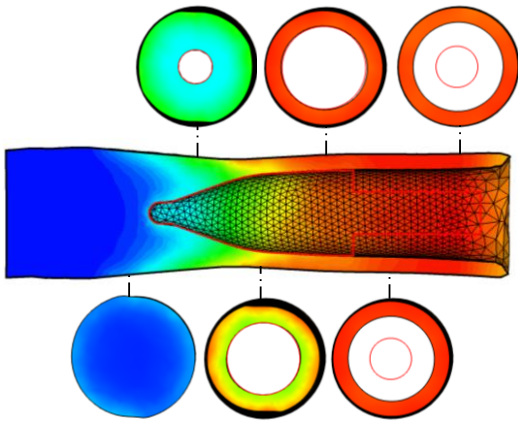


Fig. 4 Deformed cross-sections with strain distributions of the workpiece after 5 seconds

작업롤을 통과하면서 다소 반경이 증가함을 알 수 있다. 그리고 맨드릴을 통과하기 이전에는 작업롤 사이에서 소재의 단면은 원형을 유지하지 못하고 일그러진 형상이 되며, 소재가 맨드릴을 벗어나면서 점점 원형 단면에 가깝게 됨을 알 수 있다. 소재의 타원율을 구해본 결과 맨드릴의 플러그 중간부분에서 타원율이 최대값에 이르며, 그 크기는 1.057로 나타났다. 소재가 완전히 빠져나왔을 때 소재의 단면은 원형에 가깝게 나타났다. Pater 등[7]의 해석 결과와 비교해 본 결과, Pater 등이 예측한 타원율은 최대 1.054에서 최소 1.007이며, 이것은 본 연구에서 예측한 해당 단면에서의 타원율과 거의 일치하는 결과이다.

Fig. 5는 외부와 내부의 유효변형률의 분포를 나타내고 있으며, Fig. 6는 온도 분포를 나타내고 있다. 해석 결과에서 소재의 부피의 변화는 0.1% 이하로 나타났으며, 이 결과는 본 연구에서 채택한 각종 수치기법의 신뢰성과 관련이 있는 것이다.

한편, AFDEX 3D의 해석결과와 Fig. 7의 Pater 등 [7]의 해석결과를 비교한 결과, Pater 등의 해석 결과에서는 소재의 모서리 부분이 과도하게 뭉개진 것을 알 수 있다. 이는 육면체요소망의 사용에 따른 요소망재구성 상의 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 그리고 출구의 단면 모양이 비교적 크게 다르게 나타났다. 문헌상의 실험 결과[12]에 의하면, 실제 현상은 본 연구 결과와 유사하다. 진술한 몇 개의 차이점을 제외하면, 두 결과는 대체적으로 유사하다.

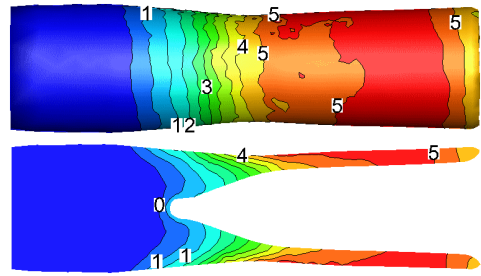


Fig. 5 Distribution of effective strain

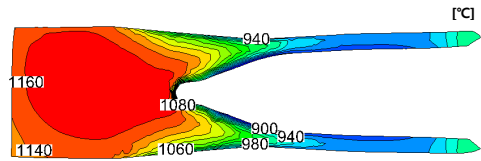


Fig. 6 Distribution of temperature

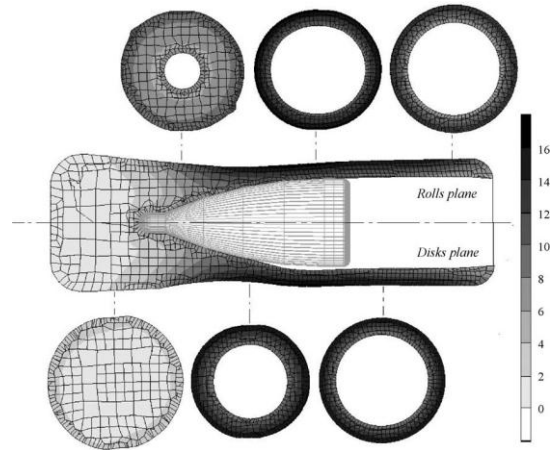


Fig. 7 Pater et al.'s predictions [6]

