

공구의 마모

北村憲彦¹

Wear of Tool

K. Kitamura¹

1. 금형수명 공학과 공구마모

소성가공에서는 제품 전체의 형상이나 치수 정밀도뿐만 아니라 적당한 표면조도, 잔류응력, 경도 등도 요구된다. 이들을 만족하면서 하나의 공구를 품질 좋고 싸게 양산 할 수 없다면 소성가공을 이용하는 것은 바람직하지 않다. 공구의 설계 및 제작은 시간과 비용이 들어 가기 때문에 단시간에 공구 제작이 되지 않을 수 있다.

소성가공용 공구는 쪼개짐, 변형, 마찰에 의해 수명에 이른다. 濟木弘行 교수가 이것에 관한 자세한 내용을 ‘금형의 수명 공학’ [1] 제목으로 해설하고 있다. 이것을 다음의 3 종류 수명형태로 나누어 고려하면 기계적 손실이나 큰 쪼개짐, 과대하중이나 금형의 열연화에 의한 변형, 현저한 연소나 심한 굽힘 생기면 빨리 교체가 이루어 져야 한다. 즉 이들을 극복하는 공구 치수 정밀도가 유지되지 않는 한계계수에 이르면 수명에 이르게 된다. 따라서 마모에 의해 수명을 연장하는 것은 공구 및 공정설계나 현장의 기술자의 능력이라고 생각된다.

이에 관하여 일단 기초적으로 냉정하게 생각하는 것이 필요하다. 본 원고에서는 공구마모에 관하여 필요한 개념, 용어, 생각하는 법이나 사례에 대하여 정리하였으므로 공구마모의 해석을 위하여 참고하여 주었으면 한다.

2. 소성변형종의 재료와 공구계면에서의 마모

소성가공에 있어서의 공구와 재료의 윤활 메커니즘은 물리적인 점 만에 고려하여도 많은 변수가 있다[2]. 어느 윤활기구가 어느 정도 작동하고 있는가조차 불확실한 것도 있다. 더 나아가서 마모가 더해지면 더욱 복잡해 진다. 공구마모의 항목을 정리하기 위해서 공구와 가공물 계면의 모델(입의 스케일)을 그림 1[3]에 표시하였다. 그림 1 의 좌측에서 보면, 두꺼운 산화물은 마모를 방지할 것인가, 또는 촉진인가 를 고려해야 한다. 냉간가공에도 Ti 나 Ti 합금의 가공에서는 재료 산화막의 응착방지 효과가 높다[4]. 이밖에 스텐인리스의 열간압연으로 900°C이하로 온도가 낮아지면 산화막의 발생이 적게 되고, 물에 응착이 이상하게 증가한다. 심레스 파이프의 만네스만 친공압연에서는 공구선단에 수 100 μ m의 산화막을 붙여서 마모를 방지 할 수 있다.

그 때문에 적당히 산화하기 쉬운 공구재질이 선정된다[5]. 산화막의 경도나 생성조건에 대하여 제 185 회 소성가공 심포지움에서 귀중한 의논이 이루어 졌다[6,7].

응착물은 제품을 손상하게 할 뿐 아니라 응착마모의 원인도 된다. 응착해서도 그것이 커다랗게 성장하기 전에 탈락 하던가, 응착을 방지하는 탄화물의 효과도 검증되고 있다[8]. 한편 막이 충분히 두꺼울 경우에는 재료 표면조도는 평균 결정립경과 유효변형률의 누적에

1. 名古屋工業大學大学院 製造領域 宇 466-8555 名古屋市昭和區 御器所町, Japan

- 원고출처 : 塑性加工, Vol.47-541(2006), 124-128

- 번역자 : 박정서(자유번역가), 김인수(금오공과대학교 신소재시스템공학부, 교수)

비례하여 증가한다. 때로는 윤활 막과 같은 정도의 조도가 되고, 조도의 산 정상이 평평하게 부서지게 된다. 벌크 변형에 따른 표면적 확대도 소성가공의 특징이다. 이와 같은 표층의 자유변형에 따르지 않는 산화막은 박리하여 어브레시브로 작용하는 일도 있다. 일부의 윤활막의 파단은 응착물을 생성하고 그 유리마모 분도 존재한다.

온도나 접촉면의 상태 여하에 따라서는 공구에의 확산도 일어나, 공구측의 연한 표층이 변질하여 마모의 원인이 된다[9]. 표면피로는 공구의 박리를 생기게 한다. 무언가의 경질입자는 연한 재료에 매립되고 역으로 경질의 공구를 손상케 하는 일도 있다.

