

## 세라믹 금형을 이용한 열간 튜브 압출의 축대칭 유한요소해석

강연식\* · 양동열\*\* · 정순길\*\*\* · 이준근\*\*\*\*

(1997년 6월 7일 접수)

# An Axisymmetric Finite Element Analysis of Hot Tube Extrusion Using Ceramic Dies

Yeon-Sick Kang, Dong-Yol Yang, Soon-Kil Chung and June-Gunn Lee

### Abstract

This study is concerned with the thermo-viscoplastic finite element analysis of hot tube extrusion through square dies with a mandrel. The problem is treated as a non-steady state and the ALE description is used due to abruptly turning flow at the die aperture. Since the contact heat transfer coefficient and the friction factor are required in the analysis, experiments are also carried out to determine the values. In order to apply ceramics to an extrusion die, the study is focussed on understanding the characteristics of the process. The simulated results provide the useful informations such as metal flow, temperature distribution, stress state etc. The elastic analysis of the dies is carried out to obtain the stress state of the ceramic dies.

**Key Words** : Ceramic die(세라믹 금형), Extrusion of tube(튜브압출), Square Dies(평금형), ALE finite element method(ALE 유한요소법)

### 1. 서 론

기존의 금형 재료는 성형(특히 열간 성형)시 금형의 마모(wear)로 인하여 금형 제작비, 금형 교체 시간 등의 손실을 가져오고 있다. 이는 생산성의 감소로 이어진다. 기존의 금형 재료 대신에 내마모성이 강한 세라믹 금형을 생산공정에 적용하면 연속적인 생산성의 증가로 제품의 생산경비를 감소시킬 수 있다. 또한 기존의 금형 재료보다 마찰상태가 향상되므로 좋은 표면을 갖는 제품을 생산할 수도 있다.

세라믹 금형은 기존의 금형 재료와 여러 가지면에서 매

우 다르다. 따라서 세라믹 금형을 소성가공 공정에 효과적으로 적용하기 위해서는 성형중의 소재의 유동, 금형에 작용하는 압력, 온도분포 등을 알아야 한다. 지금까지 세라믹 부품의 사용이 크게 제한된 원인중의 하나는 전기가 통하지 않기 때문에 EDM같은 기계가공을 할 수 없기 때문<sup>(1)</sup>이었다. 본 연구는 국내에서 개발된 전도성 세라믹을 튜브 압출공정의 금형에 적용하기 위한 작업의 일환이다. 세라믹을 사용했을 경우 공정 특성을 파악하여 설계자료로 사용하고자 한다.

중공형 형재의 압출에는 만드렐(mandrel)을 이용한 압출과 porthole, spider, bridge금형을 이용한 압출 등이

\* 고등기술연구원 생산기술연구실  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\*\* 세계평화기술연구소  
\*\*\*\* 한국과학기술연구원 세라믹스연구부

있다. 이 중에서 만드렐을 이용한 증공형 형재압출은 가장 일찍부터 사용된 방법중의 하나이다. 이 방법은 최근에 들어서 다른 방법들에 비해 상대적으로 응용이 줄어들고 있지만 튜브형 형재를 생산하는 가장 쉬운 방법중의 하나로 알려져 있다.

증공형 형재의 압출에 대한 연구는 일찍부터 여러 연구자들에 의해서 연구가 이뤄졌다.<sup>(2-4)</sup> 본 연구에서는 만드렐을 이용한 열간 압출 공정을 유한요소법으로 해석해보고자 한다. 예제에 사용되는 금형은 평금형(square die or flat die)이다. 증공형 형재의 생산은 대부분 평금형을 이용하여 성형되고 있다. 평금형을 이용한 압출공정은 금형 제작이 비교적 간단하고 생산성이 높아 널리 이용되고 있다. 그러나 이에 대한 해석은 평금형을 사용할 때 존재하는 급격한 유동변화 때문에 어려움을 겪어왔다. 따라서 평금형을 이용한 열간 튜브압출에 대한 해석은 해석의 어려움 때문에 비교적 많은 연구가 이뤄지지 않았다. 본 연구에서는 최근에 개발되기 시작한 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)방법을 도입하여 해석을 수행하였다. ALE방법은 라그랑지안(Lagrangian)방법과 오일러리안(Eulerian)방법의 장점을 취한 것으로 격자를 사용자가 임의로 조정할 수 있다. ALE방법은 초기에 유체 역학문제를 해석하기 위해 개발되었으나 최근에는 소성 가공 문제를 비롯하여 다양한 문제에 적용이 확대되고 있다.

