

압출공정에 있어서 최적 압출력 산정에
관한 연구

호서대학교 기계공학과*

오박균, 유성관*

압출공정에 있어서 최적압출력 산정에 관한 연구

오 박 균, 유 성 관(호서대학교 기계공학과)

A Study on Optimum Computation of Extruding Force for the Extrusion

P. K. Oh*, S. K. Yu**(Hoseo University)

Key Words : Extrusion(압출), Friction(마찰), Wear(마모), Lubrication(윤활)

Abstract : To carry out the analysis of the extruding products, it is necessary to get the optimum computation of extruding force for the extrusion. The existing numerical models of the extrusion may be large different from the actual conditions. In this study, accurate theoretical analysis of the extrusion forming and optimum extruding force should be subjected. It is to develop the numerical models which describes the optimum extrusion force. Therefore, the results should improve accuracy of extrusion forming and cause the energy saving for the extrusion.

1. 서 론

압출성형이란 원료를 기계에 공급하여 다이에서 압출하여 특성의 형상을 가진 연속체(連續體)로 변환하는 조작이다.⁽¹⁾ 압출은 19세기 중엽에 이탈리아에서 아카로니의 제조에 사용하기도 하였고, 1847년에 커터퍼어차(gutta-percha)의 램식 압출기에 의해 해저전선의 피복을 만드는데서 비롯되었다.

최근 압출성형산업에서 제품의 원가 절감 및 후처리를 줄일 수 있는 방안에 관심이 모아지고 있다. 일반적으로 압출성형공정은 다이에 작용하는 압력이 매우 높으므로 마찰이나 마모에 의한 파손에 주의를 기울여야 한다.

Holm은 마모현상은 두 물체의 접촉시 표면원자의 소멸이라고 제안하였다.⁽²⁾

Archard는 Holm보다 거시적인 모델로서 두 접촉물체 표면의 미세돌기들(asperities)의 접촉을 고려하여 미세

돌기의 붕괴를 마모현상이라고 하였다.⁽³⁾

압출성형에서 압출압력에 의한 마찰, 마모는 제품 불량 의 원인이 되며, 또한 재료유동 및 금형수명에도 치명적인 영향을 미친다.

따라서, 압출 공정에서 다이와 재료사이의 마찰계수와 압출압력을 정확히 해석 할 수 있다면, 기존보다 나은 압출가공 생산 기술을 확립 할 수 있을 것이다.

Takeuchi는 압출공정에서 발생된 열이 기계적 에너지에서 열에너지로 변환된다는 가정하에 온도 분포와 압출 압력을 다이와 압판등의 작은 요소로 분할하여 계산하였다.^(4, 5)

Suh와 Sin은 마찰력은 표기 돌기의 변형, 마모입자 및 표면 미세돌기에 의한 연삭 효과와 응축에 의하여 영향을 받으며, 특히 다른 마찰력 성분보다 연삭 마찰 성분이 전체 마찰력에 주된 역할을 한다고 보고하였다.⁽⁶⁾

다이와 펀치 사이의 마찰현상은 접촉부의 응력분포와 연관돼 있으며, 접촉물체의 물성치, 기하학적 형상 및 마

* 호서대학교 기계공학전공

** 호서대학교 대학원 기계공학과

참계수에 따라 변하므로 해석하기에 어려움이 많다.

본 연구에서는 압출 성형에서의 마찰 현상을 해석하기 위해, 차분형 마찰인자를 변수로 하고 a 의 값이 작아 전단응력을 무시하는 경우 최적압출력에 관한 수식을 정립하고 그 특성을 알아 보고자 한다.

2. 본론

2.1 압출 이론 해석

원추형 다이틀 통과하며 전방압출을 하는 동안에 소성 변형역 내에서 요소 원추대상에 작용하는 응력은 그림(1)과 같다.

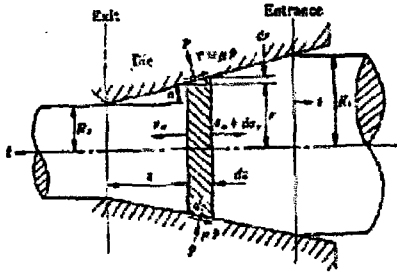


그림 1. 원추형 다이틀 통과하여 압출하는 동안 반경 r 인 요소의 전단 변형

여기서 $\tan \alpha = \frac{dr}{dz}$, $d \cos \alpha = dz = dr \cot \alpha$,

$d \sin \alpha = dr$ 이고 축 방향으로 요소 원추 대에 작용하는 분해한 힘은 평형을 취하면

$$(\sigma_z + d\sigma_z)\{\pi(r+dr)^2\} - \sigma_z \pi r^2 + P2\pi r ds \sin \alpha + \mu P2\pi r ds \cos \alpha = 0 \quad (1)$$

