

# 마멸모델을 이용한 금형마멸 예측에 관한 연구

박종남<sup>†</sup>

국방기술품질원

## A Study on the Prediction of Die Wear using Wear Model

Jong-Nam Park<sup>†</sup>

Defense Agency for Technology and Quality

**Abstract :** During the cold forming, due to high working pressure acting on the die surface, failure mechanics must be considered before die design. One of the main reasons of die failure in industrial application of metal forming technologies is wear. The mechanisms of wear are consisted of adhesion, abrasion, erosion and so on. Die wear affects the tolerances of formed parts, metal flow, and costs of process. The only way to control these failures is to develop a prediction method on die wear suitable in the design state in order to optimize the process. The wear system is used to analyse 'operating variables' and 'system structure'. In this study, with AISI D2, AISI 1020, AISI 304SS materials, a series of the wear experiments of pin-on-disk type to obtain the wear coefficients from Archard's wear model and the upsetting processes are carried out to observe the wear phenomenon during the cold forming process. The analysis of upsetting processes are performed by the rigid-plastic finite element method. The result of the analysis is used to investigate the die wear the processes, and the analysis simulated die wear profiles are compared with the experimental measured die wear profiles.

**Key Words :** die wear, wear system, pin-on-disk, wear coefficients, upsetting processes

### 1. 서 론

접촉되어 움직이는 물체는 반드시 마찰(friction)로 인해 마멸현상(upsetting processes)이 뒤따른다. 마멸이란 기계적인 원인, 예를 들면 고정되어 있는 상대물체와의 접촉, 혹은 상관된 움직임에 의해 고정된 물체의 표면으로부터 물질의 손실이 생기는것을 말한다<sup>1)</sup>. 이와 같은 현상을 메카니즘적으로 표현하면 두 금속이 미끄럼운동을 할때 마멸 표면에서 두 개의 돌출부분이 접합을 형성하게 되고 이중 약한부분이 표면으로부터 분리되는 이론이다.

이러한 이론하에 Holm<sup>2)</sup>은 전기접촉 실험을 통해 수직하중하에서 미끄럼거리를 경과하면 경도를 갖

는 표면으로부터 체적이 마멸된다는 최초의 마멸이론을 발표했다. Archard<sup>3)</sup>는 응착마멸기구(adhesion wear mechanism)를 공식화시킨 마멸방정식에 마멸계수를 도입했다. 또한 Archard 외<sup>4)</sup>가 금속간 마찰 실험을 통하여 부드러운 소재의 미세입자는 마멸과 정중 상대소재에 응착된다는 마멸응착이론(adhesion theory)을 발표하면서 마멸현상에 대한 연구가 크게 진전되었다.

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

<sup>†</sup> 국방기술품질원  
njp3836@chol.net  
접수 : 2012. 10. 17. 채택 : 2013. 01. 18.

행하여졌으나, 최근들어 금속성형분야에서 금형 및 제품 소재의 고급화와 다양화로 단조작업시 발생하는 금형의 마멸현상에 대한 연구와 정량적인 해석이 필요하게 되었다.

## 2. 이론적 접근

### 2.1. 마멸 기구

마멸은 서로 미끄러짐 되는 두면의 표면에서 서서히 미소부분이 제거되는 감량현상이며, 하중작용 시 기존의 접촉점들은 새로운 미세접촉점들의 생성보다도 더욱 급속히 마멸되고 결과적으로 하중 증가에 따라 수많은 접촉점들은 감소되므로 실 접촉면적은 하중에 비례하게 된다. 이때 접촉점에서 소재는 소성적으로 유동하며, 탄·소성변형 때문에 강한 결합부가 형성된다. 이와 같이 고체표면으로부터 분리되는 소재는 3가지 형태로 이루어지며, 열적 용융(thermal melting), 화학적 용융, 표면으로부터 원자들의 물리적 분리(physical separation of atoms) 등이 그것이다<sup>5)</sup>.

