

# 고변형을 속도 유동곡선에 미치는 가공열의 영향

방원규\* · 정재영\*\* · 장영원\*

## The Effect of Deformation Heat to the High Strain Rate Plastic Flow

W. Bang, J.Y. Jung and Y.W. Chang

### Abstract

Dynamic deformation of metallic materials mostly accompanies substantial amounts of deformation heat. Since the flow stress of deformation is sensitive to temperature, implication of heat due to plastic work is essential to the evaluation of constitutive relations. In this study, a series of compression tests were conducted for SAF 2507 super duplex stainless steel and the accumulation of deformation heat was calculated through numerical integration method. Isothermal flow surfaces were deduced from subsequent logarithmic interpolation. Simple closed die forging process was analyzed and optimized with commercial FEM code applying both raw and calibrated material database.

**Key Words** : deformation heat, high strain rate, FEM

### 1. 서론

일반적으로 실제 성형이라는 물리적 문제를 유한요소 해석에 적용하기 위해서는 소재나 금형의 초기형상과 같은 기하학적 데이터와 조업조건에 따라 제어되는 외부변수, 소재 및 금형의 열적, 기계적 성질, 그리고 각 부품품간의 상호작용에 따르는 구속조건을 수치화 하여야 한다. 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 해석코드의 정밀도와 요소구성과 같은 적절한 해석조건설정도 중요하다. 근본적으로 실제 재료의 변형거동을 정확히 나타내는 물성 데이터가 확보되지 못하면 신뢰성 있는 해

석결과는 기대할 수 없게 된다.

상온에서의 금속의 정적, 준정적 변형은 응력-변형률간의 관계로 비교적 간단하게 기술할 수 있으나, 대부분의 고온변형은 변형률만이 아니라 변형률 속도 및 온도에 크게 의존한다.<sup>(1,2)</sup> 각각의 변수에 따른 유동응력을 결정하기 위해서는 대개 온도와 변형률 속도를 고정하고 기계적시험을 통하여 응력-변형률 곡선을 얻는 것이 일반적이다. 그러나, 단조 등의 고속성형의 해석을 위해서 행해지는 고변형률속도의 시험에서는 소성일이 열로 변환되는 변형열의 발생이 상당하여 시편의 온도가 상승하게 되고, 변형률 축적에 따른 유동응력 감소를 무시할 수

\* 포항공과대학교 항공재료연구소  
\*\* 포항산업과학연구원 재료·공정연구소

없게 된다.<sup>(3)</sup> 본 연구에서는 최근 주목받는 고내식성 슈퍼 듀플렉스 스텐레스강 SAF 2507 을 대상으로<sup>(4)</sup> 고온 압축시험을 실시하고 변형열을 계산, 유동응력을 보정하는 과정을 정량화하였다. 또한 이를 형단조 유한요소해석에 적용하여 가공열 보정의 효과를 보다 구체적으로 평가하여 보았다.

## 2. 소재 및 실험방법

본 연구에 사용된 SAF 2507 강은 50kg급 진공용해로에서 제조한 후에 1200℃에서 2.5시간 열처리한 후 수냉하여 준비되었다. 모재로부터 직경 10mm, 길이 12mm의 원통형 시편을 제작하여 Gleeble-3800 Test Machine 에서 고온압축시험을 수행하였으며, 시편의 온도는 시편 표면에 열전대를 부착하여 측정, 제어하였다. 압축시험의 조건은 온도를 900~1250℃, 변형속도를 0.01~50/sec 로 변화시켜가며 진변형을 0.8 이상까지 유동곡선을 얻었다.

## 3. 해석방법 및 결과

### 3.1. 가공열에 의한 온도상승 계산

우선 실험에 의해 얻어진, 보정되지 않은 유동곡선의 개형을 전반적으로 살펴보고, 소성변형의 누적에 의한 열발생을 계상할 기준변형율을 결정한다. 이 값은 초기 소성변형영역 (항복점 직후) 을 설정하는 것이 가장 타당하므로, 본 연구에서는 전체 실험결과에 대하여 0.01의 진변형율을 기준으로 삼고, 그 이하의 변형율에 대해서는 초기온도를 적용할 수 있다고 가정하였다.

기존의 연구결과를 보면 가공열에 의한 온도상승을 계산하는 데 있어서는 주로 1회의 실험에 의해 얻어지는 응력-변형율 곡선을 단일한 지수형태의 가공경화식으로 fitting 한 후 임의의 점까지의 소성일 (plastic work) 을 해석적으로 적분하여 대입하는 방법을 사용하였다.<sup>(3)</sup> 그러나 실제 비등온 변형에서는 가공경화지수를 상수로 보기 어려우므로 단일식에 의한 해석적 접근보다는 수치적 분으로 누적되는 일의 양을 계산하는 것이 보다 바람직하다고 볼 수 있다.

