

전기 업셋팅 가공시의 열탄소성 해석에 관한 연구

王之錫* · 朴泰仁**

A Study on the Thermo - elasto - plastic Analysis of Upset Forming

J. S. Wang · T. I. Park

Key words : Upset forming(업셋트 가공), Thermal elasto - plastic analysis(열탄소성해석), Axi - symmetric body(축대칭 물체), Incremental theory(증분이론), Yield criteria(항복조건), Inherent strain(고유변형률)

Abstract

Thermal elasto - plastic analysis of axi - symmetric body by the finite element method is presented in this paper for analyzing the process of upset forming of circular section extruded bar. The example of calculation for upset forming of Nimonic extruded bar is also presented. It is shown that remeshing of quadrilateral finite element is necessary because the very highly distorted element by plastic deformation disturbs the calculation. Calculated values for nodal points in new mesh are obtained from nodal points of old mesh by linear interpolation method. The experimental results are compared with calculated values. The appearance of upset forming obtained by experimental method is very similar to that obtained by calculations. So, it is proved that the thermal elasto - plastic analysis of axi - symmetric body by the finite element method is very useful for finding the optimum upsetting condition.

1. 序 論

전기 업셋팅 성형가공할 때에 통전전류, 전압, 앤빌에서 전극까지의 거리, 전극의 길이, 업셋팅 압력, 업셋팅 속도, 후퇴거리등 여러가지의 업셋팅 파라미터가 성형제품의 품질을 결정짓게 된다. 그러므로 업셋팅 성형후 미시적인 금속조직이나 그

레인(Grain)의 배열이 최상의 상태로 되기 위하여는 상기의 파라미터를 한개씩 또는 두개씩 변경시켜가며 시행착오를 실시하여 시험하면서 경험에 의하여 조정하는 방법이 고작이다. 그러나 이러한 방법은 실질적이기는 하나 시간과 노력이 많이 들 뿐만 아니라 고가의 소재인 경우 비용도 많이 드는 문제가 있다. 또한 이런 방법으로 최적 업셋팅 조

* 정희원, 한국해양대학교 이공대학

** 정희원, 한국기계연구원 동력시스템연구부

건을 찾아내는 것은 소재의 특성이나 직경등이 달라지면 전혀 맞지 않을 것이므로 극히 한정된 경우를 제외하고는 합리적인 방법이 되지 못한다. 즉 업셋팅 변수의 조합이 너무나 다양하므로 경험만에 의존하여 최적 업셋팅 조건을 찾아내는 일을 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 전기 업셋팅 성형 가공의 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 이 프로그램에서 여러가지의 파라미터를 변경하면서 가장 최상의 업셋팅 조건을 찾는다면 시간과 비용이 훨씬 절감될 수 있다.

전기업셋팅 성형가공시의 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 열 - 점소성 해석(Thermal Visco-plastic Analysis)에 의하는 방법이 있다. 이 방법은 변형률속도(Strain rate)효과를 고려하므로써 해의 정확도를 높일려는 시도이고 실제로 인발이나 압출과 같이 변형률속도가 큰 소성가공을 해석할 때는 이 효과를 반드시 고려하여야 한다. 변형률속도의 효과를 고려하기 위하여는 온도를 여러가지로 변경시켜가며 각 설정된 온도에서 변형률속도를 또한 여러가지로 바꾸어 가며 인장 또는 압축 재료시험한 결과가 있어야 한다. 따라서 방대한 양의 재료 시험 데이터가 필요하고 이 데이터를 얻기 위하여 많은 노력과 긴 시간을 투입해야 한다. 그런데 전기 업셋팅 성형가공시의 변형률 속도는 아주 느려서 거의 정적인 변형이라고 볼 수 있다. 실제로 직경이 20~30mm되는 나이모닉 봉재를 전기업셋팅 가공으로 내연기관용 배기밸브를 예비 성형할때에 걸리는 시간은 200~250초 정도이고 직경이 50mm가 되면 360초 정도 걸린다. 이에 반하여 인발이나 압출 또는 판금의 경우에는 몇초 또는 1초안에 변형이 이루어진다. 이와같이 전기업셋팅 성형가공시는 변형률속도가 정적인 변형이라 할 정도로 느리기 때문에 굳이 방대한 양의 재료시험데이터가 필요한 열 - 점소성해석을 이용할 이유가 없다.