윤활제에 함유된 고활성인 극압 첨가제는 재료에 많이 반응하지만 특히 표면처리가 없는 공구강이나 초경합금에는

접촉하중 P, 마찰미끄럼 거리 L, 접촉면적 A, 마모 깊이 d_w , 마모 체적 W, 압입 정도 H, (버커스 정도 HV 나 브리넬 정도 HB, 이것들은 사실상 접촉압력을 kgf/mm^2 로 보이도 좋다. 단, $1\text{kgf/mm}^2=9.8\text{N/mm}^2$ 단위로 함)로 한다

$$d_w = W/A \quad (1)$$

3.1 마모율 또는 마모속도(wear rate) ω

이것은 단위 미끄럼 거리당의 마모 체적:

$$\omega = W/L \quad (2)$$

또는 단위 미끄럼 거리당의 마모 깊이 d_w/L 로 표시한다. ω 의 단위는 mm^3/m , mm^3/km 또는 mg/m , mg/km 등 이며, d_w/L 의 단위는 무차원 즉 $\mu\text{m}/\text{m}=10^{-6}$, $\text{mm}/\text{km}=10^{-6}$ 이다.

그림 2 에 미끄럼 거리에 따른 마모의 진행 정도의 개념을 표시한 것이다. (A)는 어브레시브 마모나 윤활 부족의 응착마모로 볼 수 있다. (B)는 초기 과정에서는 급격하게 마모하고, 다음 단계에는 일정하게 되고 또 다시 L 이 증가하면 온도상승 등의 원인으로 다시 마모가 급속하게 진행되는 일도 있다. W 는 금형 이나 제품에서 레프리카 채취, 중량변화, 3 차원 형상측정에 의하지만 현장에서는 d_w 쪽을 이용하는 것이 실감이 나며 생산관리상에도 편리할 것이다.

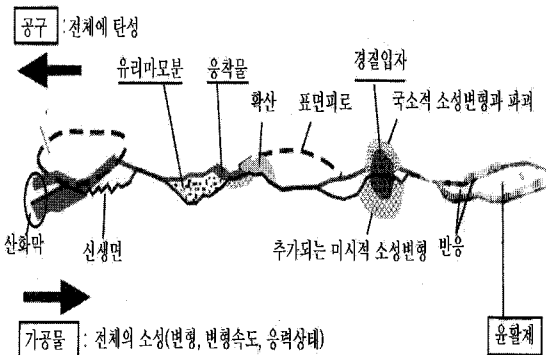


그림 1 공구와 가공물계면의 모델(마모를 고려한 항복)[3]

반응하여 응착방지의 도움을 하는 것도 있다[10]. 즉 그것이 과도하게 되면 공구의 부식마모의 원인이 될 수 있다. 그림 1 에 기입되어 있지 않은 중요한 인자로서 온도와 속도가 있으며 또 접촉부 전체의 기하학도 중요한 인자이다.

3. 마모량의 다루는 방법

가공방법이나 가공조건 등은 천차만별이지만, 서로 비교하기 위해서도 공통의 말을 쓰는 것이 바람직하다. 잘 쓰이는 용어로서 마모율, 비마모량, 마모계수에 대하여 설명한다[11].

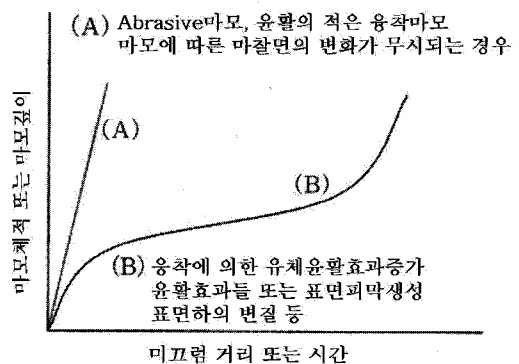


그림 2 마모진행 곡선

3.2 비마모량(specific wear rate)

$$\omega_s = W/(PL) \quad (3)$$

단위는 이를테면 mm²/N (= mm³/Nmm) 로, 문헌에서는 경험적으로 미끄럼 거리가 길고 압입 수직하중이 클수록 마모량이 크다. 그래서 변화하는 변수조건의 결과와 비교하는 것에는 비마모량이 편리하다. 식(3)의 분포에 마찰계수 μ 를 곱하면, μPL 은 계면에서의 마찰일이 되기 때문에, 단위마찰일당의 마모체적(마모량)이라는 의미를 포함하고 있다. 따라서 P나 L에 의해 μ 도 다른 것과 같은 경우에는 비교결과의 해석에 주의가 요구된다. 식(3) ω_s 를 마모 깊이로 부터 구하기 위해서는 $W=Ad_w$, $P=A p_m$ 이기 때문에

$$\omega_s = d_w / (p_m L) \quad (4)$$

3.3 마모계수(coefficient of wear) K

$$K = WH/(PL) \quad (5)$$

식(3),(4)를 이용하여 마모 깊이를 면압으로 표시하면,

$$K = WH/(PL) \omega_s H = (d_w/L) \cdot (H/p_m) \quad (6)$$

여기서 K는 무차원이다.