### 3. 결론

본 논문에서는 Mannesmann 롤피어싱 공정의 시뮬레이션을 위한 해석 모델을 제시하였다. 사면체요소망에 근거한 지능적 요소망 생성기법과 강열점소성 유한요소법이 사용되었다. 비교적 입력정보가 상세하게 제시된 Pater 등[7]이 연구한 예제를 대상으로 타당성 검증이 이루어졌다. 그 결과, 주요 부위에서의 타원율 등에서 매우 비슷한 경향을 나타내었다. 그리고 육면체요소를 사용한 Pater 등의 연구결과에 비하여 모서리 등의 표현

측면에서 사면체요소를 사용한 본 연구의 결과가 보다 우수한 것으로 평가되었다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0017012).

## 참 고 문 헌

- [1] B. W. Min, W. S. Seo, J. B. Kim, H. J. Lee, S. H. Lee, J. H. Kim, 2011, Prediction of Wrinkling in Micro R2R Forming and its Improvement, *Trans. Mater. Process*, Vol. 20, No. 1, pp. 42~47.
- [2] A. Ghiotti, S. Fanini, S. Bruschi, P. F. Bariani, 2009, Modelling of the Mannesmann Effect, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 58, No. 1, pp. 255~258.
- [3] K. Komori, K. Mizuno, 2009, Study on Plastic Deformation in Cone-type Rotary Piercing Process using Model Piercing Mill for Modeling Clay, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 11, pp. 4994~5001.
- [4] K. Komori, M. Suzuki, 2005, Simulation of Deformation and Temperature in Press Roll Piercing, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 169, No. 2, pp. 249~257.
- [5] K. Mori, H. Yoshimura, K. Osakada, 1998, Simplified Three-dimensional Simulation of Rotary Piercing of Seamless Pipe by Rigid-plastic Finite-Element Method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 80~81, pp. 700~706.
- [6] K. Komori, 2005, Simulation of Mannesmann Piercing Process by the Three-dimensional Rigid-Plastic Finite-element Method, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 47, No. 12, pp. 1838~1853.
- [7] Z. Pater, J. Kazanecki, J. Bartnicki, 2006, Three Dimensional Thermo-mechanical Simulation of the Tube Forming Process in Diescher's Mill, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 67~170.
- [8] S. Chiluveru, 2007, Computational Modeling of Crack Initiation in Crossroll Piercing, *Massachusetts Institute of Technology*, pp. 1~89.
- [9] B. Li, S. H. Zhang, G. L. Zhang, H. Q. Zhang, 2008, Prediction of 3-D Temperature Field of TP2 Copper Tubes in Three-roll Planetary Rolling Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 205, No. 1-3, pp. 370~375.
- [10] W. A. Khudheyer, D. C. Barton, T. Z. Blazynski, 1997, A Comparison Between Macroshear Redundancy and Loading Effects in 2-roll and 3-roll Rotary Tube Cone Piercers, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 65, No. 1-3, pp. 191~202.
- [11] S. Urbanski, J. Kazanecki, 1994, Assessment of the Strain Distribution in the Rotary Piercing Process by the Finite Element Method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 45, No. 1-4, pp. 335~340.
- [12] K. H. Brensing, Düsseldorf, B. Sommer, S. G. GmbH, *Steel Tube and Pipe Manufacturing Process*.
- [13] M. S. Joun, M. C. Lee, J. G. Eom, 2011, ASME Conf. Proc.(eds. Y. L. Yao, M. Bement, Z. C. Xia, B. Kinsey, X. Yang), ASME, Corvallis, Oregon, USA, pp. 161~168.