

2 단 튜브인발 공정시 인발변형을 배분모델 개발

이동활* · 정우창** · 문영훈#

(2004년 7월 15일 접수)

Drawing Strain Distribution Model for the Two-Pass Drawing Process

D. H. Lee, U. C. Chung and Y. H. Moon

Abstract

For the large reduction in tube cross section, the tube drawing process is usually performed by two successive passes, so called first drawing and second drawing. In multi-pass drawing process, the reduction balance is important to prevent drawing cracks. Therefore in this study, the model for uniform reduction distribution in two-pass drawing process has been developed on the basis of cross sectional variation of drawn tube. For the given product geometry the model provides optimal diameter and thickness that can evenly distribute drawing reductions. The capability of model is well confirmed by finite element analysis of tube drawing process. Criteria curves at various limit strains to determine whether the drawn tube would fail during drawing process are also proposed by using newly developed model.

Key Words : Electric Resistance Welding, Tube Drawing Process, Reduction of Area, Cracking Criteria, Finite Element Method

1. 서 론

자동차, 오토바이의 샤프트 및 빔류, 유공압 실린더, 보일러용 강관 및 각종 특수부품에 사용되는 전기저항용접(Electric Resistance Welding : 이하 ERW 라 표기) 강관은 제품 사이즈의 정밀성, 다양성, 가공성 및 다양한 기계적, 화학적 성질을 요구하므로 주로 소량 다품종의 특수용도에 많이 사용되고 있다. 종전에는 주로 이음매 없는(seamless) 강관은 적용하였던 부품도 근래에 와서는 끝단(edge) 처리기술, 성형기술, 용접기술, 내면비드 제거기술, 설비기술 및 비파괴 검사기술의 발달로 고강도, 후육(두께/관의 직경 = 25%정도)

ERW 강관이 개발되어 낮은 생산단가로 양호한 인발성능 및 부품 제조시 보다 작은 직경의 정밀 강관의 제조를 위해 인발가공을 하는 경우가 많다.⁽¹⁻³⁾

2 단 인발공정은 1 차 인발과 2 차 인발로 나누어 수행되는데 이 때 1 차 인발과 2 차 인발의 변형량 배분의 기준이 제시되어 있지 않아 부적절한 조업으로 인한 인발 균열 발생시 문제가 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 ERW 용접강관의 인발 변형률 배분모델을 개발하고 이를 토대로 인발강관 균열예측지표를 제안하였다.

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 고장분석 및 신뢰성연구센터

2. 인발공정 유한요소분석

본 연구에서 적용한 플러그를 이용한 인발공정의 도식도를 Fig. 1에 나타내었다. 튜브 인발시 변형을 해석을 위해 유한요소해석을 실시하였는데 유한요소해석 코드(code)로는 DEFORM 2D V7.2를 사용하였고 해석조건은 Table 1과 같다.

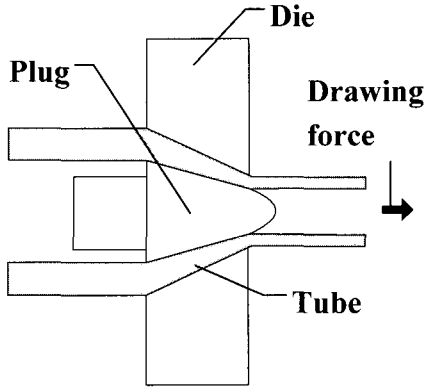


Fig. 1 Schematic of tube drawing process with plug

Table 1 Input values for FEM

Material	STKM 11A (0.12 wt% carbon steel)
Drawing Speed	10 mm/s
Coulomb Friction Factor	0.15
Number of Mesh	1000

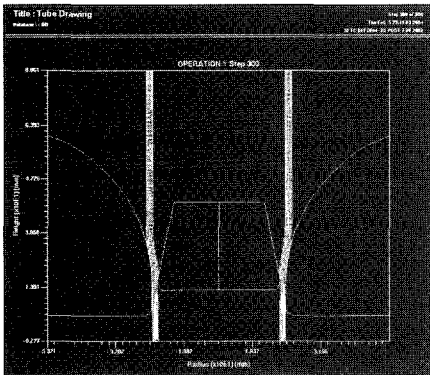


Fig. 2 FEM modeling for tube drawing process

유한요소해석을 위한 모델은 소재의 인발방향인 y축을 축대칭으로 하여 적용중인 치수를 기준으로 하였다. 튜브 드로잉 공정의 유한요소해석 모

델을 Fig. 2에 나타내었다. 2단 튜브인발시 1차 인발과 2차 인발의 변형률 배분의 기준이 제시되어 있지 않아 일반적으로 1차 인발시 소재의 외경 및 두께는 초기 소재치수와 최종 제품치수의 1/2로 설정하여 유한요소해석을 실시하였다.

