

세라믹 금형설계를 위한 열간 튜브 압출의 축대칭 유한요소해석 An Axisymmetric Finite Element Analysis of Hot Tube Extrusion for the design of Ceramic Dies

강 연식(한국과학기술원), 양 동열(한국과학기술원), 정 순길(세계평화기술연구소), 이 준근(한국과학기술연구소)
KANG Yeon-Sick(KAIST), YANG Dong-Yol(KAIST), JONG Sun-Gil(WIT), LEE June-Gunn(KIST)

ABSTRACT

The use of ceramics for extrusion dies is limited since the modification of die design is difficult. In order to successfully apply the ceramic dies to extrusion dies, a better understanding of the process should be preceded. This study focuses on understanding the characteristics of the process. In the present study, a hot extrusion of tube with a mandrel is analyzed by ALE finite element method. In order to obtain the stress state of ceramic dies, the elastic analysis of dies is also carried out.

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

1. 서론

중공형제의 압출에는 만드렐(mandrel)을 이용한 압출과 porthole, spider, bridge금형등을 이용한 압출등이 있다. 이 중에서 만드렐을 이용한 중공형제압출은 가장 일찍부터 사용된 방법중의 하나이다. 이 방법은 최근에 들어서 응용이 줄어들고 있지만 튜브형제를 생산하는 가장 쉬운 방법의 하나로 알려져 있다.

중공형제의 압출에 대한 연구는 일찍부터 여러 연구자들에 의해서 연구가 이뤄졌다. 본 연구에서는 평금형을 이용한 만드렐형의 열간 압출 공정을 유한요소법으로 해석해보고자 한다. 평금형을 사용시 존재하는 급격한 유동변화때문에 최근에 개발되기 시작한 ALE방법을 도입하여 해석하였다. 평금형을 이용한 열간 튜브압출에 대한 해석은 해석의 어려움때문에 비교적 많은 연구가 이뤄지지 않았다. 열간 성형에서는 비정상상태의 해석이 요구되어지나 지금까지의 연구는 대부분 정상상태의 해석이 대부분 이뤄져 있었다.

세라믹 금형을 소성가공 공정에 효과적으로 적용하기 위해서는 성형중의 소재의 유동, 금형에 작용하는 압력, 온도분포등을 알아야 한다. 본 연구의 목적은 국내에서 개발된 전도성 세라믹을 튜브압출 공정에 적용하기 위한 작업의 일환으로 적용할 공정의 특성을 파악하는데 있다. 압출제의 형상은 공정에 적용을 쉽게하기 위하여 축대칭 형상을 선택하였다. 유한요소해석을 통하여 유동특성을 살펴보았다. 온도는 정도, 강도등에 영향을 미치므로 온도해석도

수행하여 온도분포 상태도 알아보았다. 또한 금형에 걸리는 응력상태가 중요하므로 금형의 응력해석을 수행하였다. 금형의 응력상태를 알기 위하여 탄성 유한요소프로그램을 통한 금형의 응력 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 세라믹금형을 이용하여 예비 압출실험을 수행하여 보았다. 예비실험에서 발생하는 세라믹금형의 파손원인을 알기 위하여 응력해석 결과를 이용하여 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 유도하는데에 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 ρ 는 밀도이다. 물질좌표에 대한 시간 미분과 기준좌표에 대한 시간 미분간의 관계⁽¹⁾를 속도장에 적용하면 다음과 같다.

$$\dot{v}_i = v_i^* + c_j(v_j)_{,j} \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하면 아래와 같다.

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

코시 응력(Cauchy stress)을 편차 응력(deviatoric stress)으로 나타내면

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

과 같이 쓸 수 있다. 재료가 강-점소성이고 등방성과 비압축성을 가진다고 가정하면 다음 식(2)를 만족한다.

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

δv_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(3).

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

여기에서 K^* 는 비압축성을 고려하기 위한 벌칙 상수(penalty constant)이다. 식(5)의 각항을 묶어 다음과 같이 간단한 형으로 표현할 수 있다.

