

복합봉재 압출에 의한 에너지 소산의 영향에 관한 연구

김 창 훈[#]

A Study on the Effect of Energy Dissipation in Extruding Clad Rod

Chang-Hoon Kim[#]

ABSTRACT

Rapid progress in many branches of technology has led to a demand on new materials such as high strength light weight alloys, powdered alloys and composite materials. The hydrostatic extrusion is essentially a method of extruding a clad rod through a die.

In order to investigate the effect of the process conditions such as friction heat, deformation and clad thickness on the clad extrusion process, viscoplastic finite element simulations were conducted. A specific model for theoretical analysis used in this study is The single scalar variable version of Hart's model. An experiment also has been carried out using 1.5MN hydrostatic extruder with variable speed ram, LVDT and load cell for comparison.

It is found that the hydrostatic extrusion pressure considering the effect of heat dissipation in this theoretical work was closer to the experimental pressure than the isothermal hydrostatic extrusion pressure.

Key Words : Clad Rod(복합봉재), Hydrostatic Extrusion(정수압 압출), Hart's Model(상태변수모델), Isothermal Analysis(등온해석), Friction Heat(마찰열), Energy Dissipation(에너지소산)

1. 서 론

산업의 근간이 되는 소재산업 분야에서는 복합재, 고강도합금강 및 신소재 등 가벼우면서 강도가 높고, 부식에 강하며, 가격이 싸고, 열과 전기전도성이 우수한 고기능 소재를 요구하고 있다. 특히 정수압을 이용한 이중 복합재를 성형하는 방법은 고부가가치의 기

능성 소재가 되므로 현재까지 많은 연구를 수행하여 공정의 개발에 상당한 진전이 있었다¹⁾. 그러나 열간 공정에 대한 해석연구는 활발하지 못하였으며, 특히 복합재의 정수압 압출시 발생하는 에너지 소산에 관한 연구는 현재까지 보고된 바 없다.

본 연구에서는 금형입구에서 발생하는 마찰열을 고려하여 복합봉재의 정수압압출성형의 변형에 미치는 중요한 변수의 영향을 열 발생차원에서 수치해석 및 실험적으로 고찰하였다. 또한 압출각, 압출비, 압출속도 등 공정 변수를 고려하여 에너지 소산이 복합봉재 성형에 미치는 영향도 검토하였다.

[#] 교신저자 : 한국부품소재산업진흥원 기술개발본부
E-mail : hannak5@hanmail.net

2. 유한요소 정식화

본 연구에서 재료는 비압축성 및 등방성을 갖는 재질로 취급하고, 대변형 운동학을 적용하여, 소성 가공시 발생하는 에너지 소산을 고려한 이중 복합재 압출 모델을 가정하였다.

압출해석을 통한 응력 및 변형률 분포, 하드니스 및 온도 분포를 얻기 위해서 평형방정식과 구성방정식이 필요하다²⁻⁴⁾. 이러한 수학적 모델 식들은 복잡한 비선형 식으로서 엄밀해를 구하는 것이 불가능하다. 그러므로 근사해법을 이용하여 풀게 된다. 여러 가지 근사해법 중 계산기의 발달로 가장 유용한 방법으로 부각된 것이 유한요소법이다. 유한요소법에서는 해석영역을 유한한 요소로 분할하고 그 안에서의 변수분포를 단순한 함수로 가정하여 지배방정식을 선형화된 연립방정식으로 유도하게 된다. 이 선형화된 연립방정식을 반복하여 풀면 수렴된 변형률 속도, 온도 및 하드니스의 분포를 근사적으로 구할 수 있다. 질량, 운동량, 에너지 보존식 및 하드니스의 발전식은 경계면 수정 알고리즘(interfacial surface correction algorithm)과 더불어 반복법으로 해를 구하도록 묶여진다⁵⁻⁷⁾. 여기서서는 정상상태 성형가공의 오일러리안 유한요소해석을 목적으로 유한요소정식화 과정을 이용하였다.

