

연속압출공정의 동력계산에 대한 연구 (A study on the total power calculation in the CONFORM process)

김 강수*, 박 근배(한국원자력 연구소), 김 영호(부산대 정밀정형 및 금형가공연구센터), 곽 인섭(부산대 대학원)

K. S. Kim, K. B. Park(Korea Atomic Energy Research Institute), Y. H. Kim(ERC Pusan National Univ.), I. S. Kwak(Graduate School, Pusan National Univ.)

ABSTRACT : The calculation of the total power required at the Continuous Extrusion Forming(CONFORM) has been performed by the theoretical analysis of three transformation regions(primary grip length and extrusion grip length,flashing). In this study, that was performed by five transformation regions(biting, upsetting, filling, extruding, flashing)and four transformation regions(biting, upsetting and filling, extruding, flashing) and then results of theoretical analyses were compared with experimental results. Results of analysis by four and five transformation regions than that of three transformation regions in the CONFORM showed in a good agreement with experimental results.

Key words : Continuous Extrusion Forming(연속압출공정), transformation region(변형영역), power (동력), biting(물림), upsetting(업세팅), filling(채움), extruding(압출), flashing(플래싱)

1. 서론

CONFORM (Continous Extrusion Forming)은 현재 압출 산업체에서 사용되는 연속 압출가공이며 이 가공은 1972년 Green에 의해 개발되어⁽¹⁾ 80년 초반 알루미늄 산업체에 처음으로 도입되었다⁽²⁾. 또한 이 가공은 알루미늄과 알루미늄 합금압출에서 더 나아가 구리를 소재로 하는 연속압출에 적용되었다. CONFORM에 의해 연속압출되는 제품은 Wire, Strip, Profiles, Hollow Section과 튜브 등이며 또한 포복된 Wire 혹은 제품 등에 사용되었다.

CONFORM에 의해 압출된 응용제품들은 전기, 전도체 및 열전달 튜브에서부터 건축 및 장식 분야까지 적용되어 왔으며 공급소재는 로드, 분말 혹은 용융금속까지 진전되었다. CONFORM은 이전의 압출 가공에 비해 확실한 잇점 가지고 있다. 마찰력을 이용하기 때문에 공급소재에 예열을 하지 않아도 되며 압출가공동안 압력과 온도의 변화가 적다. 또한 공

급소재가 길고 연속적인 Cast coil로 형성되기 때문에 실제 빌렛 사이에 용접이 필요하지 않다⁽²⁾.공정에서 이러한 장점을 가지고 있음에도 불구하고 현재 CONFORM의 이론적 연구는 초기상태이며 금속의 유동형식 및 mechanical field의 분포는 깊게 연구되지 않고 있다.

지금까지 CONFORM의 소재 유동형식을 3변형영역(primary grip length, extrusion grip length 및 flashing)으로 나누어 이론적해석을 하고 동력계산을 해왔으나 이 연구에서는 5변형영역(물림, 업세팅, 채움, 압출, 플래싱)과 4변형영역(물림,업세팅 및 채움, 압출, 플래싱)으로 나누어 이론적해석을 하고 그 결과를 실제 실험치와 비교하고자 한다.

2. CONFORM의 원리

CONFORM의 원리는 그림 1에 보여진다. 공정의

기본원리는 공급소재와 압출 휠 사이의 마찰력이며 이 마찰력은 압출 chamber로 공급소재를 밀어 넣는다. 공급소재와 휠의 홈 사이의 전 마찰력은 공급소재와 정지하고 있는 shoe사이에서 발생하는 마찰력과 변형에 요구되는 변형력보다 커야 한다. 공급소재가 abutment와 만날 때, 다이를 통해 휠의 반지름 방향으로 압출 된다. 공급소재의 약간은(1~10%) abutment와 압출 휠 사이에서 혹은 wheel groove 옆으로 플래시가 형성된다.