변형률속도가 느릴 때에는 이의 효과를 고려할 필요가 없기 때문에 재료시험 데이터가 훨씬 적게 필요하고 계산 정확도가 비교적 높은 열탄소성해석(Thermo-elasto-plastic Analysis)을 이용하는 편이 낫다. 그러므로 본 논문에서는 전기업셋팅 성형가공시의 열탄소성 해석 프로그램을 유한요

소법에 의하여 개발하기 위한 연구로서 축대칭 물체의 열탄소성 해석 과정을 제시하고 계산예를 보인다. 계산예로는 나이모닉 봉재를 내연기관용 배기밸브로 예비 성형하는 과정을 해석 하였다.

2. 축대칭 물체의 열탄소성 해석

유한요소요법에 의한 열탄소성 해석에서는 증분이론(Incremental theory)을 이용한다. 또한 대부분의 금속재료가 열을 받으면 연성재료가 되므로 연성재료에 잘 맞는 Von Mises의 항복조건(Yield Criterion)에 따라 소성변형이 일어난다고 간주한다.

지금 요소의 절점력 증분을 $\{dF\}$, 표면력 증분을 $\{dP\}$, 물체력 증분을 $\{dX\}$ 라 하면 이들과 요소의 응력증분 $\{d\sigma\}$ 와는 다음과 같은 관계가 성립한다¹⁾.

$$f_v[B]^T\{d\sigma\}dV = \{dF\} + f_s[N]^T\{dP\}dS + f_v[N]^T\{dX\}dV \quad (1)$$

여기서 $[B]$ 는 요소의 기하적인 형태와 형상함수에 따라 결정되는 매트릭스이고 $[N]$ 는 형상함수 매트릭스이다.

한편 응력증분 $\{d\sigma\}$ 와 변형률 증분 $\{d\epsilon\}$ 과의 관계는 탄성영역이나 소성영역이나에 따라 다르므로 지금부터 축대칭 물체의 경우에 있어서 이들 관계를 제시하고자 한다. 응력과 변형률 사이의 관계는

$$\{\sigma\} = [C^e](\{\epsilon\} - \{\epsilon^0\}) \quad (2)$$

가 되는데 여기서

$$\{\sigma\} = \begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{pmatrix}, \quad \{\epsilon\} = \begin{pmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{pmatrix}$$

이고 $[C^e]$ 는 재료의 강성매트릭스(Material Stiffness matrix)로 다음과 같다.

$$[C^e] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{pmatrix}$$

E 는 재료의 Young계수이고 ν 는 poisson비이다. 또한 $\{\epsilon^0\}$ 는 고유변형을 (Inherent Strain)로 이것은 열변형률과 소성변형률로 되어 있다.

식 (2)를 다시쓰면

$$\{\epsilon\} = [C^e]^{-1}\{\sigma\} + \{\epsilon^0\} \quad (3)$$

이 된다. $[C^e]^{-1}$ 는 $[C^e]$ 의 역매트릭스로 다음과 같다.

$$[C^e]^{-1} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{pmatrix}$$

식 (3)을 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\{d\epsilon\} = d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + [C^e]^{-1}\{d\sigma\} + \{\alpha\}dT + \{d\epsilon^p\} \quad (4)$$

여기서 $\{\alpha\} = [\alpha \ \alpha \ \alpha \ 0]^T$ 이고 α 는 재료의 열팽창 계수이며 dT 는 온도증분이다. 또한 $\{d\epsilon^p\}$ 는 소성변형률 증분이다. von Mises의 항복조건에 의하면 다음식으로 표시되는 등가응력 σ_e 가 단순인장시의 항복점응력 σ_Y 에 달하면 소성변형이 일어난다고 본다.

$$\sigma_e^2 = \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 + 3\tau_{rz}^2 - \sigma_r\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_z - \sigma_z\sigma_r \quad (5)$$

즉 σ_e 가 σ_Y 보다 작은 영역은 탄성영역이 되고, σ_e 가 σ_Y 와 같은 영역을 소성영역이 된다. 탄성 영역에서는 $\{d\epsilon^p\} = \{0\}$ 이 되므로 식 (4)는

$$\{d\epsilon\} = d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + [C^e]^{-1}\{d\sigma\} + \{\alpha\}dT \quad (6)$$

이 된다. 이 식으로부터 $\{d\sigma\}$ 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\{d\sigma\} = [C^e]\{d\epsilon\} - \{dL^e\} \quad (7)$$

여기서 $\{dL^e\} = [C^e]d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + \{\alpha\}dT$ 이다.

