

引拔加工에 있어서 摩擦係數의 決定에 關한 研究

金 永 守* · 安 秉 廈**

A Study on the Estimation of Friction Coefficient in Drawing Process

Young Soo KIM* and Beyng Ha ANN**

Tube drawing process is more sensitive to the friction coefficient but it is a hard task to analyze it's disposition qualitatively.

This paper aims to calculate the mean friction coefficient from author's direct equation which amended from general rod drawing process, and compare the result with SACHS' or WILLIAM'S.

From this study, the thickness change was inspected in multi-pass drawing. The thickness affected with the mean friction coefficient and the thickness was deformed more thicker than initial thickness on the condition of good lubrication. For the sake of a good estimation of mean friction coefficient, the radial force of die must be considered when the drawing process has some more area reduction about more than 10 percents.

緒 論

引拔力工法은 線材 및 棒材의 基礎的인 加工에 많이 利用되어 왔으며, 特히 棒材 및 管材의 引拔에 있어서 引拔力과 製品의 質을 좌우하는 重要한 因子로서 材料와 다이(Die)間의 摩擦係數¹⁾를 들수있다.

摩擦係數는 그값이 단순히 定量的으로 表示될수 없는 關係로 보통 일정구간의 값을 平均한값 즉 平均摩擦係數를 使用하여 왔다.

現在까지는 常用의 棒材引拔時의 平均摩擦係數를 어떤 수정없이 管材引拔加工에 適用하여 왔다. 最近 H. Major²⁾는 Sachs³⁾의 理論的인 摩擦係數를 直接的인 實驗을 통하여 比較하여 그 타당성을 說明하였으며, C. T. Yang⁴⁾은 應力의 分布를 가정하여 平均摩擦係數를 求하였다.

本研究에서는 MacLellan⁵⁻⁶⁾의 實驗裝置를 개조하여 더욱 精密한 平均摩擦係數(Mean friction coefficient)를 管材引拔의 경우에 對하여 求하고, 一般棒材의 引拔에 있어서 半徑方向力 및 軸方向力에 의한

等價理論적인 추정치와 比較하였다.

本 研究에서는 다음과 같이 가정하였다.

1. 정상상태 조건에서 마찰계수는 引拔速度에 無關係하다.
2. 引拔應力은 그材料 降伏強度에 비례한다.
3. 本 研究에서 다이(Die)는 다이半角이 10°인 원추형 다이를 使用한다.
4. 다이(Die)材料는 텅스텐 탄소 工具鋼에 限한다.

理 論 解 析

얇은 管材의 加工時에 材料와 다이사이에 完全한 密着이 유지될 때 塑性的인 縮小효과를 無視할수 있고 다이벽면을 가르지르는 應力의 變化量은 없는 것으로 생각될 수 있다. 지금 加工을 받고 있는 管材의 일의 미소요소에 대하여 應力은 다음과 같다.⁷⁻⁸⁾

위 Fig. 1의 (C)에서 힘의 평형을 고려하면

$$p \cdot r \cdot d\theta \cdot ds - 2\sigma_0 \cdot \sin(d\theta/2) \cdot t \cdot ds \cdot \cos\alpha = 0$$

가 되고 정리하면 다음과 같다.

*釜山水產大學 : National Fisheries University of Pusan

**現代重電氣研究所 : Hyun Dae Heavy Electric Institute

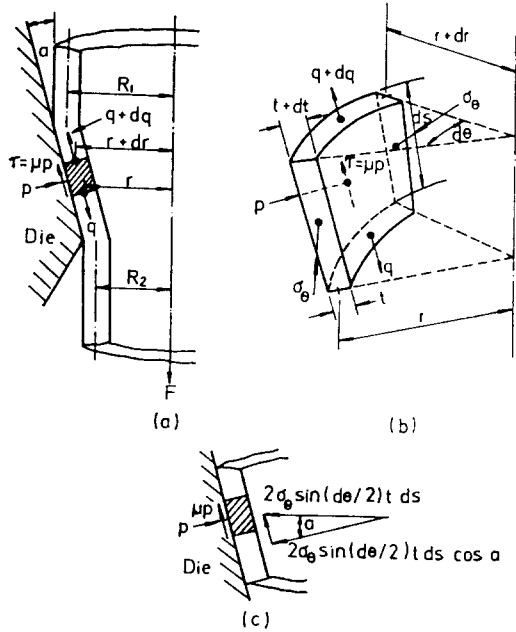


Fig. 1. Figures of tube drawing, (a) tube drawing through a conical die; (b) stress acting on an element of the tube; (c) component of the radial force due to the circumferential stress σ_θ .

