

열연화 현상을 고려한 열간 단조 금형의 마멸해석

이진호* · 김동진** · 김병민*** · 김호관****

(1999년 8월 31일 접수)

Wear Analysis of Hot Forging Die Considering Thermal Softening

J. H. Lee, D. J. Kim, B. M. Kim and H. K. Kim

Abstract

The die wear is one of the main factors affecting product accuracy and die life in hot forging process. It is desired to analyze die wear by developing wear prediction method combined with FE-simulation and experiment. Lots of researches have been done into the wear analysis of cold forging die, and the results of those researches were successful, but there have been little applications to hot forging die giving successful results. That is because hot forging process has many factors influencing die wear, and there was not accurate in-process data. In this research, change of die surface hardness by thermal softening during the lifetime was obtained by experiment, and hardness distribution of cross section was measured. This wear analysis was applied to hot forging die, and gave comparatively good results compared with actual wear profile.

Key words : Wear Analysis, Die Life, FE-Simulation, Hot Forging Die, Thermal Softening

1. 서론

열간단조 공정은 자동차, 산업기계 등의 주요부품을 제조하는 소성가공법의 하나로서, 특히 형상이 복잡한 대형부품제조에 유용하다⁽¹⁾. 열간단조 공정에서 금형은 제조비용, 생산성, 그리고 정밀도에 크게 영향을 미치며, 성형중의 열사이클, 과도한 금속유동 및 금형의 경도저하 등에 의해 냉간단조 등 타 가공법보다 엄한 조건에서 사용되기 때문에 금형수명이 상당히 짧다⁽²⁾.

열간단조용 금형의 수명을 결정하는 주된 요소는 소재와 금형의 접촉면에서 발생하는 금형의 경도저하에 의한 마멸과 열피로에 의해서 생기는 표면에서의 열균열(Heat crack)이다⁽³⁾. 따라서 열간단조 공정에서의 금형수명을 예측하고 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 기존의 마멸해석에 의한 금형의 수명평가는 주로 냉간단조 공정에 적용되어 열간단조 공정에 비하여 상대적으로 정확한 결과를 얻었으나, 열간단조 공정의 경우는 다소 미흡한 실정이다^(4,5,6). 이는 열간단조용 금형에 대한 열처리

* (주)신한금형
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 성밀정형 및 금형가공 연구소
**** 부산·울산 중소기업청

, 표면처리 및 열간 상태에서의 금형의 열연화 및 고온 경도의 변화 등에 대한 충분한 데이터의 확보 없이 열간 단조 금형의 마멸해석에 적용하였기 때문이다. Saiki는 열간단조 금형의 표면코팅층이 금형수명에 미치는 영향에 대한 연구를 하지 않았으며⁽⁴⁾, Kang 등은 고온에서의 정도변화에 대한 부분을 고려하지 않았다⁽⁶⁾. 열간단조 공정이 냉간단조 공정과 구별되는 가장 큰 차이는 작업온도이며, 이 온도에 의해서 금형의 기계적, 금속적인 성질이 영향을 받게 된다⁽⁷⁾. 따라서, 열간단조 공정에서 보다 정확한 금형의 마멸해석을 수행하기 위해서는 유한요소해석과 함께 실제 성형 중에 발생하는 작업온도영역에서의 마멸실험 데이터와 열간 상태에서의 정도변화를 근거로 한 해석이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 열간 상태에서 시간과 온도에 따른 금형의 정도변화를 조사하기 위하여 열간단조 공정에 많이 적용되고 있는 금형재에 대하여 열처리 및 표면처리를 한 다음 열연화시험과 마멸계수 측정시험을 수행하였다. 이들 데이터를 기초로 하여 유한요소해석기법에 의해 예측된 금형의 마멸형상과 실제 열간단조 금형의 마멸분포를 비교하였다.