원래는 Holm이나 Archard의 응착마모설에 의하여 마모 체적을 구할 때의 비례상수에서 유래하였다. 다른 조건으로 경도의 영향을 빼고 비교한다고 하기 때문에, K가 클수록 순수하게 내마모성이 높은 것이라 할 것이다. 단 실제에는 같은 정도에도 표면 조도나 윤활 등이 영향으로 ω_s 가 다른 것도 경험하기 때문에 주의가 요구한다.

3.4 소성가공공구에 있어서 마모율, 비마모량, 마모계수

그림 3은 이제까지 공표된 많은 마모 데이터에 대하여 식(1)-(6)을 이용하여 산출한 것으로 본지 2004년 5월호 '가공에 있어서의 마모 소특집 호'에 게재된 것이다[11]. 소성가공의 마찰계수가 0.001~1 정도의 변화에 대해, 마모계수는 5-6으로 변화하고 있다.

마모가 큰 예와 적은 예를 보여 주고 있다. 마모가 적은 예는 다이아몬드 다이스에 의한 $\phi 48 \mu\text{m}$ 세션 STS 316 인 것이다. 100km 인발하여[12] 마모깊이 1.1 μm 이므로 $d_w/L = 1.0 \times 10^{-11}$, $K = 0.8 \times 10^{-9}$ 로 된다. 한편, 마모가 큰 예는 800°C의 S45C 온간으로 인발 시험[13]에선 1회의 미끄럼 20mm, 300회에 목표 제품 치수 25mm에 대하여 마모 깊이가 6 μm 로, $d_w/L = 1.0 \times 10^{-6}$, $K = 2.0 \times 10^{-5}$ 이다. 이와 같은 정리에 의해 소성가공에 있어서의 마모 정도나 공법간의 마모의 차이를 비교할 수 있다.

시간을 다루는 현장에 있어서도 마모 문제를 되도록 식(1)-(6)으로 정리하는 것이 바람직하다. 개개의 가공에서 마모를 줄이기 위한 대책을 세울 때는 이제까지와 다른 조건으로 바뀔 경우에도 적용 가능한 예측 식을 구축하기 위해서는 식(1)-(6)의 정리는 유용하기 때문이다.

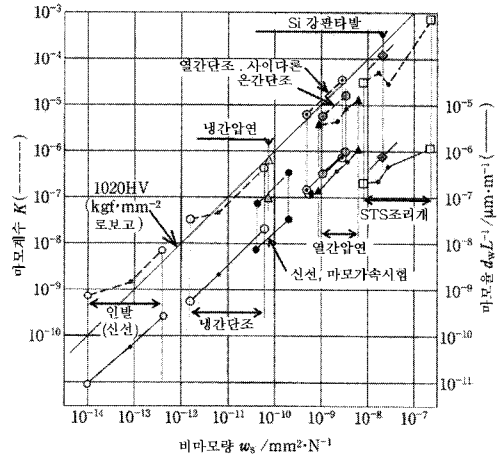


그림 3. 소성가공 공구의 마모율, 비마모량, 마모계수[11]

4. 마모형태의 분류

일반적으로 마모형태는 Abrasive 마모, 증착마모, 부식마모, 피로마모로 분류된다 [14,15]. 이 분류는 Burwell(1957)에 의한 것 이지만 그 외 2~3 개의 다른 형태도 들 수 있다[16]. 여기서는 공구마모에 관계가 깊은 어브레시브 마모와 응착마모를 주로 서술한다. 양자 모두 마모이론의 중심 이론으로 마찰의 본질과도 관계가 깊다.

4.1 Abrasive 마모(abrasive wear)

이것은 경질인 표면돌기나 경질입자가 미소한 절삭공구와 같이 되어서 먹어 들어가는 마모 형태이며 일반적으로 현저한 마모로 된다.

Rabinowicz 의 모델[17]이나 曾田[18]이 소개 하고 있는 예는 그림 4 에 표시한 것과 같은 단순한 원추돌기계 의한 마모 모델이다.

