

열처리시의 열변형에 관한 연구

장지웅* · 김동진** · 강종훈* · 강성수***

A Study on the Thermal deformation during Heat-Treatment

J. W. Jang, D. J. Kim, J. H. Kang, and S. S. Kang

Abstract

The distortion and fracture of heat treated components is a major industrial problem, which may considerably increase the costs of operations that involve high cooling rates. And also, thermal deformation would be generated during Heat Treatment. In this paper, the purpose is to check out the thermally deformed components during heat treatment and to analyze thermal deformation and thermal stress by two dimensional Finite Element Method. And two dimensional FEM program is evaluated for heat transfer and thermal deformation

Key Words : Heat Treatment, Thermal Deformation, Finite Element Method

1. 서론

열처리된 부품의 변형이나 파괴 등은 산업체에서의 중요한 문제중의 하나이다. 특히 열처리시 가열 및 냉각에 의해 소재 내부에 불균일한 온도 분포를 야기하여 열응력을 발생시킨다. 이것이 재료의 탄성범위를 넘어서면 소성변형이 발생하게 되어 이러한 변형이 열처리 후에 잔류하게 되어 열변형을 유발하게 된다. 특히 정밀 부품의 경우 열처리 후 열변형은 그 성능에 큰 영향을 미친다. 현장에서는 이러한 열처리 변형을 당연시 여기어 사전에 이를 제어하지 못하고 있는 실정인데, 주된 이유가 이를 정확히 예측하여 정량화 시키지 못하고 있기 때문이다. 이러한 열변형을 미리 예측하여 제품 설계를 하기

위해서는 기본적인 열변형 데이터가 많이 제공되어야 한다.

본 연구에서는 실제 부품과 다이의 열처리시 생기는 변형양상을 고찰하기 위해서 냉간 공구강인 STD11강으로 시편을 제작하였다. STD11강은 타발형, punch, press 성형, forming roll 등에 매우 널리 사용되는 강종으로, 열처리에 의해 발생하는 치수변화와 변형이 다른 강종에 비해 작다는 것이 특징이다. 이러한 STD11강을 실제 열처리 후 변형량을 정밀 측정을 통하여 구하고, 이러한 열처리 과정을 유한요소 해석프로그램을 통한 가상 실험으로서 열처리 변형을 예측할 수 있는 수치적 모델을 정립하고자 하였다.

유한요소법을 이용하여 2차원 열탄성 해석을 할 수 있

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 동우열처리(주)
*** 부산대학교 기계공학부

는 프로그램을 개발하였다. 이렇게 개발된 프로그램을 이용해서 실험을 하였던 형상으로 열전달과 열응력해석을 한 후 결과를 검토하였다. 프로그램은 열는 프로그램을 개발하였다. 이렇게 개발된 프로그램을 이용해서 실험을 하였던 형상으로 열전달과 열응력해석을 한 후 결과를 검토하였다. 프로그램은 열전달 문제와 열변형 문제를 연계해석 가능하게 개발되었으며 실제 현장에서도 쉽게 프로그램을 이용할 수 있는 Pre & Post Processor를 추가하였다.

향후에는 실제로 변형에 많은 영향을 미치는 상변태의 영향을 고려하여 좀 더 정확한 변형량을 예측할 수 있는 프로그램을 개발할 예정이다.

2. 실험

2.1 간단한 축 대칭 형상의 열변형량 측정

열변형량을 측정하기 위한 실험을 위해서 세장비 (aspect ratio) 가 다른 3개의 모델(STD11강)을 선정했으며 그 모양은 다음과 같다.

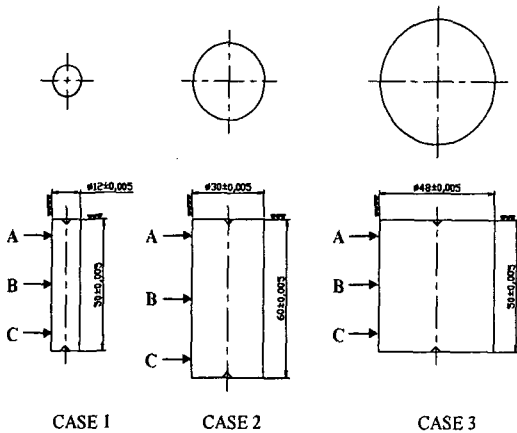


Fig. 1 Shapes of specimens

3개의 시편 모두 1000 °C에서 상온까지 급랭하여 그 변형량을 측정하였다. 측정위치는 Fig. 1 에서 보이는 A, B, C 세 점을 측정하였다. 열처리전과 후의 변형량을 측정한 결과는 다음과 같다.

