

Tribology 이론을 이용한 다이마멸 해석 A Study on the Die Wear using Tribology Theory

*#박종남

*# J. N. Park (njp3836@chol.net)

국방기술품질원

Key words : tribology, die wear, pin-on-disk, wear coefficients, wear system

1. 서론

접촉되어 움직이는 물체는 반드시 마찰(friction)로 인해 마멸현상(upsetting processes)이 뒤따른다. 이러한 마멸은 마멸이란 기계적인 원인, 예를 들면 고정되어 있는 상대물체와의 접촉, 혹은 상관된 움직임에 의해 고정된 물체의 표면으로부터 물질의 손실이 생기는 것을 말한다¹⁾. 이러한 종합적인 이론이 트라이볼러지(tribology)라고 하는데, 이와 같은 현상을 메카니즘적으로 표현하면 두 금속이 미끄럼운동을 할때 마멸 표면에서 두 개의 돌출부분이 접합을 형성하게 되고 이중 약한부분이 표면으로부터 분리되는 이론이다.

이러한 이론하에 Holm²⁾은 전기접촉 실험을 통해 수직하중하에서 미끄럼거리를 경과하면 경도를 갖는 표면으로부터 체적이 마멸된다는 최초의 마멸이론을 발표했다. Archard³⁾는 미끄럼과정에서 두 접촉 물체표면에 미세돌기들(asperities)의 접촉을 고려하여 미세돌기의 붕괴를 마멸현상이라고 하는 일반화된 모델을 제시하였으며, 특히 응착마멸기구(adhesion wear mechanism)를 공식화시킨 마멸방정식에 마멸계수를 도입했다. 또한 Archard 외⁴⁾가 금속간 마찰실험을 통하여 부드러운 소재의 미세입자는 마멸과정중 상대소재에 응착된다는 마멸응착이론(adhesion theory)을 발표하면서 마멸현상에 대한 연구가 크게 진전되었다.

트라이볼러지에 대한 연구는 그 현상의 복잡성과 대다수 연구 데이터의 다양성으로 원인해석이 완전하지 못한 실정이며, 마멸분야에서 사용되는 전문용어조차 표준화되어 있지 않다. 그러나 학자들간에 통용되는 주요 마멸발생 형태는 응착마멸(adhesive wear), 연삭마멸(abrasive wear), 부식마멸(corrosive wear)로 분류하고 있으며, 이밖에 침식마멸(erosive wear), 열적피로마멸(thermal fatigue wear) 등이 있다. 이들 마멸현상은 단독으로 일어나는 경우는 드물며 주로 조합되어 나타난다.

이상과 같이 과거의 연구 경향은 순수금속들간의 마찰로 발생하는 마멸현상을 파악하기 위하여 주로 행하여졌으나, 최근들어 금속성형분야에서 금형 및 제품 소재의 고급화와 다양화로 단조작업시 발생하는 금형의 마멸현상에 대한 연구와 정량적인 해석이 필요하게 되었다.

2. 이론적 접근

소재의 손실없는 표면손상은 소재의 구조적인 변화, 즉 상변태(phase transformations), 재결정(recrystallization) 등과 표면층의 잔류변형에 의한 소성변형, 열적 또는 기계적인 표면 균열 등이며, 손실이 따르는 표면손상은 전단파열(shear fracture), 압출(extrusion), 경한 파열(brittle), 피로파열(fatigue fracture), 화학적 용융(chemical dissolution), 확산(diffusion) 등이 있으며, 이러한 표면 손상으로 나타나는 현상이 마멸이며 두 금속의 미끄럼운동을 하는 마찰면에는 반드시 크고 작은 마멸이 발생한다.