본 연구에서는 압출재의 형상을 공정에 적용이 쉽게 하기 위하여 축대칭 형상을 선택하였다. 유한요소해석을 통하여 튜브압출시 유통특성을 살펴보았다. 온도는 경도, 강도 등에 영향을 미치므로 온도해석도 수행하여 온도분포 상태도 알아보았다. 열간 성형에서는 비정상상태의 해석이 요구<sup>(5)</sup>되어지므로 본 연구에서는 문제를 비정상상태로 보고 비정상상태의 해석을 수행하였다. 유한요소 해석을 하기 위해서는 여러 가지 계수나 상수들이 필요하다. 이 중에서 해석에 매우 중요하고도 기존의 자료에서 구할 수 없는 것이 마찰상수와 접면열전달계수(contact or over-all heat transfer coefficient)이다. 따라서 실험을 통하여 이러한 값들을 구한 후 계산을 수행하였다. 계산결과를 기존의 금형재료를 사용한 경우와 비교하여 보았다.

금형에 걸리는 응력상태가 금형설계 자료로 중요하므로 금형의 응력해석을 수행하였다. 금형의 응력상태를 알기 위하여 탄성 유한요소프로그램을 통한 금형의 응력 해석을 수행하여 보았다.

## 2. 이론 해석

ALE 접근 방식은 격자와 물질간의 이동을 독립적으로 처리할 수 있으므로 사용자가 격자를 임의대로 이동시켜 해석할 수 있다. 본 연구에서는 ALE 접근에 의한 강-점소성 유한요소 수식화를 사용한다.

### 2.1 변형해석을 위한 유한요소 수식화

기본방정식을 유도하는데 있어서 관성효과를 무시하고 소재는 강-점소성체로 가정한다. 일반적인 운동량 방정식을 쓰면 아래와 같다.

$$(\tau_{ij})_{,j} + b_i = \rho \dot{v}_i \quad (1)$$

이때  $b_i$ 는 체력(body force)이고  $\rho$ 는 밀도이다. 물질 좌표에 대한 시간 미분( $\dot{\cdot}$ )과 기준좌표에 대한 시간 미분( $\cdot$ )간의 관계<sup>(6)</sup>를 속도장에 적용하면 다음과 같다.

$$\dot{v}_i = v_i^* + c_j(v_i)_{,j}, \text{ where } c_j = V_j - W_j \quad (2)$$

여기서  $V$ 는 물질의 속도이고  $W$ 는 격자의 속도이다. 식(2)를 식(1)에 대입하면 아래와 같다.

$$\rho v_i^* + \rho c_j v_{i,j} = \tau_{ij} + b_i \quad (3)$$

코시 응력(Cauchy stress)을 편차 응력(deviatoric stress)으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{ij} = \tau'_{ij} + \sigma_m \delta_{ij}, \text{ where } \sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (3)$$

재료가 강-점소성이고 등방성과 비압축성을 가진다고 가정하면 다음 식<sup>(7)</sup>을 만족한다.

$$\tau'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (4)$$

$\delta v_i$ 는 경계조건에 합치하는 속도장에 대한 임의의 변분량이라고 하면 식(1)은 식(2), (3), (4)를 고려하여 변분 원리에 의해 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} \Pi = & \int \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV + K^* \int \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV \\ & + \int \rho (V_j - W_j) v_{i,j} \delta v_i dV - \int F_i \delta v_i dS = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

여기에서  $K^*$ 는 비압축성을 고려하기 위한 벌칙 상수 (penalty constant)이다.  $F$ 는 표면에 작용하는 접촉력 (traction)이고  $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다. 식(5)의 각 항을 묶어 다음과 같이 간단한 형으로 표현할 수 있다.

$$\Pi = \sum_{m=1}^M [\Pi_1^{(m)} + \Pi_2^{(m)} + \Pi_3^{(m)} - \Pi_4^{(m)}] = 0 \quad (6)$$

식 (5)는 속도에 대한 비선형 방정식이 되므로 식 (5)를 Taylor 전개한 후 고차원을 무시하여 다음과 같이 선형화 시킨 후 간단함과 2차 수렴특성을 갖는 Newton-Raphson 반복 방법을 이용하여 속도장을 구한다.

$$\sum_{m=1}^M \left[ \frac{\partial \Pi_1^{(m)}}{\partial V} + \frac{\partial \Pi_2^{(m)}}{\partial V} + \frac{\partial \Pi_3^{(m)}}{\partial V} - \frac{\partial \Pi_4^{(m)}}{\partial V} \right]_{(n-1)} \Delta V_{(n)} = - \sum_{m=1}^M [\Pi_1^{(m)} + \Pi_2^{(m)} + \Pi_3^{(m)} - \Pi_4^{(m)}]_{(n-1)} \quad (7)$$

여기서 (n-1)과 (n)은 이전 반복 계산과 현재 반복 계산의 단계를 의미한다.

### 2.2 온도해석방법

본 연구에서는 다음과 같은 과정을 통해 온도를 구한다<sup>(9)</sup>.

- (1) 수렴된 속도장으로 Fig. 1과 같이 물질계 가상격자 ( $x_t$ )를 구성한다.
- (2) 가상격자를 이용하여 라그랑지안 열 방정식으로 열 유량을 구한다.
- (3) 가상격자에서 온도장을 구한다.
- (4) 다음의 식을 이용하여 격자계에 온도와 열유량을 재 지정해 준다.

$$T_{(n)}^g = T_{(n-1)}^g + \Delta^g T \quad \text{where, } \Delta^g T = \Delta^m + \Delta t c_k \frac{\partial T}{\partial x_k} \quad (8)$$

이때 윗첨자  $g$ 와  $m$ 은 각각 격자계와 물질계에 대한 값을 의미한다.