이때 접촉하중 P 와 마모체적 W 는

$$P = \pi r^2 p_m = (d_w \tan \theta)^2 p_m \quad (7)$$

$$W = (1/2) d_w 2rL = d_w^2 \tan \theta \cdot L \quad (8)$$

여기서 평균압입 p_m 압력을 연한 층의 압입 경도로 치환하면,

$$W = \cot \theta (\pi PL/H) \quad (9)$$

으로 된다.

이것은 압입만 있으나, 원추경사면에서의 소위 공구 마찰을 고려한 모델도 있다. 어느 것이나 마모량을 접촉하중과 미끄럼 거리의 곱에 비례하고 마모한 쪽의 경도에 반비례 한다는 점에서는 변함이 없다

Burwell 은 abrasive 마모를 절삭형[16]에 비탕을 두고 연구했지만 금속에서는 절삭형 뿐 아니라 미시적 소성변형에 의한 옛지형 성형, 굴착형 등, 또는 세라믹스(공구 경질 표면처리도 포함된다)에서는 후레그형 성형, 분말형 성형 등으로 분류하고 있다[19].

또 에메리지에 의한 기초적 마모시험에 의하면 abrasive 마모에 관하여는 다음과 같은 것이 잘 알려지고 있다[20].

a) 2 차원 abrasive 마모는 3 차원 abrasive 마모 보다 한자리 높은 비마모량을 갖는다, b) 3 차원 abrasive 마모에서는 연마 입자의 경도가 마모하는 상대 재료의 경도의 0.8 배에서 마모가 증가하여 그 값은 1.25~1.4 배 정도로 높게 된다, c) 3 차원 abrasive 마모분은 응착 마모분에 의하여 덮게 되며 마모량도 응착의 심한 마모에 가깝다.

(2 차원 abrasive 마모에서는 마모 시키는 층이 고정, 3 차원 abrasive 마모는 사이에 유리, 개재된 경질 입자에 의해 일어난다.)

abrasive 마모에서 비마모량은 $10^5 \sim 10^7 \text{ mm}^2/\text{N}$ 정도라고 알려지고 있다[21]. 연한 층에 경한 입자가 함몰할 경우에는 경한 재료가 abrasive 마모 되는 일도 있으나, 혼탁액과 같은 극단적인 경우(현실에는 그것도 상당히 맞는 것 같다.)를 제외하고, 경한 것은 마모하기 어렵다고 여겨지고 있다.

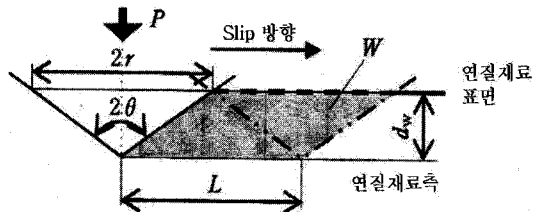


그림 4 Abrasive 마모(원추압입 모델)[17,18]

4.2 응착마모(adhesive wear)

이 마모는 접촉계면에서 두꺼운 접촉 고체가 응착하고, 그 후 진접촉면적을 구성하는 응착부의 전단이나 파괴에 기인한다. 이미 식(5), (6)에 밝힌 바와 같이, Holm 이나 Archard 의 응착마모에서는 마모량은 (PL)/H 에 비례한다고 하였다.

Holm(1946)은 원자의 상호작용으로 생각했다. 이에 대하여 Archard(1953)은 조금 더 현실감 있게 생각하는 법을 취하였다. 즉 응착부에서 소정의 확률로 마모분이 생긴다고 생각했다. 즉 경할수록 진접촉면적, 즉 응착부가 작아지기 때문에 마모가 작아진다고 했다. 그림 5 에 Archard 의

응착마모 행정 모델을 표시한 것이다[22]. (a) 반경 a 의 평평한 돌기가 최대로 접촉, (b) y 만큼 미끄러진 후, (c) 미끄러지고 않고 평평한 접촉면적이 0 라는 순서로 해석하였다.

曾田[18]의 해석을 참고로 하여 복습하면, 이 접촉의 최대 일 때는 어딘가에서 동시에 몇 개의 응착마모 행정이 행해지고 있다고 한다. 어느 순간에 n 개로 p 를 지탱하면서 (a)-(c)의 행정으로 2a 미끄러져 같은 방법으로 L 만큼 미끄러진다고 생각한다. 그 결과 L 의 사이에 N 개의 접촉이 있으며, 1 개의 접촉에서 직경 a 의 반구가 마모분으로 된다고 생각한다. 따라서 $p_m = P/A_r$, $A_r = n\pi a^2$ 이므로 행정당 즉 2a 문지르는 사이의 개수는 $n = P/\pi a^2 p_m$ 개로 된다. 그러므로 전체 L 만 문지르는 사이에 n 의 L/(2a) 배 개가 마모하는 것으로 된다.

