

〈技術論文〉

인발공정의 내부결함 방지에 관한 연구

고대철* · 김병민** · 최재찬** · 강범수**

(1994년 5월 10일 접수)

A Study on Prevention of Central Burst Defects in Wire Drawing

Dae Cheol Ko, Byung Min Kim, Jae Chan Choi and Beom Soo Kang

Key Words : Central Burst Defects(내부결함), Finite Element Method(유한요소법), Wire Drawing(인발공정), Numerical Boundary(수치적 경계영역), Back Tension(후방장력), Spherical Hole(원형공), Hydrostatic Pressure(정수압응력)

Abstract

The central burst defects, so-called chevrons, in wire drawing are analyzed by the rigid-plastic finite element method. The occurrence of central burst defects in wire drawing is estimated by the distribution of the hydrostatic pressure around the central part of the workpiece. It has been possible to obtain numerical boundaries which, in reduction in area vs. semicone angle plane, divide the safe and the danger zones, depending on friction factors and material properties. Based on the results of the analysis, it is suggested that the previous criterion derived from the upper bound analysis should be modified for better prediction of the defects. The back tension and the billet with a spherical hole on the central axis are also included in the analysis of the defects.

1. 서론

인발가공은 봉재, 관재, 선재 등의 소재를 다이로 통하여 잡아당겨서 단면적 감소와 길이의 증가를 꾀하는 기본적인 소성가공방법으로써 치수정밀도, 표면정도 및 강도와 경도의 증가를 가져올 뿐만 아니라 대단히 작은 단면적을 갖는 형상까지도 성형할 수 있는 장점이 있다.

그러나 인발공정에서는 스네이크스킨(snake skin)과 같이 금속표면에 발생하는 외부결함과 중심파열(central burst)과 같은 재료내부에 발생하는 내부결함 등이 발생한다. 특히 내부결함은 재료의 특성, 재료내부의 개재물(inclusion) 및 불순물 함유

량, 변형이력, 공정조건 등의 영향에 따라 그 발생 여부가 좌우되며, 내부결함의 발생은 가시적으로 확인이 불가능하다. 그리고 이로 인한 재료의 파괴는 생산라인의 중단을 초래하므로 자동화를 추구하는 금속성형산업에서 큰 문제가 되는 동시에 제품의 단가를 상승시키는 요인이 된다. 따라서 내부결함의 발생을 예측하고 방지하는 것은 매우 중요한 과제이다.

인발 또는 압출공정에서 발생하는 내부결함은 Jennison⁽¹⁾이 최초로 보고하였으며, 다이형상이 내부결함의 발생에 큰 영향을 미치므로 적절한 다이 설계로 내부결함을 방지할 수 있다고 제안하였다. Avitzur⁽²⁾는 상계법을 이용하여 다이 반각, 단면적 감소율, 마찰에 따른 내부결함 발생 판정식을 구하였으며, 상계하중을 계산하여 하중이 작아지면 내부결함이 발생한 것이라고 하였다. 그후 Zimmerman, Avitzur⁽³⁾는 재료의 가공경화성을 고려하여 내부결

*부산대학교 대학원 기계설계공학과

**정회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

함의 발생을 조사하였다. Lee, McMeeking⁽⁴⁾은 Avitzur^(2,3)가 제시한 내부결함 발생에 대한 상계해의 적용에는 크랙이 시작되고, 확산되는데 필요한 에너지가 계산에 포함되어야 한다고 지적하였다. Tanaka⁽⁶⁾는 임의의 다이 반각과 단면적 감소율에서 소재의 중심축을 따라 정수인장응력성분이 존재하면 중심축 선상에서 국부적인 인장파손이 생긴다고 제안하였다. Choi, Avitzur, Kim^(6,7)은 재료의 중심축 선상에 내재된 원형공을 비례유동모델과 내부결함 유동모델로 가정하여 상계해석에 의한 내부결함 발생을 예측하였다. 지금까지 언급한 연구결과들은 주로 상계해석을 이용하여 하중의 증가에 따라 내부결함의 발생을 예측한 반면에 유한요소법에 의한 내부결함 발생예측은 Chen 등⁽⁸⁾에 의해 시도되었으며, 인발 및 압출공정에서 재료 중심축 선상에 인장상태의 정수압응력이 생길 때 내부결함이 발생한다고 제안하였다. Aravas⁽⁹⁾는 축대칭 압출공정에서 다이 반각이 내부결함의 발생에 미치는 영향을 해석하였으며, Yoshida 등⁽¹⁰⁾은 구리의 인발가공 중 재료내부의 산소함유량 증가가 결함에 관계되었음을 실험으로 입증하였다. 또한, Tanaka 등⁽¹¹⁾은 내부결함에 대한 유효 변형률과 정수압응력의 영향을 조사하였고, Ayada 등⁽¹²⁾은 불균질 재료에 대한 내부결함 발생을 해석하였다. 최근에 Kim 등⁽¹³⁾은 재료 내부에 임의 크기의 원형공이 내재된 축대칭 압출공정에서 내부결함의 발생을 조사하였고, Hahm 등⁽¹⁴⁾은 미소공동(microvoid)을 포함하고 있는 변형경화성, 변형률속도 의존성 재료에 대한 성형공정모델을 제시하고, 이를 인발공정에 적용하여 미소공동의 성장에 따른 내부결함의 발생을 해석하였다. 그러나 유한요소법을 이용한 연구들은 공정변수에 대한 내부결함 발생의 일반적인 경향만 조사하였고 재료의 특성이 내부결함의 발생에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 또한, 실제 산업현장의 공정설계에 이용될 수 있도록 내부결함의 발생을 방지할 수 있는 수치적 경계영역을 제시하지 못했다.