2. 열간 단조용 금형의 마멸해석

열간단조 공정에서 금형의 마멸을 해석하기 위해서는 열간 상태에서 금형의 마멸과 관련된 물성치의 획득이 필요하다. 기존의 금형의 마멸해석에서 미흡했던 부분은 열간단조용 금형의 마멸해석을 위해서 열간 상태에서의 온도와 시간에 따른 금형의 정도변화 데이터를 확보하지 못한 점이다. 본 연구에서는 열간 상태에서 금형의 정도변화를 파악하기 위해서 열연화 실험을 수행하여 이를 유한요소해석과 병행하여 금형의 마멸을 해석하였다. 이를 위한 구체적인 과정은 Fig.1과 같다. 실제 금형의 마멸분포를 측정하기 위해서 3차원 좌표측정기를 이용하였으며, 금형의 표면처리에 따른 깊이방향의 정도측정실험을 수행하여 마멸의 진행에 따른 깊이방향에 따라 다른 정도의 변화를 고려하였다. 금형에 작용하는 압력 및 온도분포를 파악하기 위해서 상용유한요소 해석프로그램인 DEFORM⁽⁸⁾을 이용하여 성형공정을 해석하였고, 이렇게 유한요소해석을 통하여 얻은 데이터와 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 금형의 마멸해석을 수행하고, 실제금형의 마멸분포와 비교하였다.

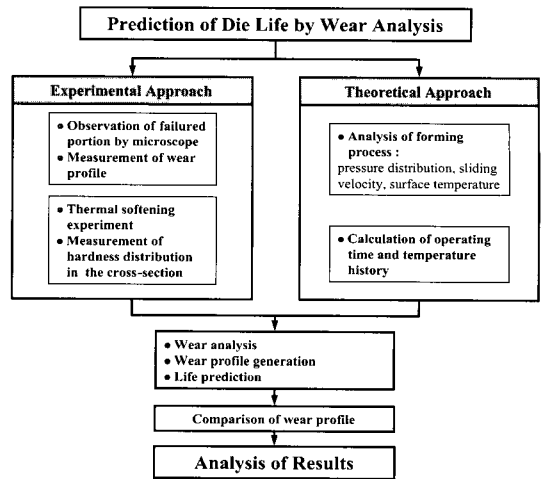


Fig.1 Procedure of wear analysis for hot forging die

2.1 템퍼링 파라미터와 열연화

열간 단조용 금형재료는 고온의 작업환경에 의해서 재료자체가 온도에 의해서 정도의 변화를 받게 되며, 또한 지속시간에 따라서 정도가 감소하는 시간의존성 특성을 나타내는 템퍼링 효과에 의한 열연화도 겪게 된다. 따라서, 고온에 의한 정도의 변화를 평가하기 위해서는 템퍼링 파라미터(Tempering parameter : M)를 도입하여 금형의 열연화 정도를 파악하는 것이 필요하다. 템퍼링 파라미터는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(1)을 통해서 금형재료의 시간과 온도에 따른 정도의 변화를 평가할 수 있다⁽⁴⁾.

$$M = \frac{T \times (C + \log_{10} t)}{1000} \quad (1)$$

식(1)에서 M은 템퍼링 파라미터, T는 절대온도, t는 작업시간, C는 재료에 의한 상수이다. 또 실제 생산에 있어서는 금형은 단조성형에서부터 취출되기까지 온도변화를 겪기 때문에 단조 1사이클 동안의 금형의 온도를 나타내기 위해 상당온도 T_{eq} 를 이용하였다. 상당온도 T_{eq} 는 근사적으로 식(2)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{eq} = \frac{(2T_{max} + T_{min})}{3} \quad (2)$$

식(2)에서 T_{max} 는 온도진폭의 최고온도, T_{min} 는 온도진폭의 최저온도이다⁽⁴⁾.

2.2 마멸해석기법

본 연구에서는 마멸해석에 이미 널리 적용되고 있고, 수치적 접근이 용이한 식(3)과 같은 Archard의 마멸모델^(9,10,11)을 이용하여 금형의 마멸해석을 수행하였다.

$$V = \frac{kPL}{3h} \quad (3)$$

여기서, V 는 마멸체적이고, k 는 재료와의 접촉조건에 의존하는 상수, P 는 접촉하중, L 는 미끄럼 길이, h 는 마멸이 발생하는 상태에서 금형의 표면경도로 정의된다. 실제 단조공정 중에는 하중과 미끄럼 거리가 시간에 따라 변하게 되므로 식(3)을 시간에 따른 중분의 형태로 나타내고 마멸깊이를 예측하기 위해서 식(4)와 같은 형태로 바꿀 필요가 있다. 즉, 원래의 Archard의 마멸 모델식에서 금형과 소재의 접촉면에서의 접촉하중 (P)을 접촉면적으로 나누어 수직응력 σ_n 을 얻을 수 있으며, 접촉면에서의 미끄럼길이(L)를 미끄럼속도 (v_s)와 시간중분(Δt)의 곱으로 나타내어 유한요소 해석에 적용할 수 있도록 하였다.

$$W = \frac{k}{3h} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (4)$$

여기서, W 는 마멸깊이, N 은 스텝번호이다. 열연화 실험으로 구한 시간과 온도에 따른 금형의 고온 경도값을 적용하기 위해 식(4)를 다음의 식(5)와 같이 수정하였다.

$$W = \frac{k}{3h(T, t)} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (5)$$

시간과 온도에 따른 금형의 고온경도변화를 템퍼링 파라미터 M 으로 나타내면 식(6)과 같다.