Table 2 Comparison of max effective strain

Input tube size		Target tube size		Set-up tube size for first drawing		Maximum effective strain	
D_0	t_0	D_2	t_2	D_1	t_1	First drawing	Second drawing
27.2	1.8	22.0	1.0	24.60	1.40	1.0200	1.4633
27.2	1.6			24.60	1.30	0.9056	1.0684
25.4	1.6			23.70	1.30	0.7337	1.0140
38.1	2.0	32.2	1.1	35.15	1.55	0.9949	1.6133
38.1	1.8			35.15	1.45	0.8396	1.0825
42.7	1.8			37.45	1.45	1.0353	1.2702
48.3	1.8	37.6	1.3	42.95	1.55	0.7508	0.8255
48.3	2.0			42.95	1.65	0.8622	1.0158
45.0	2.0			41.30	1.65	0.7755	0.8418
45.0	1.8			41.30	1.55	0.6370	0.6819

Table 2에서 FEM을 이용하여 얻은 튜브 인발소재의 최대 유효변형률(max effective strain) 값을 각 치수별로 나타내었다.

Table 2에서 알 수 있듯이 1차 인발시보다 2차 인발시 소재의 변형률 값이 커서 인발 변형률의 배분이 균등하지 못해 2차 인발시 균열발생 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 1차 인발시와 2차 인발시의 변형률을 균등하게 배분할 인발변형률 배분모델을 개발하고자 하였다.

해석과 실험을 위해 적용한 소재는 STKM 11A이며, 모델재료는 0.12 wt% carbon steel이다. 모델재료의 유동방정식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 232\bar{\epsilon}^{0.095} (Mpa) \quad (1)$$

3. 변형률 배분 수식모델

1 차 인발과 2 차 인발시의 변형률을 균등하게 배분해 주는 수식모델을 개발하기 위해 Fig. 3에 보인 바와 같은 인발튜브의 단면적 수축율에 근거한 수식모델을 개발하였다.

인발시 총 변형률 :

$$\epsilon_t = \ln \frac{A_0}{A_2} \quad (2)$$

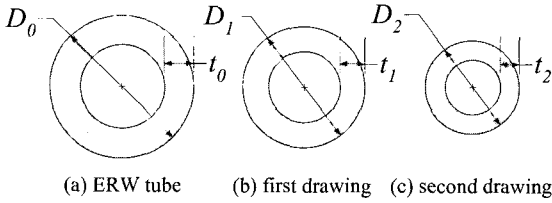


Fig. 3 Sequential variation of tube size

1 차 인발 변형량 : $\epsilon_1 = \ln \frac{A_0}{A_1}$ (3)

2 차 인발 변형량 : $\epsilon_2 = \ln \frac{A_1}{A_2}$ (4)

여기서, $A_0 = \frac{\pi}{4} [D_0^2 - (D_0 - 2t_0)^2]$

$A_1 = \frac{\pi}{4} [D_1^2 - (D_1 - 2t_1)^2]$ (5)

$A_2 = \frac{\pi}{4} [D_2^2 - (D_2 - 2t_2)^2]$

1 차 인발 변형량과 2 차 인발 변형량의 비율

$\eta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ 라 하면,

$\eta \cdot \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{A_1}{A_2}$ (6)

식 (6)을 정리하면 식 (7)을 얻는다

$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^\eta$ (7)

식 (7)은 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$(A_1)^{\eta+1} = A_2 \cdot A_0^\eta$ (8)

따라서 η 를 변화시키면 1 차 인발과 2 차 인발 변형량의 비율을 조정할 수 있다. 일반적으로 1 차 인발 후 가공경화를 완화시키는 열처리를 거치게 되므로 본 연구에서는 1 차 인발과 2 차 인발시 인발 변형률을 동일하게 설정해 주는 ($\eta=1$) 배분모델을 개발하고자 한다.

