한국정밀공학회지 제 31 권 10 호 pp. 923-928 October 2014 / 923
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 10, pp. 923-928 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.10.923
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

심리스 파이프 제조를 위한 일롱게이션 공정의 유한요소해석

Finite Element Analysis of an Elongation Rolling Process for Manufacturing Seamless Pipes

정승현 [1], 신유인 [2], 송철기 [3,✉]
Seung Hyun Jung[1], Yoo In Shin[2], and Chul Ki Song[3,✉]

1 용현 BM (Yonghyun BM)
2 경상대학교 공학연구원 (ERI, Gyeongsang National University)
3 경상대학교 기계공학부, 공학연구원 (Department of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University)
✉ Corresponding author: cksong@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-1633

Manuscript received: 2014.5.13 / Revised: 2014.7.21 / Accepted: 2014.7.23

Elongation rolling process is an intermediate process to make the uniform thickness and uniform surface roughness during producing seamless pipes. The thickness and surface roughness of seamless pipes are generally affected by the distance of rolls and guide shoes, the roll shape, and its cross angle. In this study, finite element analysis for shape forming process is based on the analysis model of elongation rolling mill with guide shoes. This paper shows how the cross angle of the roll, the rolling rpm, and the distance of the guide shoe influence on the outer diameter and the thickness of seamless pipes. The rolling rpm did not give much influence on outer diameter.

Key Words: Seamless pipe (심리스 파이프), Elongation rolling process (일롱게이션 공정), Manufacturing pipes (파이프 제조), Finite element analysis (유한요소해석)

1. 서론

상업용 금속 강관은 제조 방법에 따라 용접강관(welded pipes)과 심리스 파이프(seamless pipes)으로 크게 나뉜다. 용접강관은 초고압 가스 등을 이송할 경우 용접부위에 균열이 일어나 운송 물이 누출되거나 해저에서 용접부위의 파손 및 부식 우려로 사용처에 한계가 있으나 심리스 파이프는 용접부가 없어 용접강관에 비해 상대적으로 초고압/극심해 등의 극한환경에서도 사용이 가능해 수요가 증가하고 있다.

심리스 파이프는 환봉형태의 소재에 구멍을 뚫은 다음 연신하거나 이미 피어싱된 소재를 프레스로 압출하는 방식으로 제조된다. 후속공정에는 일롱게이션(elongation) 공정과 사이징(sizing) 공정 등의 열간 공정이 있다. 일롱게이션 공정은 두꺼운 관을 얇게 만들어 두께를 균일하게 하는 공정이고, 사이징 공정은 외경을 원하는 사이즈로 줄여 최종 제품의 외경을 확보하는 열간 마무리 공정이다.[1]

Komori[2]는 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 정상상태에서 만네스만 피어싱 공정을 해석하였으며, Z. Pater[3]는 가이드 디스크(guiding discs)를

Copyright ⓒ The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사용하는 디셔밀(Diescher mill)에서 피어싱 공정을 해석하고 변형율과 응력, 온도 등의 해석결과와 실험결과를 비교분석 하였다. Yvan Chastel[4]는 피어싱 밀에서 소재와 플러그의 접촉 직전 상태를 해석하여 소재의 응력상태를 분석하고 손상 및 파괴 시점을 예측 하였다. 그 외에도 심리스 파이프의 제조공정 중 피어싱 공정은 Ghiotti[1] 등의 많은 연구자들[1~8]에 의해 연구되었으며, 현재에도 주요 관심사가 되고 있다. 이들은 심리스 파이프 제조공정 중 피어싱 공정의 심부 파괴를 주요 연구대상으로 하였으며, 피어싱 공정에만 국한되어 있다. 하지만 실제 연속공정에서 피어싱 된 소재는 일롱게이션 공정에서 원주방향으로 압연을 실시하여 두께를 줄이고 길이를 증가시킴으로써 파이프의 품질을 확보하게 된다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 피어싱 공정은 물론이고 일롱게이션 공정도 매우 중요하다. Z. Malinowski[9]는 디셔 밀의 일롱게이션 공정을 정상상태의 가정하에서 유선형의 플러그를 사용하여 워크롤과 플러그 사이의 소재의 소성변형을 해석하였고, 주요변수가 공정에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만 실제 공정에서 적용 가능한 사이즈 변화 또는 형상측면에서의 타원도는 무시하였다.