즉, 마멸해석에 필요한 경도를 템퍼링 파라미터 M 으로 나타낼 수 있게 된다. 단조 시뮬레이션을 통하여 얻은 성형데이터와 실험을 통하여 얻은 데이터를 식(6)을 통해 계산하면 결국 1회 단조공정동안에 발생하는 금형의 마멸량을 알 수 있다. 그러나, 마멸량이 증가하면서

금형의 표면층도 깎여져 나가게 되므로 깊이방향의 경도 변화를 고려하여 식(6)을 다음의 식(7)과 같이 수정하여야 한다.

$$W = \frac{k}{3h(M)} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (6)$$

$$W = \frac{k}{3h(M, \text{wear depth})} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여, 먼저 제품의 성형 해석을 통하여 금형면에 작용하는 압력, 소재의 유동속도, 금형의 온도 분포를 구한다. 다음으로 실제와 동일한 열처리 및 표면처리를 한 금형체에 대한 마멸 및 열연화 실험을 통하여 한계 마멸량 및 한계 고온경도 값을 구한다. 여기서 한계 마멸량 및 한계 고온경도 값은 표면처리를 통하여 생성된 코팅층의 두께 및 경도값을 기준으로 하였다. 해석 결과 및 실험 결과를 이용하여 한 번의 성형 공정 동안 금형의 마멸량을 계산하고 이 마멸량에 해당하는 경도값을 예측하였다. 마지막으로 이 값들을 한계값들과 비교하여 한 공정에 대한 금형의 수명을 평가하였다. 마멸량이 한계치보다 작고, 경도값이 한계값 이상이며 금형의 형상을 마멸된 형상으로 변경하여 다시 마멸해석을 수행하고 금형의 수명을 예측하였다. 이상의 과정을 종합하여 나타내면 Fig.2와 같다.

3. 실험 데이터 획득

3.1 열연화실험

단조공정동안 금형은 성형되는 소재로부터 고온의 열을 받아 경도의 변화를 겪게 된다. 이러한 경도의 분포를 파악하기 위해서 열연화 실험을 수행하여 시간과 온도에 따른 고온경도의 변화를 파악하였다. 열연화 실험을 통하여 얻을 수 있는 결과는 첫째, 유한요소법을 통한 성형시뮬레이션과 연계하여 금형의 사용시간에 따른 경도의 변화를 간접적으로 파악할 수 있으며, 둘째, 이러한 결과를 열간단조용 금형의 마멸해석에 적용함으로써 실제 금형의 마멸분포와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 본 실험에서는 이온 질화처리된 H13소재에 대해서 실험을 수행하여 질화층의 연화정도를 파악하였다. 열연화 실험에 사용된 시편은 $40 \times 40 \times 40$ (mm)로, Fig.3과 같은 열처리 과정으로 실제금형과 동일한 조건으로 제작하였다. 일반적으로 열간단조용 금형소재는 600°C 를 전후하여 급격한 경도의 감소를 나타낸다. 따라서 본 실험에서