Table 1 Results of the measurements

CASE No.	위치	치수 (mm)	변화량 (mm)	변화율 (%)
CASE1	A	12.006	-0.001	-0.008
	B	12.006	-0.002	-0.017
	C	12.006	-0.001	-0.008
CASE2	A	29.995	-0.013	-0.043
	B	30.005	-0.028	-0.093
	C	30.008	-0.008	-0.027
CASE3	A	48.005	-0.01	-0.021
	B	48.008	-0.028	-0.058
	C	48.007	-0.022	-0.046

세장비에 따라서 변형량이 약간씩 달랐다. 측정위치에 따른 변형량의 차이가 크지 않았지만 전체적인 변형모드를 과장해서 그리면 다음과 같이 가운데 부분이 양끝보다 좀더 많이 수축한 모습을 보였다.

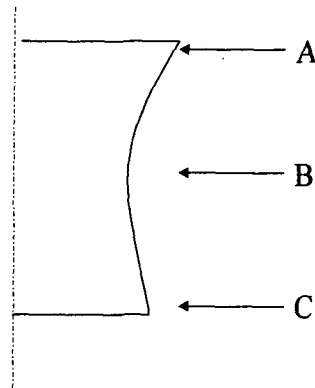


Fig. 2 Deformation mode

이는 예상했던 변형모드와는 일치하였다. 즉, 중앙부는 심부와 표면의 온도차이가 심하다. 이는 외표면의 냉각 속도가 심부보다 빠르기 때문에 수축량이 크다. 모서리 부분은 양쪽(two edge)에서 대류가 발생함으로 인해 한 방향으로만 열전달이 일어나는 B 부분(가운데)보다는 온도의 불균일이 작아서 변형도 상대적으로 작게 생기는 것이다.

2.2 Punch의 열변형량 측정

실제 생산되고 있는 Punch에 대해서 위와 같이 1000 °C에서 상온까지 급랭하는 조건으로 변형량을 측정하였다. Punch의 소재는 STD11강이고 그 형상은 다음과 같다.

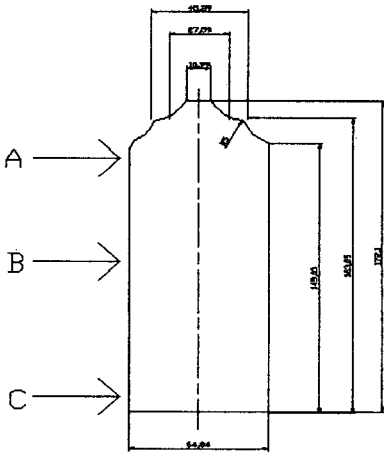
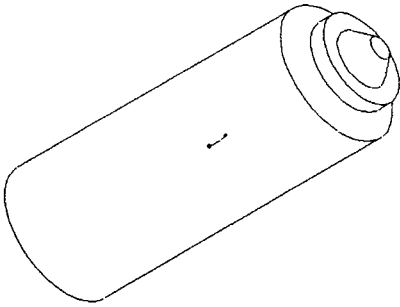


Fig. 3 Shape of Punch

외경의 A,B,C 에 대하여 변형량을 측정하였다. 그 결과는 다음과 같았다.

Table 2 Results of the measurements

위치	치수(mm)	변화량 (mm)	변화율(%)
A	64.960	-0.03	-0.046
B	65.015	-0.065	-0.099
C	65.015	-0.025	-0.038

3. 이론 해석

금속의 열변형과 관련된 요소는 다음과 같이 온도, 조직, 열응력이 상호 작용을 하는 복잡한 관계를 가지고 있다.

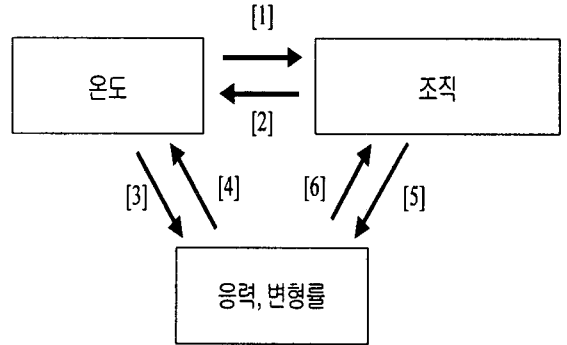


Fig. 4 Relationship among temperature, phase composition and thermal stress

Fig. 4 에서

- [1] 온도의 불균일은 상조성의 불균일을 야기한다.
- [2] 상변태는 온도에 잠열형태로 영향을 미친다.
- [3] 온도가 변할 때 열응력을 유발한다.
- [4] 응력은 1%미만의 작은 온도변화를 유발한다.
- [5] 상변태는 소재의 파괴변화를 가져온다.
- [6] 열응력은 상변태에 영향을 미친다.