일반적으로 금속표면에는 오염막, 분자막, 산화막 등이 흡착되어 나타나는 화학적인 인자 이외에 표면거칠기라고 하는 기계적인 인자가 존재하고 있다. 이러한 요소중 응착은 금속의 여러 가지 마찰특성중 금속표면 주위의 환경이 매우 중요하며, 건조상태의 비윤활 금속표면은 산화막 등이 여러층으로 덮여 있어 비윤활 상태의 조건을 정의하기 어렵게 된다. 왜냐하면 대부분 실제 상황에서 미끄럼 표면에는 약간의 종류의 윤활이 존재하기

때문이다. 이와 같은 형태의 금속표면은 초기 미끄럼작용시 마찰계수가 0.1~0.3이며, 계속해서 작용이 되면 마찰계수는 더욱 높아진다.

두 접촉 금속의 표면상태에 따라 거친 미끄럼조건은 두 접촉 금속이 동일 금속이거나 유사 금속일 경우 발생하며, 접촉하는 두 금속중 어느 한 금속이 매우 부드러울 때 상대 금속의 성질과는 관계없이 형성된다. 후자를 메카니즘적으로 표현하면 부드러운 금속은 자신이 마멸되어 상대 금속위에 응착되며, 결국 응착부위 자체로 미끄럼작용된다. 특히 응착마멸에 대한 수학적 모델은 서론에서 언급한 몇몇 연구에 의해 수정되고 개발되었다.

금속간의 미끄러운동시 발생하는 마멸에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 그리고 접촉면 거칠기 등의 접촉상태와 금형재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤활조건 등에 의해 결정⁵⁾되며, 금속성형공정 중에 발생하는 금형의 마멸깊이를 알기 위해서는 이들 관계의 정량적인 해석방법이 필요하다.

마멸계산은 여러 학자들에 의해 제안되었으나, 이론해석이 간단하면서도 실제 마멸시스템에 널리 적용되고 있는 것은 Archard의 마멸모델³⁾이며, 그 개요는 다음과 같다.

실제 접촉면상에서 반경 r의 원형 응착부(면적 $\Delta A = \pi r^2$)가 형성되어 어떤경우나 $\Delta \ell = 2r$ 를 미끄럼작용시켰을때에 반구상의 마멸입자(체적 $\Delta V = 2\pi r^3/3$)가 생성하는 것이라 가정하면 다음과 같은 관계식 (1)이 성립된다.

$$\Delta V / \Delta \ell = \Delta A / 3 \dots\dots\dots (1)$$

반경 r의 응착부 1개가 수직하중의 일부 ΔL 를 받아들였다고 생각하면 σ_y 을 금속표면의 항복응력으로 했을 경우 식 (2)로 표현 가능하다.

$$\Delta L = \sigma_y \Delta A \dots\dots\dots (2)$$

위 식 (1), (2)로부터 식 (3)을 구할 수 있다.

$$\Delta V / \Delta \ell = 1/3(\Delta L / \sigma_y) \dots\dots\dots (3)$$

이들 미끄럼되는 미소부분의 마멸량을 합치면 전체 마멸량 V는 다음 식 (4)로 주어진다.

$$V / \ell = 1/3(L / \sigma_y) \dots\dots\dots (4)$$

위 식 (4)는 1개의 응착부에서 반드시 1개의 마멸분이 생성되고 있는 것으로 하고 있다. 그러나 실제로는 반드시 그러한 것이 아니기 때문에 생성되는 확률을 나타내는 k를 도입하면 식 (4)는 다음 식 (5)로 표현된다.

$$V = k/3 (L / \sigma_y) \ell \dots\dots\dots (5)$$

위 식 (5)에서 σ_y 은 압입경도 h로 치환 가능한 값이기 때문에 V를 마멸깊이 d로 나타내면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta d = kp \delta \ell / 3h \dots\dots\dots (6)$$

여기서 δd 는 δt 동안 발생한 마멸깊이이며, k는 마멸계수, p는 접촉면에서의 수직압력, ℓ 은 접촉면에서의 미끄럼길이, 그리고 h는 금형의 경도이다.