소성영역에서 소성변형률 증분 $\{d\epsilon^p\}$ 는 Prandtl - Reuss식으로 부터

$$\{d\epsilon^p\} = d\lambda\{\sigma_D\} \quad (8)$$

이 되는데 여기서 $d\lambda$ 는 상수이고 $\{\sigma_D\}$ 는 편차응력 (Deviatric Stress)으로

$$\begin{aligned} \{\sigma_D\} &= [\sigma_{Dr} \ \sigma_{D\theta} \ \sigma_{Dz} \ 2\tau_{rz}]^T \text{이며} \\ \sigma_{Dr} &= (2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_z)/3 \\ \sigma_{D\theta} &= (2\sigma_\theta - \sigma_r - \sigma_z)/3 \\ \sigma_{Dz} &= (2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta)/3 \end{aligned}$$

이다. 식 (8)을 식 (4)에 대입하면

$$\{d\epsilon\} = d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + [C^e]^{-1}\{d\sigma\} + \{\alpha\}dT + d\lambda\{\sigma_D\} \quad (9)$$

이 식의 양변에 $[C^e]$ 를 곱하여 $\{d\sigma\}$ 에 관하여 정리하면

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [C^e]\{d\epsilon\} - [C^e]d[C^e]^{-1}\{\sigma\} \\ &\quad - [C^e]\{\alpha\}dT - d\lambda[C^e]\{\sigma_D\} \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 소성영역에서는 등가응력 σ_e 와 단순인장시 항복점응력 σ_Y 가 같으므로

$$\sigma_e^2 = \sigma_Y^2 \quad (11)$$

이 되고 이 식에서 양변의 전미분을 취하면

$$\begin{aligned} d\sigma_e^2 &= \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \sigma_r} d\sigma_r + \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \sigma_\theta} d\sigma_\theta + \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \sigma_z} d\sigma_z + \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \tau_{rz}} d\tau_{rz} \\ &= 2\sigma_Y d\sigma_Y \end{aligned} \quad (12)$$

가 된다. 식 (5)에서

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \sigma_r} &= 2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_z, & \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \sigma_\theta} &= 2\sigma_\theta - \sigma_r - \sigma_z, \\ \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \sigma_z} &= 2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta, & \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial \tau_{rz}} &= 6\tau_{rz} \end{aligned}$$

이므로 이들을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\{\sigma_D\}^T \{d\sigma\} = \frac{2}{3} \sigma_Y d\sigma_Y \quad (13)$$

소성변형 ϵ_p 와 온도 T 의 함수이므로

$$d\sigma_Y = \frac{\partial\sigma_Y}{\partial\epsilon_p} d\epsilon_p + \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT \quad (14)$$

가 되고 이때의 소성변형일(Plastic work)의 증분 dW_p 는 다음과 같다.

$$dW_p = \sigma_Y d\epsilon_p \quad (15)$$

한편 조합응력하여 소성변형일의 증분 dW_p 는

$$dW_p = \{\sigma\}^T \{d\epsilon^p\} \quad (16)$$

이 되는데, 등방성 소성경화(Isotropic plastic hardening)재료라고 간주한다면 식(15)와 (16)을 등치시킬 수 있으므로 $d\epsilon_p$ 는 다음과 같이 된다.

$$d\epsilon_p = \frac{1}{\sigma_Y} \{\sigma\}^T \{d\epsilon^p\} \quad (17)$$

이 식에 식(8)의 $\{d\epsilon^p\}$ 를 대입하고 이것을 다시 식(14)에 대입하여 정리하면

$$d\sigma_Y = d\lambda \frac{H'}{\sigma_Y} \{\sigma\}^T \{\sigma_D\} + \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT \quad (18)$$

이 된다. 여기서 H' 는 응력 - 소성변형을 곡선에서 곡선의 기울기로서

$$H' = \frac{\partial\sigma_Y}{\partial\epsilon_p}$$

이다. 식 (18)을 식 (13)에 대입하면

$$\{\sigma_D\}^T \{d\sigma\} = \frac{2}{3} d\lambda H' \{\sigma\}^T \{\sigma_D\} + \frac{2}{3} \sigma_Y \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT \quad (19)$$