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 미끄러짐 표면에는 약간의 윤활이 존재하기 때문이다. 이와 같은 형태의 금속표면은 초기 미끄러짐작용 시 마찰계수가 0.1~0.3이며, 계속해서 작용이 되면 마찰계수는 더욱 높아진다.

마멸발생 원인에 대해서는 Eyre<sup>6)</sup>는 연삭마멸이 58%로, Rabinowicz<sup>7)</sup>는 응착마멸이 45%로 가장 높다고 주장했다. 그러나 명백한 사실은 이러한 마멸현상이 한 가지 형태로 발생하는 경우는 드물며, 주로 복합작용으로 발생한다는 것이다. 따라서 마멸기구를 알기 위해서는 마찰면에서 발생하는 메카니즘을 정확히 이해하는 것이 중요하다.

### 2.2. 마멸 이론식

금속간의 미끄러움동 시 발생하는 마멸에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 그리고 접촉면 거칠기 등의 접촉상태와 금형재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄러움길이, 윤활조건 등에 의해 결정 된다<sup>8)</sup>. 이들은 미끄러움동 전 인위적으로 주어지는 조건에 따라 마멸현상에 큰 영향

을 미치므로 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 마멸모형<sup>3)</sup>이며, 그 개요는 다음과 같다.

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

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

반경 r의 응착부 1개가 수직하중의 일부  $\Delta L$ 를 받아들였다고 생각하면  $\alpha_y$ 을 금속표면의 항복응력으로 했을 경우 식 (2)로 표현 가능하다

$$\Delta L = \alpha_y \Delta A \quad \dots\dots\dots (2)$$

위 식 (1), (2)로부터 식 (3)을 구할 수 있다.

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

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

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

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.

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

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

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

여기서  $\delta d$ 는  $\delta t$ 동안 발생한 마멸깊이이며, k는 마멸계수, p는 접촉면에서의 수직압력,  $\ell$ 은 접촉면에서

의 미끄럼길이, 그리고  $h$ 는 금형의 경도이다. 이 식 (6)이 의미하는 것은 수직압력이 클수록, 미끄럼거리가 길수록 마멸깊이는 증가하며, 또한 경도  $h$ 가 큰 값일수록, 즉 단단한 소재일수록 마멸되는 깊이는 적다는 것이다.

### 2.3. 마멸 해석 접근방법

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, 미끄럼 되는 소재의 금속성질과 인자들 사이에서의 상호작용 등으로 발생하는 소재의 금속성질, 미끄럼면의 거칠기, 미끄럼상태, 마찰 및 마멸기구, 윤활조건 등을 시스템 구조(system structure)로 분석한 후, 최종적으로 작업변수와 시스템 구조의 함수로 마멸특성을 평가한다<sup>1)</sup>. 이를 간단히 표현하면 Fig. 1 과 같다.

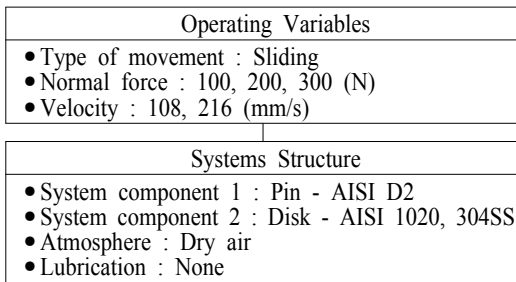


Fig. 1. System model for pin-on-disk experiment

## 3. 마멸 실험 및 축대칭 압축실험

### 3.1. 마멸 실험장치 및 실험조건

실험장치는 pin-on-disk 방식의 마멸실험기(모델명: TE92 Base Unit, England)를 이용하여 마멸실험하였다. 실험장치는 Fig. 2와 같이 주 시험장치, 압축기, 퍼스널컴퓨터 등으로 구성되며, 주 시험장치는 pin-on-disk 구성부, 전기로를 이용한 가온시스템 부로 이루어져 있다.