2.1 에너지 보존식

오일러리안 검사 체적내의 온도분포를 유한요소법을 이용하여 근사적으로 구하는 것은 에너지 보존식에서 내부에너지의 시간에 관한 편미분을 영으로 취한 식에 Galerkin의 Weighted Residual을 극소화하여 이루어진다. 그리고 정상상태에서 에너지 보존식의 Weighted Residual은 다음과 같다⁸⁻⁹⁾.

$$\int_V N_i \left[k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i \partial x_i} - \rho C_p v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \sigma_{ij} d_{ij} \right] dV = 0 \quad (1)$$

여기에서 N은 온도의 형상함수이고, 위 식에 부분적분과 Green법칙을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & - \int_V \frac{\partial N_i}{\partial x_i} k \frac{\partial \theta}{\partial x_i} dV - \int_V \rho C_p N_i v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} dV \\ & + \int_V N_i \sigma_{ij} d_{ij} dV + \int_S k N_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} n_i dS = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

온도를 형상함수를 이용하여 근사화하면 다음과 같다.

$$\Theta = [N] \{ \Theta \} \quad (3)$$

위 식에서 $\{ \Theta \}$ 는 유한요소 절점에서의 온도를 나타내는 벡터이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 유한 요소정식을 얻는다.

$$[H] \{ \Theta \} + \{ B \} = 0 \quad (4)$$

여기에서

$$[H] = \int_V [N^*] k [N^*] dV + \int_V \{ N \} \rho C_p \{ U \}^T [N^*] dV \quad (5)$$

$$\{ B \} = \int_V \{ N \} \sigma_{ij} d_{ij} dV + \int_S \{ N \} q_i n_i \quad (6)$$

위 식에서 $[N^*]$ 는 온도형상함수의 편미분들로 구성된 행렬로 다음과 같다.

$$[N^*] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

금속의 소성가공에서는 소성일에 의한 에너지 소산은 소재의 온도 증가에 큰 역할을 하며, 이러한 현상은 식(6)의 첫 번째 항에 반영되어 있다. 그 외에 표면에서의 열손실, 다이와의 접촉부에서의 열손실은 식 (6)의 두 번째 항에서 처리될 수 있다.

2.2 상태변수

본 연구에서 사용되는 상태변수모델은 변형된 경로에 따른 변형이력을 반영하는 하드니스의 식을 포함한다. 따라서 하드니스에 관련된 변형경로에 따라 적분하여야 한다. 정상상태의 오일러리안 해석에서는 이 과정을 두 가지 방법으로 다룰 수 있는데 그 첫 번째는 Galerkin 유한요소 정식화 과정을 이용하는 것으로 유한요소 해석방법이다. 두 번째는 오일러리안 검사체적으로 들어오는 입자(particle)의 이동경로를 먼저 찾고, 그 경로에 따라 하드니스 발전식을 적분하는 유선적분법(stream line integration technique)이다. Hart모델¹⁰⁻¹¹⁾에서 하드니스에 관련되는 Galerkin의 유한요소 정식화과정식을 응용화하여 먼저 정상상태에

서의 가중 잔여치(residual)를 구하면 다음과 같다.

$$R_i = \int_V N_i v_i \frac{\partial \sigma^*}{\partial x_i} dV - \int_V N_i c_o \sigma^* \left(\frac{G}{\sigma^*}\right)^m \left(\frac{\sigma^p}{\sigma^*}\right)^n dV \quad (8)$$

하드니스의 근사식은 다음과 같다.

$$\sigma^* = [M] \{\Sigma^*\} \quad (9)$$

윗 식에서 $\{\Sigma^*\}$ 는 유한요소 절점에서의 하드니스를 나타내는 벡터이다. 위의 (8) 식에 (9)식을 대입하여 정리하고, 잉여치를 영으로 만들면 다음 식을 얻는다.

$$[K_s] \{\Sigma^*\} = \{f_s\} \quad (10)$$

여기서

$$[K_s] = \int_V [M]^T \{U\}^T [M]^T [N] dV \quad (11)$$

$$\{f_s\} = \int_V [M]^T c_o \sigma^* \left(\frac{G}{\sigma^*}\right)^m \left(\frac{\sigma^p}{\sigma^*}\right)^n dV \quad (12)$$

소성역학 문제 해석과 같이 위식들에는 하드니스의 경계조건이 주어져야 한다. 정상상태 가공의 오일러리안 해석 시는 검사체적내로 들어오는 물질의 하드니스는 변형전의 값이 주어져야 한다. 변형경로에 따라 하드니스 발전식을 적분하여, 변형경화에 따른 하드니스 증가를 예측하는 유선적분법(stream line integration technique)을 요약하면 다음과 같다.