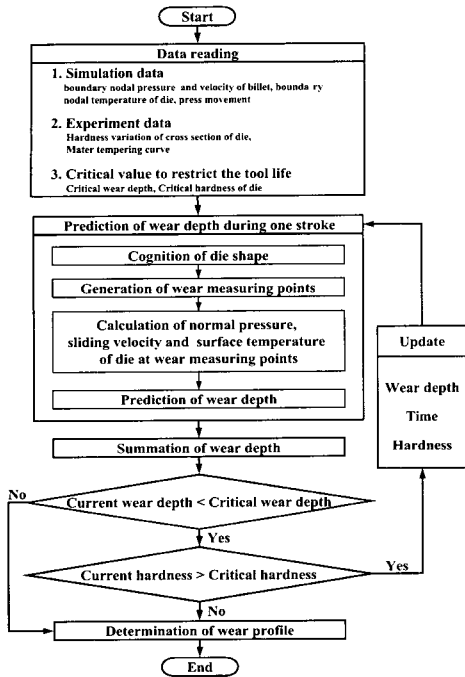


Fig. 2 Flow chart for wear analysis of hot forging die

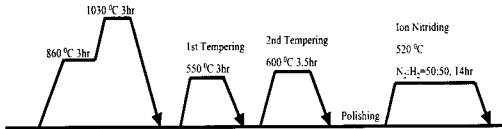


Fig. 3 Heat treatment process of die material

는 Fig.4와 같이 600°C를 전후로 하여 50°C간격으로, 6시간마다 경도의 변화를 18개 시편에 대하여 측정하였다.

이상의 열연화 실험을 통해서 얻은 시간과 온도에 따른 경도분포는 Fig.5와 같다. 실험결과, 550°C와 600°C사이보다 600°C와 650°C사이에서 열연화 현상이 심하게 나타나는 것을 알 수 있었으며, Fig.5의 결과를 템퍼링 파라미터를 이용하여 주연화곡선(Master Tempering Curve)으로 나타내면 Fig.6과 같다.

3.2 깊이방향의 경도측정

열간 단조용 금형은 1100~1200 °C 정도의 높은 온도로 가열된 소재와 직접적으로 접촉하게 되므로 고온에서

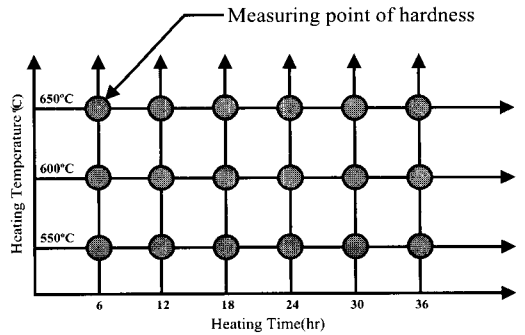


Fig. 4 Experimental Process of the thermal softening test

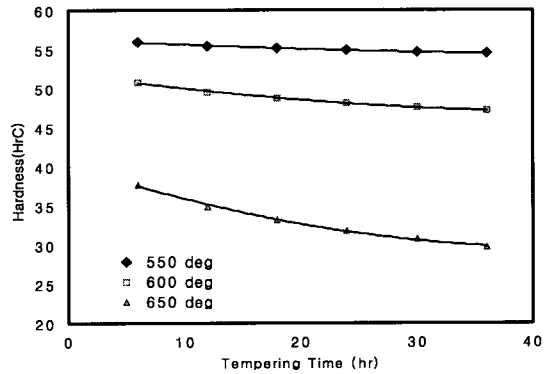


Fig. 5 Hardness variation of 14hr ion-nitrided H13

도 필요한 경도를 유지하고 마멸 및 열피로에 대한 저항성을 높이기 위하여 각종의 표면처리를 하고 있으며, 열간단조용 금형재료써 널리 쓰이고 있는 Cr, Al, Mo 등을 포함하는 H13과 같은 금형용 강에는 질화처리가 특히 널리 이용되고 있다. 따라서 질화처리를 한 금형은 독특한 표면특성을 가지므로 표면으로부터 깊이방향으로 질화층 깊이에 따라 다른 경도 분포를 가지게 된다. 깊이방향의 경도분포를 측정하기 위해서 와이어 방전가공을 통해 시편을 반으로 자르고, 방전가공시 발생한 변질층을 제거한 후 Fig.7과 같은 위치에 대하여 경도를 측정하였다. 측정점 사이의 간격이 좁으므로 이전에 측정 한 위치의 압흔이 인접한 측정점의 측정값에 영향을 미치지 않도록 하였다. 이 때의 시편의 단면은 Fig.8과 같으며, 측정결과는 Fig.9와 같다. 일반적으로 와이어 방전가공으로 인한 변질층의 두께는 0.03mm미만이라고 알려져 있지만⁽¹²⁾, 본 실험에서는 방전가공면의 변질층을 완전히 제거하기 위해서 0.3mm를 제거하였다.