$\eta = 1$ 로 설정하면,

$A_1^2 = A_0 \cdot A_2$ (9)

식 (9)는 다음의 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \frac{\pi}{4} [D_1^2 - (D_1 - 2t_1)^2] \right\}^2 = \left(\frac{\pi}{4} \right)^2 [D_0^2 - (D_0 - 2t_0)^2] \cdot [D_2^2 - (D_2 - 2t_2)^2] \quad (10)$$

식 (10)를 정리하면 식 (11)을 얻는다.

$$[D_1^2 - (D_1 - 2t_1)^2]^2 = 16t_0t_2(D_0 - t_0) \cdot (D_2 - t_2) (D_1t_1 - t_1^2)^2 = t_0t_2(D_0 - t_0) \cdot (D_2 - t_2) \quad (11)$$

C 를 $C = \sqrt{t_0t_2(D_0 - t_0) \cdot (D_2 - t_2)}$ 라 두면 식 (11)은 식 (12)와 같다.

$D_1t_1 - t_1^2 = C$ (12)

식 (12)로부터, 만약 1 차 인발시 평균직경 $\left(D_1 = \frac{D_0 + D_2}{2} \right)$ 을 기준으로 최적두께를 설정하려면, 1 차 인발 설정두께는

$t_1 = \frac{D_1 - \sqrt{D_1^2 - 4C}}{2}$ (13)

로 정한다.

만약 1 차 인발시 평균두께 $\left(t_1 = \frac{t_0 + t_2}{2} \right)$ 를 기준으로 최적직경을 설정하려면, 1 차 인발 설정 직경은

$D_1 = \frac{C + t_1^2}{t_1}$ (14)

로 정한다.

4. 결과 및 고찰

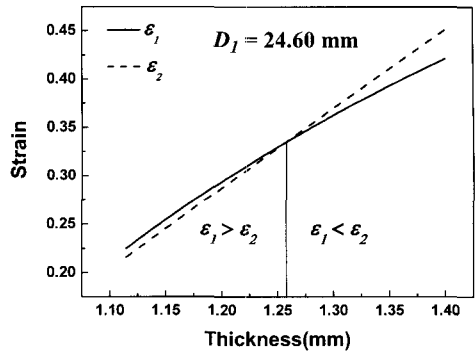
Table 3은 평균직경을 기준으로 한 식 (13)을 최적두께 인발 변형률 배분수식 모델을 이용하여 각 치수별로 1차 인발시의 최적 직경과 두께를 구한 후 그에 따른 변형률을 구한 것이고, Table 4

는 평균두께를 기준으로 한 식 (14)를 최적직경 인발 변형률 배분 수식모델을 이용하여 각 치수 별로 최적 직경과 두께를 구한 후 그에 따른 변형률을 구한 것으로 두 경우 모두 1차 인발과 2차 인발시의 변형률이 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 평균 직경을 기준으로 하거나 평균 두께를 기준으로 하거나 동일한 결과를 얻을 수 있다.

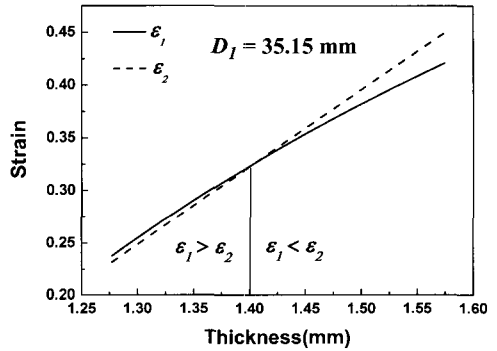
튜브 인발공정 작업표준 수식모델을 적용하여 유한요소해석으로 최대 유효변형률을 구한 결과 1차 인발과 2차 인발시의 유효변형률의 차이가 거의 없음을 Table 5에서 나타내고 있다. 평균직경을 기준으로 최적두께를 구하여 시뮬레이션을 한 결과나 평균두께를 기준으로 최적직경을 구한 결과는 거의 비슷하게 나타났다.

1차 인발시 평균직경을 기준으로 했을 때의 최적 두께와 그에 따른 1차 인발과 2차 인발시의 변형률 추이를 치수별로 Fig. 4에 나타내었다. 마찬가지로 1차 인발시 평균두께를 기준으로 했을 때의 최적직경과 그에 따른 1차 인발과 2차 인발시의 변형률 추이를 치수별로 Fig. 5에 나타내었다. 기준에 단순히 두께, 직경의 평균치를 1차 인발치수로 하였을 때의 직경과 두께에서의 변형률은 2차 인발시 더 높게 나타남을 그래프에서 확인할 수 있다. 평균직경을 기준으로 두께에 따른 1차 인발시의 변형률과 2차 인발시의 변형률은 큰 차이가 나타나지 않았으나 평균두께를 기준으로 직경에 따른 1차 인발시의 변형률과 2차 인발시의 변형률의 차이는 크게 나타났다.