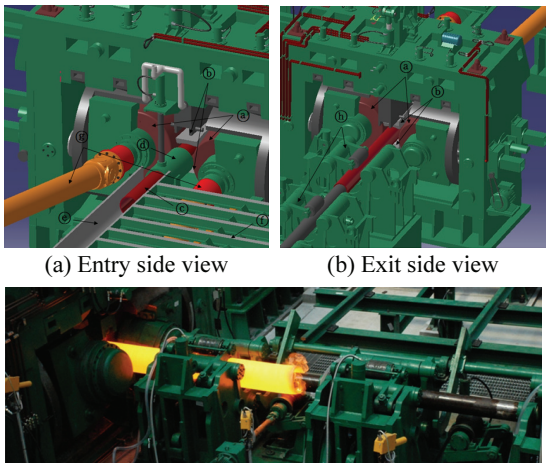
본 논문에서는 AFDEX 3D를 사용하여 Pater[3]등이 제시한 해석모델을 이용한 심리스 파이프 제조공정 중 일롱게이션 공정에 관한 유한요소해석을 실시하며, 해석결과를 분석하고 주요변수가 일롱게이션 공정 후 외경변화 및 형상에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 유한요소해석을 통한 일롱게이션 공정의 형상변화에 관한 내용을 중점적으로 다룬다.[10]

2. 일롱게이션 공정의 유한요소 해석

2.1 일롱게이션 공정

심리스 파이프 제조 공정 중의 일롱게이션 공정은 기본적으로 피어싱 공정과 유사하다. 피어싱 공정에서 1차 성형된 소재(hollow shell)는 이송 테이블(moving table)을 통해 진입통로(feeding guide)로 들어서고 하부의 이송롤이 상승-구동을 통해 진입방향으로 소재를 밀어 넣는다. 소재가 워크롤에 접촉한 이후 하부 이송롤은 다시 하강-정지한다. 이 때 상하방향으로 일정한 각도를 가진 워크롤은 소재를 진입방향으로 끌어당기며 성형이 시작된다.

Fig. 1은 본 연구에서 해석하고자 하는 일롱게이션 롤링 밀(Elongation rolling mill)의 입구 측과 출구 측을 나타내고 있다. 워크롤은 배럴형상이며, 가이드는 스티펠 방식의 가이드 슈를 적용한 밀이 다.


(a) Entry side view (b) Exit side view

(c) Exit side view

Fig. 1 General views of the elongation rolling mill

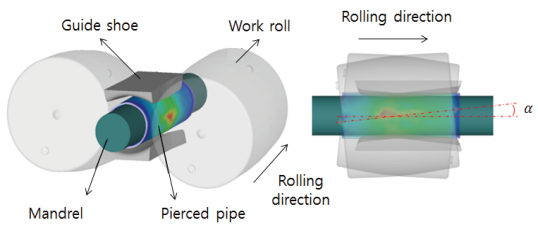


Fig. 2 Analysis model in an elongation rolling process

2.2 해석모델

일롱게이션 롤링 밀의 워크롤, 맨드렐, 가이드 및 초기소재는 CATIA 3D를 활용하여 모델링 하였고, 지능형 강소성 유한요소해석 프로그램인 AFDEX 3D를 이용하여 일롱게이션 공정을 시뮬레이션 하였다.

성형 중 사이즈 변화에 가장 중요한 공정조건의 인자로 롤의 비틀림 각도, 가이드 슈의 간격, 롤의 회전속도를 선정하였으며 Fig. 2에 일롱게이션 공정의 개략도를 나타내었다.

이 때 값은 롤의 중심축과 소재의 중심축 사이의 기울어진 정도를 의미하며 비틀림 각으로 나타내었다. 표준 비틀림 각을 6°로 선정하였으며, 각각 4.5°, 7.5°, 9°, 10.5°로 변경하여 해석하였다. 그리고 롤의 회전속도가 제품의 형상변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 30, 50, 90, 110 rpm으로 변화시

