

이음매 없는 관 인발에서 맨드렐과 금형 형상의 영향

이용신[#] · 윤상현¹ · 윤덕재²

Effects of Mandrel and Die Shape in Seamless Tube Drawing

Y. S Lee, S. H. Yoon, D. J. Yoon

(Received September 29, 2011 / Revised October 24, 2011 / Accepted October 26, 2011)

Abstract

This paper deals with effects of certain important factors in a tube drawing operation, such as the use of a mandrel, die radius and tangential angle at die outlet, on the deformation behavior of a small-diameter seamless tube. Both experimental and finite element simulation studies are carried out to assess the effects of the above parameters. Experiments and finite element predictions are compared. The use of a mandrel simplifies the design of tube drawing, but also induces some difficulties from increased process complexity. The effects of die outlet tangential angle and radius are discussed in detail.

Key Words : Seamless Tube, Mandrel, Die, Tube Drawing, Finite Element Analysis

1. 서론

내부에 빈 공간을 가지며 임의 단면 형상에 일정한 두께로 만들어진 튜브 또는 관은 고강도 경량의 구조재로 사용되거나, 물질을 유동시키는 목적으로 사용된다. 관은 다양한 용도로 쓰이며, 크기도 직경이 수 나노 미터에서 수 미터까지 이른다[1]. 예를 들면, 차체의 경량화를 위하여는 경량의 구조재로 쓰이고, 엔진에 연결되는 소구경 관은 고압을 견뎌야 하고, 배기가스 용의 비교적 직경이 큰 관은 고온과 화공부식에 대한 저항이 요구된다. 특히, 고압에 사용되는 고가의 소구경 관의 생산에는 새로운 소재의 개발과 생산 기술 개발에 관한 연구가 요구되고 있다.

일반적으로 관은 용접에 의한 관과 이음매 없는 관으로 분류될 수 있다. 이음매 없는 관은 용접선이 없어 원주 방향의 균질한 형상 및 재질로

내압과 외력에 대한 저항이 크다[1, 2]. 이에 고압의 소구경관은 이음매 없는 관으로 생산된다. 이러한 관의 제작은 우선 관의 형태를 갖는 초기소재 즉 모관을 만드는 공정으로부터 시작된다. 이에는 가열한 금속 빌렛에 피어싱을 하거나 고온으로 원심 주조하는 공정 등이 있다. 관의 형상을 갖춘 모관은 압출, 압연 또는 인발과 열처리를 조합하는 복합의 후속공정을 거쳐 원하는 크기와 형상의 제품으로 제조된다[3~5]. 다양한 후속공정 중에서 인발공정은 이음매 없는 관제조의 최종 공정으로 가장 많이 쓰인다[6~8]. 이음매 없는 관의 인발에서 내부에는 금형의 역할을 하는 맨드렐을 사용하는 경우와 맨드렐을 사용하지 않는 즉 공인발의 경우가 있다.

본 연구에서는 고부가가치의 고압용 소구경 관으로 사용되는 이음매 없는 관의 인발공정에 관한 실험연구와 유한요소해석을 병행한다. 이러한

1. 국민대학교 대학원 기계설계학과
2. 한국생산기술연구원
교신저자: 국민대학교 기계시스템공학,
E-mail: yslee@kookmin.ac.kr

인발공정에서 가장 중요한 공정인자로 알려진 맨드렐의 유무와 금형의 출구접선각과 반경이 인발공정에 미치는 영향을 조사한다.

2. 실험

고압용 소구경 관은 높은 칫수 정밀도를 요구하여 종종 맨드렐을 사용하는 인발을 한다. 이 경우에 맨드렐 사용에 따른 공정조건의 제한사항이 발생하고 이에 대한 연구가 필수적이다. 일례로, 아주 작은 관의 인발공정에서 맨드렐을 사용하면 종종 맨드렐이 표면 결함이나 파괴를 보여준다. 또한 맨드렐의 설치도 어렵고, 맨드렐과 금형사이의 작은 편심도 관의 축방향 인장력을 크게하여 성공적인 성형이 어렵다. 반면에 맨드렐을 사용하지 않는 경우에는 관의 내경이 자유표면이 되어 설계사양을 만족하려면 금형에 관련된 공정조건의 영향을 명확히 규명해야 한다.