즉, $N = nL/(2a) = P/(\pi a^2 p_m) \cdot L/(2a) = (PL)/(2\pi a^2 p_m)$ 로 된다. 반구의 체적은 $(2/3)\pi a^3$ 이기 때문에,

$$W = (2/3)\pi a^3 (PL)/(2\pi a^2 p_m) = (PL)/(3p_m) \quad (10)$$

Archard 는 이것에 마모분의 발생확률 k 를 곱하고 있다.

$$W = k(PL)/(3p_m) = k(PL)/(3H) \quad (11)$$

식 (11)에는 p_m 을 경도 H로 치환하여 표시한 것이다. 식 (9)과는 다르지만 역시 식 (11)은 상식적인 결론이 되었다. 그러나 이 식도 마모분의 발생 메커니즘을 직접 알려 주는 것은 아니다. 또 실제에는 연한 측만 아니라 경한 측도 마모된다. 공구 마모는 정말로 그런 경우가 많다. 마모의 바로 전의 단계에서는 마모분의 발생한다. 이 발생 메커니즘을 해석하는 것이 결국 현장의 문제를 해결하는 근본일 것이다. 曾田의 제시한 ‘이착, 성장, 탈락’ 마모발생 모델[23]을 그림 6 에 표시하였다. (a) 접촉, (b) 내부파단, (c) 이착 물질의 생성, (d) 이착 물질의 합체, (e) 이착 물질의 형성 및 성장 (f) 찌그러짐으로 되어 $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{mm}$ 정도의 마모분이 생긴다고 하고 있다.

마모분은 정질층과 연질층 양쪽의 성분이며, 경한 측에서도 마모분은 생성된다. 또 曾田이 주장한 이착 물질 (마모 물질)에 대해서도 三科 등이 상세한 관찰을

하여 응착마모의 근원으로서 마모 물질 생성과 마모분 발생 과정을 직접 관찰하고 있다[24].

응착마모의 비마모량은 경량으로 하여, 무운활 $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{mm}^2/\text{N}$, 윤활유사용 $10^{-8} \sim 10^{-13} \text{mm}^2/\text{N}$ 로 되어 있다[20].

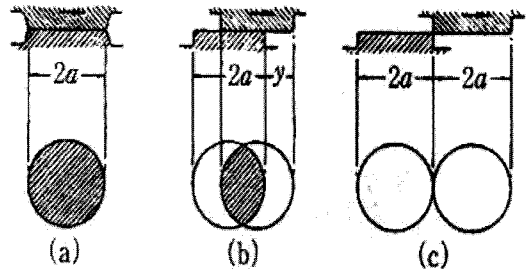


그림 5 Archard 의 응착마모의 접촉모델(동시에 n 개 접촉중의 대표 1 개의 일행정) [22]

4.3 기타

부식마모(corrosive wear): 화학적 반응도 그 부분을 기계적으로 깎아낸다고 하는 미케노 케미칼 작용으로 생긴다.

냉간에서는 고효성인 윤활제를 쓸 때에 계면의 조건 여하에 따라서 여러 형태의 마모가 일어날 수 있다.

(1) 산화마모(oxidative wear): 열간가공에서는 고온의 재료에 접촉하여 형 표면이 산화되며 서서히 손실해 나간다.

(2) 확산마모(diffusive wear): 열간가공 등으로 열부하가 증가하면 접촉하고 있는 재료간에서 원자의 상호확산이 생긴다. 응착이 생겼을 때에는 공구의 표면층도 변질한다. 가공층에 생긴 확산층이 취화하여 파괴를 일으켜 마모분이 생긴다.

(3) 피로마모(surface fatigue): 주기적으로 마찰하는 마찰면의 표면부위에서 내부에 크랙이 생성하여, 이것이 전파와 박리하여 마모한다는 디라미네이션 마모(delamination wear)가 연구[25] 되었다. 피로파괴와 같은 파괴현상을 응착마모 이론에 적용한 결과가 인정받고 있다. 이상의 마모 형태는 실제에서는 각각 단독으로 일어난다는 것은 아니다. 다시금 마모부의 발생조건, 미소한 접촉기하학, 접촉대면 강도, 미끄럼속도나 발생 압력 등의 관여와 영향을 표시하여야 한다.