여기서 먼저 물질입자(particle)의 검사체적 내에서의 유동경로 즉 유선(streamline)을 찾는다. 이때 오일러리안 검사체적 내에서 물질입장의 유선은 그 선상의 수많은 점들의 좌표값(x_s)으로 명시한다.

유선상의 점들에 대한 좌표값은 인접하여 있는 점들의 좌표값에 대한 Taylor 급수전개에 의해 구한다. 그 다음 단계로 찾은 유동 경로에 따라 하드니스 발전식을 적분하여 입의 위치에서의 하드니스 값을 구한다.

$$\int d\sigma^* = \int \dot{\sigma}^* dt = \int c_o \sigma^* \left(\frac{G}{\sigma^*}\right)^m \left(\frac{\sigma^p}{\sigma^*}\right)^n d \frac{dx_s}{v_s} \quad (13)$$

실제의 유선적분 계산은 Adams-Bashforth-Moulton의

예측 및 수정법 (predictor and corrector steps)을 이용하여, 유선을 정의하는 점들에서의 하드니스 값을 구하였다.

2.3 접촉면 형상 수정

정상상태 성형공정의 오일러리안 해석은 정확한 검사체적을 필요로 한다. 그러나 금형과 접촉부 이외의 자유표면과 이중재의 접촉면은 미리 알 수 없으므로 초기에 면을 가정하며, 가정된 검사체적이 최종의 변형소체형상과 일치하지 않는 경우가 많다. 본 연구에서는 심재와 피복재의 올바른 접촉면을 오일러리안 검사체적 입구에서 접촉부에 있는 입자의 유동경로를 추적하여 예측한다. 오일러리안 검사체적 내에 있는 입자의 입자의 유동경로의 위치는 현재위치에 대한 Talyor급수 전개로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_i(X_j t + \Delta t) = x_i(X_j t) + \frac{\partial x_i(X_j t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial^2 x_i(X_j t)}{\partial t^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (14)$$

윗식에서 $x_i (= \widehat{x}_i(X_j, t))$ 는 기준형상 위치벡터 X_j 과 시간 t 의 종속함수이고, $x_i(X_j, t + \Delta t)$ 와 $x_i(X_j, t)$ 는 각각 입자의 시간 $t + \Delta t$ 와 t 에서의 위치벡터이다. (14)식을 입의 위치의 점을 나타내는 X_j 의 유동경로를 구하기 위하여 시간 t 에 대해 편미분한 식이고, 고정된 한 점 X_{oj} 의 유동 경로는 Taylor 급수 전개로 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$x_i(X_{oj} t + \Delta t) = x_i(X_{oj} t) + \frac{dx_i(X_{oj} t)}{dt} \Delta t + \frac{d^2 x_i(X_{oj} t)}{dt^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (15)$$

시간증분 Δt 는 유선상의 거리를 입자속도 크기로 나누어 구한다. 따라서 식 (14)의 시간증분 Δt 의 세제곱 이상의 고차항을 무시한 후 입자의 속도벡터와 시간 Δt 동안의 유선상의 거리로 다음과 같이 근사화한다.

$$x_i^{t+\Delta t} \cong x_i^t + v_i^t \left(\frac{\Delta x^t}{v^t}\right) + \frac{1}{2} v_k^t \frac{\partial v_i^t}{\partial x_k} \left(\frac{\Delta x^t}{v^t}\right)^2 \quad (16)$$

가정된 접촉면을 수정하기 위해서는 먼저 오일러리안 검사체적 입구에서 접촉부에 매우 근접한 입자의 유동경로를 식(15)에 따라 구한다. 실제의 공정에서는 접촉면을 가로질러 물질의 유동이 없어야 하므로 앞에서 구한 경로가 처음에 가정한 접촉면을 가로질러 들어가면 입자의 유동경로와 가정한 접촉면과의 편차로부터 물질유동이 없는 수정된 접촉면 형상을 구하고 그에 따른 유한요소격자를 새로 만든다.

