

업셋팅 금형의 마모 실험 및 해석

박종남(국방품질연구소), 김태형(부산대학교 대학원),
강범수, 김병민, 최재찬(부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터),
이상용, 이정환(한국기계연구원)

Experimental and Analytical Study on the Die Wear during the Upsetting Processes

J.N.PARK(Defence Quality Assurance Agency), T.H.Kim(Grad. School, Pusan National Univ.)

B.S.KANG, B.M.Kim, J.C.Choi(ERC/NSDM, Pusan National Univ.)

S.Y.LEE, J.H.LEE(KIMM)

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. Die wear affects the tolerances of formed parts, metal flow and costs of process etc. The only way to control these failures is to develop methods which allow prediction of die wear and which are suited to be used in the design state in order to optimize the process. In this paper, the wear experiments to obtain the wear coefficients and the upsetting processes was accomplished to observe the wear phenomenon during the cold forming process. The analysis of upsetting processes was accomplished by the rigid-plastic finite element method. The result from the deformation analysis was used to analyse the die wear during the processes and the predicted die wear profiles were compared with the measured die wear profiles.

Key Words : Die Wear(금형의 마모), Wear Experiment(마모 실험), Upsetting process(업셋팅 공정), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서 론

금속성형공정에서는 금형의 마모, 응력집중 등이 국부적인 영역에서 발생하기 쉽고, 특히 금형의 마모는 제품 치수 불량 의 원인이 되며, 또한 재료유동 및 금형수명에도 영향을 미치기 때문에 실제 현장에서 제품의 정밀도, 금형의 신뢰성 및 경제성을 유지하고 적절한 금형교체시기를 예측하기 위해서는 금형의 마모에 대한 연구가 요구된다. 마모해석을 위해서는 마모진행 과정의 시스템 분석이 우선적으로 요구된다. 시스템분석⁽¹⁾은 먼저 마모에 관련된 시스템의 기술적인 목적을 설정하고, Operating Variables값은 입력 후 마모에 포함된 인자들 즉, 상대적인 소재 및 표면성질과 인자들 사이에서의 상호작용등으로 구성된 System Structure을 분석하고 최종적으로 Operating Variables과 System Structure의 함수로 마모특성을 평가한다. 마모에 관련된 인자들은 Operating Variables와 Systems Structure로 분류 가능하며, Operating Variables는 인위적인 변수인 하중, 속도, 미끄럼길이 등이며, Systems Structure는 소재성질, 접촉면의 거칠기, 접촉상태, 마찰 및 마모구조, 윤활조건 등을 내포한다. 두 금속이 접촉되어 미끄럼작용시 발생하는 마모특성은 작용되는 하중과 속도, 소재의 기계적·화학적 성질, 표면상태, 접촉조건 등에 따라 크게 달라진다. 그러므로 위와 같은 인자들의 변화에 따른 실험적 마모해석의 토대하에 해석적인 접근이 중요하다고 할 수 있다. 금속 성형 공정에서 금형의 마모에 관한 연구는 공정 중 공구와 소재간의 접촉면에 대한 정보와 윤활계의 역할에 관한 정보 등을 정확하게 예측하기가 어렵기 때문에 비교적 최근에 단순한 공정에서 실험적으로 금형의 마모를 계산, 실험하려는 시도가 행해져 왔다. 마모 현상은 Holm⁽²⁾이 두 물체의 접촉시 표면 원자의 소멸이라고 제안하였으며, 비슷한 시기에 Archard⁽³⁾가 두 접촉 물체 표면의 미세 돌기들(asperities)의 접촉을 고려하여 미세 돌

