

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 II

LCD 패널 러빙롤러 제작 공정변수에 관한 연구

A Study on the Manufacture Process Parameters of Roller for Rubbing LCD-panel

김 웅<sup>1</sup>, 이춘만<sup>2</sup>  
Woong Kim<sup>1</sup> and Choon Man Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design, Changwon Univ.)  
<sup>2</sup> 창원대학교 메카트로닉스공학부 (Department of Mechatronics, Changwon Univ.)  
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Key Words: Stainless Pipe (스테인리스 파이프), Composite Material Pipe (복합재료 파이프), Drawing (인발), Residual stress (잔류응력), Shrink Fit (역지끼워 맞춤), Process Parameters (공정변수)

기호설명

- $\sigma_f$  = flow stress
- $\bar{\epsilon}$  = effective strain
- $\dot{\bar{\epsilon}}$  = effective strain rate
- T = temperature
- $\tau_s$  = shear strength
- $m_f$  = constant friction factor
- K = stiffness coefficient

1. 서론

LCD 대형기판의 제조 장비 중 하나인 러빙기는 배향막(Orientation Film) 표면을 러빙포를 이용하여 균일한 압력과 속도로 마찰시켜 배향막 표면에 고분자 사슬을 일정한 방향으로 정렬함으로써 액정분자의 배향을 결정시켜 주는 장비이다.<sup>1</sup> 현재 러빙 롤러의 제조공정은 용사 공정이 적용되고 있지만 작업시간의 증대와 스테인리스 입자의 밀도에 따른 불량률의 증가가 뒤따른다. 최근 초장축 이종소재 파이프의 피팅 방법으로써 본 논문의 선행연구인 Park<sup>2</sup> 등은 파이프 속에 복합재료 파이프를 삽입 후 동시 인발하는 초장축 이종소재 파이

프의 피팅 방법을 제시하고 Tasi-wu 파손 이론식에 입각한 최적 첨쇄를 제안하였지만 인발공정시에 발생하는 잔류응력으로 인해 후처리 공정에서 뒤틀림 및 치수공차가 발생하는 문제점을 보이고 있다. 이러한 인발제품의 잔류응력에 의한 각종 불량문제에 대한 선행연구들이 지속적으로 진행되고 있다.

Basily<sup>3</sup> 등은 원형봉을 이용한 정다각형 단면형상의 인발공정에 대해 상·하계해를 이용하여 정다각형 단면에 최적 금형형상을 제시하였으며, Kim<sup>4</sup> 등은 강소성 유한요소법을 이용하여 원형단면형상을 최대 단면 감소율과 다이반각 등의 공정 조건을 찾은 바가 있다. Lin<sup>5</sup> 등은 인발공정에서 정확한 형상과 잔류응력의 감소를 위해 스킨패스 공정에 관한 고찰을 실시하였다. 이에 본 논문은 인발을 이용한 피팅공정에서 인발제품 불량률의 주원인인 잔류응력이 발생하는 것에 대한 원인을 분석, 그 원인을 해결하여 러빙 롤러 제조공정에 적용시키는데 그 목적이 있다. 인발 공정에 관한 유한요소 해석을 통하여 인발공정 시 주요 공정변수인 다이반각, 마찰인자, 인발속도에 대해 정량적으로 평가하였다. 또한 피팅공정에 있어 공정변수에 대한 최적 파라미터 설계를 실시하고자 하였다. 또한 AISI-1045 와 AISI-304 두 소재를 비교하여 인발제

품의 진원도, 진직도 측면에서 피팅에 적합한 소재를 선정하고자 하였다.

## 2. 파이프 피팅공정에 따른 유한요소 모델

### 2.1 초장축 파이프 피팅 공정

현재 개발중인 초장축 피팅공정은 Fig. 1 과 같이 외경이 138mm 인 복합재료 파이프를 두께 1.65mm,  $\phi 145\text{mm}$  인 스테인리스 파이프 내부에 삽입하여 동시 인발을 실시하는 방법으로써 진원도, 진직도가 양호한  $\phi 145\text{mm}$  인 스테인리스를 제작하기 위해서 외경이  $\phi 152.5\text{mm}$ , 두께가 2mm 인 파이프를 두 차례의 인발공정이 수행되었다.