마멸해석을 위해서는 마멸진행 과정의 시스템분석이 필요하다. 시스템분석은 마멸에 관련된 시스템의 기술적인 목적을 설정한다. 본 연구에서는 인위적으로 주어지는 입력값인 작용하중, 미끄럼속도, 미끄럼길이 등을 작업변수(operating variables)로 표현하고, 미끄럼되는 소재의 금속성질과 인자들 사이에서의 상호작용 등으로 발생하는 소재의 금속성질, 미끄럼면의 거칠기, 미끄럼상

태, 마찰 및 마멸기구, 윤활조건 등을 시스템 구조(system structure)로 분석한 후, 최종적으로 작업변수와 시스템 구조의 함수로 마멸 특성을 평가한다¹⁾. 이를 간단히 표현하면 Fig. 1 과 같다.

Operating Variables
<ul style="list-style-type: none"> • Type of movement : Sliding • Normal force : 100, 200, 300 (N) • Velocity : 108, 216 (mm/s)
Systems Structure
<ul style="list-style-type: none"> • System component 1 : Pin - AISI D2 • System component 2 : Disk - AISI 1020, 304SS • Atmosphere : Dry air • Lubrication : None

Fig. 1. System model for pin-on-disk experiment

3. 실험결과 및 분석

Archard의 식 (6)으로부터 마멸계수 k와 금형의 경도 h가 압축공정에 일정하다고 가정하고, 증분해석에 적용하기 위하여 금형에 작용하는 압력 p와 미끄럼길이 l 은 공정의 진행과 함께 변하므로 식 (6)을 적분형태로 나타내면 마멸깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d = k/3h \int^{T_{tot}} \delta n \Delta v dt \text{ on } \partial \Omega^{tool} \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)에서 δn 은 금형표면에 작용하는 수직압력, Δv 는 금형과 소재간의 접촉면에서 미끄럼속도, T_{tot} 는 전체 변형시간이다. 따라서 시간 t+ Δt 에서의 마멸깊이는 선형으로 가정하면 위 식으로부터 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d_{t+\Delta t} = \delta d_t + k/3h [\delta n \Delta v]_t \Delta t \text{ on } \partial \Omega^{tool} \dots\dots\dots (8)$$

여기서, Δt 는 증분시간이다.

마멸계수 k는 축대칭 압축실험으로는 구할 수 없으므로 pin-on-disk 실험으로 구한 데이터를 이용하여 AISI 1020은 9×10^{-6} , AISI 304SS는 7.6×10^{-6} 으로 가정하였으며, 금형의 경도는 638(H_B)로 하여 마멸해석하였다.

각 금형표면에 나타난 마멸깊이는 실험전과 동일한 방법으로 측정된 결과 AISI 1020의 경우는 약 0.5~1.5 μm , AISI 304SS의 경우 약 0.1~1.5 μm 로서 두 소재 모두 최대 마멸깊이가 유사하게 발생되었다.

Fig. 2(a), (b)는 마멸량이 최대치인 금형표면의 외곽부위를 금속현미경으로 관찰한 사진이다. Fig. 2(a)는 마찰 및 마멸흔적이 얇고 주로 연삭마멸이 발생하였으며 비교적 깨끗한 마멸면을 보여주고 있다. Fig. 2(b)는 마찰 및 마멸흔적이 거의 모든 표면에 발생하여 주로 응착마멸이 관찰되었다. 이 응착현상은 금형표면에 일정한 분포 경향을 보여주고 있으며, 이는 소재가 압축작용을 받아 소성 변형될 때 금형표면에 나타나는 미끄럼거리가 일정하여 이것으로 발생하는 마멸현상도 일정하게 관찰되었다.

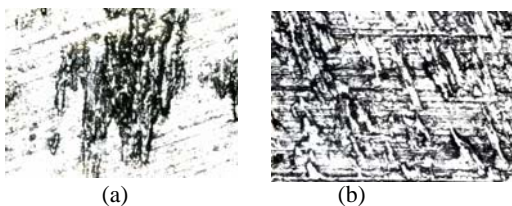


Fig. 2. Worn surface of die (OM)
((a) Cylinder AISI 1020 (x 500) (b) Cylinder AISI 304SS (x 500))

Fig. 3은 금형의 마멸깊이를 실험으로 측정된 값과 해석으로 구한 값을 구하였다.