이 식에 식 (10)의 $\{d\sigma\}$ 를 대입하여 정리하면 다음과 같이 되고

$$\begin{aligned} \{\sigma_D\}^T [C^e] \{d\epsilon\} - d[C^e]^{-1} \{\sigma\} - \{\alpha\} dT \\ - \frac{2}{3} \sigma_Y \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT = d\lambda \{\sigma_D\}^T [C^e] \{\sigma_D\} \\ + \frac{2}{3} H' \{\sigma\}^T \{\sigma_D\} \end{aligned} \quad (20)$$

이 식으로부터 $d\lambda$ 를 구하면 다음과 같다.

$$d\lambda = \frac{1}{S} \{\sigma_D\}^T [C^e] \{d\epsilon\} - d[C^e]^{-1} \{\sigma\} - \{\alpha\} dT$$

$$- \frac{2\sigma_Y}{3S} \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT \quad (21)$$

여기서 S 는 스칼라양으로

$$S = \{\sigma_D\}^T [C^e] \{\sigma_D\} + \frac{2}{3} H' \{\sigma\}^T \{\sigma_D\}$$

이다. 식(21)의 $d\lambda$ 에 따라서 부하(Load)와 제하(Unloading)가 판별되는데, 이 값이 +이면 부하이고, -이면 제하이다.

지금 소성영역에서 응력증분 $\{d\sigma\}$ 와 변형을 증분 $\{d\epsilon\}$ 의 관계를 구하기 위하여 식(21)을 식(10)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} = \left([C^e] - \frac{1}{S} [C^e] \{\sigma_D\} \{\sigma_D\}^T [C^e] \right) \\ \{d\epsilon\} - d[C^e]^{-1} \{\sigma\} - \{\alpha\} dT \\ + \frac{2\sigma_Y}{3S} \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT [C^e] \{\sigma_D\} \end{aligned} \quad (22)$$

이 식을 식(7)과 같은 형태로 고쳐쓰면

$$\{d\sigma\} = [C^{ep}] \{d\epsilon\} - \{dL^p\} \quad (23)$$

여기서 $[C^{ep}] = [C^e] - [C^p]$

$$\begin{aligned} [C^p] = \frac{1}{S} [C^e] \{\sigma_D\} \{\sigma_D\}^T [C^e] \\ \{dL^p\} = [C^{ep}] (d[C^e]^{-1} \{\sigma\} + \{\alpha\} dT) \\ - \frac{2\sigma_Y}{3S} \frac{\partial\sigma_Y}{\partial T} dT [C^e] \{\sigma_D\} \end{aligned}$$

프로그래밍을 위하여 S , $[C^p]$, $\{dL^p\}$ 를 구하여 보면 다음과 같다.

$$[C^e] \{\sigma_D\} = 2G \{\sigma_d\} \quad (24)$$

여기서 $\{\sigma_d\} = [\sigma_{Dr} \ \sigma_{D\theta} \ \sigma_{Dz} \ \tau_{rz}]^T$ 로 $\{\sigma_D\}$ 와 구별하여야 한다. G 는 전단탄성계수이다. 또한

$$\{\sigma\}^T \{\sigma_D\} = \frac{2}{3} \sigma_e^2 \quad (25)$$

이고

$$\{\sigma_D\}^T [C^e] \{\sigma_D\} = \{\sigma_D\}^T 2G \{\sigma_d\} = \frac{4G}{3} \sigma_e^2 \quad (26)$$

이므로 결국 S 는

$$S = \frac{4G}{3} \sigma_e^2 + \frac{2}{3} H' \cdot \frac{2}{3} \sigma_e^2 = \frac{4G}{3} \sigma_e^2 \left(1 + \frac{H'}{3G} \right) \quad (27)$$

이 된다. 같은 방법으로 $[C^p]$ 는

$$[C^p] = \frac{4G^2}{S} \{\sigma_d\} \{\sigma_d\}^T = \frac{9G^2}{\sigma_c^2(3G+H')} \{\sigma_d\} \{\sigma_d\}^T \quad (28)$$

이고 또한 $\{dL^p\}$ 는

$$\{dL^p\} = [C^{ep}](d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + \{a\}dT) - \frac{3G\sigma_Y}{\sigma_c^2(3G+H')} \frac{\partial \sigma_Y}{\partial T} dT \{\sigma_d\} \quad (29)$$