### 2.3 성형해석을 위한 수치적 구현

ALE방법에 의한 전체적인 해석 과정은 Fig. 2에 나타내었다. ALE수식의 대류항으로 인하여 행렬식이 비대칭이므로 총 매트리스(full matrix)에 대한 skyline solver를 사용하여 행렬식을 풀었다.

ALE방법의 장점중의 하나가 격자를 사용자의 의도에 따라 임의로 조정할 수 있다는 것이다. 격자조정은 Fig. 3과 같이 라그랑지안 영역과 순수 오일러리안 영역으로 구

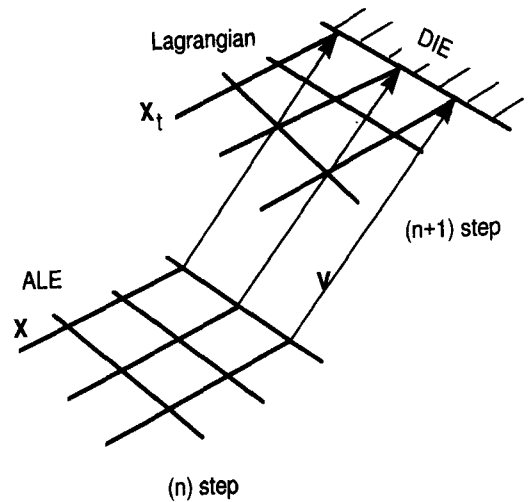


Fig. 1 Construction of pseudo material domain for temperature analysis

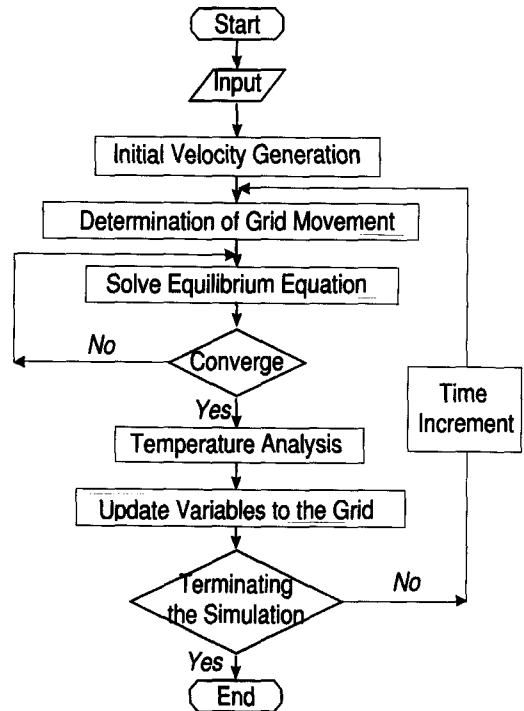


Fig. 2 Flow chart for solving procedure

분하여 해석하였다. 변형이 주로 일어나는 영역은 오일러리안 묘사에 의해 격자를 정지시켜 격자의 뒤튐림을 방지하였다. 압출된 부분과 펀치부근의 변형이 심하지 않으

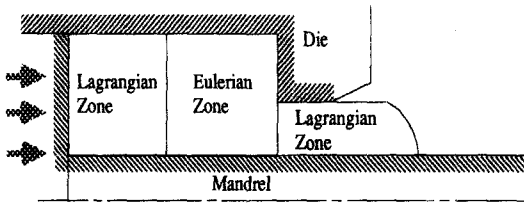


Fig. 3 Division of extrusion billet into three zones

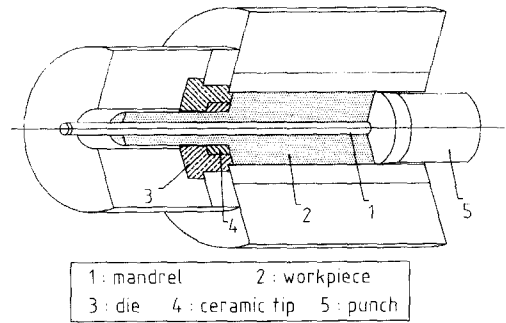


Fig. 4 Extrusion with a mandrel

로 라그랑지안 영역으로 잡아 물질 경계를 제대로 표현할 수 있게 하였다.