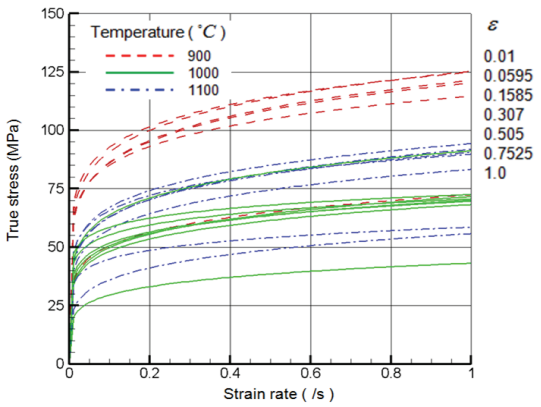


Fig. 3 Flow curve of true stress-strain rate on AISI 1020

켜 해석하였다. 또한 가이드 슈의 간격에 따른 소재의 형상변화를 분석하기 위해 가이드 슈 간격을 표준조건(241 mm)에 -15 mm, -7.5 mm, +7.5 mm, +15 mm를 각각 적용하여 해석하였다. 이들 공정변수를 제외한 나머지 조건은 고정하였으며, 형상변화에 주요한 인자이나 실제 장비에서 변경이 어려운 워크롤의 형상 및 가이드 슈의 형상은 검토대상에서 제외하였다.

해석 소재의 길이는 결과 분석과 해석시간을 고려하여 1 m로 제한하였고, 초기 롤과 소재의 접촉지점에서의 원활한 롤링 상태를 위해 15 mm구간을 강제 진입 시키고 이후 자동 분리되도록 프로그래밍 하였다. 가공 소재는 강소성체(rigid-plastic material)이고, 롤과 맨드렐은 강체(rigid material)로 가정하였다. 롤과 소재의 마찰력은 K. Komori,[2] Z. Peter[3] 등이 사용하였으며 현재까지 대부분 연구에서 적용된 일정 전단 마찰법칙과 계면마찰상수(m=1, sticking)를 사용하여 워크롤과 소재 사이에는 미끄럼이 발생하지 않는다고 가정하였다. 또한 가이드 슈와 소재 사이는 일정 전단 마찰법칙을 적용하고, 마찰상수 0.4를 그 적정 값으로 사용하였다. 이때의 마찰상수는 다양한 조건으로 수차례 예비 시뮬레이션 한 결과 값을 기준으로 하여 신뢰성을 확보하였다. 맨드렐과 소재 사이는 무마찰로 가정하였다. 요소망 구성에는 사면체 MINI 요소를 사용[10~13]하였으며, 80,000개 내외의 사면체요소를 사용하였다. 주요 해석 대상 구간에서 요소밀도를 크게 하였으며, 주변형 구간에서 하나의 요소가 내경과 외경 상의 절점을 동시에 갖지 않도록 하였다.[11] 즉, 소재의 두께 방향으로 층이 지도록 초기 요소망을 생성하였다. 변형의 특성을 감안하여 요소망 재구성은 실시하지 않았다. 주요 공정 변수는 Table 1과 같으며 유동응력은 온도에 따라 변화하므로 Fig. 3과 같이 해석 프로그램 내 적용 재질의 데이터베이스에 따른 값들을 설정하여 사용하였다.

Table 1 Standard rolling conditions for elongation analysis

Standard rolling condition	Value
Material	AISI 1020
Distance between work rolls at gorge	223.2 mm
Distance between guide shoes	241 mm
Roll Diameter at gorge	900 mm
Entrance face angle	1.5/2.5°
Exit face angle	3.5°
Cross angle (α)	6°
Roll velocity	70 rpm
Mandrel diameter	198 mm
Friction factor	
between material and roll (sticking)	1
between material and mandrel	0
between material and guide shoe	0.4
Initial material size	
Outer diameter	244 mm
Wall thickness	16.3 mm
Length	1,000 mm
Initial temperature	
Material	1,000 ℃
Mandrel	300 ℃
Work rolls and guide shoes	200 ℃

3. 해석결과 및 고찰

3.1 일롱게이션 공정의 유한요소해석

파이프 제조공정 중 일롱게이션 공정의 형상변화를 예측하기 위해 3차원 강소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 소요된 총 스텝 수는 4,288 스텝이며 Fig. 4에 표준조건의 해석결과로 얻은 소재의 변형 과정을 나타내었다. 소재의 변형과정을 볼 때 초기 소재는 한쪽으로 쏠린 타원 형상을 나타내다가 모서리가 굴곡진 사각형으로 변한 후, 중심을 지나면서 다각형이 만들어지고 출구 측을 지나면서 점진적으로 진원으로 변화하는 변형 패턴을 보이고 있다.