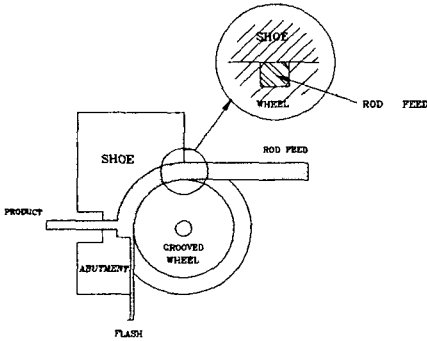


Fig.1. Principles of continuous extrusion

3. CONFORM의 이론적 해석

C. Etherington은 CONFORM을 그림 2에서와 같이 primary grip length, extrusion grip length 그리고 플래싱영역으로 크게 세 부분으로 나누어 이론적으로 CONFORM Power를 해석하였다⁽³⁾. 그러나 CONFORM은 이보다 더 복잡하며 물림(biting), 업세팅(upsetting), 채움(filling), 압출(extruding), 플래싱(flashing)영역으로 세분화할

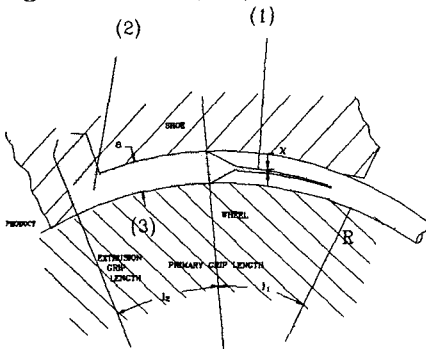


Fig.2. Distribution of three transformation regions

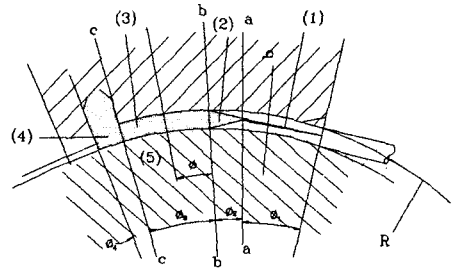


Fig.3. Distribution of five transformation regions

수 있다. 즉, 그림 3과 같이 5변형 영역으로 나누어 이론적 해석을 하고 실제 실험치와 비교하기로 한다. 또한 5변형영역의 업세팅영역이 극히 작기 때문에 물림, 업세팅 및 채움, 압출, 플래싱영역으로 한 4변형 영역 해석을 하여 실험결과와 비교한다.

3.1 CONFORM의 5영역해석

그림 3에서 (1)영역은 물림, (2)영역은 업세팅, (3)영역은 채움, (4)영역은 압출 그리고 (5)영역은 플래싱이며 각 영역에서 변형을 위한 소요 토크(torque)계산은 다음과 같다.

[i] 압출영역에서의 압출력

그림4와 같은 형상과 치수를 가지는 die에서 속도 불연속을 고려하여 상계해법을 적용하면 평균 압출압력을 구할 수 있다.

Γ_1, Γ_2 에서 에너지소비율

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\Gamma_1, \Gamma_2} &= \int_{\Gamma_1} k \Delta u dA + \int_{\Gamma_2} k \Delta u dA \\ &= 2\pi k u_0 r_0^2 \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \text{이다.} \end{aligned}$$

변형영역 내의 에너지소비율

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \frac{2}{\sqrt{3}} Y \int_V \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV \\ &= \pi Y u_0 \left(\frac{r_0}{\sin \alpha} \right)^2 \ln \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \times \\ &\quad \left(1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{\sqrt{132}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}}} \right) \end{aligned}$$

또 다이면상의 마찰응력을 $\tau_f = mk$ 라고 하면 마찰을 극복하기 위한 에너지소비를

$$\dot{W}_{F_2} = \int_{r_1}^{r_2} \tau_f A u ds = \pi m k u_0 r_0^2 \cot \alpha \ln \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2$$

그리고 container 마찰력

$$\dot{W}_{F_1} = \int_{r_1}^{r_2} k A u ds = \frac{2}{\sqrt{3}} Y m \pi u_0 r_0 L \text{ 가 된다.}$$

따라서 평균 압출압력 q 는 다음과 같다.

$$q = \frac{\dot{W}_{F_1, F_2} + \dot{W}_i + \dot{W}_{F_3} + \dot{W}_{F_4}}{\pi r_0^2 u_0}$$

다이 치수를 대입하여 정리하면 $q = 4.98 Y$ 가 된다. 여기서 Y 는 납의 항복응력 ($27 \times 10^6 \text{ N/m}^2$)