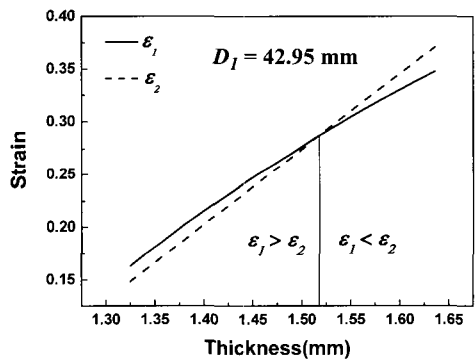
Fig. 6은 튜브 사이즈에 따른 인발한계를 나타내었다. 튜브의 직경이나 두께가 증가함에 따라서 인발에 따른 총 변형률은 증가함을 알 수가 있다. 1차 인발과 2차 인발시의 한계 연신율이 만약 0.3 이라면 1차 인발시의 직경과 두께는 각각 화살표 방향의 치수로 설계되어야만 소재에 인발균열이 발생하지 않고 인발이 가능하다. 그리고 Fig. 6 (a)에서 일정한 두께의 소재를 단순히 외경을 증가시키게 되면 총 변형률과 대체적으로 선형적인 관계를 보이나 Fig. 6 (b)는 일정한 외경의 소재를 단순히 두께만 증가시켜 나가면 총 변형률과 두께사이에는 로그함수적인 형태를 보인다. 따라서 튜브 소재의 두께보다는 외경을 변화시킬 때 총 변형률이 더욱 빠르게 증가함을 알 수 있어 인발 공정에서 두께 치수에 비해서 적절한 외경치수에 대한 선택이 더욱 중요하다고 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Strain variation with thickness for first tube drawing (a) $D_0 : 27.2$, $t_0 : 1.6$ and $D_2 : 22.0$, $t_2 : 1.0$ (b) $D_0 : 38.1$, $t_0 : 1.8$ and $D_2 : 32.1$, $t_2 : 1.1$ (c) $D_0 : 48.3$, $t_0 : 1.8$ and $D_2 : 37.6$, $t_2 : 1.3$

Table 3 Drawing strains for fixed average diameter with thickness calculated by Eq. (13)

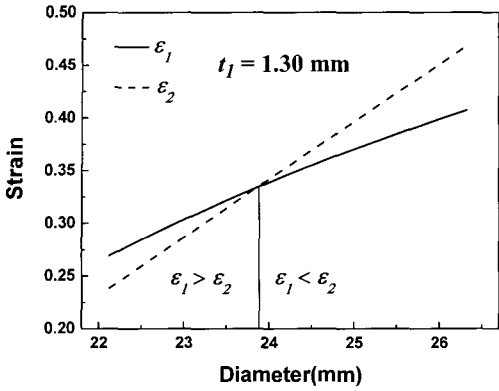
Input tube size		Target tube size		Set-up tube size for first drawing		Drawing strain	
D_0	t_0	D_2	t_2	D_1	t_1	First	Second
27.2	1.8	22.0	1.0	24.60	1.33	0.389	0.389
27.2	1.6			24.60	1.26	0.334	0.334
25.4	1.6			23.70	1.26	0.298	0.298
38.1	2.0	32.2	1.1	35.15	1.48	0.373	0.373
38.1	1.8			35.15	1.40	0.324	0.324
42.7	1.8			37.45	1.39	0.383	0.383
48.3	1.8	37.6	1.3	42.95	1.52	0.287	0.287
48.3	2.0			42.95	1.60	0.337	0.337
45.0	2.0			41.30	1.60	0.300	0.300
45.0	1.8			41.30	1.52	0.250	0.250

Table 4 Drawing strains for fixed average thickness with diameter calculated by Eq. (14)