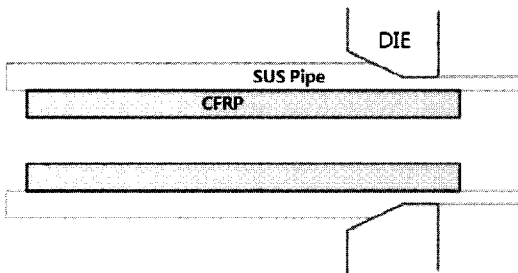


Fig. 1 Drawing process

### 2.2 유한요소모델

본 연구에서 피팅공정 시 발생하는 잔류응력을 수치적으로 예측하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM-2D Ver. 8.0 을 이용하였다. 적용된 스테인리스 파이프는 AISI-304 계열로 초기 두께가 1.65mm 이며 외경은  $\phi 141.3\text{mm}$  유한요소모델을 구성하였으며 소재의 길이는 인발 공정의 주요 변수가 <sup>10</sup> 아니므로 해석시간을 줄이기 위해 200mm 로 스테인리스 파이프를 모델링하고 지름 방향 쥘새 (Diameter Shrink Allowance)를  $\phi 0.1\text{mm}$  를 부여하여 인발해석을 실시하였다.

쥘새를  $\phi 0.1\text{mm}$  로 선택한 이유는 인발시 쥘새 크기에 따른 파손 여부 판단은 사용한 재료와 하중조건과 관계되어 있는 파손 모드에 따라 달라진다. 쥘새 거동이 지배적인 경우에는 최대 응력 이론과 변형률 이론이 좀 더 효과적이고 전단이나 압축 하중하의 연성 거동이 지배적인 경우 Tsai-Wu 파손 이론식이 좀 더 효과적이기 때문에 Tasi-Wu 이론식에 입각한 최적 쥘새를 적용하였다.<sup>2</sup>

복합재료(CFRP)는 스테인리스 파이프에 비해 충분한 강도를 가지고 있으므로 강제로 가정하였

으며 스테인리스 파이프는 4116 개의 요소수를 가진 탄-소성체(Elasto-Plastic Material)로 Fig. 2 와 같이 유한요소모델을 구성하였다. 유한요소모델은 축대칭(Axisymmetric)으로 해석을 함으로써 형상을 단면의 회전에 의해 정의되도록 하였다.

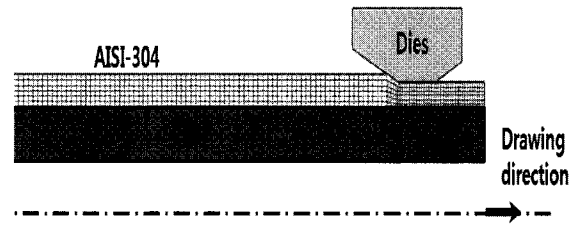


Fig. 2 FE-model of drawing process

물성치는 탄성 물성에 대해서는 Table 1 과 같이 적용하였으며, 식(1)은 유동응력으로써 탄성변형시의 탄성계수처럼 재료가 갖고 있는 특성이며, 변형률, 변형률속도, 온도 등의 영향을 받는다. 즉 유동응력은 소재가 보여주는 변형에 대한 저항으로 항복 이후의 소성변형에 보다 관심이 있으면 연속되는 항복응력에 해당하는 재료상수를 항복응력 대신에 유동응력으로 나타낸다.

본 논문에서는 가공경화에 의한 유동응력 증가 현상에 대한 수식, 즉 소성영역에 대한 물성으로써 식(2)는 AISI-1045, 식(3)은 AISI-304 를 나타내었다.

Table 1 Material properties

Material	AISI-1045	AISI-304
Young's modulus[Gpa]	206	200
Thermal Expansion coefficient[ $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ ]	12.6	17.3
Poisson's ratio	0.33	0.33

마찰계수 및 스테인리스 파이프의 마찰조건은 일정한단마찰(Constant Shear Friction)로써 식(4)와 같고 마찰인자(Friction Factor)  $m_f$  는 접촉면의 전단

강도를 두 접촉물체 중 연한 재료의 전단항복응력을 나눈 값으로 정의하였다.

$$\sigma_f = \sigma_f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \tag{1}$$

$$\sigma_f = 1275\bar{\epsilon}^{0.45} \text{ (Mpa)} \tag{2}$$

$$\sigma_f = 965\bar{\epsilon}^{0.14} \text{ (Mpa)} \tag{3}$$

$$|\tau_s| = m_f k = m_f \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 인발력에 대한 최적 다이반각

인발력은 다이반각과 마찰조건, 그리고 단면감소율의 함수로 나타난다. 따라서 마찰조건 및 단면감소율이 일정한 경우 인발력은 다이반각의 함수가 된다. 인발응력, 즉 단위부피당 소비에너지를 최소화 시키는 각도가 존재하며, 이를 최적 다이반각이라고 한다. 인발력에 대한 최적 다이반각을 찾기 위해 다이가 받는 힘에 대해 다이반각을 변화시켜가며 유한요소해석을 실시하였다. 이는 기존에 잘 알려진 인발공정의 경향과 비교하여 수행된 해석에 신뢰성을 검증하기 위해 실시하였다.