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

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

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M [& \frac{\partial \Pi_1^{(m)}}{\partial \mathbf{V}} + \frac{\partial \Pi_2^{(m)}}{\partial \mathbf{V}} + \frac{\partial \Pi_3^{(m)}}{\partial \mathbf{V}} - \frac{\partial \Pi_4^{(m)}}{\partial \mathbf{V}}]_{(n-1)} \Delta \mathbf{V}^{(n)} \\ = & - \sum_{m=1}^M [\Pi_1^{(m)} + \Pi_2^{(m)} + \Pi_3^{(m)} - \Pi_4^{(m)}]_{(n-1)} \end{aligned} \quad (7)$$

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.

- (1) 수렴된 속도장으로 물질계 가상격자를 구성한다.
- (2) 가상격자를 이용하여 Lagrangian 열방정식으로 열유량을 구한다.
- (3) 가상격자에서 온도장을 구한다.
- (4) 다음의 식을 이용하여 격자계에 온도와 열유량을 재지정해 준다.

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

이때 윗첨자 g와 m은 각각 격자와 물질계에 대한 값을 의미한다.

2.3 성형해석을 위한 수치적 구현

ALE방법에 의한 전체적인 해석 과정은 Fig. 1에 나타내었다. ALE수식의 대류항으로 인하여 행렬식이 비대칭이므로 총 매트릭스(full matrix)에 대한 skyline solver를 사용하여 행렬식을 풀었다.

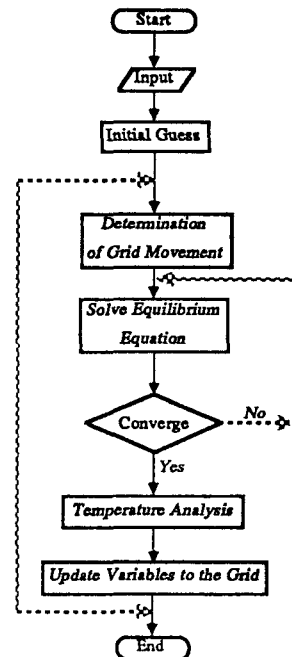


Fig. 1 Flow chart for solving procedure

ALE방법의 장점중의 하나가 격자를 사용자의 의도에 따라 임의로 조정할 수 있다는 것이다. 격자 조정은 Fig. 2와 같이 Lagrangian영역과 순수 Eulerian영역으로 구분하여 해석하였다. 변형이 주로 일어나는 영역은 Eulerian 묘사에 의해 격자를 정지시켜 격자의 뒤틀림을 방지하였다. 압출된 부분과 편치부근의 변형이 심하지 않으므로 Lagrangian영역으로 잡아 물질 경계를 제대로 나타낼 수 있게 하였다.

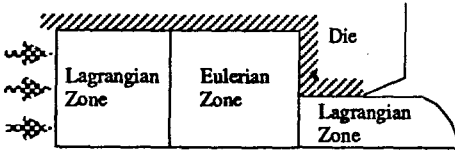


Fig. 2 Division of extrusion billet into three zones

ALE 방법은 격자계와 물질계가 일치하지 않기 때문에 경로 의존적인 변수에 대해서는 update 과정이 필요하다. update 과정은 아래의 식을 이용하여 현재 시간 스텝(time step) (n) 과 다음 시간 스텝(n+1)의 중간에서 물질과 격자간의 대류 효과를 고려해 준다⁽⁴⁾.

3. 만드렐을 이용한 축대칭 튜브압출의 해석

본 연구에서 해석할 압출방식은 만드렐(mandrel)을 이용한 튜브 열간 압출이다. 만드렐을 이용한 튜브압출의 일반적인 형상을 Fig. 3에 나타냈다⁽⁵⁾. 그림에서 부품 9가 만드렐이다.

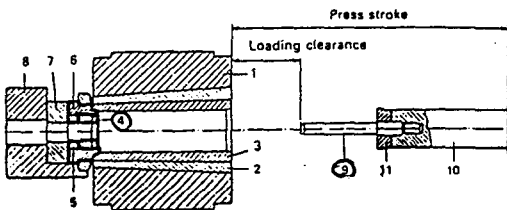


Fig. 3 Extrusion with a mandrel

계산시 사용된 조건들은 다음과 같다. 공정의 특성을 파악해 보기 위하여 기존의 SKD61 금형을 사용하여 계산하였다. 소재는 알루미늄 7000계열이다. 주어진 공정조건은 현장에서 사용하고 있는 조건들이다.