$$P = \sigma_\theta \cdot t \cdot \cos \alpha / r \quad \dots\dots\dots(1)$$

또한 다이 벽면에 평행한 方向의 힘의 平衡條件은

$$(q+dq) \cdot (r+dr) \cdot (t+dt) \cdot d\theta - q \cdot r \cdot d\theta + 2\sigma_\theta \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) t ds \cdot \sin \alpha + \mu p \cdot r d\theta \cdot ds = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{ds}{dr} = \frac{1}{\sin \alpha} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式 (1), (2) 및 (3)을 組合하면

$$r \cdot t \cdot (dq/dr) + q \cdot t \cdot (dr/dr) + q \cdot r \cdot (dt/dr) + \sigma_\theta \cdot t + \mu \sigma_\theta \cdot t \cdot \cot \alpha = 0 \quad \dots\dots\dots(4, a)$$

로 되어 간단하게 다음과같이 全微分형이 된다.

$$d(q \cdot r \cdot t) / dr + \sigma_\theta \cdot t \cdot (1 + \mu \cot \alpha) = 0 \quad \dots\dots\dots(4, b)$$

여기서 管材의 두께는 미소하므로 $dt/dr \approx 0$ 으로 두고 $B = \mu \cdot \cot \alpha$ 를 취하면 (4)식은 다음과 같다.

$$r(dq/dr) + q + \sigma_\theta \cdot (1+B) = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

그러므로 $q = \sigma_1$, $p = \sigma_2$, $\sigma_\theta = \sigma_3$ 로 두고 그 應力의 크기를 比較하면, σ_1 (引張) $\geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (壓縮)으로 되어 平面變形條件下에서 Tresca의 降伏條件을 適用하면

$$\sigma_1 - \sigma_3 = m\bar{Y} \quad \dots\dots\dots(6, a)$$

$$q - (-\sigma_\theta) = m\bar{Y} \quad \dots\dots\dots(6, b)$$

(6)式을 (5)式에 代入하면

$$\sigma_\theta = m\bar{Y} - q \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$r \cdot \frac{dq}{dr} - B \cdot q + m\bar{Y}(1+B) = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

이 되고, 여기서 \bar{Y} 는 재료의 순간마다의 항복값 (Yield stress)이다. 式(8)을 積分하여 $r = R_1 = \frac{1}{2} \cdot D_1$ 을 도입하면 管材内部의 應力平衡條件은

$$q_1 = m\bar{Y} \left\{ \frac{(1+B)}{B} \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^B \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

또 다이 면에서는 $r = R_2 = \frac{1}{2} \cdot D_2$ 이므로 q_2 는 다음과 같다.

$$q_2 = m\bar{Y} \left\{ \frac{(1+B)}{B} \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^B \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

또한 變形率에 있어서 Levy Mises의 조건에 따라

$$d\epsilon_2 = dt/t = d\lambda(\sigma_2 - \sigma_m) = \frac{2}{3} d\lambda[\sigma_2 - \{(\sigma_1 + \sigma_3)/2\}] \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$d\epsilon_3 = \frac{dr}{r} = d\lambda(\sigma_3 - \sigma_m) = \frac{2}{3} d\lambda[\sigma_3 - \{(\sigma_1 + \sigma_2)/2\}] \quad \dots\dots\dots(12)$$

여기서 $d\lambda = \frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ 이고

$$\frac{(dt/t)}{(dr/r)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - 2\sigma_3} = \frac{a + \sigma_\theta}{q - 2\sigma_\theta} \quad \dots\dots\dots(13)$$

로 表示된다.

$$\sigma_3 = \sigma_\theta = \sigma_1 - m\bar{Y} = m\bar{Y} \left[\beta \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^B \right\} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots(14)$$

여기서 $\beta = (1+B)/B$

式(14)를 式(13)에 적용하면 두께에 관한 식으로 되어 다음과 같다.