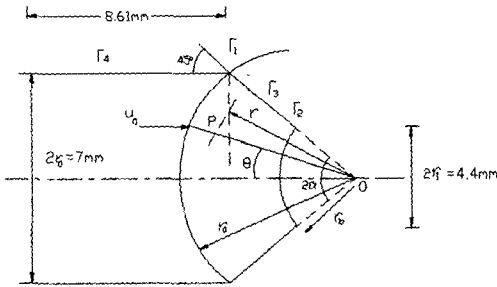


Fig.4. Dimension of extrusion die

ii) 물림영역에서 소요되는 토크

groove 양쪽 면에 대한 마찰력은 그림3에서 단면 a-a에서 소재의 축응력이 항복응력에 도달한다. 마찰력 $F_1 = 2kbR\varphi_1 = 2k\pi d^2/4$

$\therefore \varphi_1 = \pi d^2/4bR$, 일반적으로 $b = a/4$ 로 가정하고 $d = a$ 이다. 여기서 a 는 groove의 폭, b 는 소재가 groove에 접촉하는 폭, a 는 소재의 직경, R 는 wheel의 반경

$$\therefore \varphi_1 = \pi a/R$$

물림영역에서 소요되는 토크

$$M_1 = F_1 \times R \quad (1)$$

iii) 압세팅영역에서 소요되는 토크

소재의 접촉표면을 점차로 커지게 되어 그림3의 단면 b-b 위의 압출chamber를 완전히 채우기 시작한다. 그러는 사이, b-b 단면 위에 축응력은 항복이 된다. 압세팅영역에서 마찰력

$$F_2 = 2kF + 2k\pi d^2/4 = 2ka^2 \text{ 이다.}$$

여기서 F 는 압세팅영역에서 소재와 groove가 접하는 사다리꼴 면적과 같다.

$$F = (a+b)R\varphi_2/2 \text{이며 } \varphi_2 = 2a(4-\pi)/5$$

이다. 압세팅영역에서 소요되는 토크

$$M_2 = F_2 \times R \quad (2)$$

[iv] 채움영역에서 소요되는 토크

채움영역을 그림 5와 같이 요소 평행 방정식을 세우면 (원주방향 힘만 고려)

$$\begin{aligned} (\sigma_3 + d\sigma_3)a^2 \cos \frac{d\varphi}{2} - \sigma_3 a^2 \cos \frac{d\varphi}{2} - akRd\varphi \\ + k(R+a)ad\varphi - 2kaRd\varphi = 0 \end{aligned}$$

$$\therefore \sigma_3 = (2R-a)/a \cdot k\varphi + c, \varphi=0 \text{ 일 때}$$

$$\sigma_3 = Y = 2k \text{ 이므로 } \sigma_3 = (2R-a)/a \cdot k\varphi + 2k$$

또 윗 식으로부터 그림 3의 c-c 단면, 즉 $\varphi = \varphi_3$ 일 때 $\sigma_3 = \sigma_{ext}$ 이므로

$$\sigma_{ext} = (2R-a)/a \cdot k\varphi_3 + 2k \text{ 가 된다.}$$

$$\therefore \varphi_3 = \frac{(\sigma_{ext} - 2k)a}{k(2R-a)}$$

wheel의 반경방향으로 압출시 그림 5의 die 근처의 요소에서 Tresca 항복조건을 적용하면

$\sigma_{ext} = \sigma_3 = q + Y = 4.98 Y + Y = 5.98 Y$ 가 된다. 채움영역에서 마찰력 $F_3 = \sigma_{ext} \cdot A$ 이고 소요되는 토크

$$M_3 = F_3 \times R \text{ 이 된다.} \quad (3)$$

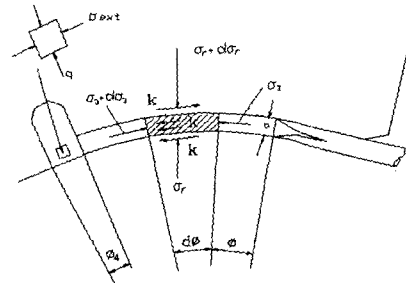


Fig.5. Stress state in filling region

[v] 플래싱영역에서 소요되는 토크

그림 6에서 groove폭은 a 이고 양쪽 플래시폭을 w 라고 하면 플래시는 φ_3 의 채움영역과 φ_4 의 압출영역에서 형성된다. 여기서 $\varphi_4 = 2r_0/R$ 이므로 플래싱영역에서 마찰력 $F_4 = 2k(\varphi_3 + \varphi_4)R(a+w)$, 소요 토크는