Fig. 1은 유동곡선의 일부 구간을 모식화한 것으로, 이때 (i-1)상태에 대한 i상태의 소성일 증가량은 빗금친 부분의 면적에 해당하므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta W_i = 0.5(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) \quad (1)$$

기계적인 일이 열에너지로 전환되는 비율은 대개 90% 전후로 알려져 있으므로 소성일의 미소증분에 상응하는 온도상승은 다음과 같이 계산된다.<sup>(4,7,8)</sup>

$$\Delta T_i = \frac{0.9 \times \Delta W_i}{\text{Specific Heat Capacity}} \quad (2)$$

진변형을 0.01 부터 이를 누적하면 특정 온도에서의 압축시험에 대한 실제 온도분포를 구할 수 있게 된다.

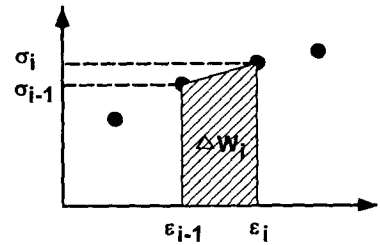


Fig. 1 Schematics of plastic work increment

### 3.2. 온도상승분을 보정한 유동응력 결정

전술한 바와 같이 금속재료의 고온변형거동은 와 같은 함수로 볼 수 있다. 강소성 유한요소해석에 유동응력을 입력하기 위해서는 1. 일반적으로 특정 형태의 구성방정식으로 회귀분석을 하거나, 2. 일정 구간의 독립변수들의 (변형율, 변형속도, 온도) 조합에 대한 응력값을 3차원 테이블 형태로 직접 도입하게 된다. 어느 경우에도 실험결과로부터 등온곡선을 결정하기 위해서는 열적 활성화항을 정량화하여야 하는데, 본 연구에서는 입력온도와 변형속도를 특정 값으로 고정하고 압축시험을 하였으므로 추가적으로 전체 실험조건에 대해 정해진 변형율의 응력값을 추출해내었다. Raw Data 에는 설정 변형율과 정확히 일치하는 절점이 대개 존재하지 않으므로 선형보간 (linear interpolation) 으로 근사값을 결정한다. 변형율과 변형속도가 일정한 경우 온도와 유동응력은 다음과 같이 널리 알려진 형태의 관계를 나타내므로,

$$\sigma = A \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)_{\epsilon, \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

동일한 변형율, 변형속도를 가지는 (σ, T) 순서쌍을 선택하여 각각의 data set 에 대해 log-linear fitting 을 하면 그 기울기로부터 활성화 에너지 Q 를 구할 수 있고, 응력 온도간의 관계가 결정된다. 구해진 관계식을 실

험결과에 다시 대입하여 각각의 유동응력을 초기 온도가 유지되었을 때의 값으로 환산한다. 예를 들어, 실험 초기 조건 900°C, 0.01/sec 에서 구해진 유동응력을 등온곡선으로 변환한 최종결과는 Fig. 2와 같이 보다 높은 응력 수준의 곡선들로 나타나게 된다.

가공열로 전환되는 소성일은 같은 변형률 수준에서 높은 유동응력을 가질수록 커지기 때문에, 온도가 낮고 변형률 속도가 큰 시험조건일수록 가공열 보정된 등온곡선의 응력값이 초기 데이터에 비해 매우 높은 비율로 증가하게 된다.

시험조건중 가장 낮은 900°C 에서 50/sec 의 높은 변형률속도로 압축된 경우에는 진변형률 0.9 까지 변형이 축적된 경우 온도상승은 989°C 까지 예측되고, 초기온도가 유지되는 경우의 응력은 실험결과에 비해 585 MPa / 351 MPa 로 60% 이상 크게 증가한 값이 얻어졌으나, 고온, 저속변형에서는 가공열의 발생에 의한 응력감소가 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

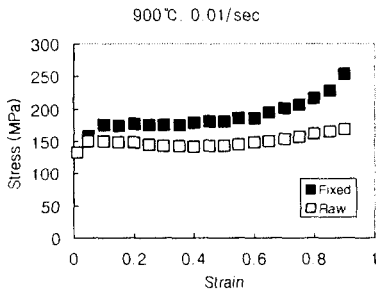


Fig. 2. Evaluation of isothermal flow stress

### 3.3. 형단조 공정 유한요소해석

보정된 유동응력 데이터를 기초로 본 연구에서는 Fig. 3의 3차원 모식도에 나타난 것과 같은 축대칭 형상의 샤프트를 원기둥형 빌렛으로부터 제조하는 공정을 선택하여 소성가공해석 전용 상용 코드인 DEFORM-2D 를 사용하여 단조 시뮬레이션을 수행하였다.

