

# 중공 튜브 성형을 위한 만네스만 천공기의 개발 및 유한요소법을 이용한 공정변수 설계

이형욱<sup>1#</sup>, 이근안<sup>1</sup>, 김응주<sup>1</sup>, 최석우<sup>1</sup>, 장병록<sup>2</sup>

## Development of Rotary Tube Piercing Machine and Parametric Study on Design Variables using Finite Element Analysis

H. W. Lee<sup>#</sup>, G. A. Lee, E. Z. Kim, S. Choi, and B. L. Jang

### Abstract

Typical seamless tube production methods are an extrusion and a rotary tube piercing. The rotary piercing process is more competitive than the extrusion process from view point of productivity, quality, and flexibility. It consists of twin rolling mills, a pair of disc or flat guides, and a plug. Twin rolling mills are skewed with proper angles in two directions. A round billet is progressively fed forward and rotated due to the rotation of twin rolling mills. Internal crack initiation and growth at central area of the billet are gradually progress because of the repeating actions of tension and rotation. Design variables in the rotary piercing rolling process are the feed angle, the cross angle, the reduction ratio, and the position of plug. In this work, a rotary tube piercing machine was developed and parametric studies on design variables were carried out using finite element analysis. The Brozzo ductile fracture criterion was utilized to determine an internal crack initiation.

**Key Words** : Rotary Piercing Machine (회전천공기), Seamless Tube (심레스 튜브), Ductile Fracture Criteria (연성과 파괴기준), Finite Element Method (유한요소법)

### 1. 서론

1886년 독일 만네스만 형제에 의해 처음 고안된, 회전천공(Rotary Tube Piercing) 공정은 회전하는 2개 또는 3개의 롤 사이에서 소재를 회전, 전진시키면서 성형하는 동안에 소재 내부에 발생하는 인장응력으로 인하여 소재 중심부에 크랙이 발생하게 되고, 이 크랙 부분에 맨드렐이라는 플러그(Plug)를 삽입하여 플러그와 롤 등으로 중심부의 크랙부분 소재 유동을 적절히 조정하여 원하는 크기의 용접심(Seamless)이 없는 튜브나 파이프를 생산하는 공정이다.

튜브와 파이프를 만드는 데 사용되고 있는 공정에는 여러 가지가 있어 각기 각 공정의 장점을

가지고 지금까지 발전, 산업 생산에 응용 사용되고 있다. 이 중에서 회전천공 공정은 인장강도가 높은 특수강을 대상으로 하고 있으며, 특히 다품종 소량생산 품목 중에서 원가절감 및 생산성에서 우수하여 현재 일본, 독일, 이탈리아 등 선진 각국에서 활발히 응용하고 있는 우수한 공정이다.

회전천공 공정은 소재의 롤링을 통하여 튜브나 파이프를 생산하는 공정으로서, 일반 롤링공정처럼 그 특성상 공정 변수와 품질과의 상관관계가 매우 깊다. 회전천공 공정에서 중요하게 다루어져야 하는 공정 변수는 다음과 같다[1,2]. 롤링 소재 온도, 롤링 경사(Cross) 각도, 롤링 이송(Feed) 각도, 단면 감소율, 플러그 삽입 깊이, 롤 형상 및 플러그 형상, 운할 조건 등이다.

1. 한국생산기술연구원, 디지털성형공정팀

2. SAC(주), 기술연구소

# 교신저자: hwlee@kitech.re.kr

전통적인 만네스만 천공기는 성형롤이 배열형태로 되어있어 롤의 투입면에서 배출면까지의 롤의 수직방향 전진속도가 일정하여 길으로 보이기에는 부드럽게 천공공정이 이루어지는 것처럼 보이지만 뚫어진 튜브가 회전하면서 앞으로 전진하기 어렵게 되어있다. 이러한 효과는 회전 단조 효과(Rotary Forging Effect)를 보여 소재 내부에 결함을 유도한다. 이를 개선하기 위해서, Hayashi 등 [1]은 원추형 (Cone Type) 롤을 사용한 “the super piercer”를 개발하였다. 이 경우 반경방향 길이 때문에 추출부로 갈수록 범선 속도가 빨라지도록 하였다. 본 연구에서도 원추형 롤을 사용한 장비를 개발하였다.