Pin-on-disk 마멸 실험에 사용된 핀 소재는 AISI D2로 담금질 및 뜨임처리를 하였고, 디스크 소재는 AISI 1020, AISI 304SS 두 종류로서 원 소재상태이며 각각의 화학성분, 경도는 Table 1과 같다. 핀 및

디스크의 표면거칠기는 각각 0.4Ra 이하, 0.02~0.56

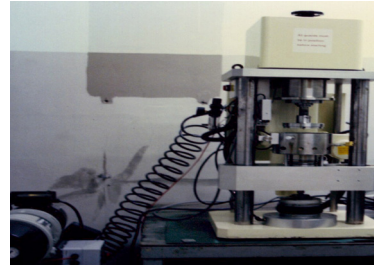


Fig. 2. Wear experimental set-up

Ra로 가공하였으며, 실험시 상대소재와 마찰되는 면은 길이방향으로 가공하였다. 핀의 거칠기 조건은 거친상태와 매끄러운 상태로 하였다. 핀과 디스크의 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1. The chemical compositions(%) of die and specimens

| Type        | Parts                  | Hardness                  | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo   | W    | V    |
|-------------|------------------------|---------------------------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
| Pin-on-disk | Pin (D2)               | 610 (H <sub>B</sub> )     | 0.93 | 0.07 | 0.27 | 0.016 | 0.015 | 0.29 | 3.90  | 4.62 | 6.09 | 1.72 |
|             | Disk (1020)            | 53.5 (H <sub>R</sub> 15N) | 0.22 | 0.26 | 0.49 | 0.010 | 0.010 | -    | -     | -    | -    | -    |
|             | Disk (304SS)           | 62.0 (H <sub>R</sub> 15N) | 0.04 | 0.38 | 1.08 | 0.023 | 0.016 | 8.15 | 18.18 | -    | -    | -    |
| Upsetting   | Die (D2)               | 638 (H <sub>B</sub> )     | 0.98 | 0.06 | 0.32 | 0.010 | 0.016 | 0.25 | 4.20  | 4.52 | 6.12 | 1.68 |
|             | Cylinder, Ring (1020)  | 53.5 (H <sub>R</sub> 15N) | 0.25 | 0.20 | 0.48 | 0.011 | 0.011 | -    | -     | -    | -    | -    |
|             | Cylinder, Ring (304SS) | 66.0 (H <sub>R</sub> 15N) | 0.08 | 0.44 | 1.17 | 0.027 | 0.030 | 8.25 | 18.60 | -    | -    | -    |

### 3.2. 마멸 실험방법

실험방법은 거친 상태와 매끄러운 상태인 두개의 핀을 한조로 하여 회전하는 시험기 마운트 중심으로부터 반대편 동일위치에 수직으로 끼워서 고정된 디스크 표면에 수직하중을 가해 한 방향만으로 미끄럼운동을 주었다. 이때 마찰조건은 비윤활상태이며, 두핀 간 거리는 40.07mm이다.

핀을 고정시킨 마운트의 회전부하속도 및 하중변

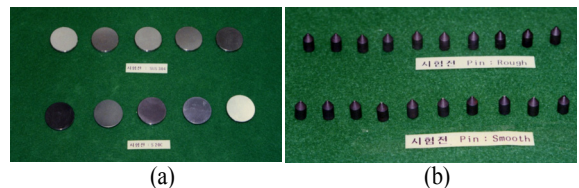


Fig. 3. Shape of wear specimens((a) Disks (b) Pins,)

화는 1, 2, 3차 단계별로 값을 입력 변환하여 적용하였다. 1단계는 초기속도 및 회전수가 'zero'인 정부하 상태이며, 2단계는 동부하상태로 미끄럼운동이 작용하여 마멸이 발생하는 실행단계, 3단계는 작업이 끝나는 종료단계로 구성된다.

실험속도는 108, 216mm/s로 하여 각 속도에 대해 하중을 100, 200, 300N로 증가시키며 실험하였으며, 각 시편의 미끄럼운동 시간은 2분으로 하였다.

이상의 실험을 통하여 마찰계수  $\mu$ 는 마멸시험기에서 출력된 데이터를 이용하고, 마멸계수는 Archard의 마멸모델을 적용하여 산출하였다. 또한 마멸실험 후 마멸면의 미시적 관찰을 위하여 OM(Optical Micrographic) 및 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하였다.