2.4 연계해석 방법

위에서 소성유동, 열전달, 하드니스와 접촉면 수정 식들은 각각 따로 유도 하였다. 계산에 있어서 각 식들의 해는 서로 관련되어 있어, 이식들을 동시에 만족하는 해를 구하는 방법이 필요하다.

본 연구에서 사용한 연계해석 방법은 다음과 같다.

1. 접촉면 형상을 가정한 초기 오일러리안 유한요소 격자망 선택
2. 소성역학적 해석 수행
 - 1) 속도 분포 계산
 - 2) 온도 분포 계산
 - 3) 상태변수(하드니스) 분포 계산
3. 접촉면 형상 수정

공정에 대한 수치해석을 위한 흐름도(flow chart)는 Fig.1과 같다. 소성유동, 열전달, 하드니스와 접촉면 수정식들을 동시에 만족시키기 위하여 접촉면 형상에 가정된 오일러리안 유한요소 격자망을 선택하였다. 이 유한요소 격자망을 이용하여 소성역학적 해석을 수행하여 속도분포와 온도분포, 상태변수분포를 구하였다. 여기서 얻은 속도분포로부터 접촉면 형상을 수정하고 다시 수치계산을 수행하였다. 이 과정을 접촉면 형상이 수렴될 때까지 반복하였다.

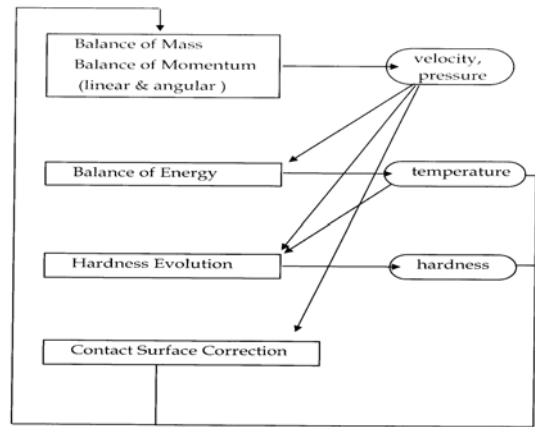


Fig. 1 Flow chart of the thermo-mechanical analysis

3. 수치해석 및 실험결과

위에서 제시된 이론을 바탕으로 수치해석을 수행하였다. 이중 복합재의 정수압 압출 중에 형성되는 접촉면의 형상을 예측하기 위해 경계면 수정을 수행하였다. 수치해석에 필요한 물성값들을 얻기 위하여 이중 복합재의 정수압 압출 실험을 수행하였다. 정수압 압출 압력과 접촉면의 가정 형상을 측정하고 수치해석 결과와 비교하여 이론해석 모델의 유효성을 검토하였다.

3.1 수치해석 모델

구리와 알루미늄 이중복합소재의 압출공정 해석을 위해 연구용으로 개발된 유한요소해석 프로그램 Hickory^[7]를 이용하였다. 이중 복합재의 정수압 압출

압출공정 모델은 Fig. 2에 나타내었다. 소재가 유입부에서 일정 속도를 갖도록 하였으며, 컨테이너 안에서 반경반향으로 변형이 일어나지 않도록 하였다. 중심축 부분에는 대칭 경계조건을 고려하였다. 이중 복합 소재가 압력 전달 매체와 공기에 노출된 부분에는 대류 경계조건을 주었으며, 다이와 접촉하는 부분에서는 열전도 경계조건을 주었다.