생산기술연구원에서 주관한 실험에서는 두 가지의 관인발을 고려한다. Case 1의 외경은 Case 2의 외경보다 크게 선정하였다. 모관의 사양과 공정조건은 Table 1에 주어진다. Case 1의 실험에서는 맨드렐을 사용하는 인발을 수행하였고, 맨드렐을 사용하지 않는 성공적인 실험이 어려운 Case 2의 경우에는 맨드렐이 없는 공인발을 수행하였다. 실험에 사용한 고압용 관의 소재는 매우 큰 인장강도를 갖는 Fe-C-Si-Mn계 합금이다. 수치해석에 사용할 데이터를 얻기 위해 Fe-C-Si-Mn 계 합금 모관의 인장시험을 수행하여 Fig. 1에 주어지는 응력-변형률 관계를 얻었다. 맨드렐과 다이의 소재는 통상의 금형재료 AISI-D2를 이용하였으며, 탄성계수가 207GPa, 포아송비 0.3이다. 인발시의 윤활은 냉간 인발용 윤활유를 사용하여 마찰을 최소화하였다.

Table 1 Specifications of tube drawing experiments

Tube drawing specifications	Case 1	Case 2
Outside Diameter [mm]	21.7	9.0
Inside Diameter [mm]	16.5	5.0
Die tangential angle [deg]	6.5	8
Die radius(mm)	30	10
Area Reduction [%]	28.0	45.0
Use of Mandrel	Yes	No

Table 2 Process conditions of finite element analyses

Process conditions	Group 1	Group 2
Use of Mandrel	Yes and No	Yes and No
α [deg]	6.5, 10, 15	8, 15, 19
R [mm]	20, 30, 40	5, 10, 20
2Ro [mm]	18	6.35

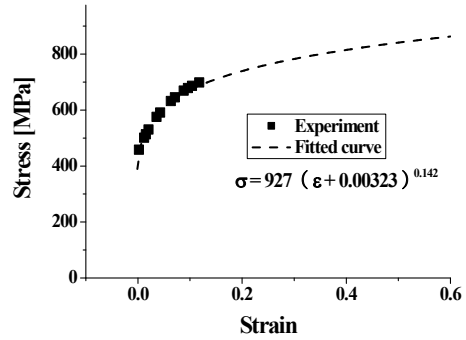


Fig. 1 Stress-strain curve of Fe-C-Si-Mn Alloy

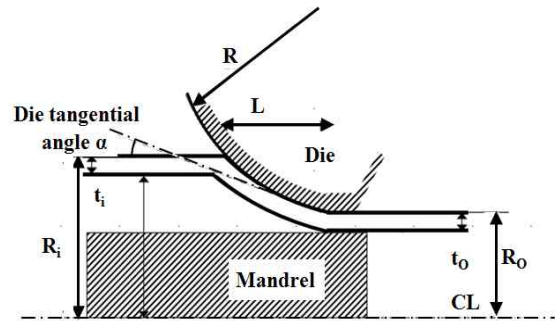


Fig. 2 Schematic of tube drawing with mandrel

3. 유한요소 해석

이음매 없는 관 인발 공정에서 공정조건이 성형의 성공여부에 미치는 영향을 조사하기 위해서 유한요소 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 상용의 DEFORM-2D를 이용하여 축대칭 해석을 수행하였다. 유한요소 해석에 사용된 요소의 갯 수는 4000 개이며, 소재와 금형 또는 맨드렐과의 접촉면에서는 전단마찰모형을 가정하였고 마찰계수는 무마찰상태로 하였다.

소구경 관 인발의 성공여부에 가장 중요한 공정조건의 인자로 맨드렐의 유무, 금형 곡률 반경(R)과 금형 출구 접선각(α)을 선정하였으며, Fig. 2의 관 인발공정의 개략도에 보여진다. 본 연구에

서 수행한 실험을 고려하여 결정된 공정조건 범위가 Table 2에서 주어진다. Group 1은 Case 1을, Group 2는 Case 2를 기준으로 하였다. Table 2에 주어지는 다양한 공정조건에 따른 유한요소해석을 수행하여 공정조건에 영향을 조사하기 위한 데이터를 얻었다.