금형의 초기온도 : 240 °C

소재의 초기온도 : 300 °C

대기 온도 : 30 °C

램속도 : 1.80 mm/sec

초기 소재의 크기 : 내경 12mm, 외경 50mm, 길이 55mm

계산에 사용된 상수와 계수들은 다음과 같이 사용하였다.

금형의 열전도계수 : 19.01 N/sec/°C

금형의 (밀도*비열) 값 : 3.77 N/mm²/°C

소재의 열전도계수 : 173 N/sec/°C

소재의 (밀도*비열) 값 : 2.68 N/mm²/°C

접촉열전달계수 : 30.5 N/sec/mm²/°C

마찰상수 : 0.3

계산에 사용된 유한요소격자를 Fig. 4에 나타냈다. 소재에는 375개의 유한요소가 이용되었다.

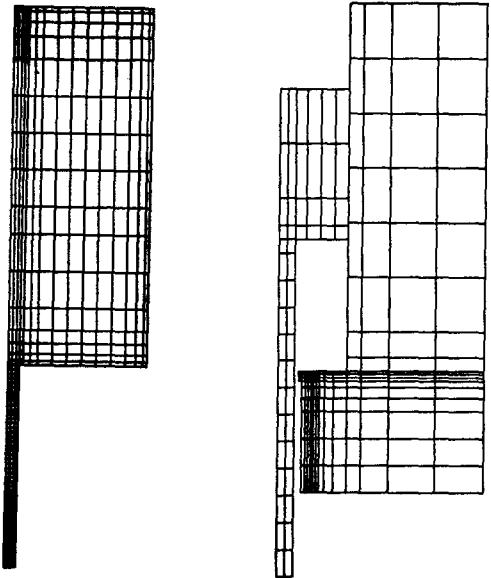


Fig. 4 Finite element mesh

유한요소해석으로 부터 나온 소재의 온도분포를 Fig. 5에 나타냈다. 소재가 평금형을 빠져나가는 부분에 형상의 변화가 급격히 변하므로 이 부분에서 유효변형률속도의 크기가 매우 큼을 볼 수 있다. 또한 소재와 금형의 온도 분포를 Fig. 6에 나타냈다.

문제점을 알기 위하여 세라믹 금형을 제작하여 예비실험을 수행하였다. 금형 전체를 세라믹으로 대체하면 제작단가와 재료비가 상승하므로 열간공구강 안에 필요한 부분만 세라믹으로 대체하는 삽입방식으로 설계하여 제작, 실험하였다. 세라믹으로 대체하는 금형의 일부를 Fig. 7에 나타냈다. 세라믹으로 대체하는 금형의 일부는 Fig. 3에서 부품 4에 해당된

다



Fig. 5 Distribution of effective strain rate

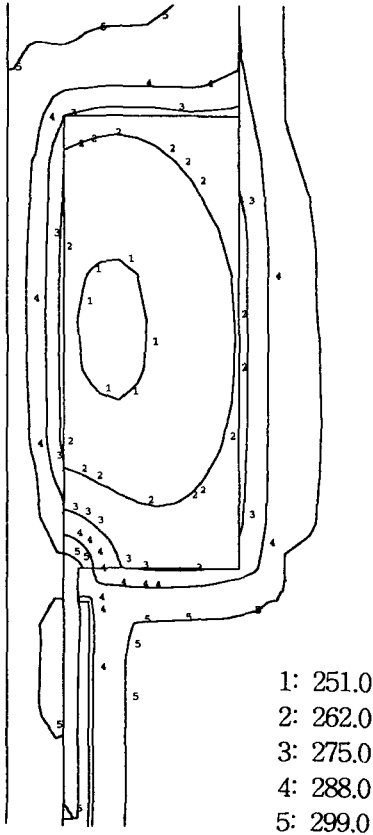


Fig. 6 Distribution of temperature

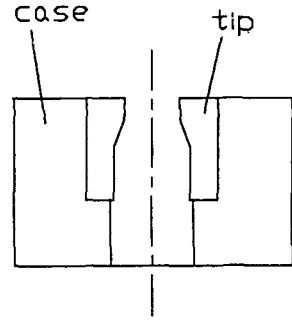


Fig. 7 Ceramic tip

실험결과 세라믹 금형부가 압출방향에 수직인 방향으로 파손되었다. 파단 이유가 공정중에 있는지 압출후 소재의 남은 부분(butt)을 잘라내기 위한 커터작업시 충격때문인지를 알아보기 위하여 응력해석을 수행하여 보았다.