$$M_4 = F_4 \times R \quad (4)$$

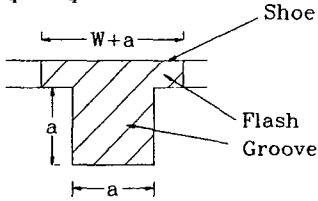


Fig.6. The section of the groove

실험 data를 적용하여 소요동력을 계산한다. 실험 data는 다음과 같다. $a=8\text{mm}$, $b=2\text{mm}$, $u=5\text{mm}$, $R=80\text{mm}$, $Y=27\text{Mpa}$ (납의 항복응력), $k=Y/2$ CONFORM 전 공정에서 소요 토크는

$$\sum M_i = (1) + (2) + (3) + (4) = 2447 \text{ (N.m)}$$

CONFORM동력은 4.61Kw이다.

$$\dot{W} = \frac{2\pi M_i n}{60} = 0.1047 \times 2447 \times 18 \times 10^{-3} = 4.61$$

3.2 CONFORM의 4영역해석

CONFORM의 5영역해석에서 업세팅영역은 매우 짧기 때문에 4영역해석에서는 그림 7와 같이 (1)영역은 물림, (2)영역은 업세팅 및 채움, (3)영역은 압출 그리고 (4)영역은 플래싱으로 구분한다.

[i] 물림영역에서 소요되는 토크

groove 양쪽면에 대한 마찰력은 그림 7에서 단면 a-a에서 소재의 축응력이 항복응력에 도달한다. 물림영역에서 마찰력은

$$F_1 = 2kbR\varphi_1 = YA = 2ka^2 \text{ 이므로}$$

$$\varphi_1 = \frac{a^2}{bR} = \frac{4a}{R}, (b = \frac{a}{4} \text{ 이므로})$$

이 영역에서 소요되는 토크는

$$M_1 = F_1 \times R \quad (5)$$

[ii] 업세팅 및 채움영역에서 소요되는 토크
그림 7의 b-b단면위에 축응력은 항복이 된다.

업세팅 및 채움영역에서의 마찰력

$$F_2 = 2kaR\varphi_2 + YA = \sigma_{ext}A$$

$$= 2kaR\varphi_2 + 2ka^2 = \sigma_{ext}a^2 \text{ 이 된다.}$$

$$\therefore \varphi_2 = \frac{a^2(\sigma_{ext} - 2k)}{2kaR} = \frac{a(\sigma_{ext} - Y)}{YR} = \frac{4.98a}{R}$$

여기서 $\sigma_{ext}A = q + Y = 5.98Y$

이 영역에서 마찰력

$$F_2 = \sigma_{ext}A = 5.98Ya^2 \text{ 이 되고 소요되는 토크}$$

$$M_2 = F_2 \times R \text{ 이다.} \quad (6)$$

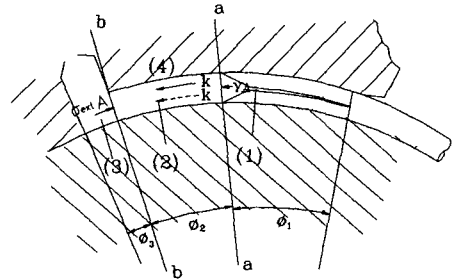


Fig.7. Distribution of four transformation regions

[iii] 압출영역에서 압출력

CONFORM의 5영역해석과 같다.

$$q = 4.98Y$$

[iv] 플래싱영역

CONFORM의 5영역해석과 같다.

CONFORM의 전 공정에서 소요되는 토크는

$$\sum M_i = (5) + (6) + (4) = 2339 \text{ (N.m)} \text{가 되고}$$

CONFORM 동력은 4.41Kw이다.

$$\dot{W} = \frac{2\pi M_i n}{60} = 0.1047 \times 2339 \times 18 \times 10^{-3} = 4.41$$

3.3 CONFORM의 3영역해석

그림 2에서 (1)영역은 primary grip length, (2)영역은 extrusion grip length 그리고 (3)은 플래싱 영역이며 세부적 소재거동은 다음과 같다.