실제로 열처리를 할 때 고려해야 할 열변형의 변수는 이처럼 복잡한 관계를 가지고 있다. 정확한 변형량을 예측하기 위해서는 모든 인자를 고려하는 것이 바람직하지만 본 논문에서는 열변형에 큰 영향을 미치는 온도와 열응력과의 관계만을 다룬 2차원 열탄성 프로그램을 개발하였다.

3.1 열전달 해석

유한요소법으로 2차원 열변형 해석을 하기 위해서는 우선 열전달 해석이 이루어져야한다.

열전달 지배 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$(kT_{,i})_{,i} - C \dot{T} + \dot{r} = 0$$

여기서 $(kT_{,i})_{,i}$ 는 열전달율(heat transfer rate)이고, $C \dot{T}$ 는 내부에너지 변화율(internal energy rate), \dot{r} 는 열생성율(heat generation rate) 이다. C는 열용량으로 밀도와 비열의 곱으로 나타난다. 여기서 내부의 열발

생(heat generation) 즉, \dot{r} 이 없다고 가정하고 가중잔류법(weighted residual)을 사용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_V kT_{,i}\delta T_{,i}dV + \int_V C\dot{T}\delta TdV - \int_{S_n} q_n\delta TdS = 0 \quad (1)$$

여기서 q_n 은 경계에서의 대류와 복사에 관한 열유속(heat flux) 이다.

대류 열유속은 $h(T_e - T_s)$ 이고 복사 열유속은 $\phi\lambda(T_e^4 - T_s^4)$ 으로 여기서 ϕ 는 슈테판-볼츠만 상수로 $5.670 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 이다.

식 (1)을 유한요소로 이산화 하기 위해서 간단한 행렬형태로 고치면

$$KT + C\dot{T} - Q_n = 0 \quad (2)$$

\dot{T} 를 선형화 하여 식(2)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left[\beta K + \frac{1}{\Delta t} C \right] T_{n+1} \\ & = \left[-(1-\beta)K + \frac{1}{\Delta t} C \right] T_n + (1-\beta)Q_n + \beta Q_{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 β 는 0과 1사이의 파라미터로 본 논문에서는 0.75를 사용하였다.

3.2 열응력 해석

응력과 변형률사이의 관계에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} - [D]\{\epsilon_0\} \quad (4)$$

여기서, $[D]$ 는 다음과 같은 탄성응력-변형률 행렬이다. 축대칭의 경우 다음과 같이 같다.

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (4)에서

$\{\sigma_{\Delta T}\} = [D]\{\epsilon_0\}$ 이라고 할 수 있고, 이 때 $\{\sigma_{\Delta T}\}$ 는 초기 열 변형률 $\{\epsilon_0\}$ 에 대한 초기 응력이다. $[B]$ 를 변형률-변위 행렬이라고 하면, 절점의 열하중 벡터에 대해서

$$\{F_{\Delta T}\} = \int_{V^e} [B]^T \{\sigma_{\Delta T}\} dV \quad (5)$$

로 나타 낼 수 있다. 식(5)를 이용하여 만족하는 열응력의 평형방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{V^e} [B]^T [D] [B] dV \{U\}^e &= \int_{V^e} [B]^T \{\delta_{\Delta T}\} dV \\ &= \{F_p\}^e + \{F_q\}^e + \{F_g\}^e + \{F_{\Delta T}\}^e \end{aligned} \quad (6)$$

행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$[K]\{U\}^e = \{F_p\}^e + \{F_q\}^e + \{F_g\}^e + \{F_{\Delta T}\}^e \quad (7)$$

여기서 $\{F_p\}^e$, $\{F_q\}^e$, $\{F_g\}^e$ 는 각각 중심력(central force)에 의한 절점하중, 표면력(area force)에 의한 절점하중, 물체력(body force)에 의한 절점하중을 나타낸다.

본 연구에서는 순수하게 열에 의한 변형만을 고려하므로

$$\{F_p\}^e, \{F_q\}^e, \{F_g\}^e \text{을 무시하면}$$

$$[K]\{U\}^e = \{F_{\Delta T}\}^e \quad (8)$$

각 요소 방정식을 구하고 조합하여 전체 계에 대해서 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$[K]\{U\} = \{F_{\Delta T}\} \quad (9)$$

식 (9) 에 의해서 불균일한 온도 분포에 따라서 생기는 절점 변위를 구한다. 그리고 식 (4) 에 의해서 열응력을 계산한다.