이다. 2차의 미분량을 무시하면 식(1)은

$$2\{\sigma_z + P(1 + \mu \cot \alpha)\} \frac{dr}{r} + d\sigma_z = 0 \quad (2)$$

또한 반경 방향에 있어서 평형을 취하면

$$\sigma_r 2\pi r dz - P2\pi r ds \cos \alpha + \mu P2\pi r ds \sin \alpha = 0 \quad (3)$$

이고 여기서 σ_r 은 반경 방향의 응력이다 식(3)은

$$\sigma_r = P(1 - \mu \tan \alpha) \quad (4)$$

로 된다.

2.1.1 압출압력

σ_z 와 σ_r 을 주응력이라고 가정하면 Tresca 항복 조건은

$$\sigma_z - (-\sigma_r) = 2K = Y \quad (5)$$

이고 여기서 K 는 항복전단응력, Y 는 단축항복응력 그리고 σ_r 은 반경 방향 응력이다. 또한

$$d\sigma_z + d\sigma_r = 0 \quad \text{또는} \\ d\sigma_z = -d\sigma_r \quad (6)$$

식(2),(4) 및 (5)를 조합하면

$$2[\sigma_z + (Y - \sigma_r)\{(1 + \mu \cot \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha)\}] \frac{dr}{r} + d\sigma_z = 0 \quad (7)$$

이 된다. $(1 + \mu \cot \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha) = \beta$ 라고 놓으면

$$d\sigma_z / \{(\beta - 1)\sigma_z - \beta Y\} = 2 \frac{dr}{r} \quad (8)$$

이다. 식(7)을 적분하고 $r = R_2 = \frac{D_2}{2}$ 인 다이틀 구에서 자유표면이므로 $\sigma_r = 0$ 인 경계조건을

적용하고 $\gamma = -\beta Y$ 를 취하면

$$\sigma_z = \{\alpha/(\beta-1)\} \{(r/R_2)^{2(\beta-1)} - 1\} \quad (9)$$

이다. P_c 를 압출압력이라고 하면 입구 $r = R_1 = D_1/2$ 에서 $\sigma_z = P_c$ 가 되고 $\mu \tan \alpha$ 가 1에 비하여 무시할 수 있는 정도로 충분히 작으면 $\beta = (1 + \mu \cot \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha) \approx 1 + \mu \cot \alpha = 1 + B$ 이고 여기서 $B = \mu \cot \alpha$ 이다. 따라서

$$P_c = Y \{(1+B)/B\} \{1 - (D_1/D_2)^{2B}\} \quad (10)$$

2.1.2 수직 다이 압력

식 (2), (3), (5) 및 (6)을 결합하면

$$2 \left\{ Y + P \{ \mu (\cot \alpha + \tan \alpha) \} \right\} \frac{dr}{r} - dP (1 - \mu \tan \alpha) \quad (11)$$

식(11)을 적분하면

$r = R_2 = \frac{D_2}{2}$ 에서 $\sigma_z = 0$ 이고 $\sigma_r = Y$ 또는 $P = Y\phi$ 이다.

이때 $\phi = \frac{1}{(1 - \mu \tan \alpha)}$,

$\delta = \mu(\cot \alpha + \tan \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha)$ 그리고 적분상수를 구하여 대입하여 최종적으로 식(12)를 알게 된다.

$$P = (Y\phi/\delta) \{(\delta+1) (r/R_2)^{2\delta} - 1\} \quad (12)$$

수직 다이 용력 P는 다이 출구에서

$$P = Y\phi = Y/(1 - \mu \tan \alpha) \quad \text{부터} \quad r = R_1 = \frac{D_1}{2}$$

인 다이 입구에서 최대치로 증가한다 그리고 다음과 같이 된다.

$$P = (Y\phi/\delta) \{(\delta+1) (R_1/R_2)^{2\delta} - 1\} \quad (13)$$

$$= (Y\phi/\delta) \{(\delta+1) (D_1/D_2)^{2\delta} - 1\}$$

만일 $\tan \alpha$ 가 작은 값이 되도록 α 가 충분히 작아서 $\mu \tan \alpha$ 가 1과 $\mu \cot \alpha$ 에 비하여 무시하게 되면

$$\delta = \mu(\cot \alpha + \tan \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha) \approx \mu \cot \alpha = B$$

$$\phi = 1/(1 - \mu \tan \alpha) \approx 1 \quad \text{그리고} \quad \text{식(13)은}$$

$$P = (Y/B) \{(1+B) (D_1/D_2)^{2B} - 1\} \quad (14)$$

이 된다.