기의 붕괴를 마모 현상이라고 제안하였다. Liou와 Hsiao⁽⁴⁾는 고속 열간 업셋팅 공정에서 금형의 온도에 따른 경도를 변수로 고려하여 금형의 마모량을 계산하였다. Hansen과 Bay⁽⁵⁾는 Archard의 마모 모델을 이용하여 업셋팅 공정에서 금형의 마모량을 계산하였으며 금형 표면 거칠기가 커질수록 소재와의 미끄럼 길이가 감소하므로 금형의 마모량이 줄어든다고 제시하였다. Doege 등⁽⁶⁾은 금형의 마모 계산시 용착마모 이론 적용의 타당성을 실험적으로 입증하였다. Rooks 등⁽⁷⁾은 초기 금형 속도와 온도를 9.15m/s, 300℃로, 초기 소재의 온도를 1000℃로 각각 설정하여 고속 열간 업셋팅 실험을 수행하였으며, 그들은 금형 마모에 영향을 미치는 주인자는 금형-소재간의 상대 속도임을 입증하였다. Ali 등⁽⁸⁾은 금형의 부식 마모 현상을 해석하였으며 금형의 부식 마모는 금형과 소재간의 윤활 상태, 접촉 시간에 영향을 받는다고 지적하였다. Miles 등⁽⁹⁾은 열간 단조 공정에서 금형의 속도가 증가할수록 관성력이 금형의 마모에 큰 영향을 준다고 지적하였다. Tronel과 Chenot⁽¹⁰⁾은 반구형 펀치로 사각블럭을 압입할 때 발생하는 펀치의 마모를 유한요소 해석결과를 이용하여 예측하였다. 최근 Kim⁽¹¹⁾ 등은 선재인발공정에서 금형에 발생하는 온도를 고려하여 금형의 마모를 계산하였다. 그러나 금형의 마모해석에 가장 중요한 요소인 마모계수의 측정에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 단조공정에서 발생하는 금형의 마모 현상을 관찰하고 해석하기 위하여 먼저 Archard의 마모모델을 이용하여 pin-on-disc 방식의 마모실험으로 마모계수를 측정하였으며 실험으로 구한 마모계수를 이용하여 단조금형의 마모현상을 예측하였다. 이론해석결과와 타당성을 검증하기 위하여 업셋팅 실험을 수행하였으며 이론 해석결과와 비교하였다.

2. 마모실험 및 업셋팅 실험

2.1 마모실험장치와 시편의 준비

마모실험장치는 마모시험기(TE92 Base Unit, PLINT Co., England)를 이용하여 Pin-on-disc 방식의 마모실험을 실시하였다. 실험장치는 주시험장치, 압축기, 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며, 주 시험장치는 하부 하중 액츄에이터 구성부, 표준 pin-on-disc 구성부(two/three pin on disc type), 전기로를 이용한 가열시스템부로 되어 있다. 핀 고정방법은 두 개를 1개 조로 한 마운트를 사용하였다. 시편은 핀 및 디스크 2가지로 구성되었으며 핀은 AISI D2로서 담금질 및 뜨임처리를 하였다. 화학성분은 Table 1, 경도 및 열처리조건은 Table 2와 같다. 가공은 0.4Ra 이하로 가공가능한 공구연막기로 가공하였으며, 실험시 마찰되는 면은 길이 방향으로 절삭시켰다. 핀의 거칠기를 두가지 종류로 변화시켰으며 Rough상태는 열처리가 된 표면상태 그대로 하였고 Soft상태는 Rough상태에서 사포(#2000)로 문질러 사용하였다. 디스크는 AISI 1020 및 AISI 304SS 두 종류로 하였다. 시편은 열처리가 되지 않은 소재상태이며, 화학성분 및 경도치는 Table 1, 2 와 같다. 표면가공은 평면연막기로 길이방향으로 가공하였다. 실험방법은 두개의 핀(Soft, Rough)을 1개조로 하여 시험기 마운트에 수직으로 끼워서 수직 방향으로 디스크 표면에 비운활상태로 Slidig운동을 주었다. 두 핀간의 거리는 40.07mm이다. 마모량의 측정은 실험전 핀의 길이와 무게는 마이크로미터와 전자저울(Electronic Balance, Japan, 측정능력 : 0.1mg)을 이용하여 측정하였으며, 실험 후 마모분말을 털어내고 아세톤으로 깨끗이 세척 후 동일한 측정방법으로 데이터를 얻었다. 실험에 사용된 프로그램은 마모시험기 자체 입력된 Plint Program을 사용하였으며, 핀을 고정시킨 마운트의 회전부하속도 및 하중변화는 1, 2, 3차 단계별로 값을 입력 변환하여 적용하였다. 이와 같이 단계별로 작업공정을 분류한 목적은 경하고 뾰족한 핀이 일정한 거리만큼 떨어진 연한 디