그 결과는 Fig. 3 과 같다. 단면감소율을 11%로 일정하게 유지할 때 전단변형, 순변형에 요하는 응력, 외부 마찰 응력의 합인 인발력이 최소값을 갖는 최적 다이반각은 7~8°사이에서 발생하였다. 이는 기존의 문헌과 동일한 결과로 본 논문에서 수행된 유한요소해석이 올바르게 진행되었음을 알 수 있다.<sup>6-10</sup>

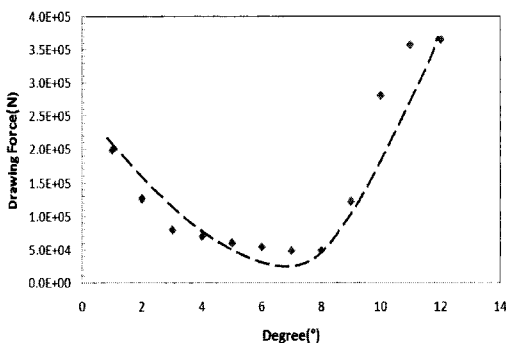


Fig. 3 Optimum semi-die angle

### 3.2 잔류응력에 대한 평가

#### 3.2.1 다이반각에 따른 잔류응력

인발공정시 다이를 통과한 소재는 표면부에 변형이 집중되어 중심부와 표면부 사이의 변형률 분포가 불균일하다. 이로 인해 인발된 소재의 표면부에 잔류응력이 발생하여 제품의 진원도, 진직도 측면에서 악영향을 미친다. 이에 Fig. 4 와 같이 다이반각을 변화시켜 가며 소재 AISI-304 에 대하여 잔류응력 분포를 나타내었다. 그래프의 X 축은 소재에 대하여 상대적 깊이로써(Relative Depth) 소재의 내부를 0 으로 소재의 표면부를 1 로 나타내었고 (-) 부호의 값은 압축잔류응력, (+) 부호의 값은 인장잔류응력을 나타낸다.

해석 결과를 보면 소재의 내부에서는 압축잔류응력이 발생하고 표면으로 갈수록 인발공정에 악영향을 미치는 인장잔류응력이 발생한다. 또한 다이반각이 커질수록 압축 및 인장 잔류응력이 증가하고 1°, 3°와 같은 저다이반각에서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 해석은 소재가 다이를 완전히 빠져나올 때까지 수행하였다.

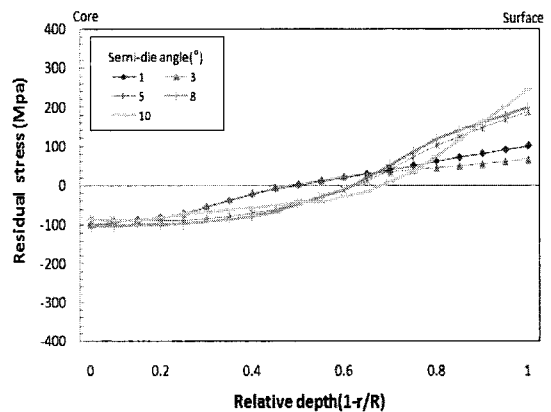


Fig. 4 Residual stress for different semi-die angle (°)

Fig. 5 는 스테인리스 파이프와 탄소복합재료를 동시 인발시 스테인리스 파이프의 표면정도를 평가하기 위하여 소재의 상대적 깊이에 따른 변형률을 평가하고자 하였다. 이는 인발제품의 진원도, 진직도에 대한 고찰을 위해 실시하였다. 해석결과는 다이반각에 따른 잔류응력과 같은 결과로 저다이반각에서 내부와 표면의 변형률의 편차 또한 거의 발생하지 않으며 소재의 변형도 적게 발생함을 알 수 있다.