표준조건의 일롱게이션 공정에서 소재의 외경은 244 mm에서 239.4 mm로 외경이 감소하였고, 두께는 16.3 mm에서 12.6 mm로 변하였으며, 연신율,

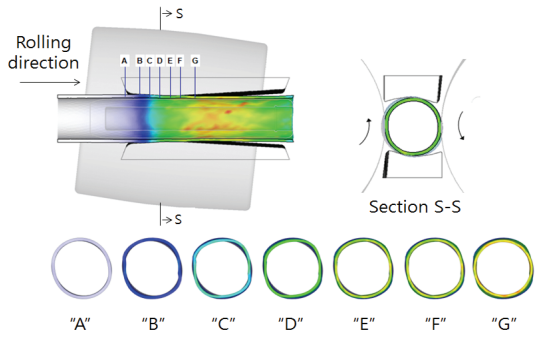
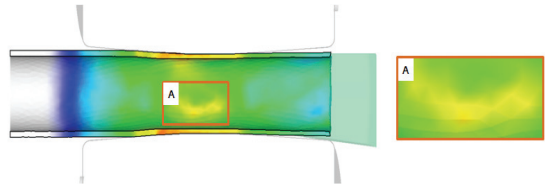


Fig. 4 Deformed cross-sections with strain distributions



(a) Prediction

(b) Experiment

Fig. 5 The comparison of guide shoe-material contact area between analysis and experiment

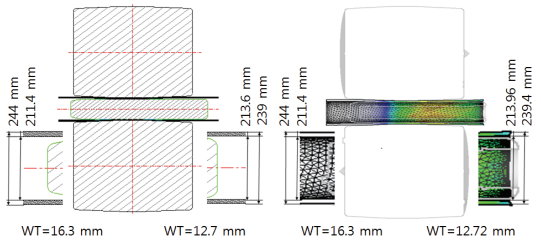


Fig. 6 Schematic drawing of deformed dimension after elongation rolling process

즉 길이 방향의 변화율은 23%로 나타났다. 이때 전체 소재길이 1,000 mm 중 687 mm 구간을 변형 구간으로 선정하였으며, 모든 조건에서 동일 적용하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 실험결과들의 평균값으로 하여 나타낸 도면이며, Table 2에서 실험결과와 해석결과의 비교를 나타내었다. 결과를 살펴보면 실험의 외경은 239 mm, 해석의 외경은 239.4 mm, 실험의 내경 213.6 mm, 해석의 내경 213.96 mm, 파이프 두께는 해석의 경우 12.7 mm, 해석의 경우 12.72 mm로 두 결과가 매우 흡사함을 알 수 있다. 따라서 압연 천공법을 이용한 심리스 파이프 제조 공정 중 일롱게이션 공정의 유한요소법 적용이 유용하다 판단된다.

Table 2 Comparison of prediction with experiment

After elongation rolling	Experiment	Prediction
Outer Diameter (mm)	239	239.4
Inner Diameter (mm)	213.6	213.96
Wall thickness (mm)	12.7	12.72

Table 3 Comparison of measured roughness data

rpm	30	50	70	90	110
Outer diameter (mm)	239.6	239.7	239.4	239.4	240.3

Table 4 Comparison of measured roughness data

Cross angle (°)	4.5	6	7.5	9	10.5
Outer diameter (mm)	239.4	239.4	241.0	241.4	242.5

3.2 롤 회전속도의 영향

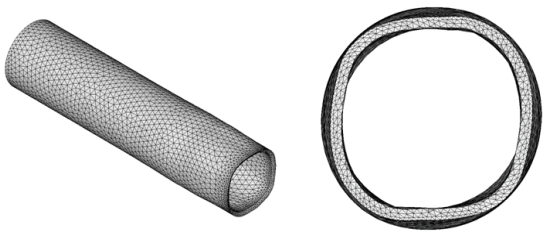
소재의 형상변화 측면에서 롤 회전속도의 영향을 분석하기 위해 워크롤의 비틀림 각, 가이드 슈의 간격 등 Table 1에서 회전속도를 제외한 나머지 공정조건을 고정하고, 30, 50, 90, 110 rpm으로 나누어 해석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 각각의 평균 외경을 측정한 결과 30 rpm의 경우 239.6 mm, 110 rpm의 경우 240.3 mm을 나타내었으며, 70 rpm의 표준조건과 비교하였을 때 소재의 형상변화 측면에서 회전속도의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