4. 결과 및 분석

유한요소해석을 병행하면 실험에 의한 연구비용을 절감하고, 연구시간을 단축할 수 있다. 더불어 실험에서는 관찰하기 어려운 변형특성을 유한요소예측을 통하여 조사할 수 있다. 이를 위하여는 유한요소해석의 타당성을 검증하여야 한다. 이에 Case 1과 2를 실험과 같은 조건으로 유한요소해석을 수행하고, 실험과의 비교를 각각 Table 4와 5에서 보여준다. 맨드렐을 사용한 Case 1의 경우에는 관의 내경, 외경, 두께, 그리고 단면감소율을 비교하였을 때 최대 치수 오차는 관의 두께 비교에서 1.8% 정도로 나타났다. 실험과의 오차는 관이 급형을 벗어나는 곳에서 복잡한 변형특성으로 발생되는 것으로 생각된다. 공인발을 수행한 Case 2의 경우에는 최대 치수 오차가 관의 내경 비교에서 약 3.2%로 나타났다. 공인발의 경우에는 관의 내경이 자유표면이 되어 오차가 비교적 클 것으로 예측되었으며, 공인발의 경우에는 오차를 최소화하는 공정조건을 찾는 것이 중요한 관점이다. 위와 같은 비교에서 실험 결과와 유한요소해석의 예측은 오차가 매우 작으므로 유한요소해석의 타당성은 입증된 것으로 사료된다.

4.1 맨드렐의 영향

맨드렐을 사용하는 Case 1 실험에서 급형 출구 접선각 $\phi=6.5^\circ$, 과 곡률반경 $R=30\text{mm}$, 급형 내경 $2R_0=18\text{mm}$, 그리고 맨드렐 직경은 13.5mm 이다. 실험에서와 같은 조건의 급형을 갖고 맨드렐이 없는 공인발을 유한요소 해석하여 맨드렐의 영향을 조사하였다.

맨드렐을 사용한 경우의 해석결과와 비교하여 공인발된 관의 외경은 0.34mm 줄어 들었으나 내경은 1.14mm 로 감소폭이 커서 관의 두께는 0.35mm 두꺼워 지는 것을 예측하였다. 이러한 현상은 실험에서도 흔히 관찰되며 맨드렐이 관의 내경을 유지하는 역할을 함을 설명한다.

맨드렐이 없는 Case 2의 실험에서 급형은 $\phi=8^\circ$,

Table 4 Comparison of experiments and simulations for Case 1

Tube Dimension	Experiment w/ Mandrel	Simulation w/ Mandrel
Outside Diameter (mm)	17.97	18
Inside Diameter (mm)	13.44	13.5
Thickness (mm)	2.26	2.3
Actual Area Reduction (%)	28%	28%

Table 5 Comparison of experiments and simulations for Case 2

Tube Dimension	Experiment w/o Mandrel	Simulation w/o Mandrel
Outside Diameter (mm)	6.24	6.24
Inside Diameter (mm)	2.78	2.82
Thickness (mm)	1.73	1.71
Actual Area Reduction (%)	44.0%	43.9%

$R=30\text{mm}$ $2R_0=6.35\text{mm}$ 이다. 유한요소해석에서는 실험과 같은 조건 외에 고압용으로 인발된 관의 두께가 1.675mm 가 되도록 맨드렐의 직경이 3mm 인 경우도 고려하였다. 소구경관 인발의 경우에 급형과 맨드렐의 동심을 맞추는 것이 실험에서는 매우 어려웠으나 유한요소 해석에서는 전혀 문제가 되지 않았다. 맨드렐이 있는 경우의 유한요소 해석은 관의 외경이 6.29mm , 내경이 2.97mm , 두께는 1.66mm 로 예측하였다. 맨드렐과 급형사이를 벗어난 관은 축방향 인장력을 받아 관의 내경이 맨드렐의 외경보다 작아지게 된다. Case 1에서와 마찬가지로 맨드렐이 없으면 인발된 관의 외경과 내경이 맨드렐이 있는 경우에 비하여 동시에 감소하는데 내경의 감소가 외경의 감소보다 커서 두께를 두껍게 한다. 따라서 맨드렐을 사용하면 관의 치수가 설계사양에 맞도록 공정조건을 조절하는 것이 수월함을 알 수 있다.