ALE 방법은 격자계와 물질계가 일치하지 않기 때문에 경로 의존적인 변수에 대해서는 재지정 과정이 필요하다. 재지정 과정은 현재 시간 스텝(time step) (n)과 다음 시간 스텝 (n+1)의 중간에서 물질과 격자간의 대류 효과를 고려해 준다.<sup>(10)</sup>

### 3. 만드렐을 이용한 축대칭 튜브압출의 해석

본 연구에서 해석할 압출공정은 만드렐을 이용한 축대칭 형상의 튜브 열간 압출이다. 만드렐을 이용한 튜브 압출공정의 일반적인 형상을 Fig. 4에 나타냈다.<sup>(11)</sup> 그림에서 부품 1이 만드렐이다. 금형 전체를 세라믹으로 대체하면 제작단가와 재료비가 상승하므로 열간공구강 안에 필요한 부분만 세라믹으로 대체하는 삽입방식으로 설계하였다. 세라믹으로 대체하는 금형의 일부를 Fig. 5에 나타냈다. 세라믹으로 대체하는 금형의 일부는 Fig. 4에서 부품 4에 해당된다. 사용한 세라믹 금형은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(60%) + TiN(40%)의 복합분말을 HP(hot pressing)공정으로 성형한 것이다.

사용된 제품 소재는 AISI A1 2024-O이다. 이때 사용된 소재의 유동응력식<sup>(12)</sup>은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = C(T)\dot{\epsilon}^{m(T)} \quad (N/mm^2) \quad (9)$$

C와 m값은 Table 1의 값을 이용하여 계산하였다. 적용할 공정의 만드렐 지름은 ϕ12.0 mm이고 금형의 내경은 ϕ15.2 mm이다. 공정조건은 다음과 같다.

- 소재의 초기온도 : 440 ℃
- 공구의 초기온도 : 405 ℃
- 대기 온도 : 30 ℃

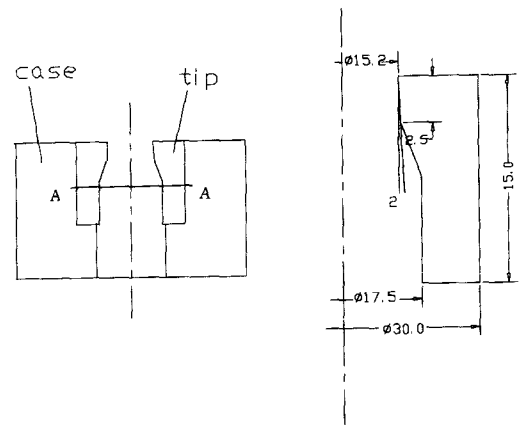


Fig. 5 Inserted ceramic tip

Table 1 Stress-strain rate properties given with respect to the temperature

Temp	C(T)	M(T)
350℃	79.551	0.02807
400℃	70.396	0.06397
450℃	62.078	0.10200
480℃	52.981	0.12522

압출속도 : 25.0 mm/sec (램속도 : 0.90 mm/sec)  
 초기 소재의 크기 : 내경12 mm, 외경 50 mm, 길이 55 mm  
 계산에 사용된 상수와 계수<sup>(13-15)</sup>들은 다음과 같이 사용하였다.  
 공구의 열전도계수(N/sec/℃) : 세라믹 23.26, AISI H13 28.4

공구의 (밀도\*비열) 값(N/mm<sup>2</sup>/°C) : 세라믹 4.03,  
 AISI H13 3.69  
 소재의 열전도계수(N/sec/°C) : 182.0  
 소재의 (밀도\*비열) 값(N/mm<sup>2</sup>/°C) : 2.84

해석에 필요한 값들 중에서 접촉열전달계수와 마찰상수는 해석 결과에 중요한 값이지만 본 연구에서 사용한 세라믹 재료가 비교적 최근에 개발된 재료이므로 기존의 연구 결과에서 보고 된 적이 없었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6과 같은 실험장치<sup>(16)</sup>를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험은 로안의 온도를 400°C로 유지시킨 상태에서 수행하였다. 마찰상수는 외경:내경:높이의 비가 6:3:2인 링(ring)을 사용하여 무윤활조건에서 구했다. 이때 구한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 마찰상수는 0.4와 0.5 사이로 본 연구에서는 0.48을 택하였다.

접면열전달계수의 산출은 기존의 방법<sup>(16)</sup>을 이용하여 구하였다. 그러나 세라믹에 지름이 작고 긴 구멍을 가공하기 어려우므로 시편에만 열전대(thermocouple)를 삽입하여 온도를 구하여 계산에 이용하였다. 실험은 3번을 수행하여 평균값을 취했고 이 값들을 이용하여 접면열전달계수를 구하였다. 산출한 접면열전달계수를 평균압력의 함수로 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 접면열전달계수는 7.0과 8.0사이로 본 연구에서는 7.6 (N/sec/mm<sup>2</sup>/°C)을

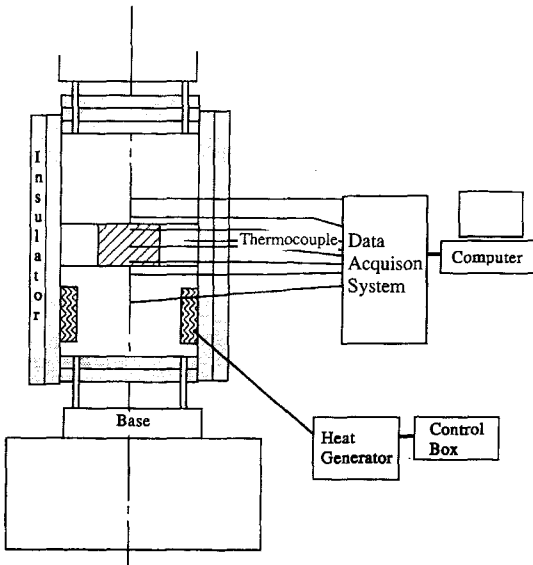


Fig. 6 Schematic of the experimental setup to determine the friction factor and the contact heat transfer coefficient

택하였다.