이다. 식(7)과 식(23)은 각각 탄성영역과 소성영역에서의 응력증분 $\{d\sigma\}$ 와 변형율 증분 $\{d\varepsilon\}$ 과의 관계식이다. 이 두식은 같은 형태로 다같이

$$\{d\sigma\} = [C]\{d\varepsilon\} - \{dL\} \quad (30)$$

의 형태이다. 이식에서 탄성영역에서는 $[C]=[C^e]$, $\{dL\}=\{dL^e\}$ 이고 소성영역에서는 $[C]=[C^p]$, $\{dL\}=\{dL^p\}$ 이다. 또한 변형율 증분 $\{d\varepsilon\}$ 은 절점변위 증분 $\{dq\}$ 와 다음의 관계에 있으므로

$$\{d\varepsilon\} = [B]\{dq\} \quad (31)$$

이 식과 식(30)을 식(1)에 대입하여 정리하면

$$[K]\{dq\} = \{dR\} \quad (32)$$

가 된다. 여기서

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dV$$

$$\{dR\} = \int_V [B]^T \{dL\} dV + \{dF\} + \int_S [N]^T \{dP\} dS + \int_V [N]^T \{dX\} dV$$

이다. 식(32)를 모든 요소에 대하여 구하고 조립(Assembling)하여 풀면 절점의 변위 증분 $\{dq\}$ 가 구하여 지고 식(31)에서 변형율 증분 $\{dq\}$, 식(30)에서 응력증분 $\{d\sigma\}$ 가 구하여 진다.

3. 계산예

업셋팅 가공시의 열탄소성 해석을 적용하는 예로 직경 27mm의 나이모닉 봉재를 대형 디젤기관용 배기밸브로 예비성형하는 과정을 들었다. Fig. 1은 나이모닉 재료의 탄성계수가 온도에 따라 변화하는 모양을 나타내고 Fig. 2는 항복점과 최대

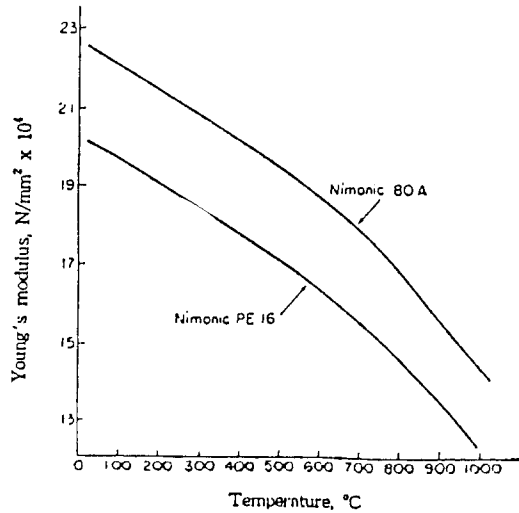


Fig. 1 Variation of Young's modulus of Nimonic 80A and PE 16

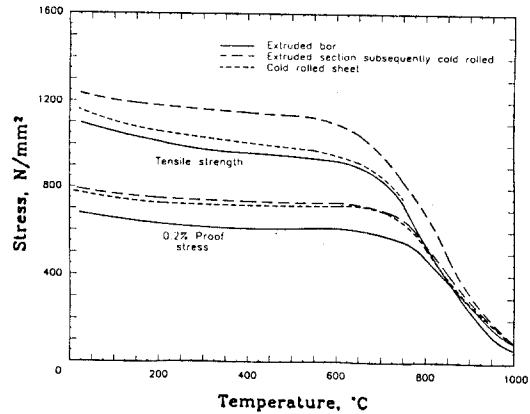


Fig. 2 Variation of tensile properties of Nimonic 80A

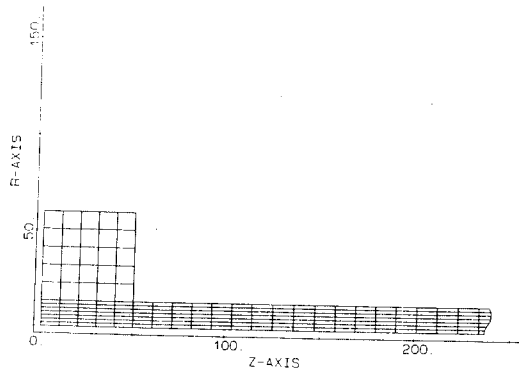


Fig. 3 Finite elements of anvil and materials before upsetting

Table 1 Materials properties of Nimonic

Properties	Symbols	Units	Values
Coefficient of thermal conductivity	k	W/(m · K)	18.4
Density	ρ	kg/m ³	8190
Specific heat	c	J/(kg · K)	545
Coefficient of convection heat transfer(Air)	h	W/(m ² · K)	6.5
Coefficient of convection heat transfer(Water)	h	W/(m ² · K)	890
Energy input	q	W/m ²	52000000
Total emissivity	ϵ		0.95
Coefficient of thermal contact	h_c	W/(m ² · K)	1894

강도의 온도의존성을 나타낸다. 이 계산에서는 재료가 나이모닉 봉재이므로 사출봉(Extruded bar)에 대한 값들을 사용하였고 그 외에 이 계산에 사용한 데이터는 Table 1과 같다.