3.3 비틀림 각의 영향

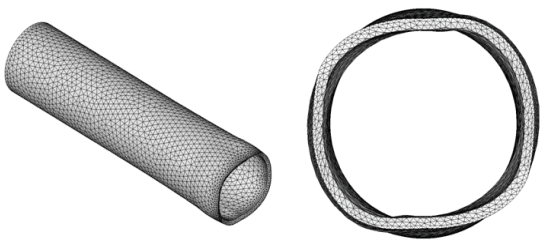
비틀림 각에 따른 소재의 형상변화 차이를 분석하기 위해 비틀림 각을 제외한 나머지 공정조건을 Table 1의 표준조건으로 적용하고 비틀림 각을 4.5°, 7.5°, 9°, 10.5°로 나누어 해석한 결과 값을 Table 4에 나타내었다. 각각의 평균 외경을 측정한 결과 4.5°의 경우 239.4 mm, 10.5°의 경우 242.5 mm를 나타내었다. 비틀림 각이 증가함에 따라 외경감소량이 감소하는 경향을 보였으나, 그 변화폭은 전체 3.1 mm로 크지 않았다. 비틀림 각이 1° 증가함에 따라 평균외경 증가 값은 0.516 mm로 나타났다.

Table 5 Comparison of measured roughness data

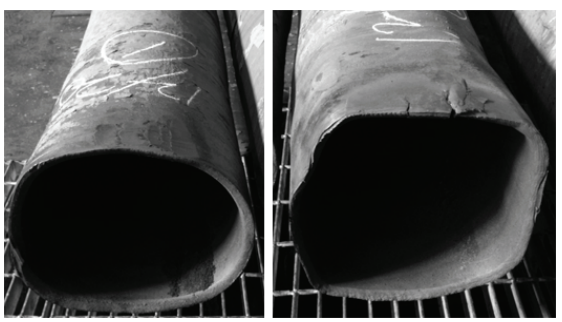
Distance between guide shoes	-15 mm (226)	-7.5 mm (233.5)	Standard (241)	+7.5 mm (248.5)	+15 mm (256)
Outer diameter (mm)	235.3	237.6	239.4	243.0	244.8



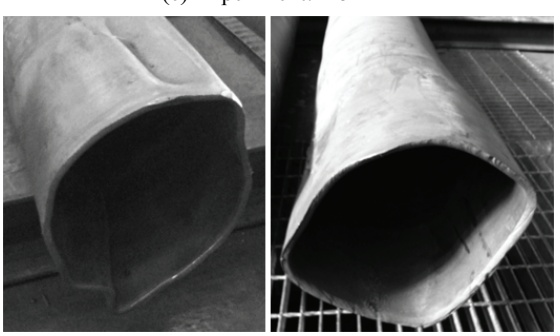
(a) Analysis: -15 mm



(b) Analysis: +15 mm



(c) Experiment: -15 mm



(d) Experiment: +15 mm

Fig. 7 The comparison of analysis and experiment on the distance of guide shoe

3.4 가이드 슈 간격의 영향

가이드 슈 간격에 따른 소재의 형상변화 차이를 비교하여 결과 값을 Table 5에 나타내었다. 각각의 평균 외경을 측정한 결과 +15 mm(256 mm)의 경우 244.8 mm, -15 mm(226 mm)의 경우 235.3 mm를 나타내었다. 공정변수 중 가장 큰 폭의 외경변화율을 확인하였으며 가이드 슈 간격 7.5 mm 변경 시 평균 외경 1%의 외경 변화율을 나타내었다.