계산에 사용된 유한요소격자를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9(a)에는 소재의 격자를 나타냈다. 이때 소재에는 375개의 유한요소가 사용되었다. Fig. 9(b)는 금형과 펀치를 포함한 공구의 유한요소 격자를 나타냈다.

실제 공정에서 만드렐부에 이형과 윤활을 위하여 윤활제를 바르고 세라믹으로 교체되는 부분은 금형 일부이므로 공구 표면의 마찰조건을 Fig. 10과 같이 고려하였다. 금형과 컨테이너는 일체형으로 가정하여 해석하였다. 유

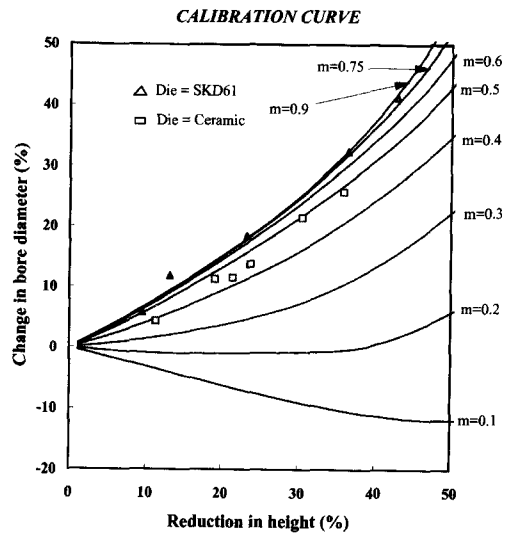


Fig. 7 Calibration curve for determination of friction factor

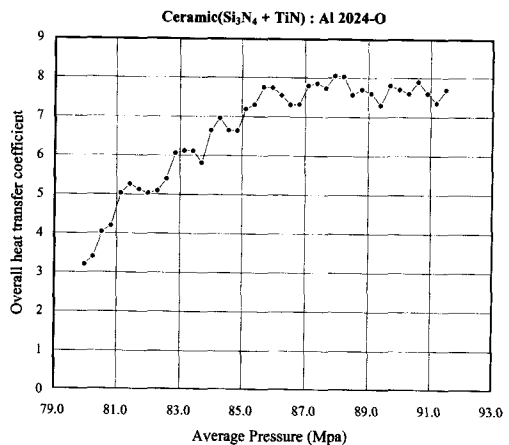


Fig. 8 Values of contact heat transfer coefficients for various interface pressure

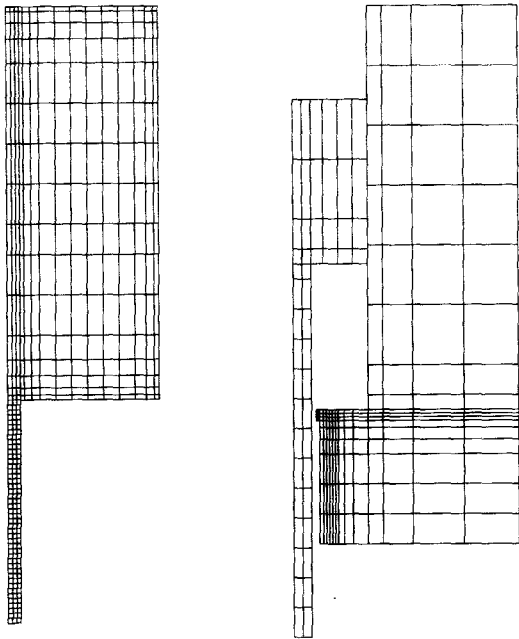
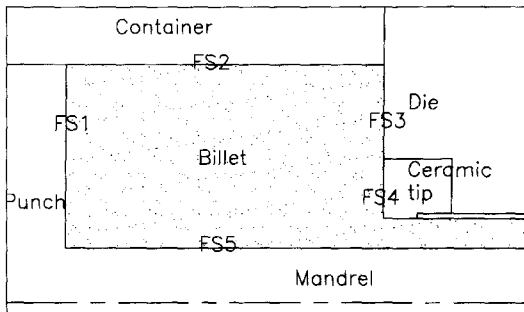


Fig. 9 Mesh configuration of (a) the workpiece and (b) the tool



FS1, FS2, FS3 : Without lubrication ( $m=0.85$ )  
 FS4 : Without lubrication ( $m=0.48$ )  
 FS5 : With lubrication ( $m=0.21$ )