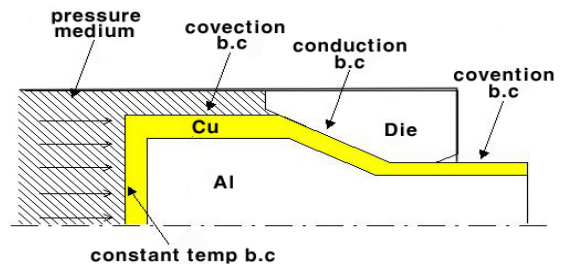


Fig. 2 Clad bar hydrostatic extrusion model

열전달 해석을 위한 소재의 열물성은 Table 1에 나타내었으며, 열적 경계조건(Thermal boundary condition)은 다음과 같다. 대칭면을 통과하는 열전도가 일어날 수 없으므로 이 면에서 열유속을 0 W/m^2 으로 주었다. 컨테이너 안과 대기에 노출된 부분에 대해서는 대류 경계조건을 주었고, 열전달 계수는 각각 $15.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 주었다. 다이 접촉부에서는 소재로부터 다이로 열전도가 일어나는 것으로 가정하였고 열전달계수는 $102.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 주었다. 주위와 압력매체의 온도는 상온으로 가정하여 300K 으로 하였다.

Table 1 Thermal properties of aluminium and copper

Material	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kg K)
Al	2702	220	896
Cu	8933	371	383

3.2 수치해석을 위한 접촉면 형상 수정

신뢰할 수 있는 공정해석 결과를 얻기 위해서는 실제 정수압 압출공정과 유사한 변형유형으로 수정하였다. Fig. 3는 유한요소해석으로 구한 복합재 접촉면의 형성경로를 초기 경계면과 수정된 경계면을 비교해서 보여주었다. 외재의 두께감소구배가 변형구역에서 비교적 작은 값을 유지하다가 변형말기에 급격하게 커지는 경향으로 경계면이 형성됨을 볼 수 있다.

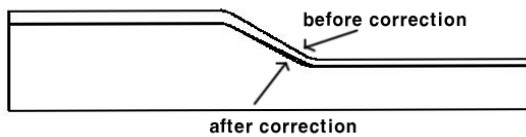


Fig. 3 Contact surface correction

3.3 실험장치 구성

압출공정실험은 H 연구소에서 연구용으로 개발된 1.5MN급의 수평식 정수압 압출기를 이용하였다. 본 압출기는 컨테이너의 수명과 안전성을 높이기 위해 외벽에 피아노 강선을 감아 보강하는 강선적층방식의 라이너가 사용되었다. 압출기는 초당 0~25mm까지 램의 속도를 변화시킬 수 있으며, 램의 변위와 속도를

측정할 수 있는 LVDT와 압출하중을 측정할 수 있는 로드셀이 장착되어 있다.

압출시편의 내재로는 냉간에서 비교적 큰 압출비를 얻기 위해 전·연성이 우수한 알루미늄봉과 외재로는 구리봉(OFEC)을 사용하였다. 복합재의 압출에서는 시편 제작시에 표면의 불순물들을 제거하는 표면처리를 하였다. 또한 내재의 바깥면과 외재의 안쪽면에 비슷한 표면거칠기값을 부여하여, 압출공정시에 경계표면층의 균일한 파괴를 유도하도록 하였다. 구리와 알루미늄 복합봉의 정수압 압출 실험 순서는 다음과 같이 실시하였다.

① 외재로 적당한 외경치수의 구리 파이프를 절단하여, 원하는 외경, 살두께 및 길이로 가공한 후, 한쪽 끝단이 밀폐가 되도록 브레이징(brazing)한다.

② 내재로 알루미늄봉을 외재의 내경 치수에 맞추도록 가공한 후, 금형각도에 따라 한쪽 끝단을 원추형상으로 선삭가공한다.

③ 구리 파이프의 내경과 알루미늄 심재의 외경은 탈유(degreasing)를 위해 시약(tri-chloro-ethylene)으로 세척하고, 입자크기가 같은 사포로 표면거칠기를 주어 서로 삽입하여 결합한다.

④ 결합된 시편의 다른 한쪽 끝단을 원추형상이 되도록 스피닝(spining)하여 일체형 시편을 만든다.

⑤ 시편의 원추형끝단에 윤활제를 도포하고, 밀폐기능을 갖춘 금형을 컨테이너 안으로 삽입한다.

⑥ 압력전달매체가 주입되고 램이 전진하면 압출된다.