$$\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \left\{ \frac{3}{B-1} \right\} \cdot \ln \left\{ 2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^B / 2 - \beta \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^B \right\} \right\} - 2 \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \dots\dots\dots(15)$$

式(15)의 t_1 은 알려진 값이며 t_2 는 측정하여야 한다. 여기서 도출된 平均摩擦係數를 直接的인 값으로 칭

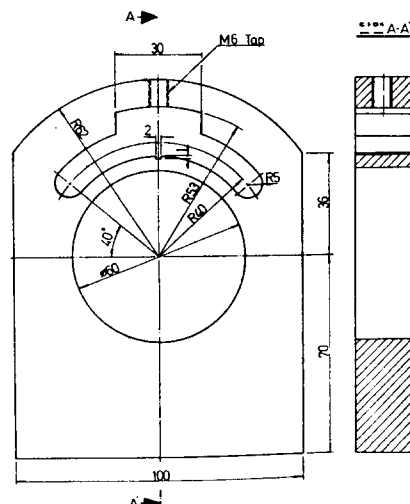


Fig. 2. A figure of the Radial force measuring apparatus on the split dies.

하며, Aluminum管材에 있어서는 정확한 t_2 의 측정이 불가능하므로, 實驗時에 軸 및 半徑方向應力의 측정치에서 誘導하였다. 또 軸 및 半徑方向의 應力測定을 爲하여 Fig. 2에 圖示된 로오드셀(Load cell)이 부착된 裝置로 다이를 支持托도록하고 이때 내부의 다이는 分離型다이(Split Die)를 사용하였다. 여기에 本研究結果와 比較한 Sachs의 理論式⁹⁻¹⁰⁾은

$$\sigma_1 = \left[1 + \frac{\tan \theta}{\mu} \right] \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{2\mu}{\tan \theta}} \right] \dots (16)$$

으로 表現되며, Aluminum管材에 對하여 유도한 應力들로부터 平均摩擦係數를 求하는 직접유도법式은 다음과 같다.

$$\left\{ \frac{(\sigma_\alpha/P)}{(A_1/A_2)} - 1 \right\} - 1 = \mu \cdot \cot \theta \dots (17)$$

- 이 式에서 σ_α : 引拔應力
- P : 平均다이面壓
- A_1 : 다이入口 斷面積
- A_2 : 다이出口 斷面積
- θ : 다이半角

材料試驗 및 摩擦力의 測定

1. 引張試驗

材料의 精確한 應力과 變形率의 關係를 求하기 爲하여 加工前의 材料를 垂直方向으로 切개어 後板材引張時의 試편으로 만들어 材料가 引張力을 받아 네킹(Necking)이 發生하여 破壞될때 까지의 자취를 最小자승법으로 曲線式을 求하였으며 그 式은 다음과 같다.

Copper : $Y = 18.0423 (1 + \epsilon)^{0.2197} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
 Aluminum : $Y = 14.6803 (1 + \epsilon)^{0.1166} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$

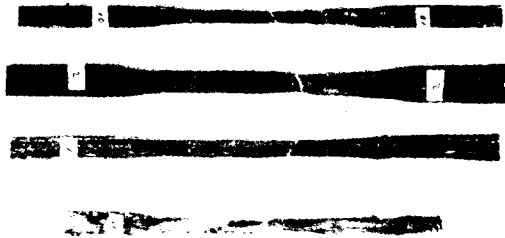


Fig. 3. Figures of Specimens which were tensioned up to the necking.

2. 摩擦力의 測定

Fig. 4는 引拔裝置의 다이 주변을 圖示한 것이며 그림에 나타난 바와 같이 引拔力中 半徑方向의 成分을 測定하도록 Fig. 2의 裝置를 부착하였다. 이 裝置에서 半徑方向力을 로오드셀의 미세한 變形率값을 동적변형확대기(Dynamic strain Amplifier)를 통과시켜 기록계로 기록하여 그림을 계산하였다. 軸方向力은 드로우벤치(Draw bench)와 드로우어(Drawer) 사이에 로오드셀을 裝置하여 同一한 方法으로 求하였다.

한편, 引拔速度는 準靜的 狀態를 유지할수 있도록 약 1.2m/min의 速度로 引拔하였다.