금형에 걸리는 응력분포를 알아보기 위하여 성형해석시 금형에 걸리는 접촉력을 가지고 금형의 탄성해석을 하여 보았다. 사용한 세라믹 금형은 $\text{Si}_3\text{N}_4(60\%) + \text{TiN}(40\%)$ 의 복합분말을 HP(hot pressing)공정으로 성형한 것이다. 계산조건은 Bellosi⁽⁶⁾등이 실험에서 구한 값들을 이용하였다. 탄성해석에서 나온 금형의 압출방향 응력성분을 Fig. 8에 나타냈다. 재료가 공정중에 파단되었다면 압출방향의 응력이 Griffith이론에 의하여 인장강도값을 넘어야한다⁽⁷⁾. 그러나 계산결과가 곡강도(MOR)값⁽⁶⁾인 529MPa에 크게 미치지 못함을 볼 수 있다.

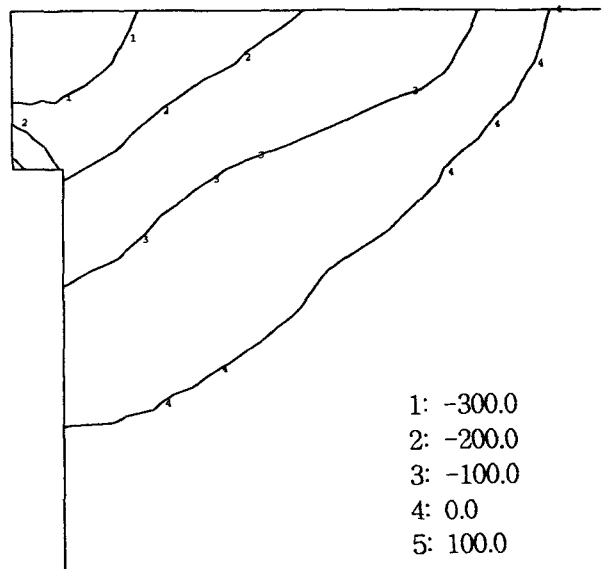


Fig. 8 Distribution of axial stress

4. 결 론

본 연구에서는 ALE 유한요소법을 이용한 만드렐 타입의 축대칭 열간 튜브 압출공정을 해석하여 보았다. 해석을 통하여 온도분포, 금속유동, 응력상태 등의 공정 특성을 알 수 있었다.

금형의 응력해석을 통하여 예비실험결과 발생한 세라믹 금형의 파손원인을 검토하여 보았다. 해석결과를 검토하여 불때 성형중에 금형에 걸리는 응력분포는 금형의 파손에 직접적인 원인을 제공하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 압출후 버트 절단 과정에서 발생하는 충격이 금형에 가해져 금형이 파손된 것으로 추정할 수 있다. 이에 대한 개선책으로 압출후공정에서 충격이 오지않게 바꿔 시도하면 개선이 될것으로 본다.

참 고 문 헌

1. T.J.R. Hughes, W.K.Liu and T.K. Zimmermann, Comput. Meths. Appl. Mech. Engng., Vol.29(1981), pp.329-349
2. P.Perzyna, Adv. in App. Mech., Vol. 9(1966), pp.243-315
3. 강연식, 양동열, 한국소성가공학회, 제 3권, 제 2호(1994), pp. 156-166
4. S. Ghosh, J. Mater. Shaping Technol., Vol.8, No.1(1990), pp.53-64
5. K. Laue and H. Stenger, Extrusion:process, machinery, Tooling, Metals Park(1976), pp.69
6. A. bellosi, S. Guicciardi and A. Tampieri, J. of the European Ceramic Society, Vol. 9(1992), pp. 83-93
7. 김수영, 김정규, 기계재료학, 문운당(1987), 5장

후 기

본 연구는 “구조세라믹스의 엔지니어링 부품설계 기술개발”에 관한 연구의 일부로 수행되었습니다. 본 연구를 위해 지원해주신 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 예비실험을 할 수 있게 도와주신 동아알루미늄(주)의 관계자에게 감사드립니다.