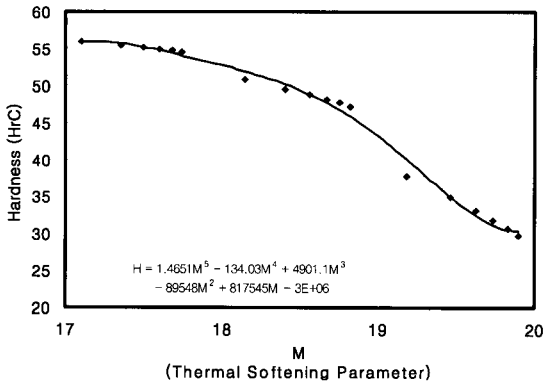


Fig. 6 Master tempering curve of 14hr ion-nitrided H13 (measured in elevated temperature)

3.3 마멸계수측정실험

마멸계수는 마멸시험기(TE92 Base Unit, PLINT Co., England)를 이용하여 Pin-on-disk 방식에 의해 측정되었다. 실험에 사용된 핀은 Fig.3과 같은 방법으로 실제 열간 단조 금형과 동일하게 제작하였다. 시험조건 및 결과는 Table 1과 같다.

4. 마멸해석기법의 적용 및 고찰

4.1 적용대상 열간단조품

금형마멸을 해석하기 위해서 채택된 열간단조품은 Fig.10과 같은 AISI 1045의 자동차 Shaft Front Outer로써 이를 생산하기 위한 금형은 Fig.11과 같다. Fig.10의 제품은 높이가 224.5mm이고, 최대직경이 103mm이다. 본 제품은 Fig.11의 피니셔 다이의 'B' 부분과 같은 요철이 심한 부분과, 긴 압출부길이, 'A' 부분에 발생한 심한 마멸로 인해서 압출부길이가 충분히 나오지 않음으로 인해서 금형의 수명이 12,000개 정도로 짧은 편이다.

4.2 성형공정해석

Shaft Front Outer를 단조하는 동안 최종금형에 발생하는 마멸을 해석하기 위해서 Fig.11의 금형에 대해서 성형해석을 수행하였다. 성형공정은 Fig.12와 같이 예비성형공정과 최종성형공정으로 나뉘며, 본 연구에서는 제품의 치수정밀도를 좌우하는 최종금형에 대해서 금형의 마멸해석을 수행하였다. 성형공정해석을 위한 소재 및 금형의 물성치와 성형조건은 Table 2와 같고, 실제 생산공정이 수작업에 의해서 이루어지고 있으므로 현장에서

작업시간 등을 측정하여 적용하였다.

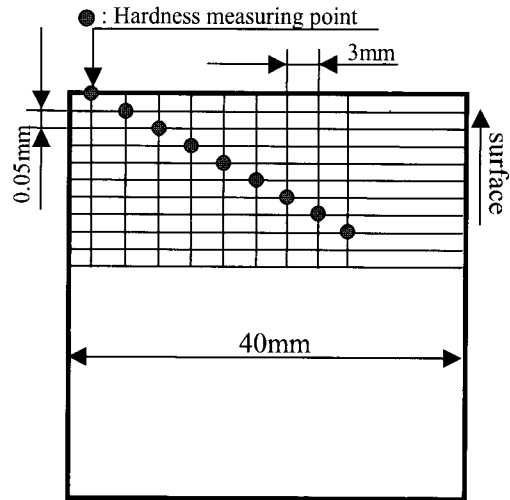


Fig. 7 Hardness measuring points

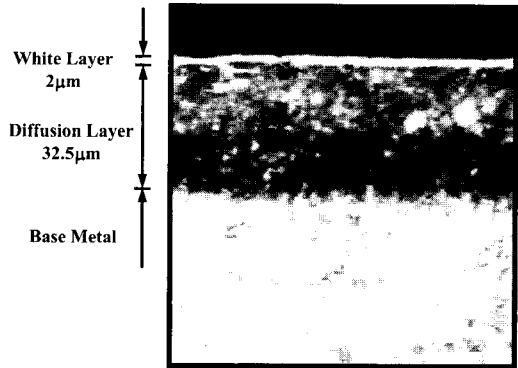


Fig. 8 Cross section of ion-nitrided die

4.3 마멸형상비교

실제 금형의 마멸분포를 3차원 좌표측정기(CMM: Coordinate Measuring Machine, DUCKIN MHB100C)를 사용하여 측정하여 예측된 마멸분포와 비교하였다. 이때 탐촉자의 직경은 2mm였으며, 측정오차는 0.0003mm 이하였다. Fig.13은 최종형상 금형의 손상이 아주 심한 'A', 'B' 두 부분에 대해서 확대하여, 3차원 좌표측정기를 통해서 측정한 실제금형의 마멸분포와 열연화현상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 마멸해석 결과를 비교한 것이다. 'A' 부분은 성형의 마지막부분에서 다이