회전천공기의 설계변수 중 소재의 온도는 정밀하게 제어되어야 할 요소로 초기 온도가 일정하게 공급되어도 성형속도가 증가되면 변형에너지 때문에 소재 내부의 온도가 증가하여 소재가 용융하는 불량일 수 있다. [2] 따라서 소재의 과도한 가열에 주의하여야 하며, 이는 추후의 연구에서 다루도록 하였다. Hayashi 등[3]은 원주방향의 변형과 표면 비틀림에 의한 소재의 변형모양에 대한 연구를 수행하였고, Mori 등[4]은 3차원 해석을 단순화하여 접근하고, Oyane의 연성과괴조건을 이용하여 예측의 타당성을 보였다. 최근에 Pater 등[5]은 3차원 회전천공공정을 모사하기 위하여 MSC.SuperForm를 이용하여 디스크형 가이드인 Diescher’s 밀을 사용한 공정에 대하여 열-기계적 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 플러그를 고려한 공정분석을 위하여 DEFORM/3D를 사용하여 해석을 수행하고, 이송각의 영향을 분석하기 위하여 LS-DYNA3D를 이용한 해석을 수행하여 연성과파괴모델을 적용하여 플러그 앞 단의 적절한 위치를 설계하도록 하였다.

## 2. 회전 천공 공정의 유한요소해석

### 2.1 회전 천공기의 개발

본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 원추형 롤을 사용한 회전천공기를 개발하였다. 원추형 롤의 입력각은 4도, 출력각은 3도로 설정하도록 하여 경사각 20도로 고정하였고, 이송각을 0도에서 15까지 변화시킬 수 있도록 하였다. 천공장비는 소재경 20~60mm의 소재를 성형할 수 있도록 하였고, 가이드는 직선형 가이드와 회전 디스크형 가이드를 사용할 수 있도록 제작하였다.

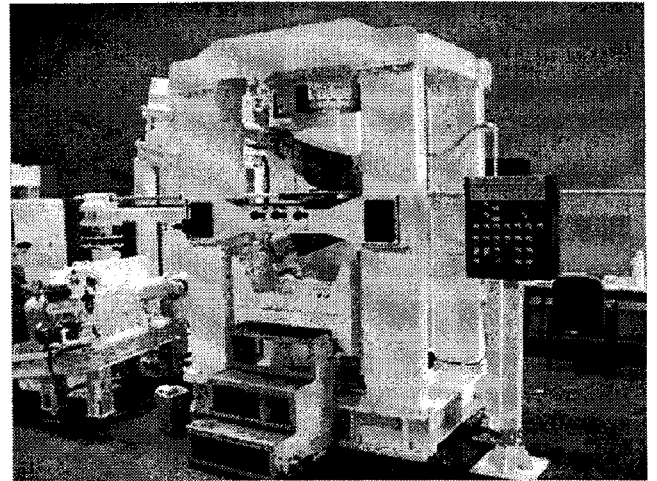


Fig. 1 Developed rotary piercing machine with cone type roll mills



Fig. 2 Pierced pure aluminum billet by developed machine

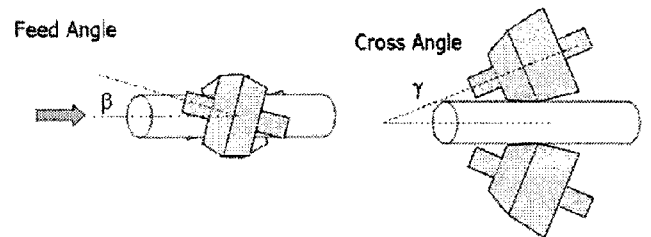


Fig. 3 Schematic diagram of the feed and cross angle

순수 알루미늄 소재에 대하여 성형을 수행하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻었고, 설계변수의 영향을 파악하기 위해서 유한요소해석을 이용하였다.

### 2.2 회전 천공 공정의 유한요소해석

회전 천공 공정의 형상설계변수 중 경사각과 이송각을 Fig. 3에 도시하였다. 본 논문에서 경사각은 20도로 고정하고, 이송각에 따른 내부 크랙의 발생가능성에 대하여 분석을 할 수 있도록 하였다. 이송각을 크게 할수록 소재는 빠르게 이송되며, 작게 할수록 소재의 회전량이 커진다. Fig. 4에 유한요소해석을 위한 모델링을 도시하였다. 천공공정을 모사하기 위해서 DEFORM/3D를 사용하였다.

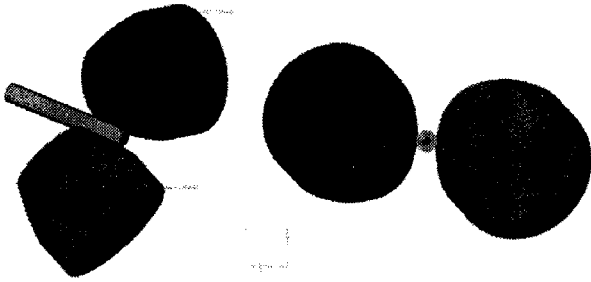


Fig. 4 Finite element modeling of rotary piercing process with twin rollers and material