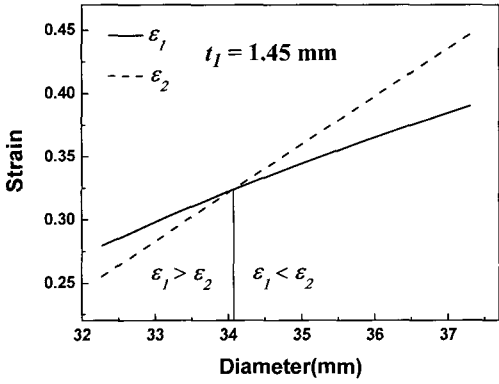
Input tube size		Target tube size		Set-up tube size for first drawing		Drawing strain	
D_0	t_0	D_2	t_2	D_1	t_1	First	Second
27.2	1.8	22.0	1.0	23.5	1.40	0.389	0.389
27.2	1.6			23.9	1.30	0.334	0.334
25.4	1.6			23.1	1.30	0.298	0.298
38.1	2.0	32.2	1.1	33.6	1.55	0.373	0.373
38.1	1.8			34.1	1.45	0.324	0.324
42.7	1.8			36.1	1.45	0.383	0.383
48.3	1.8	37.6	1.3	42.1	1.55	0.287	0.287
48.3	2.0			41.7	1.65	0.337	0.337
45.0	2.0			40.3	1.65	0.300	0.300
45.0	1.8			40.6	1.55	0.250	0.250

Table 5 Max effective strain

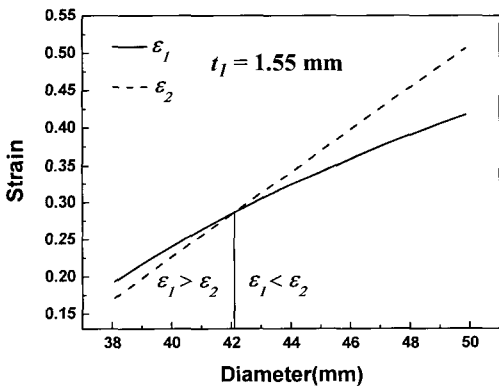
Contents	Input tube size		Target tube size		Max effective strain	
	D_0	t_0	D_2	t_2	First drawing	Second drawing
$D_1 = \frac{D_0 + D_2}{2}$	27.2	1.8	22.0	1.0	1.2043	1.1819
	38.1	2.0	32.2	1.1	1.1542	1.2122
t_1 from Eq. (13)	48.3	1.8	37.6	1.3	0.7937	0.7477
$t_1 = \frac{t_0 + t_2}{2}$	27.2	1.8	22.0	1.0	1.2337	1.1863
	38.1	2.0	32.2	1.1	1.1771	1.1944
D_1 from Eq. (14)	48.3	1.8	37.6	1.3	0.7903	0.7494



(a)

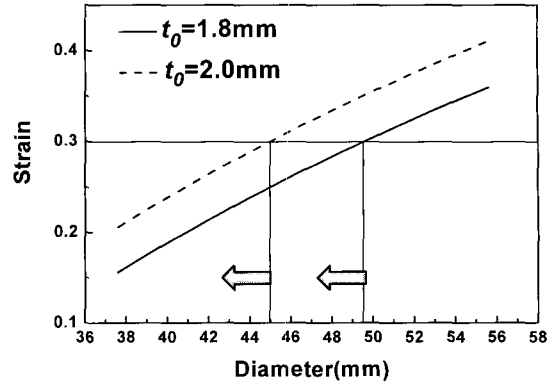


(b)

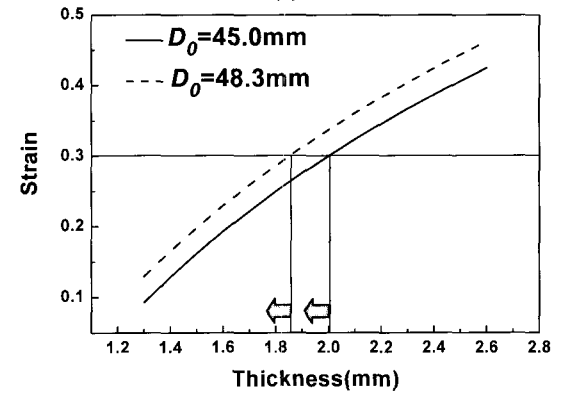


(c)

Fig. 5 Strain variation with diameter for first tube drawing (a) $D_0 : 27.2$, $t_0 : 1.6$ and $D_2 : 22.0$, $t_2 : 1.0$ (b) $D_0 : 38.1$, $t_0 : 1.8$ and $D_2 : 32.1$, $t_2 : 1.1$ (c) $D_0 : 48.3$, $t_0 : 1.8$ and $D_2 : 37.6$, $t_2 : 1.3$



(a)



(b)

Fig. 6 Drawing limit in (a) diameter at given thickness and (b) thickness at given diameter for ($D_2 : 37.6$, $t_2 : 1.3$)