공동부를 채우고 남은 소재가 빠져나가는 플래시부분이고, 'B'부분은 예비성형체와 금형이 처음부터 접촉하여 접촉시간이 가장 긴 부분이다. 실제 금형에서 'A', 'B'부분을 현미경으로 살펴본 Fig.14에서도 알 수 있듯이

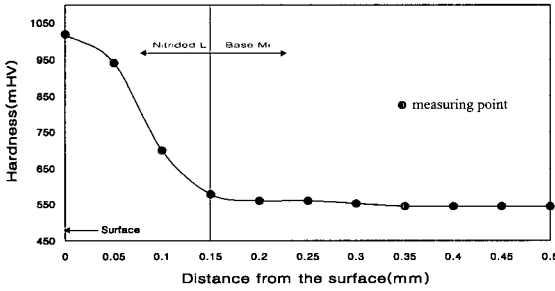
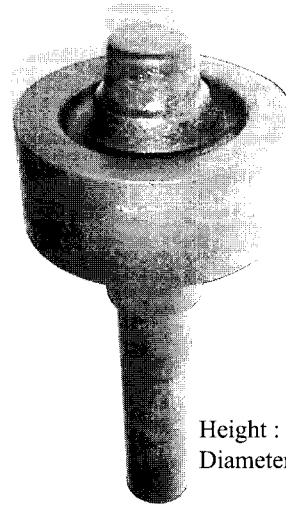


Fig. 9 Hardness distribution of the cross section



Height : 224mm
Diameter : 103mm

Fig. 10 Shaft Front Outer (Final product by hot forging process)

Table 1 Operating conditions for wear test, and measured wear coefficient

Movement	2Pin type
Normal Force	500N
Rotation speed	120rpm
Pin (Die material)	H13
Disk (Billet material)	AISI1045
Temperature	500℃
Lubrication	None
Wear coefficient	5.497E-06

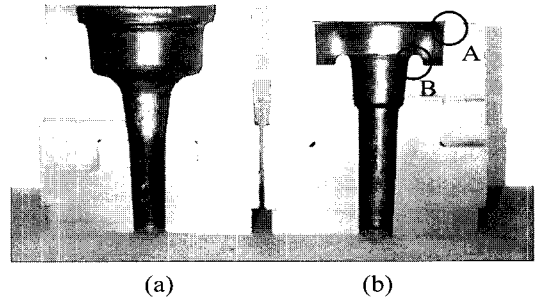


Fig. 11 (a) : Blocker die, (b) Finisher die
'A', 'B' : damaged part

'A' 부분은 마멸이 주로 발생하고, 열균열이 아주 미소하게 발생한 부분이며, 'B' 부분은 마멸과 함께 열균열이 심하게 발생한 부분이다. 마멸이 주로 발생한 'A' 부분은 실제 금형의 마멸분포와 해석에 의해서 예측된 마멸분포가 정량적, 정성적으로 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나, 열균열과 마멸이 동시에 발생한 'B' 부분은 정량적으로 약간의 차이를 보이고 있다. 그리고 Fig.15의 'A', 'B', 'C', 'D' 지점의 온도이력과 표면손상을 비교해 볼 때, 접촉시간과 온도편차가 클수록 금형표면에 열균열이 심하게 발생한다는 것을 알 수 있었다.