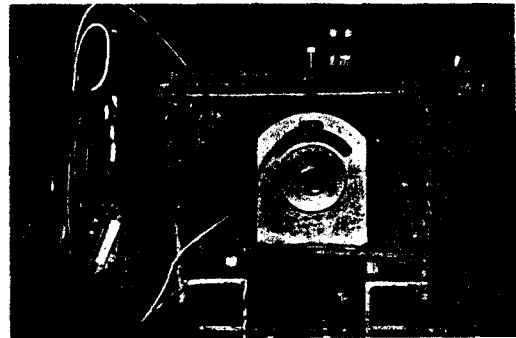


Fig. 4. A Picture of the drawing die apparatus which was used in this study.

各 工程(pass)은 먼저 Fig. 5에 圖示된 바와같이 매 引數(pass)마다 5%의 斷面減少率을 갖도록 다이를 교체시키면서 11회 反復하여 그 管材의 두께變化를 測定하였고, 또 Fig. 6에 表示된것과 같이 매회 10%씩의 斷面減少率을 갖도록 하여 연속 5회 反復하여

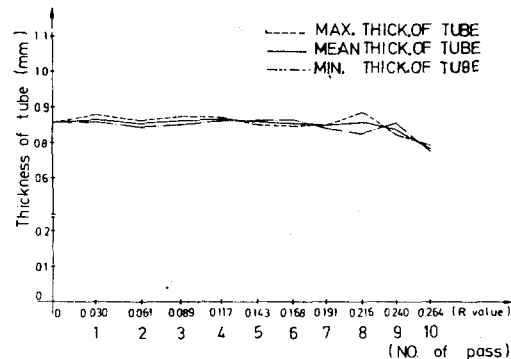


Fig. 5. A diagram of the tube thickness change for multi-pass drawing (5% reduction).

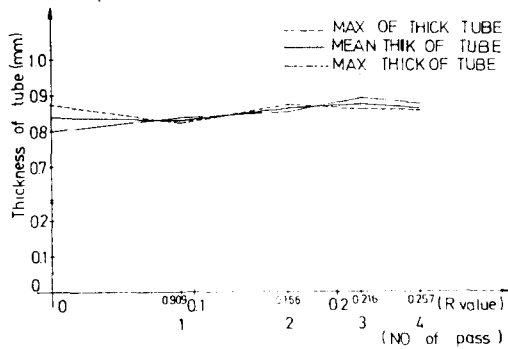


Fig. 6. A diagram of the tube thickness change for multi-pass drawing (10% reduction).

그 두께變化를 그림에 나타 내었다.

考 察

Table 1, 2, 3, 4 및 5는 本 研究를 通하여 求한 平均 摩擦係數 μ 를 Sachs 및 William의 理論値와 比較하고 H. Majors, Jr의 실제 측정치로 그 타당성을 검증한 表이다.

Table 1 및 2에서는 本理論値가 Sachs 및 William의 結果와 양호한 一致를 보여주고 있다.

Table 3 및 4는 本 研究의 結果가 Sachs 및 William의 값보다 다소 낮은 값을 주고있으나 여전히 許容範圍內에 있다.

마지막 Table 5는 管材를 Aluminum으로 선택하여

Table 1. The comparison of the mean friction coefficient value, μ when the tube drawn from $\phi=12.7$ (mm) to $\phi=12.28$ (mm) size

Material	Lubricant	Mean friction coefficient, μ		
		Author's	Sachs'	William's
Copper	not used	0.2602	0.2315	0.07~0.29
Copper	used	0.187	0.171	0.07~0.29

Table 2. The comparison of the mean friction coefficient value, μ when the tube drawn from $\phi=12.7$ to $\phi=10.8$ size

Material	Lubricant	Mean friction coefficient, μ		
		Author's	Sachs'	William's
Copper	not used	0.199	0.178	0.07~0.29
Copper	used	0.13	0.13	0.07~0.29

Table 3. The comparison of the mean friction coefficient value, μ when the tube drawn from $\phi=12.8$ to $\phi=10.8$ size

Material	Lubricant	Mean friction coefficient, μ		
		Author's	Sachs'	William's
Copper	not used	0.0808	0.195	0.07~0.29
Copper	used	0.023	0.109	0.07~0.29