Fig. 3은 upsetting 시작하기 전의 유한요소 분할을 나타낸다. 전부 사각형 요소만을 사용하였고 소재와 앤빌이 축대칭이기 때문에 한 쪽만을 그렸다. 소재의 길이는 800mm로 잡았고 요소 소재 분할은 반경방향으로 7등분, 길이방향으로 74등분하였는데 이 그림에서는 길이 방향의 요소를 전부 나타내지 못 하였다.

소재를 앤빌에 대고 압축시킬때 앤빌과 소재 사이에는 마찰력이 중심방향으로 작용한다고 보았다. 소재의 압축력을 점차 증가시켜 가면 발열부가 부풀어 오르면서 사각형 요소가 심하게 찌그러진다. 이와 같이 요소가 심하게 찌그러지면 부정확한 해를 얻거나 또는 더 이상 계산을 계속하는 것이 불가능하게 되므로 적당한 시기에 격자를 재구성 해 주어야 한다. 어느 시기에 무엇을 기준으로 하여 격자를 재구성 하여야 하는 것은 이것만으로도 중요한 연구대상이 되어 있으므로 여기서는 상세한 내용의 언급을 피하고 대략 다음과 같은 두가지 방법이 있다는 것만을 말해 두고자 한다.

첫째는 사각형 요소의 내각기준이다. 사각형 요소의 내각이 0도나 180도에 가까우면 요소가 심하

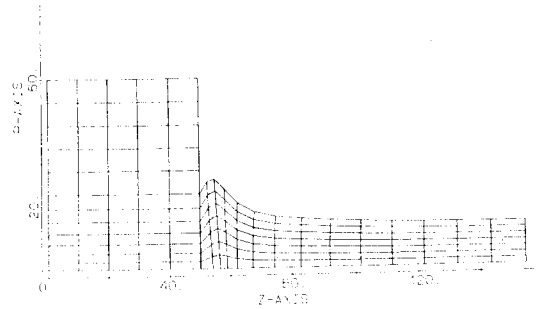


Fig. 4 Configuration of finite elements after 40 sec. of upsetting.

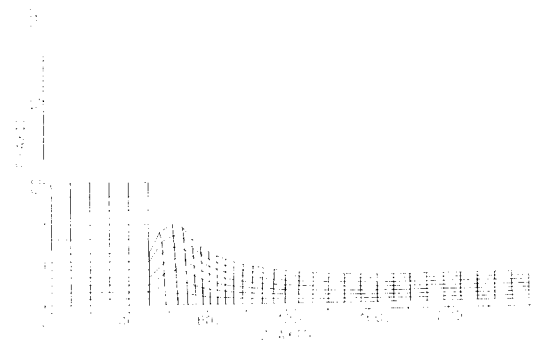


Fig. 5 Configuration of finite elements after 60 sec. of upsetting.

게 찌그러져 있다는 것을 의미하므로 이 각도에 가까워지면 격자를 재구성 하여야 한다.

둘째는 사각형 요소의 변길이 기준이다. 사각형 요소에서 가장 긴 변과 가장 짧은 변의 비가 크거나, 사각형의 대각선에서 긴 것과 짧은 것의 비가 심하게 찌그러져 있음을 뜻하므로 격자를 재구성 해 주어야 한다.