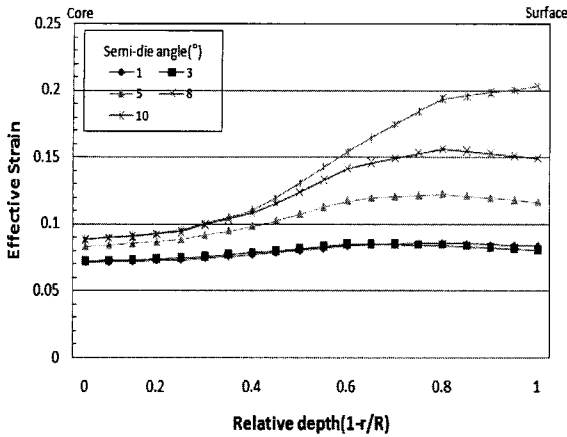


Fig. 5 Effective strain for different semi-die angle (°)

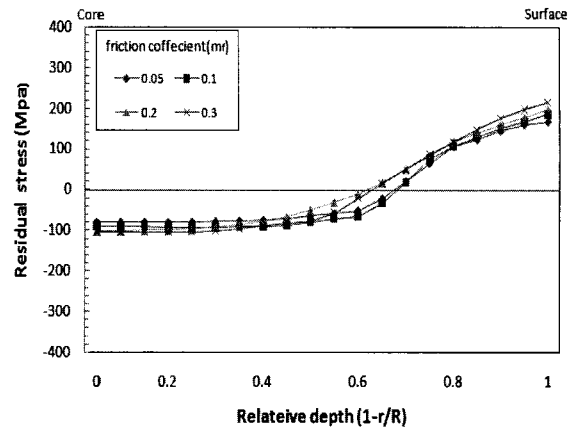


Fig. 7 Effective strain for different friction coefficient (μ)

### 3.2.2 마찰인자 및 인발속도에 대한 평가

초장축 탄소복합재 파이프 피팅공정에 있어 최적의 공정변수를 찾기 위해 마찰인자 및 인발속도에 관한 고찰을 실시하였으며 마찰인자는 0.05 ~ 0.3 의 실제 사용범위 내에서 잔류응력과 변형률을 평가하였다. 인발속도는 사용되는 재료 및 단면적에 따라 다르게 적용되고 있으므로 피팅공정에 있어서 적절한 인발속도 변화를 보고자 기존의 피팅공정의 인발속도 20mm/sec 를 기준으로 하여 10mm/sec ~ 50mm/sec 의 범위에서 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 일정한 각도(7°)에서 마찰인자에 따른 잔류응력과 변형률의 분포를 나타낸 것이다. AISI-304 에서 마찰인자가 적을수록, 즉 윤활이 원활한 경우 잔류응력이 감소하지만 변형률의 변화폭은 증가함을 알 수 있다

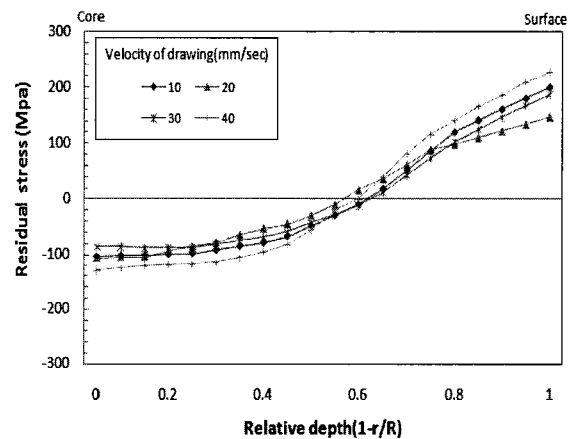


Fig. 8 Residual stress for different drawing velocity(mm/sec)

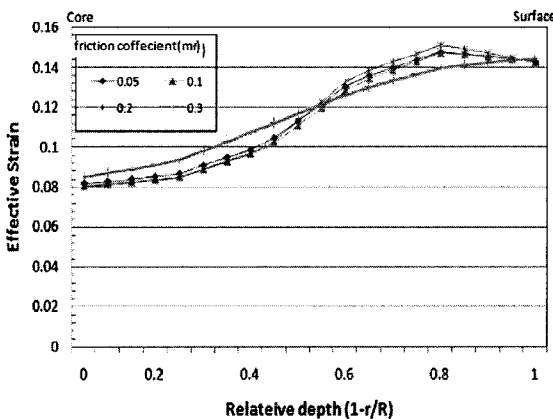


Fig. 6 Residual stress for different friction coefficient (μ)