따라서 본 연구의 목적은 강소성 유한요소법으로 다이 반각, 단면적 감소율, 마찰상수 등의 공정변수 및 재료특성과 내부결함 발생과의 관계를 조사한 후에, 초기소재 직경으로부터 최종제품 직경까지의 내부결함 발생이 없는 인발공정설계, 즉 패스(pass)설계가 될 수 있도록 내부결함 발생이 가능한 위험영역과 가능성이 없는 안전영역의 수치적

경계를 제시하는데 있으며, 또한 인발공정에서 다이면압과 마찰력 감소를 위해 가해지는 후방장력과 재료내부의 개재물 및 불순물 등으로 인한 미소공동이 내부결함의 발생에 미치는 영향을 조사하는데 있다.

2. 인발공정의 유한요소해석

2.1 유한요소 수식화

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하였으며, 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌^(15,16)에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K 를 도입하면, 강소성 재료에 대한 일차 변분법함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i ds = 0 \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력, $\dot{\epsilon}$ 는 유효 변형률속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도, \bar{t}_i 는 표면력이다.

위의 식(1)은 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

2.2 유한요소 모델링

시뮬레이션에 사용된 재료는 순수알루미늄, 무산소고전도동(O. F. H. C. copper), 1010강이며, 이들 재료의 응력-변형률관계를 Table 1⁽¹⁷⁾에 나타내었다. 소재의 치수와 형상은 지름이 10 mm, 길이가 35 mm인 원형소재이다. 시뮬레이션에 사용된 격자시스템은 Fig. 1(a)와 같으며, 요소수는 432개, 절점수는 490개이다. 또한, 축대칭 소재이므로 1/2만 해석하였다. 인발공정에 있어서 내부결함의 발생에 관한 안전영역과 위험영역의 수치적 경계를 설정하기 위하여, 다이 반각과 단면적 감소율을 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 행하였다. 마찰의 영향을 조사하기 위하여 마찰상수를 0.0, 0.1, 0.4로 하였다.

후방장력이 내부결함의 발생에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유한요소해석으로 내부결함 발생에 관한 안전영역과 위험영역의 수치적 경계를 설정한 후, (1) 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 10%,

Table 1 Materials and their stress-strain relationships used for computation

Material	Stress-strain relation	Initial yield stress
Pure aluminum	$\bar{\sigma}/Y_o = \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.3193}\right)^{0.34}$	$Y_o = 106.86 \text{ N/mm}^2$
O. F. H. C couper	$\bar{\sigma}/Y_o = \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.3518}\right)^{0.28}$	$Y_o = 289.56 \text{ N/mm}^2$
Steel 1010	$\bar{\sigma}/Y_o = \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.0054}\right)^{0.223}$	$Y_o = 226.5 \text{ N/mm}^2$

마찰상수가 0.1인 공정조건과 (2) 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 25%, 마찰상수가 0.1인 공정조건을 해석하였다. 후방장력의 영향은 소재 끝부분의 점들에 일정한 속도 경계조건을 부여하여 고려하였다.

그리고 개재물과 불순물 등으로 인하여 재료내부에 미소공동이 존재할 경우, 이와 같은 미소공동이 내부결함의 발생에 미치는 영향을 조사하기 위하여 재료 중심축 선상에 원형공이 내재된 소재의 인발 공정을 해석하였다. 다이와 접촉이 끝나는 절점으로부터 높이 2.5 mm의 중심축 선상에 지름의 1/20 크기의 원형공이 내재된 지름이 10 mm, 길이가 35 mm인 원형소재를 이용하였다. 시뮬레이션에 사용된 격자시스템은 Fig. 1(b)와 같으며, 요소수는 488개, 절점수는 511개이다. 다이 반각을 5°, 7.5°로 하고 각각의 단면적 감소율을 10%, 20%, 30%, 40% 및 10%, 30%로 변화시켜 해석하였다. 또한 마찰의 영향을 조사하기 위하여 마찰상수를 0.0, 0.1로 정하여 시뮬레이션하였다. 이러한 공정조건

은 Table 2에 나타나있다. 공정변수에 대한 원형공의 형상변화와 체적변화를 조사하였고, 공정의 진행에 따른 원형공의 형상변화 및 체적변화와 내부결함 발생과의 연관성을 해석하였다.