스크 표면상에 순간 최대 300N의 수직하중이 작용했을 때 흠집이 발생되어 원활한 미끄럼 작용이 되지 않고 또한 알고자 하는 핀의 마찰표면에는 크고 작은 손상이 발생되므로 이를 방지하기 위함이다. 따라서 초기 Speed 및 회전수를 'Zero' 상태로 하여 하중을 서서히 증가시켜 디스크 표면의 손상을 최소화시키면서 실험하였다.

실험속도는 108, 216mm/sec 2가지로서 각각 하중을 100, 200, 300N 로 증가시켜 가며 핀의 접촉부위 거칠기를 Rough, Soft 상태로 하여 시험하였으며, 각 미끄럼운동 시간을 120초로 하였다. 본 마모실험 시스템 구성모델을 개략적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

2.2 실험결과 및 마모계수의 결정

핀 마찰부위에 대해 SEM 관찰 결과 AISI 1020, AISI 304SS 모두 하중이 증가할수록 그리고 동일한 하중에서 속도가 증가할수록 핀 표면에 나타난 마찰흔적은 현저하게 더 크고 넓게 분포되었다. AISI 1020에 미끄럼 운동시킨 핀 표면은 거칠기가 Soft, Rough상태 모두 전체 표면적에 대해 넓은 분포로 그리고 하중이 증가할때 응착이 얇은 상태로 마찰흔적이 나타나 있으며, 이 흔적은 디스크에서 마모된 입자가 핀 표면에 재응착되어 마찰되는 경향이 적은 것으로 확인되었으며 응착현상이 적은만큼 마찰 표면상태는 거친 상태이다. 상대적으로 AISI 304SS에 대한 핀 표면은 마찰부위가 AISI 1020보다 적은 범위로 나타났다. 이는 핀 표면에 초기 응착된 부위로 계속해서 반복 마찰됨에 따라 결국 그 흔적이 3~4 겹 이상 겹친 상태로 마찰이 계속됨으로 Pin전체 표면적에 대한 마찰부위는 적게 나타났으며 응착현상이 증가할수록 마찰 표면상태는 매끄러운 상태이다. 또한 미끄럼운동으로 인해 마모현상이 두드러진 표면을 관찰 및 성분 분석결과 AISI 1020 경우는 SEM 사진을 통해서 확인한 바와 같이 일반적으로 거친 상태이며, 속도 및

하중이 낮은 조건하에서는 거친면을 나타내지만 속도 및 하중이 증가할수록 핀 표면에 디스크 소재입자가 일부 응착됨을 보였다. 핀 표면에 응착된 성분을 확인하기 위해 EDX분석을 하였으며 그 결과 핀 재질인 STD11종의 주요 함량성분인 W, Mo, Cr, V 등이 주로 검출되었고 두 재료의 공통 원소인 Si, Mn 등은 나타나지 않았거나 소량 함유되었다. 이러한 현상으로 미루어 볼때 AISI 1020소재입자가 핀 표면에 응착되었는지는 성분분석으로는 정확하게 판단할 수 없었다. AISI 304SS 경우는 속도 및 하중이 증가할수록 겹친 층이 증가하였으며 응착현상이 두드러지게 나타났다. 응착부위에 대한 EDX분석결과 STD11종에 가장 많은 함량을 가진 W, Mo 성분은 전혀 나타나지 않았고 AISI 304SS의 주요 성분인 Cr 과 Ni이 가장 높게 나타났다. 이것은 핀 응착부위는 AISI 304SS입자로 주로 덮여있는 상태이며, 더욱이 속도와 하중이 적은 경우에서도 이 같은 현상이 나타난 것으로 보아 AISI 304SS는 쉽게 마모되며 마모입자는 상대 재료에 응착되어 반복 마찰작용을 받게 됨을 확인할 수 있었다.