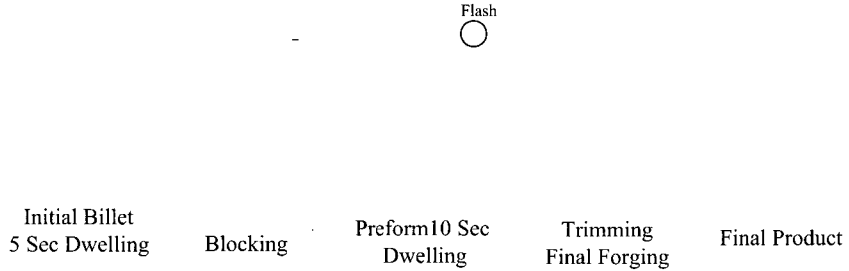


Fig.12 Forging process sequence of Shaft Front Outer

Table 2 Simulation conditions for hot forging process

Billet material	Material	AISI 1045
	Composition	0.41C, 0.29Si, 0.73Mn, 0.018P, 0.021S, 0.08Cr, 0.01Mo, 0.04Ni, 98.35Fe
	Thermal conductivity	74.93 N/sec °C
	Specific heat	0.110 cal/g °C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.602 N/mm °C
Die material	Material	Hot work tool steel : H13
	Composition	0.38C, 0.3Mn, 1.0Si, 5.25Cr, 1.5Mo, 1.0V, 90.57Fe
	Thermal conductivity	28.6 N/sec °C
	Specific heat	0.11cal/g °C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.574 N/mm °C
Forging conditions	Friction Factor	μ : 0.3
	Lubricant heat transfer coefficient	forming : 30N/sec mm °C dwelling : 3 N/sec mm °C
	Convection coefficient	free air convection : 0.02 N/sec mm °C
	Billet initial temperature	1200 °C
	Die initial temperature	300 °C
	Equipment	1,500 ton Mechanical press

5. 결론

열간단조 급형의 마멸해석을 위해서 열연화 실험을 수행하여 열간경도 변화를 파악하였으며, 이러한 데이터를 근거로 마멸해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이온 질화처리를 한 시편에 대해서 열연화 실험을 실시하고 이를 바탕으로 실제급형의 경도 변화를 파악할 수 있었다.

(2) 열간급형의 마멸해석에서는 반드시 온도와 시간을 고려한 열연화 실험이 필요하며, 열간경도의 변화를 고려하는 것이 필수적임을 알 수 있었다.

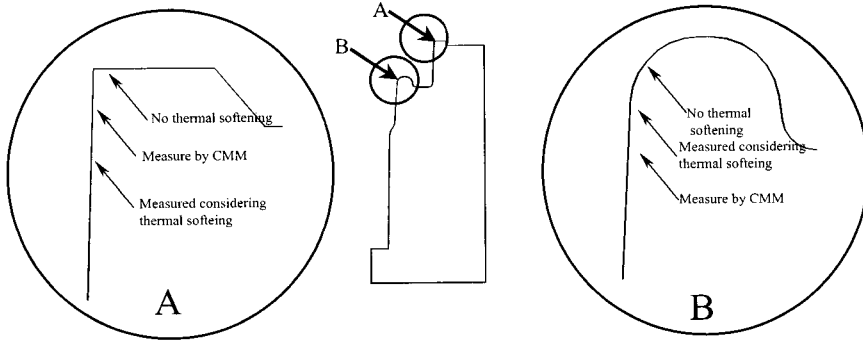


Fig. 13 Comparison of wear profiles at portion 'A', 'B'

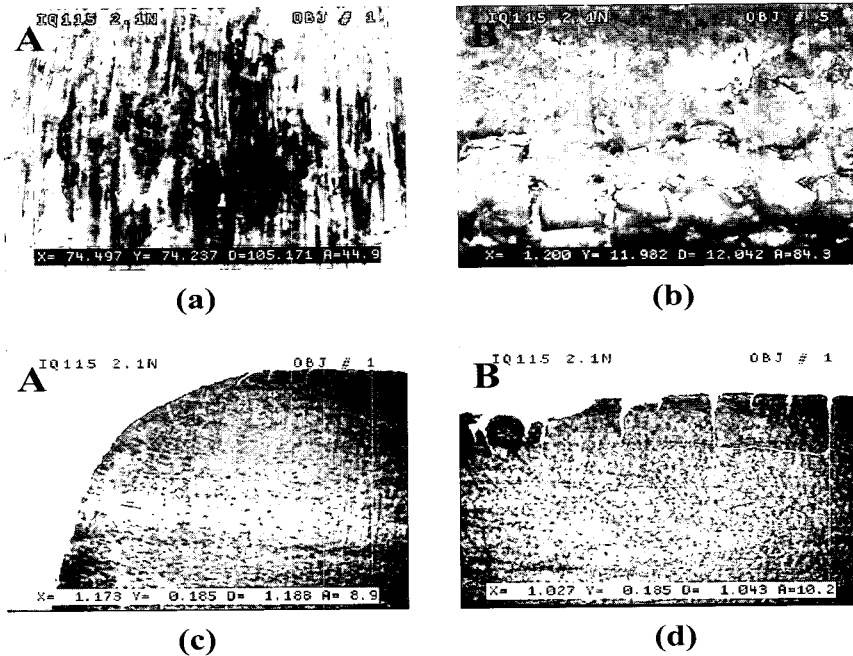


Fig. 14 Photographs of surface and cross-section of portion 'A', 'B'

(a) : Surface of portion 'A', (b) : Surface of portion 'B'

(c) : Cross-section of portion 'A', (b) : Cross-section of portion 'B'

(3) 열연화 실험의 결과를 마멸해석에 적용하여 열간 단조용 금형의 마멸분포를 예측하여 본 결과, 마멸이 주로 발생한 부분에서는 정량적, 정성적으로 상당히 유사한 마멸분포를 얻었으며, 열균열이 함께 발생한 부분에

서는 약간의 차이를 보였다.