2.3 수치적 경계영역 설정을 위한 판단기준

앞서 보고된 연구결과에서 언급되었듯이, (5,8,9) 재료내부의 결함은 미소공동의 성장과 합체로 일어난다. 소성유동의 초기단계에 기지재(matrix)와 개재물 또는 불순물 사이에 미소공동이 생성될 수 있으며, 재료 중심축을 따라 정수인장응력성분이 존재하는 공정에서 이러한 미소공동은 성장하게 되고 이웃한 공동과의 합체로 국부적인 인장파손을 일으

Table 2 Drawing process conditions for computation

Semicone angle of die(α°)	Percent reduction in area(R%)	Friction factor (m)
5.0	10	0.0
		0.1
	20	0.0
		0.1
	30	0.0
		0.1
7.5	10	0.0
		0.1
	30	0.0
		0.1

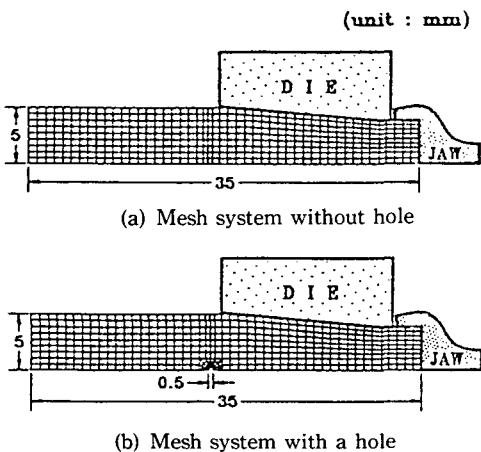


Fig. 1 Initial mesh systems for drawing

킨다. 이에 비해 중심축을 따라 정수압축응력이 지배적인 공정에서 미소공동은 닫힌(closed) 상태를 유지하며, 이로 인해 국부적인 인장파손을 피할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 재료내부의 응력상태를 내부결함 발생에 관한 안전영역과 위험영역의 경계를 설정하기 위한 판단기준으로 이용하였다. 즉, 재료 중심축 선상에 정수인장응력성분이 존재하는 공정조건을 내부결함의 발생이 예측되는 공정조건 또는 결함발생의 위험이 있는 공정조건으로 고려하였다.

$$\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} = \sigma_m \geq 0 : \text{danger zone on the occurrence of defects}$$

$$= \sigma_m < 0 : \text{safe zone on the occurrence of defects}$$

(2)

여기서, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 주응력 성분이며, σ_m 은 정수 압응력이다.

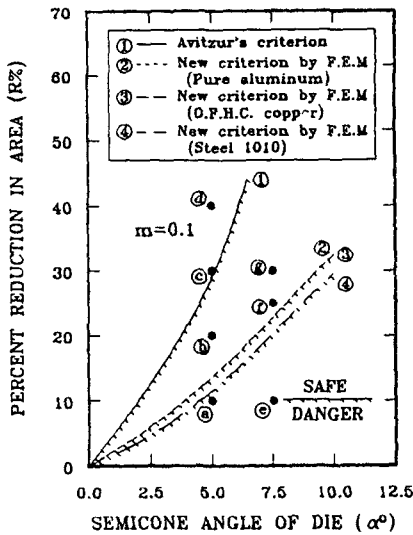
그러나 여기서 내부결함이 발생할 수 있는 위험 영역의 공정조건에서도 내부결함은 반드시 발생하

는 것이 아니라, 이와 같은 공정조건에서는 단결함발생의 가능성이 높다는 것에 유의해야 한다.

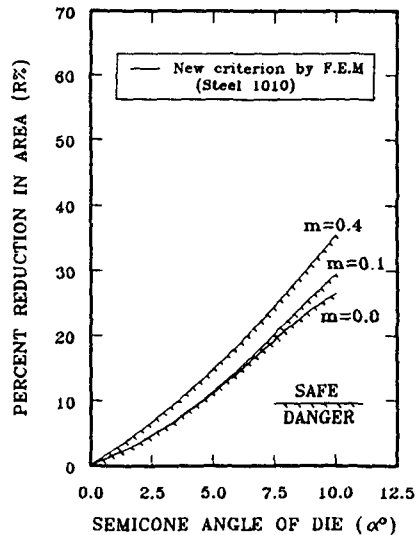
3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석에 의한 수치적 경계영역

순수알루미늄, 무산소고전도동, 1010강에 대하여 내부결함의 발생이 가능한 위험영역과 가능성이 없는 안전영역에 대한 새로운 수치적 경계영역을 Avitzur의 수치적 경계영역⁽¹⁸⁾과 비교하여 Fig. 2(a)에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 Avitzur의 수치적 경계영역에 의하면 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 20%, 마찰상수가 0.1인 공정조건(㉑점)과 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 10%, 마찰상수가 0.1인 공정조건(㉒점)은 내부결함의 발생이 가능한 위험영역의 공정조건이다. 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 20%, 마찰상수가 0.1인 공정조건에 대한 정수압응력 분포를 나타낸 Fig. 3에서 재료 중심축 선상에 정수압축응력 성분이 존재하므로 이는 재료 중심축 선상의 정수압응력이 인장상태인



(a) Effect of materials



(b) Effect of friction factors(steel 1010)