따라서 마찰로 인한 내마모성은 소재경도에 따라 큰 차이를 보이나 동일경도 조건하에서는 탄소함량이 많은 소재가 적게 함유된 소재보다 내마모성이 훨씬 더 좋을 것을 관찰할 수 있었다. 거칠기가 서로 다른 두개의 핀이 고정된 디스크 표면에 미끄럼운동 작용시 마찰계수 값은 디스크 소재가 AISI 1020인 경우는 동일속도하에서 하중의 증가시 그 값도 증가하였으며, AISI 304SS인 경우는 동일속도에서 하중의 증가에 따라 마찰계수가 증가하다 다시 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 SEM분석결과와 같이 디스크의 재질이 AISI 304SS의 경우 하중이 큰 상태에서 응착부위가 계속적으로 마찰작용을 받아 표면이 다소 매끄러운 상태로 되는 반면 AISI 1020의 경우는 하중은 증가되지만 응착현상이 적게 발생하므로 상대적으로 새로운 면에 마

찰이 발생되기 때문에 마찰계수는 증가하는 것으로 분석된다.

평균 마찰계수값은 디스크의 재질이 AISI 304SS인 경우 0.11~0.38으로 나타났으며 AISI 1020의 경우는 0.12~0.68로 다소 높게 나타났다. 이러한 현상은 미끄럼작용으로 발생하는 마찰면이 AISI 1020의 경우보다 AISI 304SS가 더 매끄러운 표면을 유지하는 현상 때문으로 판단될 수 있다. 미끄럼운동을 하는 두 물체의 마찰계수는 하중이 가해지면서 상대운동이 발생함에 따라 표면 거칠기가 달라지므로 하중상태와 접촉소재의 종류에 따라 그 값의 크기가 다르게 나타난다⁽¹²⁾. 실험결과로부터 동일 소재일수록 마찰계수가 크며, 서로 상이한 소재일수록 마찰계수가 적다는 이론과 일치함을 확인 할 수 있었다⁽¹²⁾. 마모계수는 Archard의 마모모델을 이용하여 계산하였으며 그 값은 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 정도의 범위이다. 핀의 거칠기 변화와 속도 및 하중 증가에 따른 마모계수는 일정한 변화를 보이지 않았고 불규칙적으로 나타났다. 그러나 AISI 1020, AISI 304SS 모두 Soft, Rough 상태에서 속도 216mm/s, 하중 100N에서 마모계수값이 최대로 나타났다. 이러한 현상은 마찰계수가 낮을수록 마모계수가 더 크다는 기존 연구 결과⁽⁵⁾와도 일치됨을 알 수 있었다. 핀의 마모깊이가 (-)인 값은 핀 표면에 디스크 입자가 응착되어 길이가 증가한 것을 의미하며, 궁극적으로 초기 마찰과정중에 핀이 미세적으로 마모되었다 하더라도 어느 시점에서 응착되기 시작함을 알 수 있었다. 이러한 응착현상은 속도분포 및 표면 거칠기에 관계없이 AISI 304SS 소재에서 하중 200, 300N에서 주로 나타났으며 SEM 관찰에서도 입증되었다. 반면 AISI 1020에서 나타난 (-) 값은 하중 및 속도 등에 의한 영향으로는 판단키 어려우며 환경적인 조건 및 산화막이나 오염막등이 흡착되어 이로 인한 윤활 역할로 인해 핀 표면에 응착현상이 발생된 것으로 추정 된다. 따라서 AISI 1020경우는 동일한 속도, 하중조건 하