개발된 프로그램은 열전달 해석과 열응력 해석을 연계하여 계산하도록 되어있으며 그 알고리즘은 Fig. 5와 같다.

4. 수치해석

앞서 실행한 실험과 같은 시편형상으로 시뮬레이션을 하였다. STD11강의 물성치는 Table 3과 같다. 열팽창계수는 온도에 따라서 Table 4 와 같은 값을 이용하였다.

Table 3 Physical and Mechanical properties of STD11 for analysis

Young's Modulus E (GPa)	Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)	Density (g/cm^3)	Specific heat ($J/g \cdot K$)	Poisson's ratio (ν)
210	20.0	7.70	0.46	0.3

Table 4 Thermal expansion coefficients of STD11

Thermal Expansion coefficient ($\times 10^{-6} m/m \cdot K$)				
100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
10.5	11.0	11.0	11.5	12.0

Fig. 1 의 CASE1과 Fig. 3의 Punch를 해석하기 위해서 요소망을 나누었고 축대칭 형상이므로 Fig. 6 과 같이 1/2 형상해석만 수행하였다. 해석이 끝난 후 각각의 유효응력 분포를 Fig.7에 나타내었다. 실험에서 측정된 각각의 변형량과 시뮬레이션에서 예측한 변형값을 Table 5 와 같이 정리하였다.

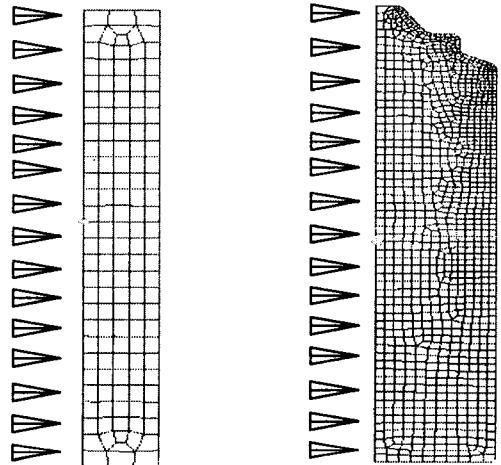


Fig. 6 Finite element models for analysis

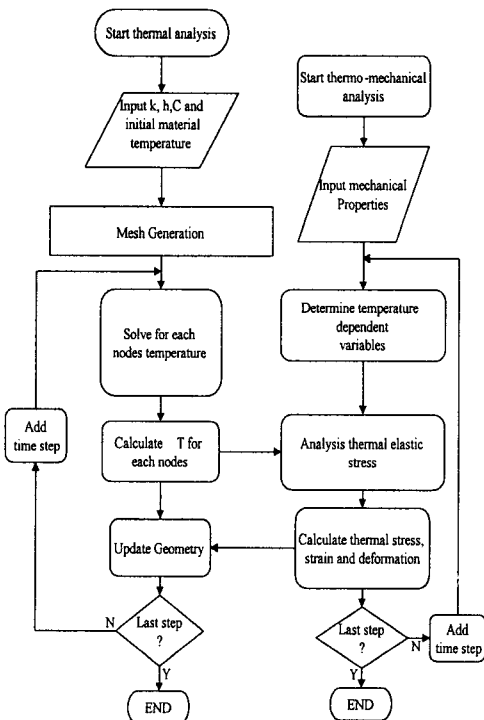


Fig. 5 Algorithm of developed program

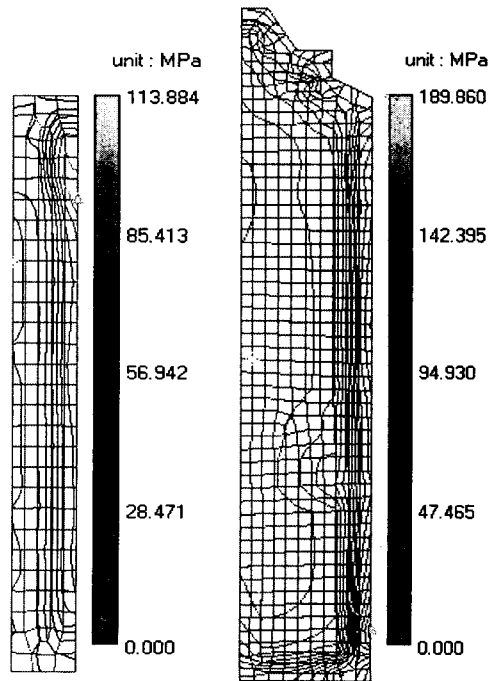


Fig. 7 Effective stress distribution

Table 5 Check for simulation results

변형량 비교	CASE1			Punch		
	A	B	C	A	B	C
실험 (mm)	-0.001	-0.002	-0.001	-0.03	-0.065	-0.025
시뮬레 이션 (mm)	-0.011	-0.014	-0.010	-0.04	-0.12	-0.05