Fig. 2 New criteria for central burst defects in drawing

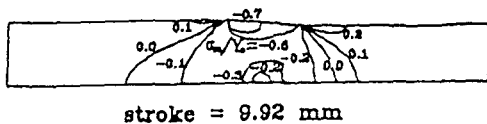


Fig. 3 Hydrostatic pressure distribution for pure aluminum($\alpha=5^\circ, R=20\%, m=0.1$)

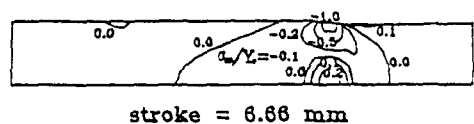


Fig. 4 Hydrostatic pressure distribution for pure aluminum($\alpha=7.5^\circ, R=10\%, m=0.1$)

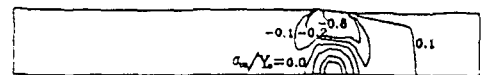
경우 내부결함의 발생이 예측 또는 결함발생의 위험이 높다는 점을 고려해 볼 때, 결함발생의 가능성이 없는 안전영역의 공정조건임을 알 수 있다. 또 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 10%, 마찰상수가 0.1인 공정조건에 대한 정수압응력 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 재료 중심축 선상에 정수인장응력성분이 존재하므로 내부결함이 발생할 수 있는 위험영역의 공정조건임을 알 수 있다. 따라서 Fig. 2(a)와 같이 재료 중심축 선상의 정수압응력 상태를 근거로 한 수치적 경계영역은 상계해석으로 Avitzur가 제시한 경계영역보다 내부결함의 발생 가능성이 없는 안전영역이 확장되었다. 또한 단면적 감소율이 클수록, 다이 반각이 작을수록 내부결함에 관한 위험영역이 감소하므로 결함발생이 억제될 수 있음을 알 수 있다. 재료 특성에 대한 내부결함 발생의 영향을 비교해 보면, 순수알루미늄과 무산소고전도동의 경우는 거의 일치되는 곡선형태를 나타내었고 1010강은 위의 두 재료보다 약간 아래쪽에 위치하였다. 이는 각 재료의 응력-변형률 관계를 나타낸 Table 1에서 알 수 있듯이 순수알루미늄과 무산소고전도동보다 가공경화의 정도가 심한 1010강의 경우가 내부결함의 위험영역이 감소하여 결함발생이 억제될 수 있음을 의미한다. 1010강에 대하여 마찰조건 변화에 따른 내부결함 발생의 영향을 비교하여 Fig. 2(b)에 나타내었다. 마찰상수가 작을수록 내부결함에 대한 위험영역이 감소하므로, 결함발생이 억제 또는 지연될 수 있음을 알 수 있다.

인발공정 설계자는 이상과 같이 제시된 수치적 경계영역을 이용하여, 안전영역에 있는 공정변수조합을 선택한 패스설계를 함으로써 실제 인발가공에서 내부결함 발생으로 인한 생산라인의 중단을 미리 방지할 수 있을 것이다.

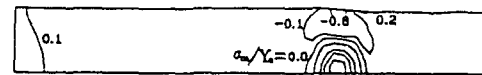
3.2 후방장력의 영향

후방장력이 내부결함에 미치는 영향을 조사하기 위하여, Fig. 2(a)의 유한요소해석으로 제시된 수치적 경계영역에서 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 10% 마찰상수가 0.1인 위험영역의 공정조건(㉔점)과 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 25%, 마찰상수가 0.1인 안전영역의 공정조건(㉑점)에 대하여 후방장력을 고려한 순수알루미늄 재료의 인발공정을 해석하여 정수압응력 분포를 조사하였다.

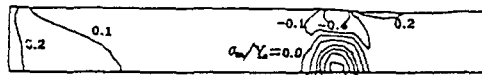
내부결함의 발생이 가능한 위험영역의 공정조건에 대한 정수압응력 분포를 나타낸 Fig. 5에서 후방장력이 클수록 중심축 선상의 정수인장응력이 더 큼을 알 수 있다. 또 내부결함의 발생 가능성이 없는 안전영역의 공정조건에 대한 정수압응력 분포를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 이 공정조건은 후방장력이 작용하지 않을 때에는 변형영역내 중심축 선상에 정수압축응력성분이 존재함을 볼 수 있다. 그러나 후방장력이 작용함에 따라, 변형영역내 중심축 선상의 정수압응력이 인장상태로 되어 내부결함이 발생할 수 있는 위험영역의 공정조건으로



(a) Stroke=6.81 mm($\sigma_b/Y_o=0.08$)

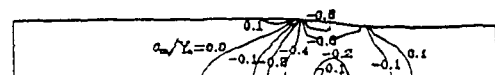


(b) Stroke=6.78 mm($\sigma_b/Y_o=0.18$)

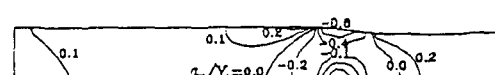


(c) Stroke=6.77 mm($\sigma_b/Y_o=0.29$)