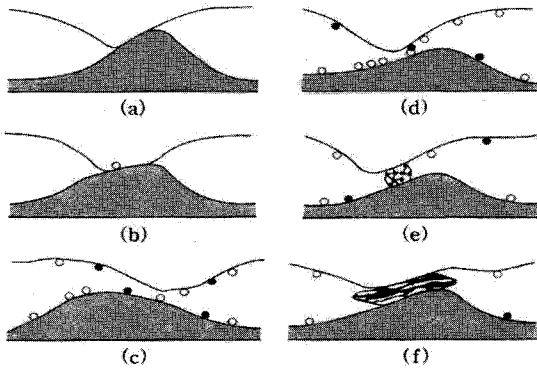


그림 6 笹田의 이착 성장 모델[23]

마모의 메카니즘을 정량적으로 분류하기 위하여 마모를 지배하는 마모형태 도(wear map, wear mechanism map)가 연구[26-28] 되고 있다. 소성가공학 분야에도 그림 7에 표시한 바와 같은 마모 형태도 작성되고 있다[29].

5. 공구마모에의 작업

앞 절에서는 기본으로 되돌아가서 마모에 영향을 주는 주요한 인자를 정리하였다. 이들에 바탕을 두고 A) 마모를 줄이는 것, B) 마모를 예측하는 것, C) 공구의 마모 기구 등을 생각하는 것 등으로 분류하여 보았다. 이하에서는 A, B 분야를 주로 최근의 동향으로 본다. 식(10), (11)등에서 경한 공구가 필요하기 때문에 먼저 형제와 형표면처리 대책이 거론되고 있다. 이 기본적인 생각을 새로이 정리하여 보았다[30,31]. 예서는 플라즈마 PVD 도 주목되고 있다[32]. 경질막피복에 대하여는 마모 보다 오히려 내 바리성이 문제로 그 평가법[33]이나 계면손상 역학 시뮬레이션[34]이 검토되기 시작하였다. 타발형에서 수명의 실제적인 검토[35]나 경질막 피복공구의 전단가공에의 적용[36]도 참고가 되고 있다. 또 부하온도, 응력분포에 최적화한 경사복합재가 경이적인 형 수명 연장을 실현하고 있는 예도 있다[37].

식(10),(11)에 의하면, 가공조건으로서는 마찰일을 어떻게 줄이고 형연화방지를 위해열부하 유입을 줄이는 가라는

중과가 필요하게 된다. 형표면에 따른 좌표상에 압력분포와 미끄럼 속도의 시간변화를 이는 것이 열쇠이다.

Holm 이나 Archard 류의 마모 측이 한층 더 마모량이 많은 것으로 되지만, 열간단조의 경우에는 형연화를 고려하여 마모량은 경도의 2 승[38,39]에 비례 또는 사용시의 형의 변형저항의 4 승에 비례[40]한다고 주장하고 있다.

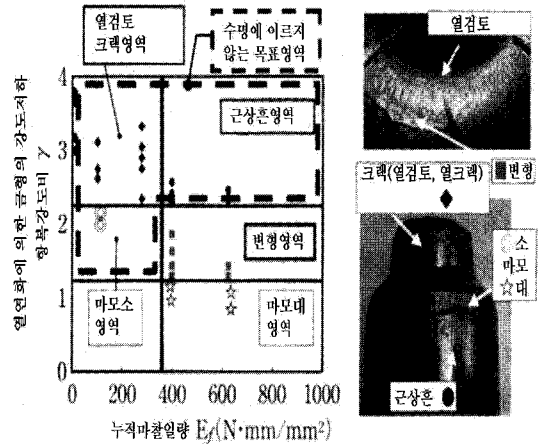


그림 7 열간단조에 있어서의 마모형태도(wear map)의 일례[29]

압연, 선 인발 가공, 단조 등에서는 재료유동의 공정배분, 공정 사이클타임, 가공속도, 윤활이나 냉각의 제어가 중요하다. 공정, 공구를 설계하는 기술자는 해석을 이용하여 형의 수직응력, 전단응력(마찰계수의 설정도 과제), 미끄럼 속도분포, 표면적 확대의 분포, 유효 전단 등의 분포 등의 환경에 대하여 비교 정리하여 왔다. 최적한 트라이보로지 설계를 하는데 현재 매우 유리하게 되었다. 후방입출 등의 대변형에서는 냉간에서 조차 높은 고온[41]으로 되기 때문에 형에서 열전도이나 그것에 따른 윤활의 악화도 당연할 뿐만 아니라 형마모에 영향에 영향을 끼친다.