시뮬레이션 결과를 보면 변형 양상은 실험치와 비슷하였으나 절대값은 차이가 있었다. 이는 실제 켈칭하는 상황을 정확히 프로그램에서 구현하는데 한계가 있었고 상변태등과 같이 변형에 영향을 주는 다른 인자를 현재는 고려하지 않았기 때문이라고 생각된다.

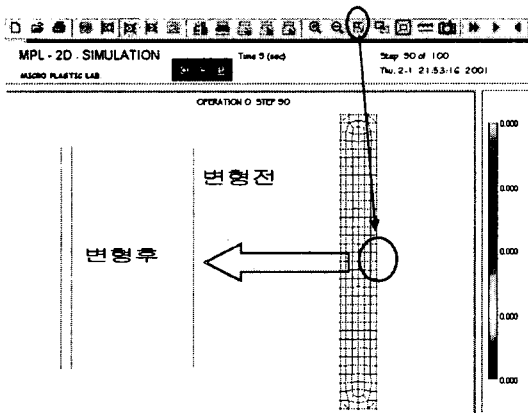


Fig. 8 Deformation mode function of PostProcessor

Fig. 8 에서 개발된 프로그램에서 제공하는 변형모드 보여주기 기능을 보여주고 있다. 후처리기(PostProcessor)에서 변형모드를 선택한 후 확대시켜 변형양상을 확인하는 기능으로 사용자가 쉽게 변형양상을 정성적으로 확인할 수 있게 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 부품이나 다이에 발생하는 실제 치수 변화량에 대하여 살펴보았다. 열처리시 문제가 되는 열변형을 해석하기 위해서 2차원 열탄성 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 현장에서도 쉽게 사용할

수 있는 전, 후처리기(Pre, Post Processor) 환경을 제공하여 현장에서 필요할 수 있는 온도, 변형 데이터를 신속하게 제공할 수 있게 하였다. 실제 열처리와 같은 시뮬레이션 조건을 프로그램 상에서 정확히 묘사하는데 한계가 있고 개발된 프로그램이 아직 상변태를 고려하지 않았기 때문에 실제 변형량과 비교해 보면 약간의 오차가 있었다. 그러나 열응력에 의한 열변형의 양상은 예상했던 것과 일치하였다. 프로그램에서 열변형 모드를 정성적으로 인식할 수 있는 기능이 있어 많은 도움이 되리라 생각된다. 향후에는 상변태 영향을 프로그램에 추가하는 연구를 계속하고 열처리 현장의 많은 변형데이터를 feed-back하여 좀 더 정확한 변형량을 예측할 계획이 다.

참고 문헌

- (1) J.N.Reddy, 1993, "An Introduction to the finite element method", McGraw-Hill.
- (2) Tai-Ran Hsu, 1986, "The Finite Element Method in Thermomechanics", Allen & Unwin, Inc.
- (3) Klaus-Jurgen Bathe, 1996, "Finite Element Procedures", Prentice-Hall International, Inc.
- (4) H.G.Wang, Y.H.Guan, T.L.Chen, J.T.Zhang, 1997, "A study of thermal stress during laser quenching", Journal of Material Processing Technology., Vol. 63, pp.550~553.
- (5) S.Sen, B.Aksakal, A.Ozel, 2000, "Transient and residual thermal stresses in quenched cylindrical bodies", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, pp.2013~2029.
- (6) M.-s. Liu, Q.-W. Dong, D.-B. Wang, X. Ling, 1999, "Numerical simulation of thermal stress in tube-sheet of heat transfer equipment", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, pp.671~675.
- (7) M. Buchmann, R. Gadow, J. Tabellion, 2000, "Experimental and numerical residual stress analysis of layer coated composites", Materials Science and Engineering, Vol. A288, pp.154~159
- (8) M Sedighi, C A McMahan, 2000, "The influence of quenchant agitation on the heat transfer coefficient and residual stress development in the quenching of steels", Proc Instn Mech Engrs, Vol. 214, Part B, pp.555~567.