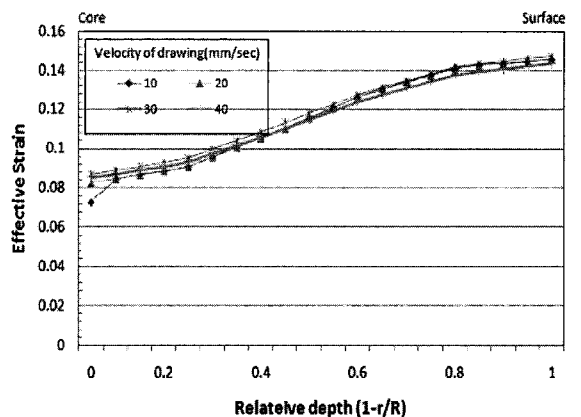


Fig. 9 Effective strain for different drawing velocity(mm/sec)

Fig. 8 과 Fig. 9 는 인발속도 변화에 따른 잔류 응력 및 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 인발속도는 피팅공정의 실제 운용범위내에서 변형률의 차이는 거의 없으나 잔류응력 측면에서는 인발속도가 20mm/sec 일 때 최소의 인장 및 압축잔류응력이 나타남을 알 수 있다. 하지만 다이반각과 비교하여 상대적으로 잔류응력 및 변형률에 마찰인자와 인발속도는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 AISI-1045 와 AISI-304

본 연구에서는 기존의 AISI-304 를 외부 파이프 로 사용하여 탄소복합소재와 피팅공정을 실시하였을 때 후가공시 발생하는 뒤틀림 및 형상공차에 따른 문제점을 해결하고자 후가공이 용이한 AISI-1045 에 대한 변형률에 대하여 평가하였다.

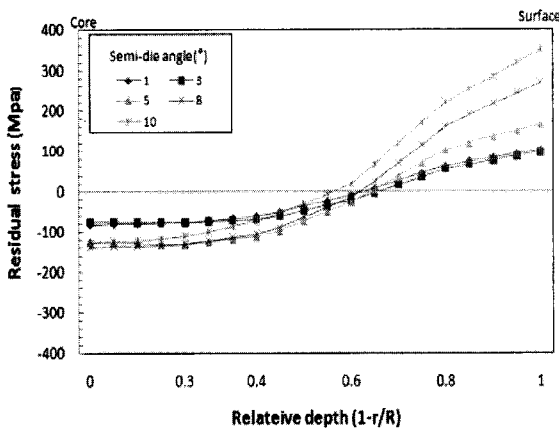


Fig. 10 Residual stress for different semi-die angle(°)

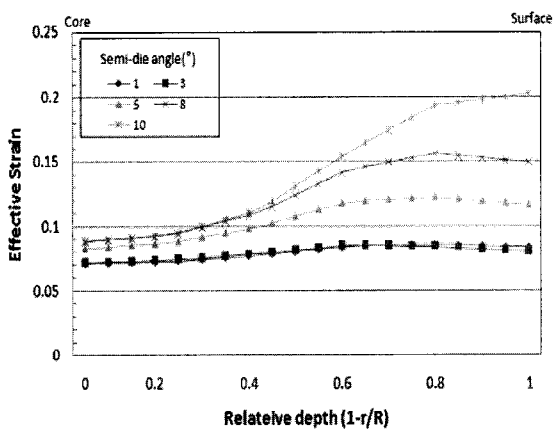


Fig. 11 Effective strain for different semi-die angle(°)

Fig. 10 과 Fig. 11 은 AISI-1045 에 대하여 다이 반각 변화에 따른 잔류응력과 변형률을 나타낸 것이다. AISI-304 와 비교시 AISI-1045 가 다이반각의 변화에 따라 더 많은 잔류응력이 발생하였지만 압축잔류응력과 소재 변형률은 AISI-304 와 거의 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 12 는 AISI-1045, AISI-304 에 대하여 소재 표면부의 변형률을 축방향 전체의 노드(Node)에 대해 모두 측정하여 이들에 대한 표준편차(Standard Deviation)를 구함으로써 변형률의 분산 정도를 나타내었다. 표준편차는 편차들을 제곱하여 산술평균한 값의 제곱근으로 식 (5)와 같이 정의하였다. 즉 피팅공정시 발생하는 진원도, 진직도 측면에서 불량을 평가하기 위한 것으로서 두 소재 모두 다이반각이 커질수록 표준편차가 증가하였다. 그러나 AISI-304 와 AISI-1045 를 서로 비교하였을 시 AISI-1045 가 더 적은 변형률의 편차를 나타냄을 알 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - m)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n x_k^2}{n} - m^2} \quad (5)$$