### 3.3. 축대칭 압축실험 및 실험조건

축대칭 압축실험을 위한 실험장치는 Fig. 4와 같이 300톤 유압프레스를 사용하였다. 상·하부 금형 소재는 pin-on-disk 마멸실험에 사용된 핀 재질과 동일한 AISI D2이며, 열처리는 담금질과 뜨임처리를, 화학성분 및 경도 및 열처리조건은 Table 1과 같다.

상·하부 금형의 표면거칠기는 각각 0.07~0.28 Ra, 0.59Ra로 나타났다.

압축실험용 시편인 링과 실린더는 마멸실험 시편인 디스크 재질과 동일한 AISI 1020, AISI 304SS로서 원 소재상태로 사용하였다. 화학성분 및 경도치는 Table 1과 같다. 상·하부 금형과 직접 접촉되는 시편 양쪽면을 금형표면과 동일하게 연마 가공하였으며, 표면거칠기는 0.10~ 0.35Ra이다. 특히 링 시편의 치수는 외경, 내경, 높이의 비율을 각각 6:3:2 크기로 하였다.

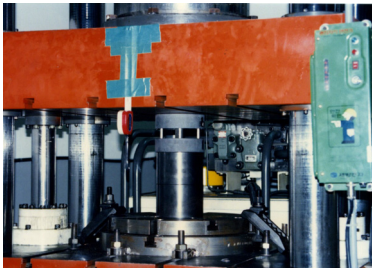


Fig. 4. Set-up for upsetting experiment

### 3.4. 축대칭 압축실험 방법

축대칭 압축실험은 먼저 재료상수를 결정하기 위한 실험이며, 상부금형용으로 제작한 동일한 금형 2

개를 상·하부로 구성하여 비윤활상태로 실시하였다. 실험은 AISI 1020 시편 6개, AISI 304SS 시편 6개 모두 12개를 각각 1회씩 펀치 거리량을 증가시키면서 압축 실험하였다.

실린더 압축실험은 링 실험방법과 동일하나, 하부금형은 돌기 있는 금형으로 계속 사용하였으며, 작용된 펀치거리는 시편 높이의 약 50%로 일정하게 압축하였다.

실린더 압축실험 후 상부금형 표면의 마멸깊이는 실험 전 측정지점과 동일하게 측정하여 데이터를 얻었으며, 이 데이터 측정 결과는 유한요소 해석한 마멸 깊이와 비교 분석하여 일치성 여부를 판단하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1. 축대칭 압축공정의 마멸해석

Archard의 식 (6)으로부터 마멸계수  $k$ 와 금형의 경도  $h$ 가 압축공정에 일정하다고 가정하고, 증분해석에 적용하기 위하여 금형에 작용하는 압력  $p$ 와 미끄럼길이  $\ell$ 은 공정의 진행과 함께 변하므로 식 (6)을 적분형태로 나타내면 마멸깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d = k/3h \int_{t_0}^{t_{tot}} \delta n \Delta v dt \quad \text{on} \quad \partial \Omega^{tool} \dots\dots\dots (7)$$

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

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

여기서,  $\Delta t$ 는 증분시간이다.

마멸계수  $k$ 는 축대칭 압축실험으로는 구할 수 없으므로 pin-on-disk 실험으로 구한 데이터를 이용하여 AISI 1020은  $9 \times 10^{-6}$ , AISI 304SS는  $7.6 \times 10^{-6}$ 으로 가정하였으며, 금형의 경도는 638( $H_B$ )로 하여 마멸 해석하였다.

Table 3은 실린더의 실험전·후 치수를 나타내었고, Table 4는 pin-on-disk 실험으로 구한  $k$ 값 등을 구하였다.