(4) 이상의 연구를 통해서 잦은 금형교체 및 재가공이 요구되는 열간단조용 금형의 교체시기를 예상할 수 있어 금형의 장수명화가 가능하다.

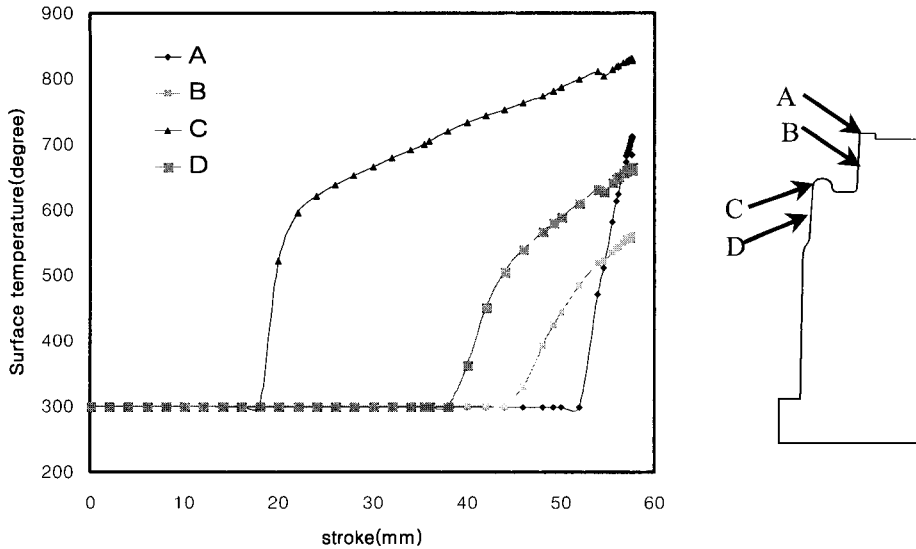


Fig. 15 Temperature history of lower finisher die

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학기술재단의 우수연구센터의 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

(1) 正田中司, 1982, “熱間鍛造における製品缺陷とその対策”, 大坂府立工業技術研究所, p.24.
 (2) 松原基夫, 林建次, 1983, “熱間鍛造用型材料と型加工法の動向”, 塑性と加工, Vol. 24, No. 271, p.816.
 (3) K. Venkatesan, C. Subramanian, E. Summerville, 1997 “Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures”, Wear, Vol. 203-204, pp.129~138.
 (4) 濟木弘行, 御秩如英, 南明宏, 1983, “熱間鍛造における型の熱負荷の解析”, 塑性と加工連合講演會, 第三報, p.507.
 (5) 湯淺紘二, 岡本治郎, 1981, “溫間鍛造用金型の壽命

に對するプレススライドモーシヨンの影響についての考察”, 塑性と加工, Vol. 22, No. 241, pp.133-138.

(6) 강종훈, 박인우, 제진수, 강성수, 1998, “열연화를 고려한 금형마멸모델에 관한 연구(II)”, 소성가공, Vol. 7, No. 3, pp. 274~290.
 (7) A. K. Singh, B. W. Rooks, S. A. Tobias, 1973, “Factors affecting die wear”, Wear, 25, p.271.
 (8) SFTC, DEFORM-2D Ver. 5.1 SFTC Co.
 (9) J. F. Archard, 1953, “Contact and rubbing of flat surfaces”, Journal of applied physics, pp.981~988.
 (10) T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, 1997 “Prediction of die wear in the wire drawing process”, J. of Mat. Pro. Tech., Vol. 65, pp. 11~17.
 (11) P. H. Hansen, N. Bay, 1990, “A flexible computer based system for prediction of wear distribution in forming tools”, Advanced technology of plasticity, Vol. 1, pp. 19~26.
 (12) “TD PROCESS”, 동우열처리 공업주식회사 생산부, p.16, 1993.