관 인발공정의 또 다른 성공여부는 관이 결함이 없이 우수한 기계적 성질을 갖는 것과 공정의 효율성을 가늠하는 급형과 맨드렐의 수명이다. 이는 인발된 관과 맨드렐의 변형이력에 대한 이해에서 유추가 가능하다. 공정조건에 따른 인발된 관의 치수 변화는 실험으로도 조사가 가능하나 인발된 관의 변형이력에 관하여는 실험에

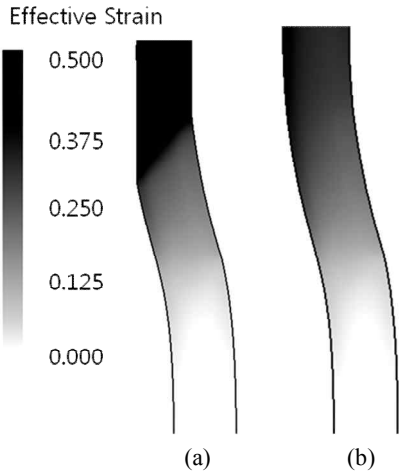


Fig. 3 Distribution of effective strain for Case 1: (a) with mandrel (b) without mandrel

서 측정이 어려워 유한요소 해석에 의존한다. 이에 본 연구에서는 맨드렐의 유무에 따른 관의 변형률 분포와 맨드렐에 걸리는 응력분포를 유한요소해석에 의존하여 비교·조사하였다. Fig. 3에서는 Case 1의 금형을 갖고 맨드렐이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 유한요소해석에 의한 관의 유효변형률 분포를 보여준다. Fig. 3(a)와 (b)에서 보이는 것처럼 관이 금형과 접촉을 시작하면서 유효변형률이 증가하고, 맨드렐이 있는 경우 (Fig. 3(a))에는 금형 및 맨드렐 접촉이 시작되면서 더욱 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 관이 변형구역을 통과한 후에는 변형률이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 반면에 유한요소해석에 의한 유효응력분포는 금형아래의 변형구역에서 최대값을 나타내게 되는데, 맨드렐을 사용한 경우에는 공인발 경우보다 더 큰 유효응력을 나타내는 것을 보여주었다. Fig. 3(a)에서의 최대 유효변형률은 약 0.46으로 Fig. 3(b)의 최대 유효변형률 0.37보다 약 24.3% 정도 큰 것으로 예측되었다. 따라서 맨드렐을 사용한 경우에는 관이 보다 큰 변형률을 겪으며 이는 관 인발공정의 설계에 제약을 주게 된다.

관이 맨드렐과 금형 사이의 변형 구역을 벗어난 후에 맨드렐의 유무가 두께방향으로 유효응력의 분포에 미치는 영향을 조사하여 Fig. 4에 보여준다. 맨드렐을 사용하면 평균적인 유효변형률은 커지나 두께방향으로의 유효변형률의 분포는 편

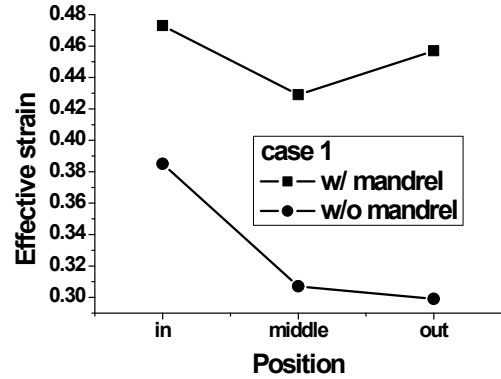


Fig. 4 Variation of effective strain through tube thickness direction for Case 1

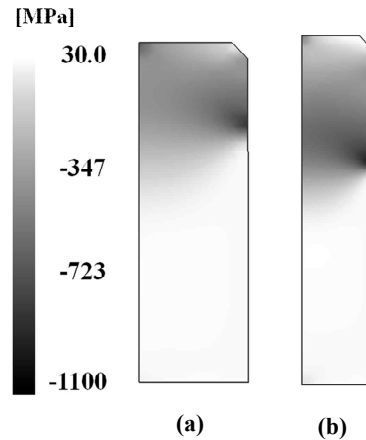


Fig. 5 Distribution of radial stress in mandrel of tube drawing for (a) Case 1, (b) Case 2

차가 작아지는 것으로 예측하고 있다. 맨드렐이 없는 경우에는 인발되면서 관 내측의 자유표면에서 굽힘에 의한 인장이 외측에서 금형과의 접촉에 의한 전단변형보다 커서 관의 내측에 유효변형률이 크고 두께방향으로의 편차도 크게한다. 이에 맨드렐을 사용하면 인발된 관의 항복응력이 두께방향으로 편차가 작게되어 공인발의 경우보다 유리할 것으로 예측된다.