(1) primary grip length: shoe와 마주보는 groove면의 마찰력은 서로 상쇄되고 groove 두면의 마찰력은 소재 축응력이 항복된다.

$$2Yxl_1\mu = YA, \quad l_1 = A/2x\mu, \quad \text{일반적으로}$$

$$A = a^2, \quad x = a/4 \text{로 가정하면 primary grip}$$

length는 $l_1 = 2a/\mu$

(2) extrusion grip length

$$l_2 = \sigma_{ext} \cdot a / 2k = \sigma_{ext} \cdot a / Y$$

(3) 플래싱영역

z- 영역에서 요구되는 힘은 다음과 같다.

[i] 압출력

$$\sigma_{ext} \cdot A = \sigma_{ext} \cdot a^2 = \sigma_{ext} a \cdot a = 2kl_2 a = 2al_2 k$$

$$\text{여기서 } \sigma_{ext} = q + Y = 4.98 Y + Y = 5.98 Y$$

[ii] shoe면에 대한 전단력

$$al_2 k$$

[iii] primary grip length에서 shoe에 대한 마찰력

$$Y\mu x l_1 = Y\mu \frac{a}{4} \cdot \frac{2a}{\mu} = Y \cdot \frac{a^2}{2}$$

[iv] 플래싱영역에서 마찰력

$$\therefore \text{전체소요력} = 3al_2 k + Y\mu x l_1 + \text{플래싱영역의}$$

마찰력 = $1.5 \sigma_{ext} \cdot A + Ya^2/2 + \text{플래싱영역의 마찰력}$

그리고 CONFORM 전공정에서 소요되는 토크는

$(1.5 \sigma_{ext} \cdot A + Ya^2/2) \cdot R + \text{플래싱영역에서 소요되}$

는 토크 = 2683 (N.m)이다.

CONFORM 동력은

$$\dot{W} = 0.1047 \times 2683 \times 18 \times 10^{-3} = 5.06 (\text{Kw})$$

4. 결과 및 고찰

CONFORM을 3변형영역, 4변형영역 그리고 5변형영역으로 구분하여 해석한 결과와 실제 소재를 납으로 실험한 실험결과⁽⁴⁾를 비교하였다. 여기서 wheel의 회전속도는 18, 20 및 22rpm에 대해 계산, 실험되어 졌다.

3변형영역 해석보다 4변형영역 및 5변형영역 해석의 결과가 실험치와 좋은 일치를 보인다. 3 변형영역 해석이 4변형영역 및 5변형영역 해석보다 큰 값이 되는 이유는 3변형영역 해석의 extrusion grip length는 4변형영역 해석의 업세팅 및 채움 그리고 압출영역에 해당되고 extrusion grip length가 4변형영역의 상응하는 영역보다 길게 계산되기 때문이다. 그리고 플래싱영역에 대한 소요동력이 다른 영역에 비해 상당히 크기 때문에 플래시가 많이 생성되지 않도록 die설계를 하는 것이 중요하다고 판단된다.

아울러 플래시 양의 많고 적음에 따라 제품의 질에 미치는 영향에 대한 연구를 시도해 볼 필요가 있다고 판단된다.

rpm	실험 결과 값 (Kw)	5영역 계산 (Kw)	4영역 계산 (Kw)	3영역 계산 (Kw)
18	4.77	4.61	4.41	5.06
20	5.23	5.13	4.90	5.62
22	5.43	5.64	5.39	6.18

5. 결론

CONFORM의 금속 유동형식 및 mechanical field 분포는 보다 복잡하기 때문에 3변형영역보다 4변형영역과 5변형영역 해석이 합리적이고 실제 실험치와 잘 일치한다. 그리고 플래싱영역에 대한 소요동력이 다른 영역에 비해 상당히 크기 때문에 플래시가 많이 생성되지 않도록 die설계를 하는 것이 중요하다고 판단된다.

6. 참고문헌

- Green, D., Continuous Extrusion of Wire Sections, J. Inst. Metals, 100 : pp296-300.1972.
- Parkinson R. D., "The Technical Development of a New Extrusion Company Solely Using Conform Machines", Proc. of the Fourth International Aluminum Technology Seminar, Chicago, USA, 2: pp545-552. 1988.
- C. Etherington, "Conform-A New Concept for the Continuous Extrusion Forming of Metals", Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, pp893-900. 1974. 156-162.
- Xu Yigong, Wang Zutang, "A Study on Continuous Casting and Extruding Tube Process with Upper Bound Analysis", Advanced Technology of Plasticity 1993- Proceeding of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity, Beijing, pp482-487. 1993.