탄성유체윤체 윤활 EHL 의 막 두께비 Λ 나 접촉시간[42]은 공구 마모 문제에도 참고가 된다. 여기서 $\Lambda = h_{min}(\sigma^2 + \alpha^2)^{1/2}$, 이룬 최소막두께 h_{min} , 2 면의 σ^2, α^2 의 합성 값 지승평균방근,

$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$ 이다. EHL에서는 $\Lambda < 1$ 로 직접접촉이 빈번하게 일어난다고 하고 있다. 그와 같은 얇은 유막에서 돌기 간섭도 문제가 된다[43]. $\Lambda > 3$ 에서 거의 안전한 유체윤활로 된다. 표면적 확대가 크면 윤활막이 얇아지기 쉽고 Λ 값 여하에서는 형에도 큰 손상을 줄일 수가 없다.

윤활의 종류나 화학적인 활성 등의 성능만을 생각하기 쉬우나, 오히려 물리적인 조건, 이를테면 형형상[44]의 차이나 도포의 방법(압연의 냉각수의 끊기 후에 윤활 도포 등을 고려하는 법)의 개선은 형마모의 방지에 영향을 준다. 사이클 타임이나 가공속도를 설정하고 디지털 서보푸레스에 의해 이를테면 정수압이 높아져 최종의 말기에 미끄럼 속도를 낮추면, 마찰일률이 줄어지는 효과도 생길 것이다.

성형 재료에 대하여서는 경한 성분조직의 형상이나 분포, 가공경화, 산화막의 생성이나 성질 등에도 주의가 요구한다. 형구조나 프레스 기계에 대하여는 마모뿐 아니라 크게 쪼개짐이나 절손 등 치명적인 손상을 주지 않도록 형의 분할 방법, 가동부의 가이드, 형조의 순번 등도 중요하다. 냉간가공의 마찰마모시험으로서는 大矢根 등이 제안한 몇 가지의 실험[45]은 파라미터도 많이 고려하여 손쉽게 마모를 평가하였다. 다른 연구 결과로 연가공재의 인발 가공 형태의 많은 내용이 문헌 2에 소개하고 있다. 소성가공에서는 형표면은 상당히 큰 응력을 받기 때문에 그것이 공구마모에 영향을 주는 것도 표시하고 있다[46]. 열간가공에는 열간 전도식[47]이 유용하며 단조용을 모의한 시험방법[13,48,49]도 시도되고 있다. 메카니즘 해석에는 시험법에는 역시 현장의 데이터 정리가 불가결하다. 그것들은 예측식이나 형재의 개발에서 매우 큰 역할을 하고 있다.

6. 맺는 말

본지 1966년 5월호(Vol. 7-No. 64) '마모 특집', 동 2004년 5월호(Vol. 45-No. 520) '가공에 있어서의 마모 소특집'에는 상세히 해설되어 개별의 가공법마다 처방도 소개하였다. 또 프로세스 트라이보로지 1분과회의 제 83회 연구회 '소성가공에 있어서의 마모문제를 생각한다' (2001)에도 사례 등이 다수 게재되어있다. 그러나 소성가공의 윤활이론과 마모이론과는 아직 융합돼 있지 않다. 상황 증거나 사례의

정리조차 이론과는 아직 융합돼 있지 않고 있다. 상황증거나 사례의 정리조차 늦어지고 있는 일도 있다. 언젠가는 소성가공계면에 나타나는 독특한 윤활마찰 모델이 그림 1에 추가된다면, CAE에 도움이 되고 더욱 더 계획적으로 유효한 대책이 잡히게 될 것이다. 그것은 '형공학'을 짜는 것에 지나지 않는다. 春日報南 선생의 실험[50]에 의하면, 경제적 생산에 적합한 형설계법, 제작법 및 형의 성능, 수명, 공작설비의 계획에 관한 원리를 명확하게 하고 생산 실시 단계에 있어서도 시행착오, 지체, 기타의 비경제적인 문제를 제거하기 위해 필요한 공학을 형공학이라 한다.

본 논문은 한국소성가공학회와 일본소성가공학회의 번역 게재협정에 의하여 저자의 허락을 생략하고 번역하여 게재합니다.

참고 문헌

- [1] 濟木弘行 : 209 回塑加 심포지엄, (2002), 1-10
- [2] 水野高爾 : 소성가공에서의 트라이보로지(일본소성가공학회편), (1998), 67-82, 트코로나사
- [3] 水野高爾: 1999년도 프로세스, 트라이보로지분과회 연간보고서, (2000), 6-16
- [4] 村尾卓兒, 森謙一郎, 原田泰典, 加藤幸司, 大久保不二男 : 소성가공, 43-495 (2002), 336-340.
- [5] 大貫輝, 蓮香要, 加藤治, 菊池勤, 有吉富雄, 川並高雄 : 철과강, 59-13 (1983), S1132.
- [6] 谷口滋次 : 185 回塑加 심포지엄, (1999), 1-6.
- [7] 岡田光 : 상동, 7-15.
- [8] 土屋能成, 川浦宏之, 新井透, 島進 : 소성과가공, 38-433(1997), 141-146.
- [9] 清野次郎 : 상동, 24-265 (1983), 184-194.