에서 핀 거칠기가 Rough, Soft 상태 모두 값이 거의 같으므로 핀 거칠기에 따른 마모계수의 변화는 무시할 수 있었다. AISI 304SS의 경우는 약 50%이상의 조건에서 마모계수를 계산할 수 없으므로 거칠기에 따른 마모계수값 분포를 비교하기 어려운 상황이나 거칠기가 Rough한 상태가 Soft한 상태보다 속도 및 하중 증가시 더욱 큰 값으로 나타났다. 이상과 같이 낮은 속도의 경우 Pin거칠기 변화에 따라 마모계수는 큰 영향이 없으나 속도가 증가할수록 Pin의 거칠기 변화에 따른 마모계수의 변화가 큼을 볼 수 있었다.

2.3 업셋팅실험 및 금형 마모형상 측정

재료상수를 결정하기 위하여 링업셋팅 실험을 수행하였다. 재료를 강소성재료로 가정하였으며 링업셋팅 실험으로 구한 응력과 변형률의 관계를 아래식과 같이 정의하였다.

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

여기서 재료상수 C, n을 결정하기 위하여 마모실험에서와 같은 조건하에서의 AISI 1020, AISI 304SS에 대하여 링압축실험을 수행하였으며 Osakada가 제시한 방법⁽¹³⁾으로 Table 3과 같은 재료상수를 구하였다.

실제 단조공정에서 발생하는 금형의 마모현상을 관찰하기 위하여 소재를 각각 AISI 1020, AISI 304SS으로 금형을 AISI D2를 이용하여 업셋팅실험을 수행하였으며, 반복 공정에 따른 금형의 마모량 변화를 동시에 관찰하기 위하여 업셋팅실험을 각각의 재료에 대해 1,3,5회 수행하였다. 금형과 소재간의 중심을 맞추기 위해 금형은 Fig. 2과 같이 제작하였으며 업셋팅용 재료의 하부도 Fig. 3와 같이 제작하였다. 상부 금형의 마모량 측정은 3차원 측정기()를 이용하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 금형의 마모 해석

3.1 마모 모델

금속과 금속의 접촉시 마모에 관계된 인자들은 접촉면의 온도, 접촉돌기의 분포, 접촉면의 거칠기 등의 접촉상태와, 금형재료의 경도, 금형에 작용하는 수직압력, 미끄럼길이, 윤활조건 등에 의해 결정된다⁽¹⁰⁾.

금형의 마모 계산에는 Archard의 마모 모델⁽³⁾을 적용하였으며 그는 두 물체의 접촉시 마모 깊이는 아래와 같다고 제안하였다.

$$\delta d = \frac{kPL}{3h} \quad (2)$$

여기서 δd 는 δt 동안 발생한 마모 깊이이며, k는 마모 계수, P는 접촉면에서의 수직 압력, L은 접촉면에서의 미끄럼 길이, h는 금형의 경도이다.

위의 식(2)에서 마모 계수와 금형의 경도가 공정 중에서 일정하다고 가정하고 증분 해석에 적용하기 위하여 적분 형태로 표현하면 마모 깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d = \frac{k}{3h} \int_0^{T_{tot}} \sigma_n \Delta v dt \text{ on } \partial \Omega^{tool} \quad (3)$$

식(3)에서 σ_n 은 금형 면에 작용하는 수직응력, Δv 는 금형과 소재간의 접촉면에서 미끄럼 속도, T_{tot} 는 전체 변형 시간이다. 따라서 시간 $t + \Delta t$ 에서의 마모 깊이는 식(3)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta d_{t+\Delta t} = \delta d_t + \frac{k}{3h} [\sigma_n \Delta v] \Delta t \text{ on } \partial \Omega^{tool} \quad (4)$$

여기서 Δt 는 증분 시간이다.