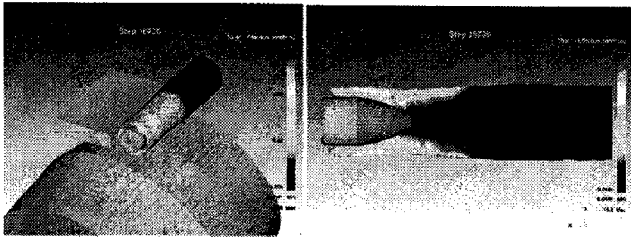


Fig. 5 Effective strain distribution of FE result from the DEFORM/3D

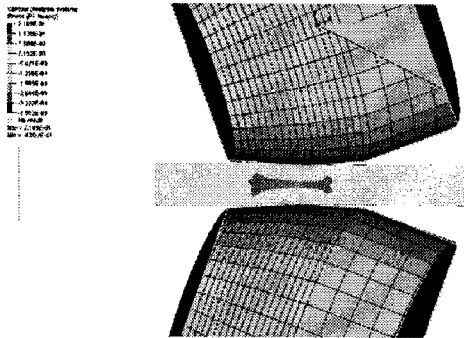


Fig. 6 Principal stress distribution in sectional view from the LS-DYNA3D without a plug

해석에 사용된 주요변수는 경사각 20 도, 이송각 4 도, 롤러의 간극 52mm, 좌우 가이드 간 간극 56mm, 롤러의 회전수 50RPM, 초기 소재경 60mm 이며, 재질은 S45C 로 1100 도의 조건을 사용하였으며, 플러그의 전진거리는 10mm 이다. Fig. 5 의 형상까지의 해석시간은 약 26 시간으로, 플러그 주위로 소재가 밀려나가 중공축으로 성형되는 것을 볼 수 있다. 본 해석에서는 파괴조건 없이 요소의 재구성만으로 성형한 결과로 해석시간을 고려하여 유한요소의 크기를 적정선에서 제한하였다. 연성파괴조건을 사용하여 해석을 수행할 경우, 유한요소의 크기가 적어도 1/4 로 줄여 사용해야 하는데 이 경우 대략적 해석시간은 한달 정도 걸릴 것으로 예상되어, 그 결과를 비교분석하기

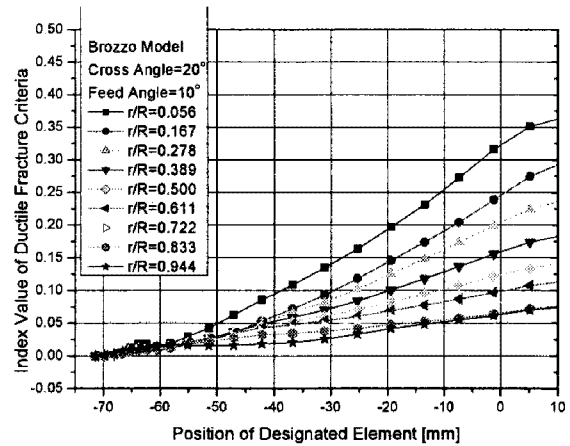


Fig. 7 Variation of Brozzo index values according to the radial position with respect to the material position

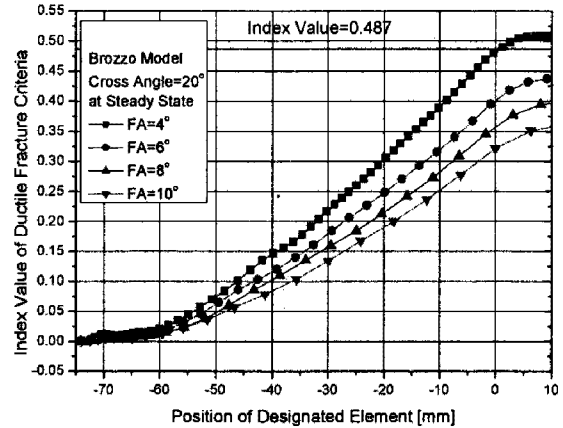


Fig. 8 Variation of Brozzo index values at central point of billet according to the feed angle with respect to the material position

어려운 점이 있어, 플러그를 제외하고 이송각의 영향을 알아보기 위하여 LS-DYNA3D 를 사용하고, 연성파괴조건을 계산하였다.