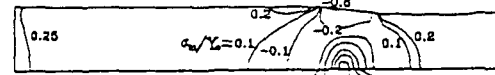
Fig. 5 Hydrostatic pressure distribution for pure aluminum under various back tension conditions($\alpha=7.5^\circ$, $R=10\%$, $m=0.1$)



(a) Stroke=6.96 mm($\sigma_b/Y_o=0.00$)



(b) Stroke=6.60 mm($\sigma_b/Y_o=0.25$)



(c) Stroke=6.87 mm($\sigma_b/Y_o=0.37$)

Fig. 6 Hydrostatic pressure distribution for pure aluminum under various back tension conditions($\alpha=7.5^\circ$, $R=25\%$, $m=0.1$)

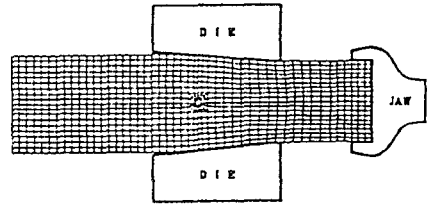
바뀌게 되고 후방장력이 클수록 중심축 선상의 정수인장응력이 더 큼을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 후방장력이 작용하는 경우, 후방장력이 클수록 내부결함에 대한 위험영역이 확장됨을 알 수 있다.

3.3 원형공이 내재된 소재의 인발공정

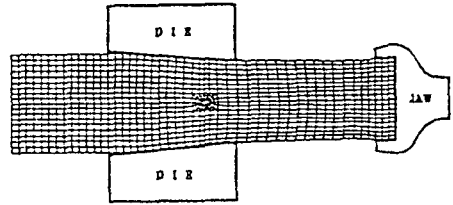
3.3.1 원형공의 형상변화

소재 내부에 일정 크기의 원형공이 존재해 있는 순수알루미늄 재료의 인발공정에 대하여 Fig. 2(a)와 같이 유한요소해석으로 제시된 수치적 경계영역의 안전영역과 위험영역에 있는 공정조건을 선택하여 공정의 진행에 따른 원형공의 형상변화를 조사하였다. 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 30%, 마찰상수가 0.1인 공정조건에 대한 원형공의 형상변화는 Fig. 7과 같다. 인발공정이 진행됨에 따라, 원형공이 다이의 감소부를 지나면서 원형공 주위의 격자가 왜곡되기 시작하여 중심축 선상으로 강축을 가진 타원형상으로 변화하여, 다이를 빠져나온 후에는 원형공 주위의 격자 왜곡이 거의 없음을 알 수 있다.

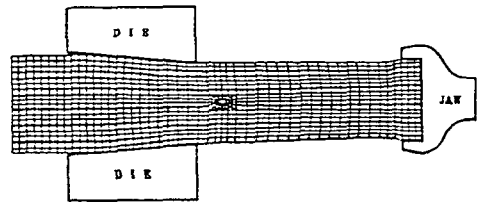
유동방향으로 원형공의 초기반경을 a_0 , 변형후의 반경을 a_f 라 하고 반경방향으로 원형공의 초기반경을 b_0 , 변형후의 반경을 b_f 라 할 때, Table 2의 공정조건에 대한 a_f/a_0 및 b_f/b_0 값의 변화를



(a) Stroke=6.15 mm

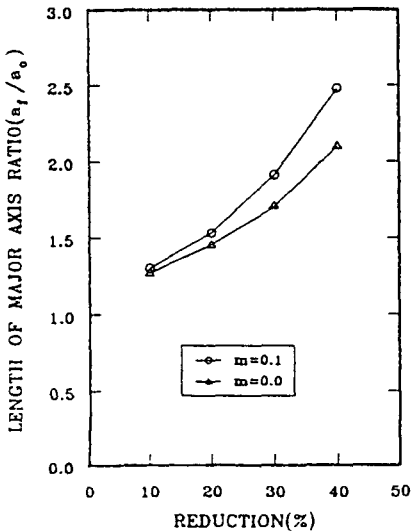


(b) Stroke=13.31 mm

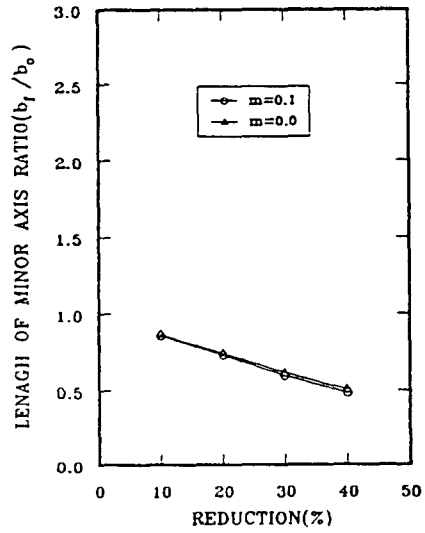


(c) Stroke=20.24 mm

Fig. 7 Numerical simulation of a drawing process ($\alpha = 5^\circ$, $R=30\%$, $m=0.1$)



(a)



(b)

Fig. 8 The length of major and minor axis ratio of a deformed hole vs. reduction($\alpha=5^\circ$)