⑦ 압출이 끝난 후 압출재는 절단되어 금형과 분리하고, 금형에 남아있는 잔여시편은 차후의 압출을 위해 제거한다.

이상과 같은 공정순서에 따라 표면처리공정부터 압출까지 수 분 이내에 상온에서 압출을 수행하였으며, 압출공정은 빠른 시간 내에 정상상태(steady state)에 도달하였다.

4. 고 찰

본 연구에서 제시된 소성가공 시 발생하는 에너지 소산을 고려한 복합봉제의 정수압압출 복합봉제의 정수압 압출성형의 변형특성 파악에 중요한 변수를 고

찰하였다. 또한 압출각, 압출비, 압출속도 등 공정 변수를 달리하여 그것들이 복합봉재 성형에 미치는 영향을 고찰하였다.

4.1 경계면 변형의 영향

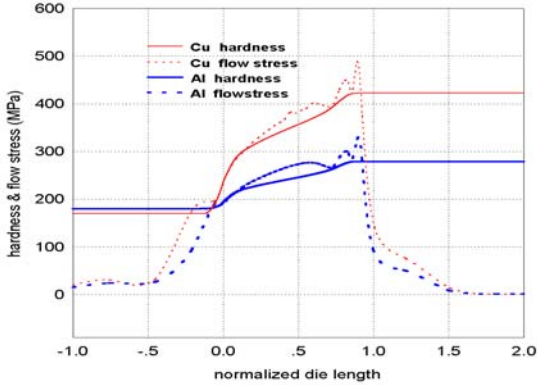


Fig. 4 Comparison of flow stress and hardness along the contact surface (ER=4.0, half die angle=30°, Ro=30.0mm, Rc/Ro=0.867)

Fig. 4는 내재와 외재의 경계면인 구리와 알루미늄의 접촉면 근처에서 변형경로를 따른 유동응력과 하드니스의 변화를 보여준다. 소성변형구역에서 두 값들은 유사한 값을 갖고 그 외의 구간에서 하드니스는 변형 경화성이 보존됨을 보여준다.

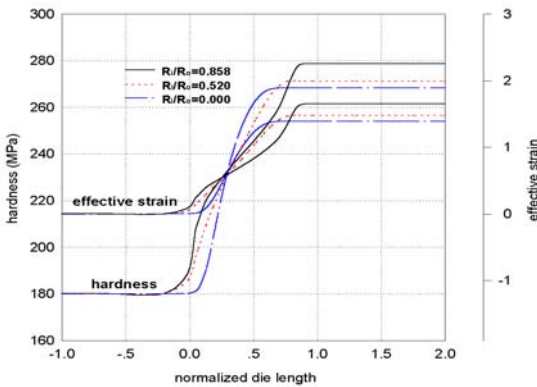


Fig. 5 Hardness and effective strain along the same particle paths (ER=4.0, half die angle=30°, Ro=30.0 mm, Rc/Ro=0.867)

Fig. 5는 내재인 알루미늄의 세 종류의 변형경로에 따른 유효변형률과 하드니스의 진전과정을 보여준다. 유효변형률과 하드니스는 동일한 변형경화정도를 나타내는 정성적인 물리량으로 볼 수 있었다.

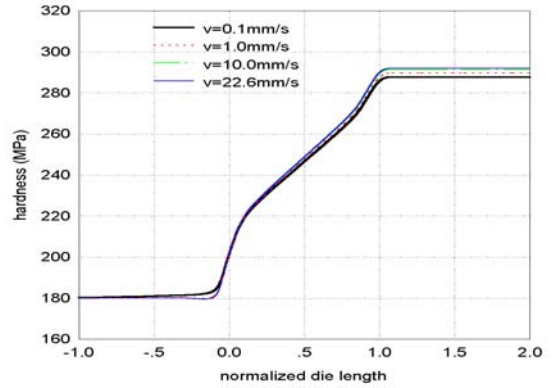


Fig. 6 Evolution of hardness along the contact surface for some inlet velocity (ER=6.250, half die angle=30°, Ro=30.0mm, Rc/Ro=0.867)

Fig. 6은 금형 입구속도를 달리 하였을 때, 내재인 알루미늄의 경계면 근처 변형경로를 따른 하드니스변화를 보여 주었다. 속도가 클수록 하드니스는 큰 값으로 발전하며 변형률속도에 따른 변형경화의 변화가 작은 알루미늄의 경우, 그 차이는 크지 않았다.