3.2 변형 해석 및 마모 해석

업셋팅공정의 변형해석을 강소성 유한요소해석하였으며 업셋팅실험에서와 동일한 최종편치행정까지 해석하였다. 해석은 1020강에 대해서만 수행하였으며 최종 편치행정에서의 소재내부의 변형을 분포, 속도분포를 Fig. 5에 나타내었으며 측정된 금형의 마모형상과 이론해석으로 구한 금형의 마모형상을 Fig. 4에 비교하였다. 이론해석으로 구한 금형의 마모형상은 실험 후 측정된 금형의 마모형상과 비교적 잘 일치함을

확인 할 수 있었다.

4. 결 론

단조공정에서 발생하는 금형의 마멸현상을 관찰하여 해석적으로 접근하기 위하여 마모실험을 수행하였다. 마모실험으로 구한 마모계수를 이용하여 업셋팅공정을 유한요소해석하였으며 변형해석과 동시에 금형의 마모해석을 수행하였다. 해석으로 구한 금형의 마모형상과 업셋팅 실험에서 발생한 금형의 마모형상을 비교하였으며 그 결과가 비교적 잘 일치함을 확인 할 수 있었다. 제시한 마모해석기법과 마모실험 자료는 다른 공정에서의 금형마모예측에 활용될 수 있다.

Table 1 The chemical compositions(%) of Pin and Disc

성분 재질	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V
D2	.93	.07	0.27	.016	.015	0.29	3.90	4.62	6.09	1.72
1020	.22	.26	0.49	.010	.010	-	-	-	-	-
304SS	.04	.38	1.08	.023	.016	8.15	18.2	-	-	-

Table 2 The hardness and heat treatment condition of Pin and Disc

Matl.	h	Heat treatment
Pin (D2)	517 (H _B)	<ul style="list-style-type: none"> o Preheating: 700°C, 90min. o Quenching: 1020°C, 120min. air cooling o Tempering: 180°C 3hour. air cooling
Disc (1020)	53.5 (15N)	Normalizing
Disc (304SS)	62.0 (15N)	Normalizing

Table 3 Material properties for AISI 1020 and 304SS

Properties Material	C [N/mm ²]	n	m
S20C	1137.2	0.327	0.1
SUS304	1991.5	0.438	0.1

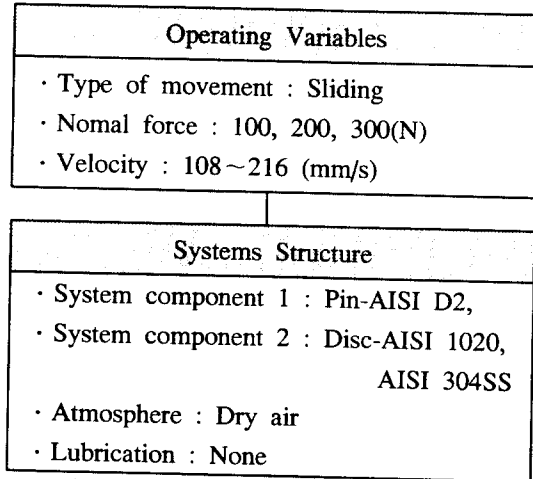


Fig. 1 System model for wear test

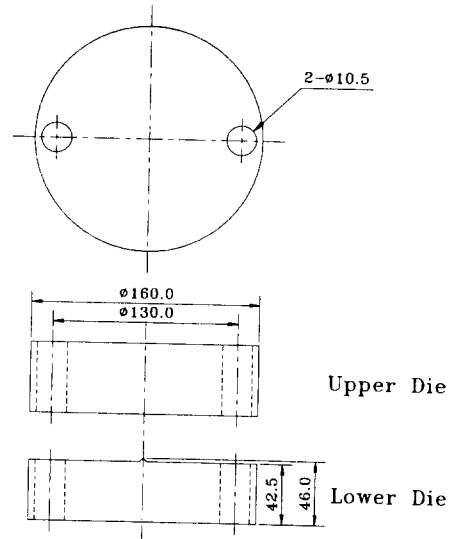


Fig. 2 Dimensions of die for upsetting.