2.2 최적 압출력 산정

압출압력은 식(10)에서와 같이 B에 관한 식으로 나타낼 수 있으며, 다시 정리하면 다음과 같다.

$$P_c = Y \{(1+B)/B\} \{1 - (D_1/D_2)^{2B}\}$$

$$B \approx \mu \cot \alpha$$

여기서 압출압력은 차분형 마찰인자(B)에 관한 함수이며, 따라서 압출압력의 극소값은 $\frac{dP_c}{dB} = 0$ 을 만족하는 압출 압력값 중에 존재 할 것이다.

$\frac{dP_c}{dB} = 0$ 에 관한 식을 풀면 식(15)와 같이 된다.

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{2B} \left\{ 1 - 2B(1+B) \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) \right\} = 1 \quad (15)$$

정확한 B값 산정을 위한 수치해석 방법 및 결과는

2.3장에 나타냈다. 식(15)를 만족하는 B값에서 극값을 가진 것으로 판단하였으나, 실제로는 그림2와 같이 극값이 아닌 변곡점을 갖는 것을 알 수 있었다.

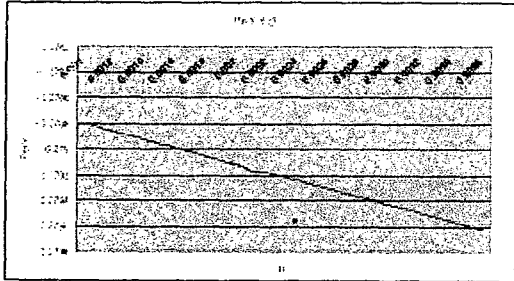


그림2. Pe/Y의 변곡점을 나타내는 B값

2.3 수치해석 사례

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{2B} \left\{ 1 - 2B(1+B)\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) \right\} = 1 \quad (15)$$

D_1/D_2 값은 $D_1 > D_2$ 이며, 본 연구에서는 13%의 압출비를 가정하여 $D_1/D_2 = 1.149$ 로 한다.

$D_1/D_2 = 1.149$ 를 식(15)에 대입시켜 정리하면 식(16), (17)과 같이 된다.

$$1.32112^B \{1 - 2B(1+B)\ln(1.149)\} = 1 \quad (16)$$

$$f(B) = 1.32112^B \{1 - 2B(1+B)\ln(1.149)\} - 1 = 0 \quad (17)$$

식(17)을 만족하는 B값을 구하기 위해 수치해석적 기법인 Secant Method를 사용했다.

Secant Method를 이용한 수치해석 시산은 다음과 같다.

[시 산 1]

$$f(B) = 1.32112^B \{1 - 2B(1+B)\ln(1.149)\} - 1$$

$$B_{-1} = 0.1, \quad B_0 = 1.0 \text{ 일 때}$$

$$f(B_{-1}) = f(0.1) = -0.00318$$

$$f(B_0) = f(1.0) = -0.41285$$

$$B_1 = B_0 - \frac{f(B_0)(B_{-1} - B_0)}{f(B_{-1}) - f(B_0)} = 1 + \frac{0.41285(0.1 - 1.0)}{-0.00318 + 0.41285} = 0.093014$$

$$\ast B_1 = 0.093014$$

[시 산 2]

$$B_0 = 1.0, \quad B_1 = 0.093014 \text{ 일 때}$$

$$f(B_0) = f(1.0) = -0.41285,$$

$$f(B_1) = f(0.098443) = -0.00274$$

$$B_2 = B_1 - \frac{f(B_1)(B_0 - B_1)}{f(B_0) - f(B_1)} = 0.093014 + \frac{0.00274(1.0 - 0.093014)}{-0.41285 + 0.00274} = 0.086954$$

$$\ast B_2 = 0.086954$$

정확한 B값 산출을 위해 수치해석 산출 Code를 사용하였으며 산출Code에 의한 결과값은 그림3에 나타냈고, 그 값에 대한 곡선은 그림4와 같다.

| | | |
|--------------|--------------|--------------|
| -0.00317977 | -0.412852198 | 0.0930144540 |
| -0.412852198 | -0.002741271 | 0.0869541613 |
| -0.002741271 | -0.002587981 | 0.0460164636 |
| -0.002587981 | -0.00084518 | 0.020272832 |
| -0.00084518 | -0.000291897 | 0.010028332 |
| -0.000291897 | -0.000102598 | 0.012345311 |
| -0.000102598 | -8.85204E-05 | 0.008608538 |
| -8.85204E-05 | -1.57738E-05 | 0.004604530 |
| -1.57738E-05 | -5.7026E-06 | 0.005891012 |
| -5.7026E-06 | -2.1017E-06 | 0.0029781638 |
| -2.1017E-06 | -7.335E-07 | 0.004913511 |
| -7.335E-07 | -2.228E-07 | 0.002257053 |
| -2.228E-07 | -4.88E-08 | 0.002055516 |
| -4.88E-08 | -5.3E-09 | 0.001887811 |
| -5.3E-09 | -2E-10 | 0.001881631 |
| -2.0E-10 | 0.00E+00 | 0.001881624 |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.001881624 |