맨드렐은 탄성변형을 받으며 반경방향압축에 의한 취성과파괴 또는 마모가 설계시의 관점이다. Group 1과 2의 기준이 되는 Case 1과 2의 금형조건에 맨드렐을 사용한 경우를 유한요소해석하여 반경방향 응력분포를 Fig. 5에 보여준다. 두 경우

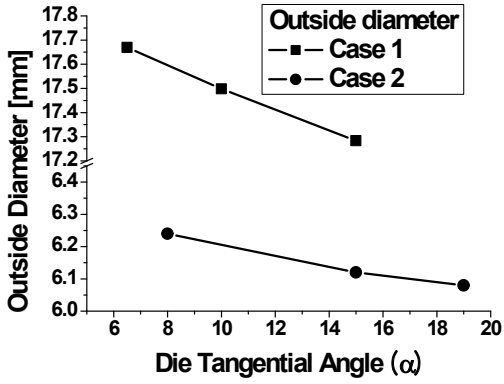


Fig. 6 Effects of α on tube outside diameter

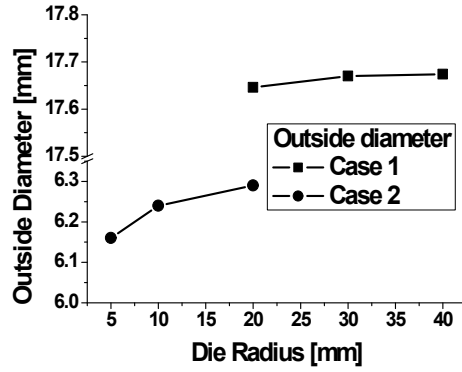


Fig. 8 Effects of die radius on tube outside diameter

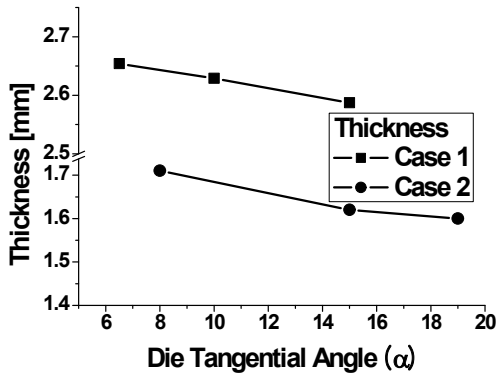


Fig. 7 Effects of α on tube thickness

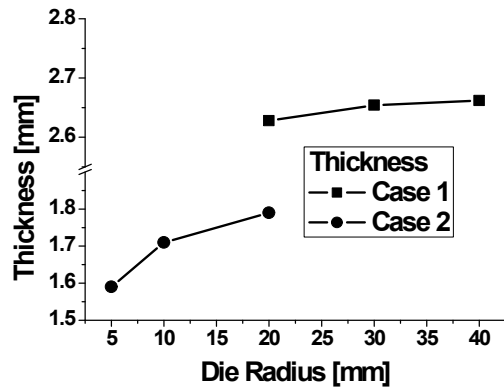


Fig. 9 Effects of die radius on tube thickness

모두 반경방향 압축응력의 최대값은 금형과 맨드릴 사이에서 처음 접촉이 시작되는 점 근처에서 발생되며, 응력이 국부적으로 집중되는 것을 보여준다. Case 1의 경우에는 맨드릴이 받는 최대 압축응력이 약 890MPa이고, Case 2의 경우에는 약 1100MPa이다. 이렇게 높은 압축응력이 국부적으로 집중하여 맨드릴의 수명을 제한할 것으로 생각된다.

4.2 금형 출구접선각(α)의 영향

맨드릴을 사용하지 않는 공인발의 경우에는 관의 내·외경, 두께 등의 치수는 금형의 영향을 크게 받는다. Table 2에 주어지는 금형의 조건들에 대하여 맨드릴이 없는 공인발의 유한요소해석 결과를 정리하여 금형 출구접선각(α)의 영향을 Fig. 6과 7에 보여준다. Group 1의 경우에는 금형의 곡률반경 R이 30mm 이고, Group 2의 경우에는 10mm 이다. 두 그룹 모두 금형 출구접선각이 커지면 외경과 두께가 작아지는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 인발 금형의 랜드부로 소재가 지날 때 접선방향으로 소재의 유동이 유도되어 α 가 커짐에 따라 관의 외경이 작아지고, 그에 따른 저항은 랜드부에 있는 관에 인장을 주어 두께를 얇게하는 것으로 분석된다. 따라서 α 가 커짐에 따라 인발된 관의 평균 유효변형률도 크게 나타난다.