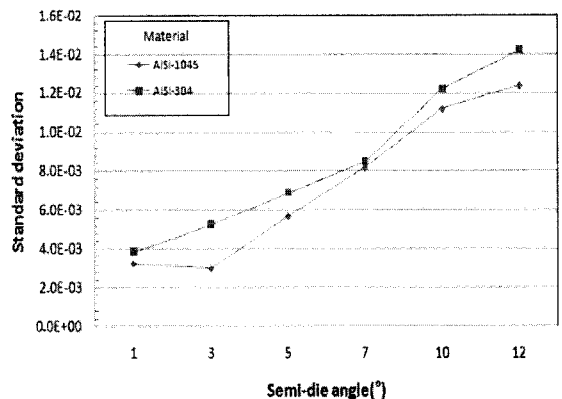


Fig. 12 Standard deviation of effective strain for different material

### 4. 결론

본 연구의 목적은 인발을 이용한 초장축 탄소 복합재 파이프 피팅공정에서 발생하는 문제점을 해결하고자 다이반각, 마찰계수, 인발속도와 같은 공정변수를 변화시켜가며 최적의 공정변수를 얻고,

또한 새로운 소재에 대한 고찰을 실시함으로써 기존의 뒤틀림, 진원도·진직도 불량 등과 같은 문제점에 대한 해결방안을 찾고자 하는데 있다. 본 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인발을 이용한 이중소재 피팅공정에 있어서 마찰계수와 인발속도에 비하여 다이반각이 잔류응력 크기 및 분포에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

2) 공정변수에 관해서는 다이반각  $1^\circ \sim 3^\circ$  와 같은 저다이반각에서 잔류응력 완화 효과가 우수하며, 그 영향은 적으나 마찰인자( $m_f$ )는 작을수록, 인발속도는 실제 운용 속도인 20mm/sec 에서 잔류응력 및 소재 변형률의 변화가 적게 나타남을 알 수 있다.

3) 변형률에 대한 표준편차를 통해 AISI-1045 와 AISI-304 를 비교해 본 결과 진원도, 진직도 측면에서는 편차가 적은 AISI-1045 가 초장축 탄소복합재 파이프 피팅에 있어 적합함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술 혁신 사업 [RTI04-01-03]의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. Park, S. H., Lee, C. M., Chung, W. J. and Park, D. G., "A Study on the Shrink Fit for Long Pipes of Different Materials," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 629-630, 2007.
2. Park, S. H. and Lee, C. M., "Development of Fitting Process for Extra Long Stainless/Composite Material Pipes," Transactions of the Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 77-82, 2008.
3. Basily, B. B. and Sansome, D. H., "Some Theoretical Consideration for Direct Drawing of Section Rod from Round Bar," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 18, pp. 201-208, 1976.
4. Kim, H. C., Choi, Y. and Kim, B. M., "Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Nonsteady State Shaped Drawing Process," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 119-128, 1998.
5. Lin, H. S., Hsu, Y. C. and KEH, C. C., "Inhomogeneous deformation and residual stress in skin-pass axisymmetric drawing," Journal of Material Processing Technology, Vol. 201, No. 1-3, pp. 128-132, 2008.
6. Renz, P., Steuff, W. and Kopp, R., "Possibilities of influencing residual stress in drawn wires and bars," Wire journal international, Vol. 29, No. 1, pp. 64-69, 1996.
7. Vijayakar, S. S., Starinshak, T. W., Prakash, A., Kot, K. M. and Bhagwat, A. W., "Optimization of die geometry and drawing parameters in high-strength cord production," Wire journal international, Vol. 28, No. 11, pp. 79-85, 1995.
8. Truman, C. R. and Booker, J. D., "Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly," Engineering Failure Analysis, Vol. 14, No. 4, pp. 557-572, 2007.
9. Lee, G. H., "Theory of Metal Forming and Application of Deform," IMETEC, pp. 102-121, 2008.
10. Kim, N. S. and Kim, H. J., "Analysis of Plastic Working," Munundang, pp. 251-256, 2007.