3.5 해석결과 고찰

해석결과 소재 형상변화에 가장 큰 영향을 미치는 가이드 간격을 실제공정에 적용한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 소재의 형상변화 측면에서 가이드 슈 간격은 소재의 타원률을 제어하는 역할을 하며 해석결과인 표준 가이드 간격의 -15 mm와 +15 mm를 실제 공정에 적용하였을 때 -15 mm 조건에서는 입구형상이 정사각형에 가까운 모양을 나타내었고, 이는 해석결과 Fig. 7(a)와 유사하였으나, 실제 공정에서는 Fig. 7(c)와 같이 롤링이 일어나기 전 끼임 현상이 발생하였다. 그리고 + 15 mm 조건에서는 입구형상이 직사각형에 가까운 형태를 나타내었고 이 역시 해석결과 Fig. 7(b)와 유사하였으나, 실제공정에서는 Fig. 7(d)와 같이 소재의 롤링이 일어나지 않는 현상이 발생하였다. 이를 통해 롤링을 위한 소재의 타원율의 제어가 중요한 인자임을 확인하였으며, 롤 간격과 가이드 간격으로 제어되는 타원율은 안전율을 고려할 시 1.05 ~1.11이 적정 수준으로 판단되며, 이러한 범위 내에서는 실험적으로 롤링 시 문제가 발생되지 않음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 심리스 파이프 제조 공정 중 일롱게이션 공정의 3차원 강소성 유한요소해석을 실시하였다. 이 공정의 해석 목적으로 강열점소성 유한요소법과 지능적 사면체요소 생성 기술이 사용되었으며 공정변수에 따른 해석결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일롱게이션 공정 중 소재의 두께변화 발생구간에서 응력이 최대치를 나타내었으며, 전체적으로 가이드 슈의 접촉면에서 응력의 집중현상을 통해 가이드 슈와 소재의 접촉영역에서 응력의 적절한 제어가 공정의 안정성에 매우 중요한

인자임을 해석결과를 통해 규명하였다.
2) 롤의 회전속도가 소재의 형상변화에 미치는 영향은 미미하였다.
3) 비틀림 각을 4.5°에서 10.5°까지 1° 증가 시 약 0.5 %의 외경 증가율을 나타내었다.
4) 가이드 슈의 간격조절 조건에서 7.5 mm 조건 변경 시 평균 1%의 외경 변화율을 나타내었으며 이는 일반적으로 파이프 외경공차가 ±1% 임을 감안할 때 외경의 변화가 큰 폭으로 나타남을 확인하였다.
5) 롤과 가이드 슈의 관계에서 적정 유효 타원율은 1.05 ~ 1.11 범위임을 실험적으로 검증하였다.

본 논문의 연구결과는 압연 천공법을 이용한 파이프 제조공정 중 일롱게이션 공정 스케줄 설계 및 금형 제작에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국산업기술진흥원의 '지역혁신인력양성사업'과 'Brain Korea 21 PLUS' 사업단의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

1. Komori, K. and Mizuno, K., "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, 2009.
2. Komori, K., "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, 2005.
3. Pater, Z., Kazanecki, J., and Bartnicki, J., "Three Dimensional Thermo-Mechanical Simulation of the Tube Forming Process in Diescher's Mill," J. Mater. Process. Technol., Vol. 177, No. 1-3, pp. 167-170, 2006.
4. Chastel, Y., Diop, A., Fanini, S., Bouchard, P.-O., and Mocellin, K., "Finite Element Modeling of Tube Piercing and Creation of a Crack," International Journal of Material Forming, Vol. 1, No. 1, pp. 355-358, 2008.
5. Ghiotti, A., Fanini, S., Bruschi, S., and Bariani, P., "Modelling of the Mannesmann Effect," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 58, No. 1, pp. 255-258, 2009.
6. Chiluveru, S., "Computational Modeling of Crack Initiation in Cross-Role Piercing," Massachusetts Institute of Technology, pp. 1-89, 2007.
7. Khudheyer, W., Barton, D., and Blazynski, T., "A Comparison between Macroshear Redundancy and Loading Effects in 2-and 3-roll Rotary Tube Cone Piercers," J. Mater. Process. Technol., Vol. 65, No. 1, pp. 191-202, 1997.
8. Shim, S. H., Lee, M. C., and Joun, M. S., "Finite Element Analysis of Mannesmann Roll Piercing Process," Proc. of Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 223-226, 2011.
9. Malinowski, Z., Kazanecki, J., and Urbański, S., "Thermal-mechanical Model of the Tube Elongation Process in Diescher's Mill," J. Mater. Process. Technol., Vol. 60, No. 1, pp. 513-516, 1996.
10. Lee, M. C. and Joun, M. S., "Automated Adaptive Tetrahedral Element Generation for Three-Dimensional Metal Forming Simulation," Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 3, pp. 189-194, 2006.
11. Kim, B. S., Jung, S. H., Cho, J. M., and Joun, M. S., "Finite Element Analysis of an Elongation Process in Manufacturing a Seamless Pipe," Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 201-204, 2012.