**Table 3.** Dimension for cylinder upsetting experiment

| Material | Before experiment(mm) |        | After experiment(mm) |        | Punch Stroke (mm) |
|----------|-----------------------|--------|----------------------|--------|-------------------|
|          | Outer dia.            | Height | Outer dia.           | Height |                   |
| 1020     | 30.029                | 30.001 | 42.215               | 16.075 | 13.93             |
| 304SS    | 29.982                | 30.073 | 41.743               | 16.640 | 13.43             |

**Table 4.** Friction and wear coeff. through wear experiment of pin-on-disk

| Pin rough-ness | Disk mat. | Vel. (mm/s) | Load (N) | Pin wear depth (μm) | Mean friction coeff. (μ) | Wear coeff. (k)      |
|----------------|-----------|-------------|----------|---------------------|--------------------------|----------------------|
| Rough          | 1020      | 108         | 100      | 1.00                | 0.31                     | $2.1 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | 5.00                | 0.33                     | $4.7 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 300      | 8.00                | 0.44                     | $6.4 \times 10^{-5}$ |
|                |           | 216         | 100      | 12.00               | 0.10                     | $2.9 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | 14.00               | 0.42                     | $6.2 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 300      | 19.00               | 0.52                     | $6.8 \times 10^{-6}$ |
|                | 304SS     | 108         | 100      | 5.00                | 0.11                     | $7.6 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | (-2.00)             | 0.36                     | -                    |
|                |           |             | 300      | (-2.00)             | 0.17                     | -                    |
|                |           | 216         | 100      | 30.00               | 0.15                     | $2.9 \times 10^{-5}$ |
|                |           |             | 200      | (-2.00)             | 0.38                     | -                    |
|                |           |             | 300      | (-10.0)             | 0.35                     | -                    |
| Smooth         | 1020      | 108         | 100      | 2.00                | 0.31                     | $4.4 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | 10.00               | 0.33                     | $8.7 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 300      | 10.00               | 0.44                     | $8.9 \times 10^{-6}$ |
|                |           | 216         | 100      | 5.00                | 0.10                     | $5.7 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | 14.00               | 0.42                     | $8.2 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 300      | 25.00               | 0.52                     | $9.0 \times 10^{-6}$ |
|                | 304SS     | 108         | 100      | 3.00                | 0.11                     | $4.7 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | 2.00                | 0.36                     | $1.6 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 300      | (-5.00)             | 0.17                     | -                    |
|                |           | 216         | 100      | 5.00                | 0.15                     | $4.8 \times 10^{-6}$ |
|                |           |             | 200      | (-3.00)             | 0.38                     | -                    |
|                |           |             | 300      | (-5.00)             | 0.35                     | -                    |

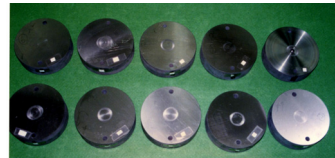
**4.2. 금형의 마멸깊이 측정 및 마멸현상 관찰**

각 금형표면에 나타난 마멸깊이는 실험전과 동일한 방법으로 측정한 결과 AISI 1020의 경우는 약 0.5~1.5μm, AISI 304SS의 경우 약 0.1~1.5μm로서 두 소재 모두 최대 마멸깊이가 유사하게 발생되었다. Fig. 5는 실험후의 금형 마멸현상을 보여주고 있다.

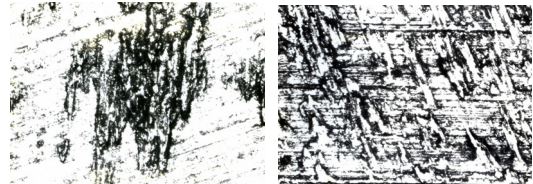
마멸된 금형표면을 육안 관찰 결과, AISI 1020은 마멸자국이 대체로 뚜렷하고 균일한 원형으로 나타났으나, AISI 304SS는 AISI 1020에 비해 마멸현상은 유사하나 더욱 뚜렷한 마멸흔적이 나타났다.

Fig. 6(a), (b)는 마멸량이 최대치인 금형표면의 외곽부위를 금속현미경으로 관찰한 사진이다. Fig.