Table 3 The eccentricity, e_h of the hole on process conditions

Semicone angle of die(α°)	Percent reduction in area(R%)	Friction factor (m)	Eccentricity (e_h)
5.0	10	0.0	0.1888
		0.1	0.2040
	20	0.0	0.3221
		0.1	0.3534
	30	0.0	0.4693
		0.1	0.5241
	40	0.0	0.6120
		0.1	0.6741
7.5	10	0.0	0.2073
		0.1	0.2156
	30	0.0	0.5121
		0.1	0.5541

Fig. 8(a), (b)에 나타내었다. 인발공정 후의 원형공 형상은 a_f/a_o 의 값은 증가하고 b_f/b_o 의 값은 감소하여, b_f 에 상대적으로 a_f 가 대단히 큰 납작한 타원 형상임을 알 수 있으며, 변형된 원형공의 이심률, e_h 을 $e_h = (a_f - b_f) / (a_f + b_f)$ 라 정의하여 나타낸 Table 3에서도 알 수 있다. 그러나 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 10%인 공정조건과 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 10%인 공정조건은 Fig. 8(a), (b)와 Table 3에서 각각 알 수 있듯이, 인발공정 후 a_f/a_o 및 b_f/b_o 값의 변화가 적고, e_h 가 비교적 적으므로 거의 원형 형상으로 변화하였음을 알 수 있다.

3.3.2 원형공의 체적변화

Table 2의 각 공정조건에 대한 원형공 내부의 체적변화를 인발공정의 진행에 따라 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)에 나타나 있듯이 동일한 다이 반각 및 마찰상수에 대해서는 단면적 감소율이 클수록 인발공정의 진행에 따라 원형공 내부의 체적이 더 작음을 알 수 있으며, 동일한 다이 반각, 단면적 감소율에 대해서는 모든 공정에서 마찰상수가 작을수록 원형공 내부의 체적이 더 작음을 알 수 있다. 또한 Fig. 9(b)에 나타나 있듯이 동일한 단면적 감소율, 마찰상수에 대해서는 다이 반각이 작

을수록 인발공정이 진행됨에 따라 원형공 내부의 체적이 더 작음을 알 수 있다.

다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 10%인 공정조건(Fig. 2(a)의 ㉔점)은 내부결함이 발생할 수 있는 위험영역의 공정조건이며, 이 공정조건에서는 인발공정이 진행됨에 따라 원형공이 다이 감소부를 지나면서 원형공 내부의 체적이 감소하다가 다이를 빠져나온 후에는 다시 증가함을 알 수 있다. 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 20%인 공정조건(Fig. 2(a)의 ㉕점)과 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 30%인 공정조건(Fig. 2(a)의 ㉖점) 그리고 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 40%인 공정조건(Fig. 2(a)의 ㉗점)은 내부결함에 대한 안전영역의 공정조건이며, 이 공정조건에서는 인발공정의 진행에 따라 원형공이 다이 감소부를 지나면서 원형공 내부의 체적이 계속 감소하다가 다이를 빠져나온 후에는 거의 체적의 변화가 없음을 볼 수 있다.

다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 10%인 공정조건(Fig. 2(a)의 ㉘점)은 내부결함이 발생할 수 있는 위험영역의 공정조건이며, 이 공정조건에서는 공정이 진행됨에 따라 원형공이 다이 감소부를 지나면서 원형공 내부의 체적이 증가하다가 다이를 빠져나온 후에는 거의 체적의 변화가 없음을 알 수 있다. 다이 반각이 7.5°, 단면적 감소율이 30%인

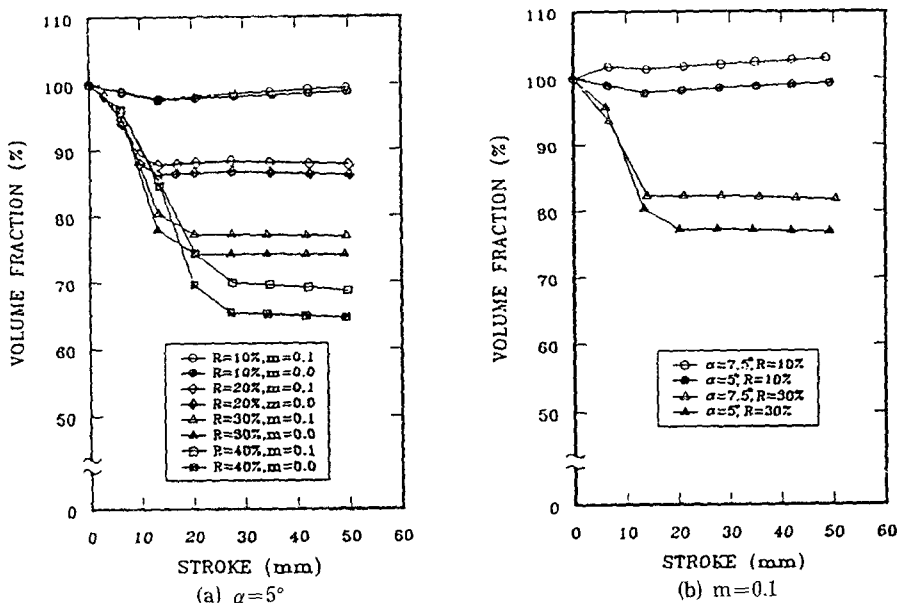


Fig. 9 Volume change in the hole vs. stroke

공정조건(Fig. 2(a)의 ㉔점)은 내부결함에 대한 안전영역의 공정조건이며, 이 공정조건에서는 인발공정이 진행됨에 따라 원형공이 다이감소부를 지나면서 원형공 내부의 체적이 계속 감소하다가 다이를 완전히 빠져나온 후에는 거의 체적의 변화가 없음을 알 수 있다.