- [10] 北村憲彦, 大森俊英 : 상동, 39-448 (1998), 452-456.
- [11] 水野高爾: 상동, 45-520 (2004), 315-319.
- [12] 일본소성가공학회 : 프로세스트라이볼로지, (1993), 146, 코로나사.
- [13] Doege, E., Melching, R. & Kowallick, G. : J. Mech. Working Tech., 2 (1978), 129-143.
- [14] 野呂瀬進 : 마모기구의 해석과 대책 (1992), 11-95, 테크노시스템.
- [15] Bhushan, B. : Modern Tribology handbook, vol.1 (2001), 273-300, CRC Press.
- [16] John T. Burwell, Jr. : Wear, 1 (1957), 119-141.
- [17] Ernest Rabinowicz : Friction and Wear of Materials, (1965), 71, John Wiley & Sons Inc.
- [18] 曾田範宗 : 마찰의 話, (1971), 175-177, 岩波新書 791.
- [19] Hokkirigawa, K. & Kato, K. : Tribology International, 21-1 (1988), 51-57.
- [20] 笹田直, 尾池守, 江森信彦 : 윤활, 27-12 (1982), 922-928.
- [21] 일본기계학회편 : 기계공학편람, B-1 (1987), 61.
- [22] archard, J. F. : J. Applied Physics, 24-8 (1953), 981-988.
- [23] 笹田直 : 소성과 가공, 20-227(1997), 1072-1077.
- [24] 三科博司, 河野彰夫, 赤松良信, 트라이볼로지, 48-4 (2003), 307-314.
- [25] Suh, N. P. : Wear, 25 (1973), 111-124.
- [26] リム, S. C, アッシュビイ, M. F. 著, 加藤康司 譯, 트라이볼로지, 37-10 (1992), 787-792.
- [27] 상동: 상동, 37-10 (1992), 793-798.
- [28] 堀切川一男 : 상동 37-10 (1992), 799-805.
- [29] 森下弘一, 鈴木寿之 : 소성과 가공, 45-520 (2004), 310-314.
- [30] 新井透 : 소성가공에 의한 트라이볼로지(일본소성가공학회편), (1998), 150-180, 코로나사.
- [31] 新井透: 프로세스트라이볼로지 (일본소성가공학회편), (1998), 19-36, 코로나사.
- [32] 河田一喜 : 소성과 가공, 45-518 (2004), 153-157.
- [33] 村川正夫 : 상동, 148-152
- [34] 早川邦夫, 中村保, 原田邦明, 田中繁一 : 상동, 45-517 (2004), 113-117.
- [35] 高石和年, 岩城忠則, 近藤俊郎, 南幸一, 佐佐木和幸, 阿部保記 : 상동, 45-518 (2004), 183-187.
- [36] 古閑伸裕 : 상동, 158-161.
- [37] 桑原光雄 : 223 回塑加 심포지엄, (2003), 21-30.
- [38] Painter, B., Shivpuri, R. & Altan, T. : J. Materials Processing Technology, 59(1996), 132-143.
- [39] 小島久義, 藤川眞一郎, 石原章 : 소성과 가공, 43-495 (2002), 331-335.
- [40] 鈴木寿之: 230 回塑加 심포지엄, (2004), 53-59.
- [41] Kato, T., Nakanishi, K. & Tozawa, Y. : Ann. CIRP, 35-1 (1986), 177-180.
- [42] Johnson, K. L., Greenwood, J. A. & Poon, S. Y. : Wear, 19 (1972), 91-108.
- [43] Li, D. F., Kauzlarich, J. J. & Jamison, W. E. : J.Lubric Tech. Trans. ASME, 98 (1976), 530-537.
- [44] 水野高爾, 小島之夫, 北村憲彦, 朱偉成 : 소성과 가공, 25-285 (1984), 926-935.
- [45] 大矢根守哉 : 상동, 24-265 (1983), 132-136.
- [46] 北村憲彦, 服部美技, 水野高爾 : 상동, 46-532(2005), 387-391.

[47] 中島浩衛, 大貫輝, 蓮香要 : 소성가공
춘강론, (1978), 181-184.

[48] Weist, Chr. & Westheide, H. : Annals of the
CIRP, 35-1 (1986), 199-204.

[49] 澤村政敏, 土屋能成, 団野敦 : 소성과
가공, 39-455 (1998), 1258-1262.

[50] 春日報南 : 상동, 8-74 (1967), 156-157.