Fig. 10 Treatment of friction boundary condition

한요소해석으로부터 나온 금형오리피스(die orifice) 주위의 소재 유동속도를 Fig. 11에 화살표로 나타냈다. Fig. 12에는 소재의 유효변형률속도 분포를 나타냈다. 소재가 평균형을 빠져나가는 부분에 형상의 변화가 급격히 변하므로 이 부분에서 유동의 변화가 매우 큼을 볼 수 있다. 따라서 이 부분에서 유효변형률속도의 크기가 매우 큼을 볼 수 있다. 금형부를 기존의 AISI H13으로 한 경우는 마찰상수가 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 0.8이상이므로 0.85을 택하였고 접면열전달계수는  $27.5(N/sec/mm/^\circ C)^{(15)}$

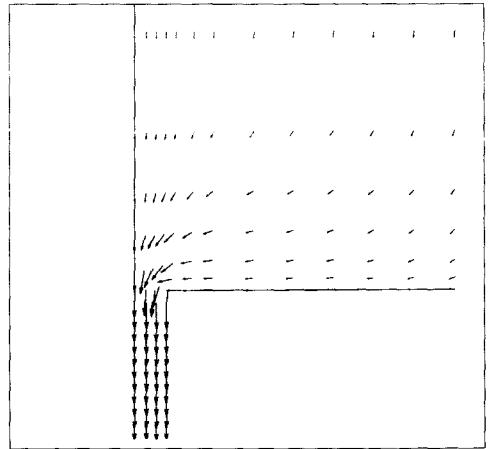


Fig. 11 Velocity distribution around the die orifice

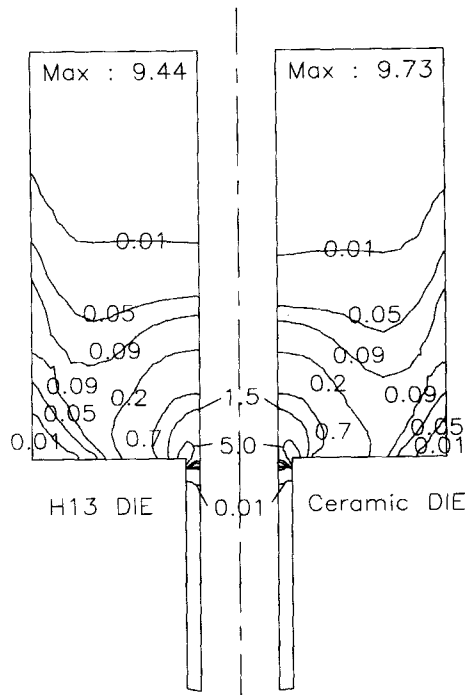


Fig. 12 Comparison of distribution of effective strain rate for two die materials

로 택하였다. 세라믹 금형을 사용한 경우가 비유동영역이 작게 분포됨을 볼 수 있는데 이유는 세라믹이 마찰계수가 작고 열전도가 낮기 때문이다. 세라믹금형을 사용한 경우가 마찰계수가 작아 표면에서 미끄러짐이 쉬우므로 금형면에서 최대값도 높게 나타났다.

소재와 금형의 온도 분포를 Fig. 13에 나타냈다. 오리

피스 부근에서는 급격한 유동으로 변형열과 마찰열의 발생이 크므로 소재의 온도가 올라감을 알 수 있다. 세라믹 금형을 사용한 경우가 접면열전달계수가 작고 마찰상수가 작으므로 오리피스부에서 금형의 온도가 훨씬 덜 상승했다. 소재는 접면열전달계수가 훨씬 작은 세라믹 금형의 경우가 약간 더 올라갔다. 금형오리피스부에서 온도상승은 제품의 정밀도와 표면성질, 금형의 수명에 영향을 줄 수 있고 특히 생산속도와 매우 밀접<sup>(17)</sup>하다. 따라서 금형이 세라믹으로 바뀌면 램의 속도도 조정해 줄 필요가 있음을 볼 수 있다. 비유동영역에서 소재의 온도손실은 유동성을 떨어지게 하므로 비유동영역의 범위에도 영향을 줄 수 있는데 세라믹 금형을 사용한 경우가 훨씬 적음을 볼 수 있다.

세라믹 금형은 기존의 금형보다 취성이 강하므로 파손되기 쉽다는 단점이 있다. 세라믹 금형으로 기존의 금형을 교체하였을 때 발생하는 문제점을 알기 위하여 세라믹 금형을 제작하여 예비시험을 수행하였다.

실험결과 세라믹 금형부가 압출방향에 수직인 방향으로 파손되었다. 파단 위치는 Fig. 5의 A-A 단면으로 압출방향과 수직인 면에서 압출방향의 중간부분에서 발생하였다. 파단 이유가 공정 중에 있는지 압출 후 소재의 남은 부분(butt)을 잘라내기 위한 커터(cutter)작업시 발생하는 충격 때문인지를 확인해보기 위하여 응력해석을 수행하여 보았다.