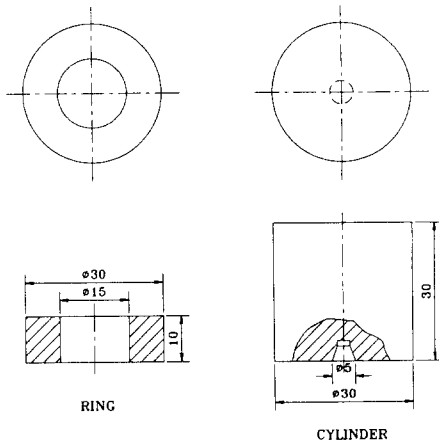


Fig. 3 Dimensions of billets for upsetting.

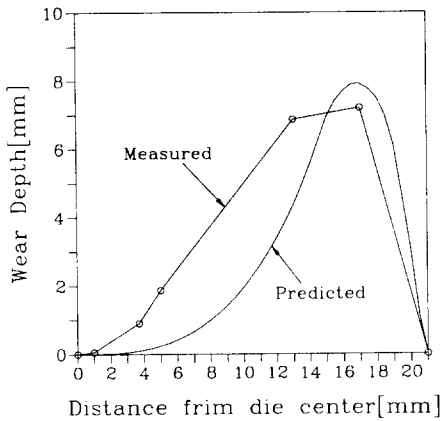


Fig. 4 Comparison of die wear profile between predicted and measured

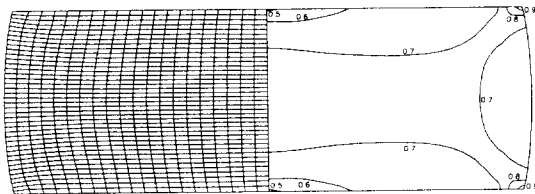


Fig. 5 Grid distortion and distribution of effective strain(AISI 1020, $m=0.1$)

참고문헌

1. DIN 50320, Verschleiß-Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gleiderung des Verschleißgebietes, 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. M.J.Liou, H.S.Hsiao, "Prediction of Die Wear in High Speed Hot Upset Forging", ERC/NSM Report, No. 99~33, OSU, 1989.
5. P.H.Hansen, P.H. Bay, "A Flexible Computer Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp.19~26, 1990.
6. E.Doege, P.Groche, Th.Bobke, "Application of Adhesion Theory to Friction and Wear Processes in Hot Die Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp.27~32, 1990.
7. B.W.Rooks, "The Effect of Die Temperature on Metal Flow and Die Wear During High Speed Hot Forging", Proc. 15th Inter. MTDR Conference, Birmingham, England, No.4, pp.487~495, 1974.
8. S.M.J.Ali, B.W.Rooks, S.A.Tobias, "The Effect of Dwell Time on Die Wear in High Speed Hot Forging", Proc. Inst. Mech. Engrs, vol. 185, p.1171, 1971.
9. M.P.Miles, L.Fourment, J.L.Chenot, "Inertia Effects in Finite Element Simulation of Metal Forming Process", J. of Materials Processing Technology, vol. 45, p.19~24, 1994.
10. Y.Tronel, J.L.Chenot, "Prediction of Tool Wear using Finite Element Software for the Three-Dimensional Simulation of the Hot-Forging Process", J. of Mater. Proc. Tech, Vol. 31, pp.255~263, 1992.
11. 김병민, 조해용, 김태형, "온도상승을 고려한 인발금형의 마모해석", 한국정밀공학회지 제 13권 제 1호, pp.116~122, 1996.
12. E.Rabinowicz, Friction and Wear of Materials 2nd Ed., John Wiley and Sons, 1995.
13. K.Osakada, M.Shiraishi, S.Muraki and M.Tokuoka, "Measurement of flow stress by the ring compression test", JSME, Sers I, Vol. 34, No. 3, pp. 312~318, 1991.