마멸깊이를 비교 분석결과, AISI 1020의 경우는 측정된 마멸깊이가 해석치보다 다소 높게 나타났으나 대체로 잘 일치하였다. AISI 304SS의 경우는 해석으로 구한 마멸깊이가 전체적으로 약 0.5 μm 로 일정하였으며, 실험으로 구한 마멸깊이는 AISI 1020의 경우와

유사한 경향으로 나타나 두 비교치가 일치하지 않았다. 또한 응착 현상이 금형표면에도 나타나 pin-on-disk 마멸실험과 동일한 마멸 현상이 발생하여 AISI 304SS의 마멸계수값은 pin-on-disk 방식의 마멸실험으로는 계산 곤란함을 알 수 있으며, 1회의 축대칭 실험으로는 마멸진행과정을 예측하기 어려움을 알 수 있었다.

마멸깊이의 분포는 AISI 1020의 경우 두 결과치 모두 중앙부위에서 반경방향으로 깊이량이 일정하게 증가하다가 반경 약 18mm 위치에서 최대치로 되어 다시 감소하는 분포를 보여주고 있다. AISI 304SS의 경우는 실험치가 AISI 1020의 경우와 동일한 분포를 보여주고 있으나, 해석치는 전체분포가 일정하게 나타나 있어 두 분포는 일정치 않음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, pin-on-disk 방식의 마멸실험으로 구한 AISI 1020 마멸계수 값은 축대칭 압축공정 해석에 적용 결과 적합하였으나, AISI 304SS의 경우는 적합치 않음을 알 수 있다.

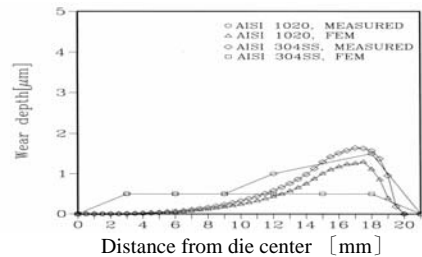


Fig. 3. Comparison of wear profiles between the experimental measured and the analytical simulated after upsetting process

4. 결론

본 연구에서는 금속성형공정시 발생하는 금형의 마멸현상을 관찰하고, 마멸계수를 구하기 위하여 마멸실험을 수행하였다. 또한 Archard의 마멸모델을 적분형태로 나타내어 적용시 마멸계수는 마멸실험에서 구한 값을 이용하여 축대칭 압축공정을 유한요소 해석하였으며, 해석으로 구한 금형의 마멸깊이와 실험으로 측정된 마멸깊이를 비교 분석하였다. 이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다이표면에 나타난 현상은 주로 AISI 1020은 연삭마멸, AISI 304SS는 응착마멸로 pin-on-disk 실험과 동일하게 관찰되었다.
- 2) Archard의 마멸모델로 구한 마멸계수 값은 10^{-6} ~ 10^{-5} 로서 Rabinowicz 등의 연구 결과와 일치하였다.
- 3) 마멸계수 결정을 위한 pin-on-disk 실험은 재질이 유사한 AISI D2와 AISI 1020의 경우에 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 금형의 마멸깊이는 해석결과와 실험치가 AISI 1020 소재는 대체로 잘 일치하였으나, AISI 304SS 소재는 일치하지 않았다. 따라서 AISI 304SS는 마멸계수 계산시 pin-on-disk 방식으로 적용 곤란함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) DIN 50320, Verschlei β -Begriffe, Systemanalyse von Verschlei β vorgangen, Gleiderung des Verschlei β gebietes, 1979.
- 2) R. Holm, Electric contacts, Almqvist and Wiksells, Stockholm, p. 203, 1946.
- 3) J. F. Archard, "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces", J. of Appl. Phys., Vol. 24, p. 981, 1953.
- 4) J. F. Archard, W. Hirst, The wear of Metals under Lubricated Conditions. Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Vol. 236, p. 397 ~ 410, 1956.