4.3 금형 곡률반경(R)의 영향

맨드릴이 없는 공인발에서 금형 곡률반경(R)의 영향을 조사하기 위하여 α 를 고정하고 Group 1과 Group 2에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. α 는 Group 1의 경우에는 6.5°, Group 2의 경우에는 8° 를 기준으로 하였다.

R의 변화에 따른 관의 외경과 두께의 변화를 Fig 8과 9에 나타냈다. 두 그룹의 경우 모두 R이 커지면 외경이 커지고 두께가 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 다른 공정조건을 고정하고 금형의 R이 커지면 금형과 소재의 접촉면이 증가하여

변형구역의 축방향 길이가 길어진다. 따라서 금형 내부의 변형구역에서 관이 인발 방향으로 진행하면 관의 바깥쪽 반지름이 감소되는 속도가 작아지고, 이러한 현상이 금형 출구를 벗어나는 때에도 영향을 미치는 것으로 생각된다.

5. 결론

이음매 없는 고압용 소구경 관의 인발에서 맨드렐의 유무, 금형 출구접선각(α), 그리고 금형 곡률반경(R) 등의 영향을 조사하기 위하여 실험과 유한요소해석을 병행하였다.

실험에서는 맨드렐을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우를 고려하였다. 실험과 같은 조건으로 유한요소해석을 수행하고 실험과 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다.

맨드렐을 사용하는 관 인발의 경우에는 관의 내·외경을 설계사양에 맞추기 수월하다. 그러나, 금형출구를 벗어나는 관에 맨드렐의 반력에 의한 인장이 커져 성공적인 공정조건의 범위에 제약을 준다. 관의 내경이 더욱 작은 경우에는 맨드렐의 사용이 어려워 공인발을 하는데, 관 내부의 자유표면을 조절하기 위하여는 공정조건의 영향에 대한 깊은 이해가 필요하다.

금형 출구접선각이 커지면 인발된 관의 외경과 두께는 작아지고 관의 평균 유효변형률은 커지는 것으로 조사되었다. 한편, 금형 곡률반경이 커지면 관의 외경과 두께는 커지고 관의 평균 유효변형률은 작아지는 것으로 조사되었다.

본 연구의 조사결과는 연속 관인발 공정스케줄 설계에 공헌할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2010년도 국민대학교의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. S. J. Hashmi, 2006, Aspects of Tube and Pipe Manufacturing Process: Meter to Nanometer Diameter, J. Mater. Process. Technol., Vol. 179, No. 1-3, pp. 5~10.
- [2] B. Brickstad, B. L. Josefson, 1998, A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-pass Buttwelded Stainless Steel Pipes, Int. J. Press. Vessels Pip., Vol. 75, No. 1, pp. 11~25.
- [3] C. K. Shih, R. Q. Hsu, C. Hung, 2002, A Study on Seamless Tube in the Planetary Rolling Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 121, No. 2, pp. 273~284.
- [4] Z. Chena, K. Ikeda, T. Murakami, T. Takeda, J. X. Xie, 2003, Fabrication of Composite Pipes by Multi-billet Extrusion Technique, J. Mater. Process. Technol., Vol. 137, No. 1, pp. 10~16.
- [5] Y. S. Lee, S. H. Yoon, D. J. Yoon, E. Kim, 2009, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. 2009 Spring Meeting(ed. S. H. Lee), Proc. Kor. Soc. Precis. Eng., Jeju, Korea, p. 1021.
- [6] H. S. Kim, S. W. Bae, Y. J. Kim, 2000, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. 2000 Spring Meeting(ed. S.H. Song), Proc. Kor. Soc. Precis. Eng., Pusan, Korea, pp. 120~123.
- [7] M. Reggio, F. McKenty, Luc Gravel, J. Cortes, G. Morales, M. A. Ladron de Guevara, 2002, Computational Analysis of the Process for Manufacturing Seamless Tubes, App. Therm. Eng., Vol. 22, No. 4, pp. 459~470.
- [8] R. S. Lu, Y. F. Li, Q. Yu, 2001, On-line Measurement of the Straightness of Seamless Steel Pipes using Machine Vision Technique, Sens. Actuators, Vol. 94, No. 1, pp. 95~101.