3.3.3 원형공의 형상변화 및 체적변화와 내부 결함 발생과의 관계

공정이 진행됨에 따라 원형공은 거의 원형 형상을 유지하거나 타원형상으로 변화하였으며, 이러한 원형공의 형상변화는 내부결함 발생과 일관성있는 관계를 나타내지 않았다. 따라서 내부결함 발생에 대한 영향을 원형공 내부의 체적변화와 연관시켜 해석하기 위하여 원형공 주위의 정수압응력 분포를 조사하였다. Fig. 10은 다이 반각이 5°, 단면적 감소율이 30%, 마찰상수가 0.1인 공정조건에 대하여 원형공이 변형영역 내부에 있을 때와 변형영역 외부에 있을 때의 정수압응력 분포이다. 원형공이 변형영역 내부 및 변형영역 외부에 있을 때, 재료 중심축 선상의 정수압응력이 압축상태임을 보여주고 있다. 이는 동일한 공정조건에 대하여 Fig. 9(a)에서 인발공정이 진행됨에 따라 원형공 내부의 체적이 점차 감소함을 알 수 있으며, Fig. 2(a)에서 ㉔점의 동일한 공정조건은 내부결함의 발생 가능성이

없는 안전영역의 공정조건임을 알 수 있다. Fig. 11은 다이 반각 7.5°, 단면적 감소율 10%, 마찰상수가 0.1인 공정조건에 대한 정수압응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11(b)에서 원형공이 변형영역 외부에 있을 때, 중심축 선상의 다른 곳에서 정수압응력이 인장상태로 됨을 알 수 있다. 이는 동일한 공정조건에 대하여 Fig. 9(b)에서 원형공 내부의 체적이 인발공정의 진행에 따라 증가하고 있음을 알 수 있으며, 또한 Fig. 2(a)에서 ㉔점의 동일한 공정조건은 내부결함이 발생할 수 있는 위험영역의 공정조건임을 알 수 있다. 그러나 다이 반각 7.5°, 단면적 감소율 30%, 마찰상수가 0.1인 공정조건에 대한 정수압응력의 분포를 나타낸 Fig. 12에서 원형공이 변형영역 내부 및 변형영역 외부에

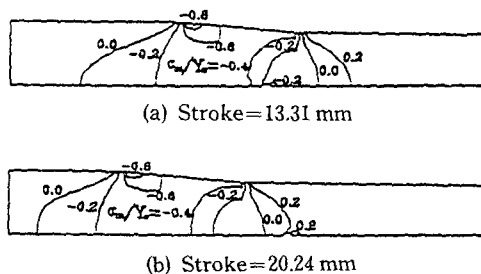


Fig. 10 Hydrostatic pressure distribution($\alpha=5^\circ$, R=30%, $m=0.1$)

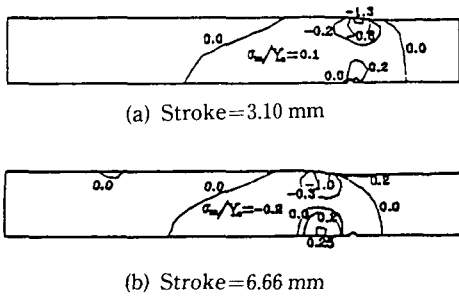


Fig. 11 Hydrostatic pressure distribution($\alpha=7.5^\circ$, $R=10\%$, $m=0.1$)

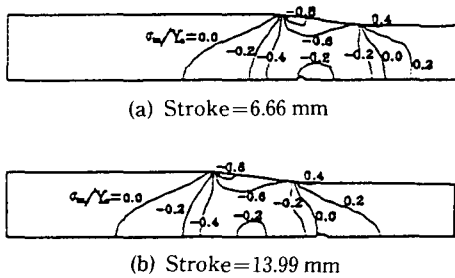


Fig. 12 Hydrostatic pressure distribution($\alpha=7.5^\circ$, $R=20\%$, $m=0.1$)

있을때, 변형영역내의 정수압응력이 압축의 분포임을 볼 수 있다. 이는 동일한 공정조건에 대한 Fig. 9(b)에서 인발공정의 진행에 따라 원형공 내부의 체적이 감소함을 알 수 있으며, Fig. 2(a)에서 ㉔ 점의 동일한 공정조건은 내부결함의 발생 가능성이 없는 안전영역의 공정조건임을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 인발공정의 진행에 따른 원형공 내부의 체적변화는 내부결함 발생여부와 관련이 있음을 알 수 있다. 즉, 공정이 진행됨에 따라 원형공 내부의 체적이 증가하면 내부결함의 발생이 가능한 공정조건이고, 원형공 내부의 체적이 감소하면 내부결함에 대한 안전영역의 공정조건으로 고려할 수 있다. 그리고 동일한 공정조건의 정수압응력 분포를 나타내는 Fig. 4와 Fig. 11(b)에서 원형공이 내재된 소재의 중심축 선상에 더욱 큰 정수인장응력이 존재함을 볼 수 있다. 이는 재료내부에 공동이 존재하는 경우가 결함발생의 위험이 더욱 높은 것으로 고려된다.