6(a)는 마찰 및 마멸흔적이 얇고 주로 연삭마멸이 발생하였으며 비교적 깨끗한 마멸면을 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 마찰 및 마멸흔적이 거의 모든 표면에 발생하여 주로 응착마멸이 관찰되었다. 이는 소재가 압축작용을 받아 소성변형 시 금형표면에 나타나는 미끄럼거리가 일정하여 이것으로 발생하는 마멸현상도 일정하게 관찰되었다. 이상과 같이 축대칭 압축실험 결과 금형표면에 발생한 마멸현상은 pin-on-disk 마멸실험 결과와 동일하게 관찰되었다.



**Fig. 5.** Die wear's profile of experimental after



(a) (b)

**Fig. 6.** Worn surface of die (OM)

((a) Cylinder AISI 1020 (x 500) (b) Cylinder AISI 304SS (x 500))

**4.3. 금형의 마멸깊이 해석 및 실험결과 분석**

금형의 마멸깊이는 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 0.5μm로 일정하였으며, 실험으로 구한 마멸깊이는 AISI 1020의 경우와 유사한 경향으로 나타나 두 비교치가 일치하지 않았다. 또한 Fig. 7과 같이 응착현상이 금형표면에도 나타나 pin-on-disk 마멸실험과 동일한 마멸현상이 발생하여 AISI 304SS의 마멸계수 값은 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 일치치 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. 또한 소재의 재질이 금형 재질과 유사한 AISI 1020 소재를 사용한 경우에 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치하였으나, 금형재질 성분과 약간 상이한 경우에는 AISI 304SS 소재를 사용한 경우에는 응착현상이 발생되어 두 결과치가 잘 일치하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속성형공정 시 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 마멸깊이

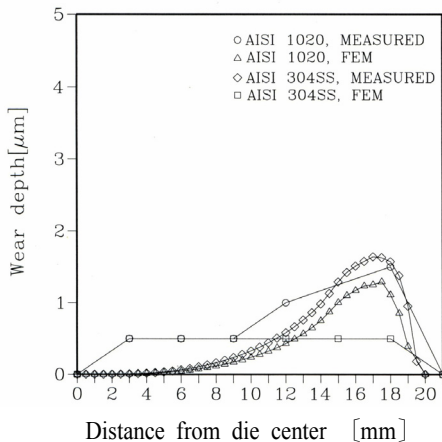


Fig. 7. Comparison of wear profiles between the experimental measured and the analytical simulated after upsetting process

와 실험으로 측정된 마멸깊이를 비교 분석하였다. 이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 금형표면에 나타난 마멸기구는 주로 AISI 1020 소재는 연삭마멸, AISI 304SS 소재는 응착마멸이 발생하여 pin-on-disk 실험과 동일하게 관찰되었다.

- 2) Archard의 마멸모델로 구한 마멸계수 값은  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 로서 Rabinowicz 등의 연구 결과와 일치하였다.
- 3) 마멸계수 결정을 위한 pin-on-disk 실험은 두 접촉금속의 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 계산 시 pin-on-disk 방식으로 적용 곤란함을 알 수 있었다.
- 5) 제시된 기법은 다른 금속성형공정에서 발생하는 금형의 마멸깊이 예측에 적용 가능하다.

#### 참고문헌

- 1) DIN 50320, Verschlei  $\beta$ -Begriffe, Systemanalyse von Verschlei  $\beta$  vorgangen, Gleiderung des Verschlei  $\beta$  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.
- 5) D. Henry, Editor, ASM Handbooks Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, p. 175 ~ 176, 1995.
- 6) T. S. Eyre, Wear Characteristics of metals, Tribology International, 10, p. 203 ~ 212, 1976.
- 7) E. Rabinowicz, Tribology II, Video course Manual, Center for Advanced Engineering study, Cambridge, MA, 1.2 ~ 1.3, 1983.
- 8) Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbooks, 1st ed., Vol. 1, Pergamon Press, Fairview Park, NY, p. 102 ~ 118, 1981.
- 9) Harold L. Gegel, Metal Forming, p. 86, 1983.