금형에 걸리는 응력분포를 알아보기 위하여 공구의 탄성해석을 하여 보았다. 성형해석시 소재에 걸리는 접촉력을 접촉응력으로 바꾼 후 이 접촉응력을 가지고 공구의 접촉력을 보간 방법으로 계산하여 탄성해석을 수행하였다. 탄성해석시는 금형부의 격자를 Fig. 9보다 조금 더 세분화시킨 격자로 계산하였다. 계산조건은 Bellosi<sup>(13)</sup>등이 실험에서 구한 값들을 이용하였다. 사용한 세라믹 재료의 곡강도(MOR)값<sup>(18)</sup>은 평균 529MPa이다. 재료가 공정 중에 압출방향에 수직인 면으로 파단 되었다면 Griffith이론에 의하여 압출방향으로 발생하는 인장응력<sup>(18)</sup>때문이다. 따라서 주응력의 방향이나 크기를 구하지 않고 압출방향 응력성분만으로 원인을 알 수 있다. 압출방향 응력성분을 Fig. 14에 나타냈다. 계산된 응력분포나 크기를 볼 때 압출공정중에 세라믹 팁이 파손되지 않았음을 알 수 있다.

원주방향의 응력은 앞에서 언급한 것과 같이 본 실험의 파손과 직접적인 관계는 없다. 그러나 압출금형의 파괴시 주로 발생하는 반경방향 균열의 opening mode<sup>(19)</sup>와 관련이 있는 것으로 알려져 있으므로 Fig. 15와 같이 원주방

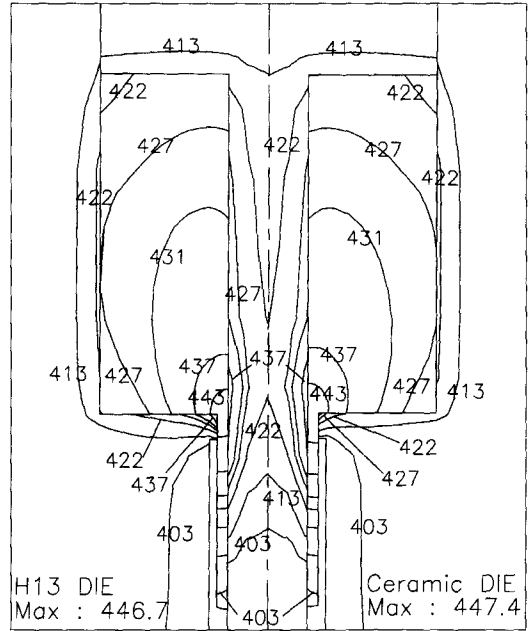


Fig. 13 Comparison of temperature distribution for two die materials

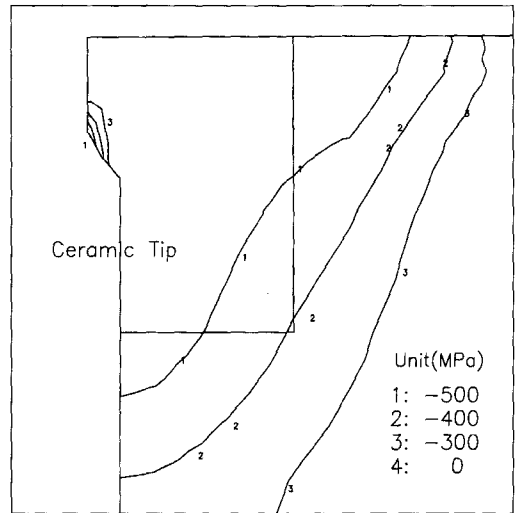


Fig. 14 Distribution of axial stress

향의 응력분포를 구해 점검해 보았다. 이 경우 역시 응력분포나 크기를 볼 때 원주방향의 응력은 세라믹 팁의 파손에 관계가 없음을 알 수 있다.

## 5. 결론

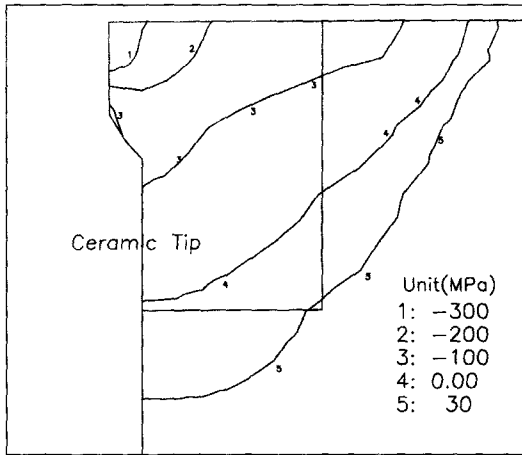


Fig. 15 Distribution of hoop stress

본 연구에서는 ALE묘사에 의한 유한요소법을 사용하여 세라믹 금형을 이용한 축대칭 열간 튜브 압출공정을 해석하여 보았다. 해석을 통하여 온도분포, 금속유동, 응력 상태 등의 공정 특성을 알 수 있었다. 실험을 통하여 세라믹 금형에 대한 마찰상수와 접면열전달계수를 구하였다. 접면열전달계수는 7과 8사이이고 마찰상수는 0.4와 0.5 사이로 기존의 열간공구강 재료보다 훨씬 작음을 알 수 있었다. 따라서 공정중의 상태도 달라지게 됨을 해석을 통하여 살펴보았다. 세라믹 금형은 기존의 금형 재료보다 마찰 상태가 우수하고 접면열전달계수가 낮으므로 비유동영역도 작게 나타났다.