본 연구에서는 위의 두가지 방법중 둘째번 방법을 사용하였다. 즉 어느 한 요소라도 사각형의 가장 긴 변과 가장 짧은 변의 길이비가 7.5이상이거나 사각형의 긴 대각선과 짧은 대각선의 길이비가 7.5이상이면 격자 재구성을 하도록 하였다. 이와 같이 격자를 재구성하면 다음 단계의 계산은 구 격자의 절점들로부터 새로운 격자의 절점들에서의 정보전달이 필요한데 이 정보전달은 선형 보간원칙을 사용하였다. 즉 새로운 격자의 절점이 속해있

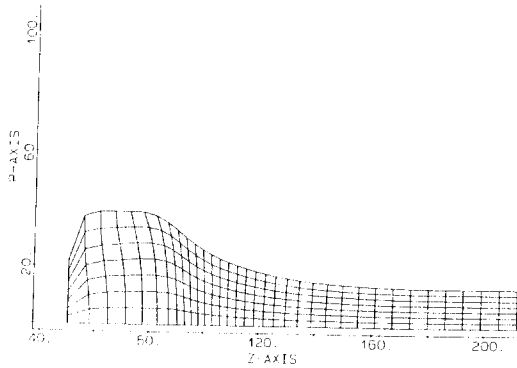


Fig. 6 Configuration of finite elements after 110 sec. of upsetting

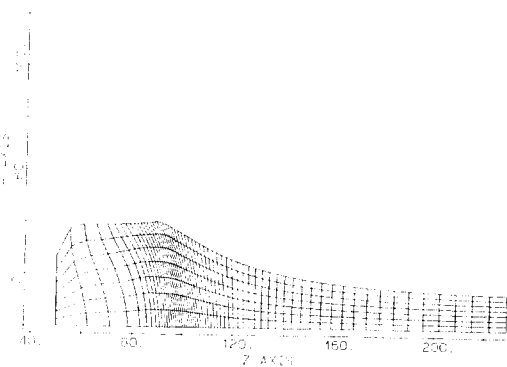


Fig. 7 Configuration of finite elements after 150 sec. of upsetting.

는 구격자의 사각형 요소로부터 이 절점의 정보들을 선형 보간으로 계산하여 전달받는다. Fig. 4는 업셋팅 시작하고 나서 40초 후의 모습을 계산하여 나타낸다. 발열부가 꽤 부풀어 있음을 볼 수가 있다. Fig. 5는 60초 때의 모습을 나타내고 Fig. 6은 110초 때의 모습을 나타낸다. Fig. 7은 150초 때의 최종 성형 모습을 나타낸다.

4. 실험

Fig. 8은 대형 배기밸브의 예비성형을 위하여 개발한 업셋팅 가공기의 개략도를 보이고 Photo. 1은 이 장치를 나타내는 사진이다. 소재에 큰 압축력을 가하기 위하여 2개의 유압 실린더를 사용하였다. 이 장치는 횡형으로 설계된 강제 용접 구조물로서 2개의 주유압실린더가 우측에 상하 횡방향