이와 같은 형상에서 빌렛의 초기온도 및 형상, 다이의 스트로크 속도를 변화시켜가면서 성형이 완료된 제품에 대한 특성과 에너지 소모등을 중점적으로 살펴보았다. 특히 앞서 기술한 가공열 보정에 대해서는 Gleeble test machine 에서 얻어진 raw data 를 그대로 Material Database 로 입력한 경우와 가공열을 보정하고 입력한 경우에 각기 해석해가 나타내는 경향차이를 비교하였다. 또한

빌렛은 동일한 부피의 원통형을 사용하되, 반지름과 높이의 비를 다르게 하여 특히 변형률 분포와 스트로크-하중곡선의 경향을 살펴보았다.

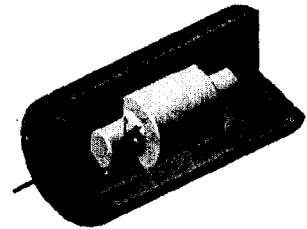
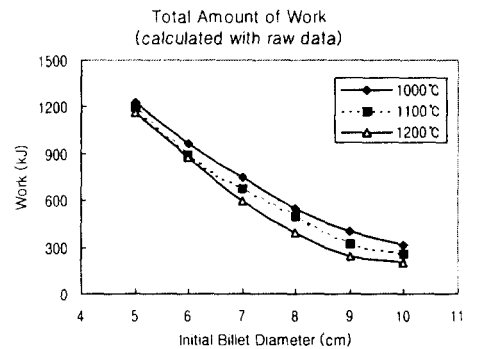
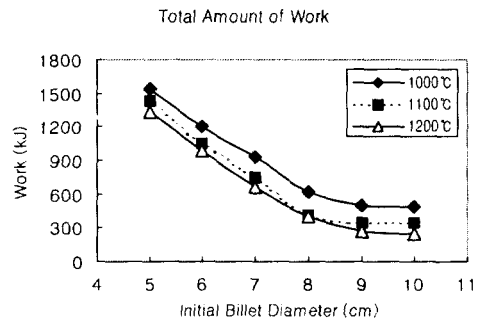


Fig. 3. 3-D geometry of shaft forging



(a)



(b)

Fig. 4. Total amount of work done with various initial billet geometries

해석해의 전반적인 경향에 있어서는 가공열이 보정된 경우와 그렇지 않은 경우가 비슷하게 나타나고 있으나, Fig. 4에 나타난 바와 같은 소성일의 정량적 예측에 있어서는 비교적 큰 차이를 나타내었다. 가공열이 보정되지 않은 입력값으로 유한요소해석을 한 결과는 전반적으로 낮은 유동응력이 예측되어 상대적으로 낮은 값들을

모든 온도구간에서 나타내고 있으며, 초기 빌렛의 직경에 대해 뚜렷한 천이구간 없이 선형적인 관계를 나타내고 있다. 이는 가공열이 보정되지 않은 본래의 비등온 유동곡선이 실제 등온곡선에서 나타나는 가공경화능을 제대로 반영하지 못하기 때문에 생기는 차이로 보여진다.

가공열이 반영되지 않아 발생하는 해석해의 차이는 크게 다음 두가지 문제를 일으킬 수 있다. 첫째로는, 실제보다 낮은 기계적 에너지 소모를 예측하게 되므로 그러한 설계 최적화 방안을 따를시에 성형에너지 부족으로 인한 모서리 채움의 부족 등이 나타날 수 있으며, 둘째로는 공정 설계에 대한 변화가 정확히 예측되지 않아 최적조건을 설정하는데 어려움을 주게 된다.<sup>(5-7)</sup>

## 후 기

본 연구는 1999년도 산업자원부에서 지원한 민·군겸용 기술사업 "선박용 고강도, 고내식 특수 주·단조품 개발" 연구과제를 수행한 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) J. Holloman, 1947, Trans. AIME, vol. 171, p355.
- (2) F. Garofalo, 1963, TMS-AIME, vol. 227, p251.
- (3) 유인창, 박종진, 최승주, 1996, 대한금속학회지, vol. 34, p973.
- (4) J.W. Simmons, Mat. Sci. Eng. vol. A207, p159
- (5) S.L. Semiatin and J.J. Jonas, 1984, "Formability and Workability of Metals", ASM, p43,
- (6) N.R. Chitkara and M.A. Bhutta, 1996, Int. J. Mech. Sci., vol.38, p871.
- (7) L. Fourment, T. Balan, and J.L. Chenot, 1996, Int. J. Num. Method. Eng. vol. 39, p51.