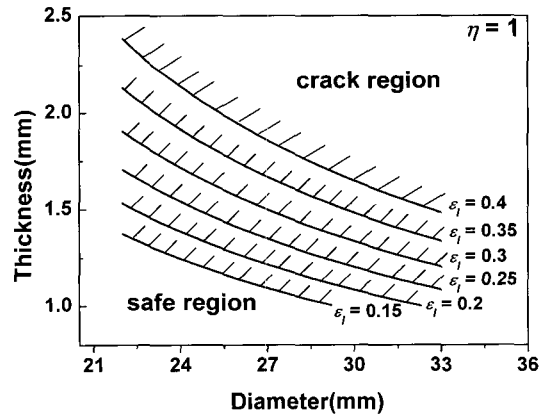


Fig. 7 Criteria curves at various limit strains ($D_2 : 22.0$, $t_2 : 1.0$)

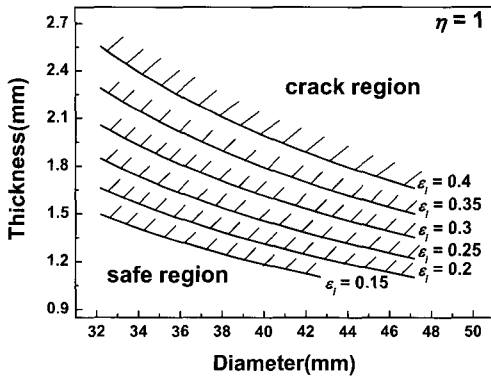


Fig. 8 Criteria curves at various limit strains
(D_2 : 32.1, t_2 : 1.1)

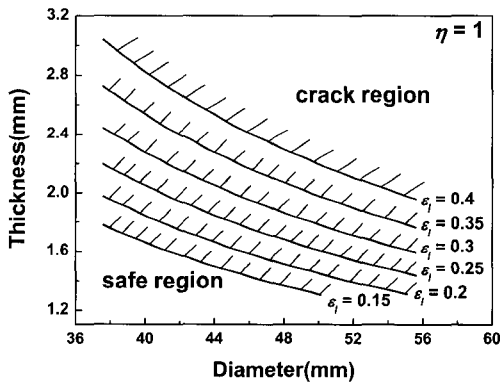


Fig. 9 Criteria curves at various limit strains
(D_2 : 37.6, t_2 : 1.3)

Fig. 7에서 Fig. 9는 튜브 소재 연신율에 따른 인발한계를 나타내고 있다. 최종제품의 치수를 기준으로 하여 초기 소재의 치수와 연신율의 정보를 가지고 있으면 인발시 이 소재의 크랙 여부를 예측할 수가 있다

5. 결 론

2단 튜브인발시 변형을 배분을 균등하게 해주는 수식모델의 개발을 통해 아래의 결론을 얻었다.

(1) ERW 인발용 강관의 용접부 균열이 없는 경우 1차 인발과 2차 인발의 변형을 불균일로 인한

변형을 집중 때문에 인발균열이 발생한다.

(2) ERW 강관의 1차 인발과 2차 인발시 인발 변형을 배분을 위하여 단계별 인발 단면적에 근거한 2단 튜브인발 변형을 배분 수식모델을 개발하였다.

(3) 인발작업표준 수식 모델을 이용하여 ERW 용접강관의 재질별 한계 연신량에 대한 인발균열 예측지표를 제안하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성 분석 연구센터의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) P. Karnezis and D.C.J. Farrugia, 1998 "Study of cold tube drawing by finite-element modeling", Journal of Material Processing Technology, 80-81, pp. 690~694.
- (2) N. Alexandrova, 2001, "Analytical treatment of tube drawing with a mandrel", Proceeding International Mechanical Engineering Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 215, pp. 581~589.
- (3) Chin-Tarn Kwan, 2002, "A generalized velocity field for axisymmetric tube drawing through an arbitrarily curved die with an arbitrarily curved plug", Journal of Material Processing Technology, 122, pp.213~219.
- (4) 허관도, 최영, 최일국, 2003, "상계요소법에 의한 판재 인발공정에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 1 호, pp. 11~17.
- (5) J. Peter Blau, 2001, "The significance and use of the friction coefficient", Tribology International, Vol. 34, pp. 585~591.
- (6) I. F. Collins and B. K. Williams, 1985, "Slipline fields for axisymmetric tube drawing", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 27, pp. 225~233.
- (7) G. Rai and S. K. Mukherjee, 1982, "Cracking of weldments in pipe manufactured by ERW process: An analysis", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, pp. 527~537.