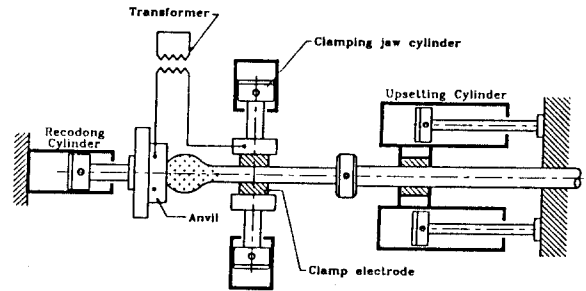


Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus

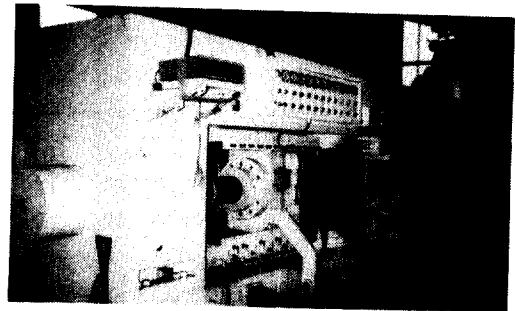


Photo. 1 Experimental apparatus

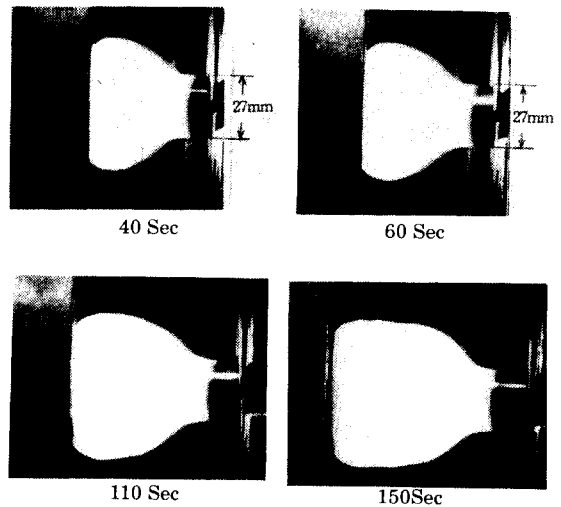


Photo. 2 Experimental configurations of upsetting

으로 배치되고 이의 중심선 방향으로 설치된 압축봉에 의해 소재에 힘이 가하여지고, 좌측단에 배치된 쿠손 실린더에 앤빌과 물 자켓(Jacket)이 설치되어 전극역할도하며 소재의 성형 형상에 따라 후진하게 되고, 중앙부에는 2개의 클램핑 실린더가

상하수직 대칭 방향으로 배치되고 각각 그 일단에 전극이 취부되어 있으며 소재를 피딩(Feeding)하면서 파지하는 역할도 하는 시스템이다. 가공 소재를 밀어주는 압축봉과 주실린더가 힘의 작용선에 일치 시킴으로서 피가공 재료에 벽클링이 발생하지 않는 설계구조로 되어 있다. 가공재료는 가열이 동시에 이루어진다. 일단 재료가 설치되면 유압식 전극크램프가 작동하여 고정되고 그 재료의 일단은 앤빌과 접촉하여 통전이 되어 가열이 시작되고 유압실린더에 의해서 계속 가압되어 가공공정이 진행되며 성형이 완료되면 자동적으로 전원과 유압회로가 정지된다. 소재의 가열 장치는 특수변압기를 사용한 전기저항 가열 방식으로 가열전압은 4-8볼트(Volt)이고 싸이리스터(Thyristor)에 의해 전원이 제어된다.

실험 데이터는 전절의 Table 1과 같다. Photo. 2는 엷셋팅 시작하고 나서 각각 40초, 60초, 110초, 150초 때의 모습을 나타내는데 유한요소 해석의 결과와 거의 일치하고 있음을 볼 수가 있다.

5. 결 론

엷셋팅 가공과정을 유한 요소법에 의한 열탄소성 해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엷셋팅 가공시에는 변형속도가 매우 느리므로 계산시 필요한 재료물성치가 엄청나게 많은 열점소성 해석보다는 계산시 필요한 재료물성치가 비교적 작은 열탄소성 해석을 하여도 만족한 계산 결과를 얻을 수 있다.

(2) 유한요소법에 의한 축대칭 물체의 열탄소성 해석은 원형 단면 봉의 엷셋팅 가공 시물레이션 프로그램 작성에 매우 유용하다.

(3) 엷셋팅 가공시의 최적 가공 조건을 찾는 데

본 연구에서 제시한 축대칭 물체의 열탄소성 해석이 유효하게 쓰일 수 있다.

참고문헌

- 1) 박태인 외, 대형디젤기관용 배기밸브개발(1), 한국기계연구원, 연구보고서(1993)
- 2) Alexander Mendelson, PLASTICITY : Theory and Application, The Macmillan Company, New York, 1970.
- 3) R. A. C. Slater, Engineering Plasticity, Theory and Application to metal Forming Process, The Macmillan Press Ltd, London 1978.
- 4) D. R. J. Owen, E. Hilton, Finite Elements in Plasticity : Theory and practice, Pinerridge Press Limited, Swansea, U. K.
- 5) Kurt Lunge, Handbook of Metal Forming, McGraw - Hill book Company.
- 6) O. C. Zienkiwicz, The Finite Element Method, McGraw - Hill, 1977.
- 7) Erwin Kreyzig, Advanced Engineering Mathematics, John Wiley, 1984.
- 8)王之錫, 有限要素法에 의한 熱彈塑性 應力解析(Ⅰ), 韓國船舶機關學會誌, 第14卷, 第3號, pp. 169 - 176 (1990).
- 9)王之錫, 有限要素法에 의한 熱彈塑性 應力解析(Ⅱ), 韓國船舶機關學會誌, 第14卷, 第4號, pp. 235 - 244 (1990).
- 10) 유인선, 有閑要素法을 利用한 軸對稱 連續體의 動力學的 熱彈塑性 應力解析法, 陸軍第3士官校 논문집, 第7集(1978)
- 11) 강연식, 양동열, 자동격자 재구성법을 이용한 평균형 압출의 3차원 열-점소성 유한요소해석, 대한기계학회 '94년도 춘계학술대회논문집, pp. 366 - 370.