Fig. 6 에 단면에서의 최대주응력 분포를 도시하였다. 소재의 내부에서 연성파괴조건에 영향을 주는 최대주응력이 가장 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있어 소재 중심부에서 크랙이 먼저 발생하게 될 것을 예측할 수 있다. Brozzo 연성파괴식을 이용하여 Fig. 7 에 반경방향 위치에 따라 계산된 Brozzo 연성파괴 특성치를 도시하였다. 소재의 내부에서 가장 큰 값을 가져 소재 표면보다 중심에서 크랙이 발생하여 맨드렐을 이용하면 중실재를 중공재로 성형할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 2.2 이송각의 영향분석

본 절에서는 성형각 20도일 때, 이송각을 4도에서 10도까지 변화시켜 소재 중심에서의 연성과파괴 특성치를 계산하였다. 계산된 특성치를 Fig. 8에 도시하였다. 이송각이 작아질수록 연성과파괴 특성치가 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 9에는 이송각 4도에서 S45C 소재의 실험결과를 도시하였다. Fig. 9의 실험결과에서 중심부의 크랙의 크기는 반경 대비 약 9.5%이며, 이를 Fig. 8에 근사하면, 특성치 값을 약 0.487로 결정할 수 있으며, 이를 통하여

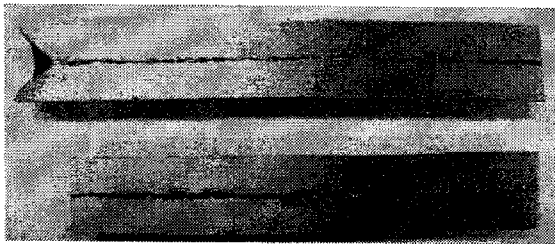


Fig. 9 Experimental result of the central crack initiation in the feed angle of 4 degrees

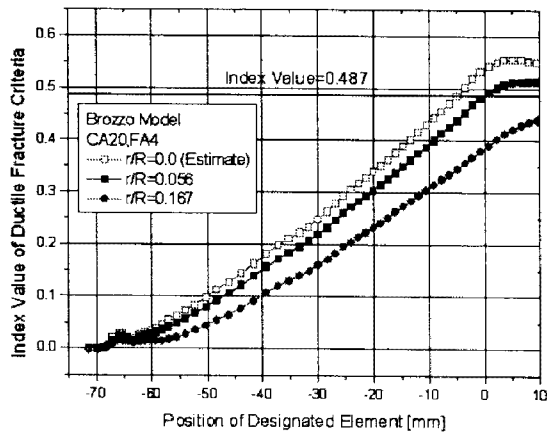


Fig. 10 Variation of index value of Brozzo ductile fracture criteria and the threshold line of the crack initiation with respect to the radial position

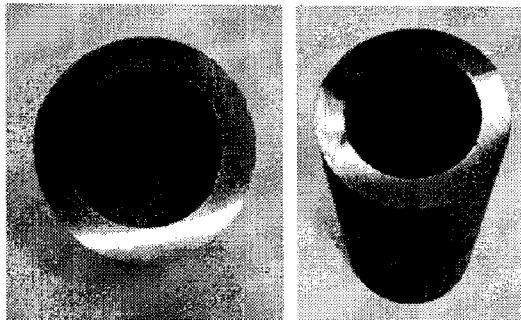


Fig. 11 Experimental result of the S45C tube by rotary piercing machine with the feed angle of 4 degrees

Fig. 10과 같이 이송각 4도일 때, 반경위치에 따른 내부 크랙의 발생시점을 소재위치에 따라 예측할 수 있다. 소재 중심의 크랙은 너무 빨리 일어나면 소재가 산화될 수 있고, 너무 늦으면 플러그의 마모를 유발한다. 따라서 Fig. 10에서 플러그의 전진 거리는 소재의 중심부에서 크랙이 시작되는 5mm로 결정할 수 있다. Fig. 11은 실험을 통하여 얻은 S45C 튜브재이다.

## 3. 결론

본 연구에서는 회전 천공장비를 개발하고, 유한 요소해석을 통하여 이송각의 변화 따라 소재의 중심에 발생하는 크랙의 발생 시기를 예측하고, 이를 통하여 플러그의 위치를 설계할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 공동핵심기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] C. Hayashi, T. Yamakawa, 1998, Influences of Piercing Ratio, Expansion Ratio, Feed, Cross and Skew Angles on Available Piercing Size Range in Rotary Piercing Process, ISIJ International, Vol. 38, No.11, pp.1255-1261.
- [2] M. Morioka, H.Oka, T. Simizu, 1997, Development of manufacturing technology for high alloy steel seamless pipe by Mnnesmann processes, Kawasaki Steel Technical Report, No. 29, pp.57-63
- [3] C. Hayashi, T. Yamkawa, 1997, Influences of feed and cross angle on rotary forging effects and redundant shear deformations in rotary piercing process, ISIJ International, Vol. 37, No.2, pp.146-152.
- [4] K. Mori, H. Yoshimura, K. Osakada, 1998, Simplified three-dimensional simulation of rotary piercing pf seamless pipe by rigid-plastic finite-element method, J. Mater. Process. Technol. Vol.80-81. pp.700-706.
- [5] Z. Pater, J. Kazanecki, J. Bartnicki, 2006, Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in diecher's mill, J. Mater. Process. Technol. Vol. 177, pp.167-170.