Table 4. The comparison of the mean friction coefficient value, μ when the tube drawn from $\phi=10.8$ to $\phi=8.28$ size

Material	Lubricant	Mean friction coefficient, μ		
		Author's	Sachs'	William's
Copper	not used	0.114	0.418	0.07~0.29
Copper	used	0.043	0.196	0.07~0.29

Table 5. The comparison of the mean friction coefficient value, μ when the tube drawn from $\phi=11.0$ to $\phi=8.28$ size

Material	Lubricant	Mean friction coefficient, μ		
		Author's	Sachs'	William's
Aluminum	not used		0.0865	
Aluminum	used	0.1077	0.017	
		0.08*	0.10*	

* result from H. Major Jr's equation

引拔한 경우이며 윤활제를 使用하지 않고는 引拔이 어려운 狀態였으며 윤활時는 他의 結果와 相當한 一致를 나타낸다.

한편, Fig. 5 및 Fig. 6에서 나타난 바와같이 10%의 斷面減少率을 가져오는 引拔을 연속 10회 반복했을 때 最初두께 0.85(mm)보다 0.08(mm)만큼 管材의 平均두께가 감소함을 알수있고, 斷面減少率을 10%씩 5회 연속인발하였을 때는 오히려 0.03(mm)의 두께증가가 發生하였다.

이러한 현상은 다이半角과 平均摩擦係數⁽¹¹⁻¹³⁾의 영향에 기인한 것으로 해석되며 實際 生産시스템에 있어서는 管材를 연속적으로 多量의 다이를 通하여 引拔하고 있음을 감안할때 이러한 두께變化의 측정은 매우 重要한 意味를 지닌다고 생각된다.

結 論

1. 微小한 斷面積 變化率의 管材引拔에서는 直接의인 方法에 의한 平均摩擦係數(Mean friction coef-

ficient)와 Sachs의 理論値가 매우 근사한 오차를 나타내므로 軸方向 應力으로부터 摩擦係數를 決定할 수 있다.

2. 比較的 높은 斷面積 減少率의 引拔에 있어서는 直接的인 方法에 依한 平均摩擦係數가 Sachs등의 값보다 더욱 實驗値에 더욱 接近하므로 半徑方向分力の 測定이 必要하다.

3. 棒材引拔加工에 利用되는 平均摩擦係數의 추정치도 管材引拔의 경우에 확대 適用이 가능하다.

文 献

- 1) Majors, H. (1956) : Study in cold-drawings, Part III, Determination of Friction Coefficient. Trans. ASME, Tech. Report No.8, March.
- 2) Whitton, P. W. (1958) : The calculation of Drawing force and Die pressure in wire drawing. J. Inst. Metals, 86, 417-421.
- 3) Sachs, G. and K. R. Van Horn (1940) : Practical Metallurgy. American Society for Metals.
- 4) Yang, C. T. (1961) : On the Mechanics of wire drawing. Trans. ASME, Series B, J. Eng. Ind. 83, 523-530.
- 5) MacLellan, G. D. S. (1948) : A critical Survey of the Wire drawing theory. J. Iron Steel Inst. 158, 347-356.
- 6) MacLellan, G. D. S. (1953) : Some friction Effects in wire drawing. J. Inst. Metals, 81, 1-13.
- 7) Slater, R. A. C. (1977) : Engineering plasticity theory and application to metal forming processes. McMillan Press, New York, 263-347.
- 8) Hill, R. (1971) : The mathematical theory of Plasticity. Oxford University Press, 262-282.
- 9) Espey, G. and G. Sachs (1947) : Experimentation on tube drawing with a moving Mandrel. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 14, 81-87.
- 10) More, C. G. and J. F. Wallas (1961) : Theoretical Study of Tube sinking through Conical Dies. J. Mech. Eng. Sci., 3, 225-235.
- 11) Siebel, E. and Weber (1935) : Stress and Metal flow in Drawing Tubing. Stahl Eisen, 55, 331-334.
- 12) Sachs, G. and W. M. Baldwin (1946) : Folding in tube Sinking. Trans. ASME, 68, 647-654.
- 13) Baron, H. G. and F. C. Thompson (1951) : Friction in wire drawing. J. Inst. Metals, 78, 416-462.