그림3. B값에 대한 산출코드 결과

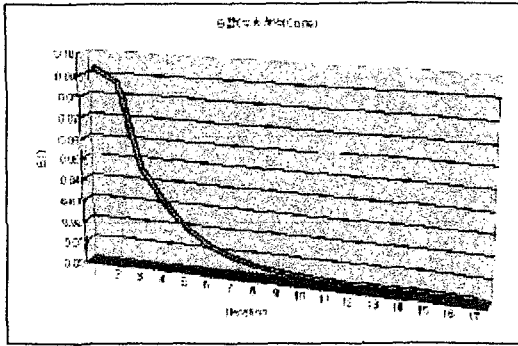


그림4. 산출코드 결과값에 대한 곡선

그림3, 4에서 알 수 있듯이 수치해석 결과로 B는 0.0021980624 로 수렴함을 알 수 있었다.

2.4 결과 및 고찰

식(14)에서 $\frac{dP_c}{dB} = 0$ 이 되는 B값을 구해 Pe의 극값을 구하려고 하였으나, Pe의 극값은 존재하지 않고 변곡점이 되는 것을 알 수 있었다. 즉 압출력 (Pe)은 변화율이 증가하다가 0으로 되고, 다시 증가하는 사실을 발견하였다. 따라서 최적 압출력은 그림5의 Stribeck 곡선에서의 최소 마찰계수를 구하여 산정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

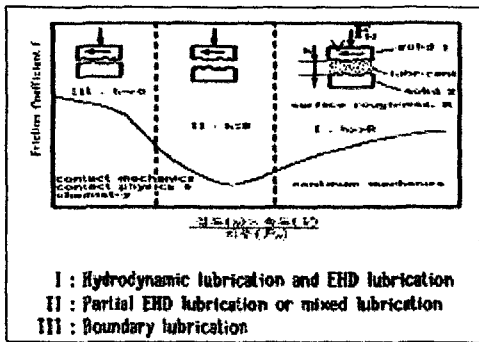


그림5. Stribeck curve and lubrication region

3. 결 론

본 연구에서는 압출 성형에서의 최적 압출력에 관한 수식모델을 제시하였다. Stribeck 곡선에서의 유체윤활, 탄성유체윤활, 혼합윤활, 경계윤활 영역에서의 최소 마찰계수값을 구하여, 그 값 주위에서 운전됨으로서 최소 압출력을 산정 할 수 있을 것으로 사료되며, 압출력, 압출속도, 표면조건을 고려한 마찰계수산정식을 해석적으로 구하여 최적압출력을 도출해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 林田建世 외 15인, 1995, " 押出成形 ", 성안당
- (2) R. Holm. 1946, Electric contacts, Almqvist and Wiksells, Stockholm, p. 203
- (3) Archard, J. F, 1953, " Contacts and Rubbing of Flat Surfaces ", Appl. Phys., Vol. 24, p. 98 1~988
- (4) K. Takeuchi. 1986, " Temperature of Extrusion and Extrusion Pressure of Aluminum alloy in Consideration of changing Yield Strength in each Elements ", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 37, pp345-352
- (5) K. Takeuchi. 1989, " Analysis of Pressure Distribution in the Radial Direction during Extrusion by Plasticine", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 40, pp435-438
- (6) 김병민, 조해용, 김태형, 1996, " Analysis of die wear in wire drawing with temperature effect ", 한국정밀공학회지 제13권 제1호 pp116-122
- (7) 김태형, 김병민, 최재찬, 1996, " Prediction of die wear in Extrusion and wire drawing ", 대한기계학회논문집(A) 제20권 제10호, pp3031-3037
- (8) 양순중, 최한호, 강범수, 이상록, 1998,

" Establishment of Bending Analysis Technique
on the Extrusion of Aluminum Alloy ", 한국정
밀공학회지 제15권 제1호, pp152-159

(9) N. P. Suh and H. C. Sin, 1981 " The Genesis
of Friction, " Wear, Vol. 69, pp91-114

(10) 권완섭, 김경웅, 1997, " A Study on Friction
and Wear Behaviour of Undulated Surfaces ",
한국유활학회지, 제13권 제1호 pp21-27