공구의 응력해석을 통하여 예비실험결과 발생한 세라믹 금형의 파손원인을 검토하여 보았다. 해석결과를 검토하여 볼 때 성형 중에 금형에 걸리는 응력분포는 금형의 파손에 직접적인 원인을 제공하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 압출 후 버트 절단과정에서 발생하는 충격이 금형에 가해져 금형이 파손된 것으로 추정할 수 있다. 이에 대한 개선책으로 압출 후 공정에서 충격이 오지 않게 바뀌 시도 하면 개선이 될 것으로 본다.

### 후 기

본 연구는 "구조세라믹스의 엔지니어링 부품설계 기술 개발"에 관한 연구의 일부로 수행되었습니다. 본 연구를 위해 지원해주신 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 예비실험을 할 수 있게 도와주신 인천의 동아알루미늄(주)의 김영호 부장님께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Guyoncourt, D., Huang, H.C and Piller, R., 1996, "Housing of Ceramic Die Inserts for Aluminum Extrusion", Proc. 6th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Vol. 2, pp. 133~139.
- (2) Mehta, H.S., Shabaik, A.H and Kobayashi, S., 1970, "Analysis of Tube Extrusion", Trans. ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 92, pp. 403~401.
- (3) Yang, D.Y., Kim, H.S., Lee, C.M and Han, C.H., 1990, "Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Arbitrarily Shaped Tubes", Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No.2, pp. 115~127.
- (4) Mooi, H.G and Huetink, J., 1995, "Simulation of Complex Aluminium Extrusion using an Arbitrary Eulerian-Lagrangian", Proc. 5th NUMIFORM, Ithaca, New-York, USA, pp. 869~874.
- (5) Kang, Y.S and Yang, D.Y., 1996, "Investigation into the Thermo-Viscoplastic Finite Element Analysis of Square Die Extrusion of Square Section with Lagrangian Description", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol.36., No. 8, pp. 907~924.
- (6) Hughes, T.J.R., Liu, W.K and Zimmermann, T.K., 1981, "Lagrangian-Eulerian Finite element Formulation for Incompressible Viscous Flows", Comput. Meths. Appl. Mech. Engng., Vol.29, pp.329~349.
- (7) Perzyna, p., 1996, "Fundamental Problems Viscoplasticity", Adv. in App. Mech., Vol. 9, pp.243~315.
- (8) 강연식, 양동열, 1994, "ALE 묘사에 근거한 강-점소성 유한요소 수식화와 축대칭 평금형 압출에의 적용", 한국소성가공학회, 제 3권, 제 2호, pp. 156~166.
- (9) Tong, L., Hora, P and Reissner, J., 1992, "Application of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method in the FE-Simulation of 3-D Bulk Forming Processes", Proc. 4th NUMIFORM, Valbonne, France, pp. 669~674.
- (10) Ghosh, S., 1990, "Finite Element Simulation of



- Some Extrusion Process using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Description”, J. Mater. Shaping Technol., Vol.8, No.1, pp.53~64.
- (11) Laue, K and Stenger, H., 1976, Extrusion: Process, Machinery, Tooling, Metals Park, UAS, p.69.
- (12) Altan, T., Oh, S.I and Gegel, H.L., 1983, Metal Forming: Fundamentals and Applications, American Soc. for Metals, USA, chap.4.
- (13) Bellosi, A., Guicciardi, S and Tampieri, A., 1992, “Development and Characterization of Electroconductive Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN Composites”, J. of the European Ceramic Society, Vol. 9, pp. 83~93.
- (14) Kobayashi, S., Oh, S.I and Altan, T., 1989, Metal Forming and Finite Element Method, Oxford University Press, pp. 261~262.
- (15) Burte, P.R., Im, Y.T. , Altan, T and Semiatin, S.L., 1990, “Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction During Hot Forging”, Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 112, Nov., pp. 332~339.
- (16) 강연식, 양동열, 1997, “비등온 유한요소해석을 위한 접면열전달계수의 결정”, 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 4호, pp. 72~77.
- (17) Skauvik, I. Karhausen, K. Melander, M and Tjotta, S., 1996, “Numerical Simulation in Extrusion Die Design”, Proc. 6th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Vol. 2, pp. 79~82.
- (18) 김수영, 김정규, 1987, 기계재료학, 문운당, 서울, 제 5장.
- (19) 김해두, 이상록, 이재경외, 1995, “압출 인발용 세라믹 다이개발”, 연구보고서, 통상산업부, p. 37.