4. 결 론

본 논문에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 측

대칭 인발공정에서 다이 반각, 단면적 감소율, 마찰상수 등의 공정변수, 재료의 특성, 후방장력과 재료내부의 미소공동이 내부결함의 발생에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임의의 다이 반각, 단면적 감소율, 마찰상수 등의 공정변수조합에 대하여 내부결함 발생이 가능한 위험영역과 가능성이 없는 안전영역에 관한 새로운 수치적 경계영역을 제시하였다.

(2) 제시된 수치적 경계영역은 초기소재 직경에서 최종제품 직경으로의 내부결함 발생이 없는 인발공정의 공정설계시 유용하게 적용될 수 있다.

(3) 제시된 수치적 경계영역은 재료의 특성에 큰 영향을 받지 않았으며, 다이 반각, 단면적 감소율, 마찰상수 등의 공정변수에 크게 의존함을 알 수 있었다.

(4) 단면적 감소율이 클수록, 다이 반각과 마찰상수가 작을수록, 가공경화의 정도가 심한 재료일수록 내부결함의 발생이 억제될 수 있음을 알 수 있었다.

(5) 후방장력이 클수록 내부결함의 발생에 대한 위험영역이 확장되므로 결함발생의 위험이 더욱 높음을 알 수 있었다.

(6) 재료내부에 미소공동이 존재하면 내부결함의 발생위험이 더욱 높음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jennison, H. C., 1930, "Certain Types of Defects in Copper Wire Caused by Improper Dies and Drawing Practice," *AM. Inst. of Mining and Metall. Eng., Technical Publication*, No. 285, *Class E., Inst. of Metals*, No. 97.
- (2) Avitzur, B., 1968, "Analysis of Central Bursting Defects in Extrusion and Wire Drawing," *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 90, No. 1, pp. 79 ~ 91.
- (3) Zimmerman, Z. and Avitzur, B., 1970, "Analysis of the Effect of Strain Hardening on Central Bursting Defects in Drawing and Extrusion," *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 92, No. 1, pp. 135 ~ 145.
- (4) Lee, E. H. and McMeeking, R. M., 1978, "Concerning Analysis of Central Busting in Metal Forming," *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 100,

- No. 3, pp. 386~387.
- (5) Tanaka, H., 1952, "On the Cause of Cuppy Defects in Drawn Material," *J. Japan Inst. Metals*, Vol. 16, pp. 567~574.
- (6) 최재찬, 김병민, 1985, "판재 인발에서 내부결함에 대한 변형경화의 영향에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제9권, 제5호, pp. 677~682.
- (7) Avitzur, B. and Choi, J. C., 1986, "Analysis of Central Bursting Defects in Plane Strain Drawing and Extrusion," *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 108, No. 4, pp. 317~321.
- (8) Chen, C. C., Oh, S. I. and Kobayashi, S., 1979, "Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing, Part 1," *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 101, No. 1, pp. 23~35.
- (9) Aravas, N., 1986, "The Analysis of Void Growth that leads to Central Bursts during Extrusion," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, No. 1, pp. 55~79.
- (10) Yoshida, K. and Tanaka, H., 1987, "Cup Shaped Defects in Copper wire Drawn from Rods of Continuous Casting and Rolling," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II, pp. 857~862.
- (11) Tanaka, M., Ono, S., Tsumeno, M. and Iwadate, T., 1987, "An Analysis of Void Crushing during Flat Die Free Forging," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II, pp. 1035~1042.
- (12) Ayada, M., Higashino, T. and Mori, K., 1987, "Central Bursting in Extrusion of Inhomogeneous Materials," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. I, pp. 553~558.
- (13) 김태형, 이진희, 권혁홍, 김병민, 강범수, 최재찬, "유한요소법을 이용한 전방압출공정의 내부결함에 관한 연구," 1992, 한국소성가공학회 논문집, 제1권, 제1호, pp. 66~74.
- (14) 함승연, 이용신, 1994, "변형경화성을 갖는 점소성재의 인발공정에서 결함성장의 유한요소해석," 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 71~79.
- (15) Zienkiewicz, O. C., 1977, *The Finite Element Method*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York.
- (16) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and The Finite Element Method," Oxford University Press.
- (17) Chen, C. C., 1978, "Finite Element Analysis of Plastic Deformation in Metal Forming Processes," Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- (18) Avitzur, B., 1980, *Metal Forming : The Application of Limit Analysis*, Marcel Denkker Inc.