위의 연구결과로부터 소성변형구역에서 큰 변동이 없이 비교적 안정적인 증가를 보이는 하드니스는 가공경화를 나타내는 정성적인 값임을 알 수 있었다.

4.2 에너지 소산의 영향

소성변형에 의해 생기는 에너지 소산에 의한 해석의 결과들은 Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다. 변형이 일

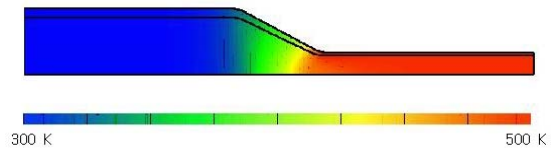


Fig. 7 Distribution of temperature (Outer layer : copper, Inner layer : aluminium) (ER=9.0, half die angle=30°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s)

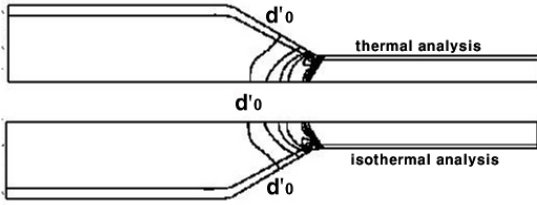


Fig. 8 Comparison of effective strain rate contour
 ($d'o = 5.0 [1/s]$, $\Delta d' = 5.0 [1/s]$)
 (ER=9.0, half die angle=30°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s)

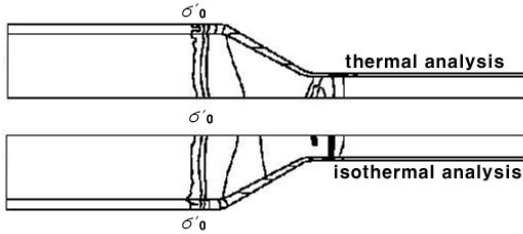


Fig. 9 Comparison of effective stress contour
 ($\sigma'o = 50 [MPa]$, $\Delta \sigma' = 50 [MPa]$)
 (ER=9.0, half die angle=30°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s)

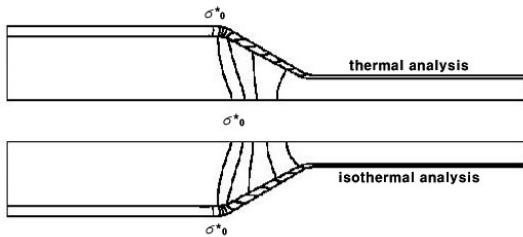


Fig. 10 Comparison of hardness contour
 ($\sigma*o = 185 [MPa]$, $\Delta \sigma* = 25 [MPa]$)
 (ER=9.0, half die angle=30°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s)

어나는 구간에서 열이 발생되고 온도가 올라가는 것을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 바깥쪽 구리는 내부의 알루미늄에 비해 매우 낮은 온도를 보인다. 소재는 컨테이너 안에서는 압력 매개체와 대류에 의해서, 다이 접촉부에서는 전도에 의해서, 다이를 빠져 나온 뒤에는 외기와의 대류에 의해 열을 빼앗기게 된다. 여기에 더하여 알루미늄에 비해 구리의 전도율이 높고 비열이

작기 때문에 그러한 온도 분포를 갖게 되는 것으로 분석될 수 있다.

Fig. 8에서는 변형률 속도를 보여주고 있다. 열발생을 무시한 계산결과와 비교할 때 경향은 비슷하나 전체적인 값은 감소하고 있다. 유효응력과 하드니스도 각각 Fig. 9, Fig. 10에서 나타난 바와 같이 등온을 가정한 계산과 전체적인 형상은 비슷하나 그 크기는 감소하였다. 이러한 현상은 온도상승으로 생긴 소재의 연화 때문인 것으로 판단할 수 있다.

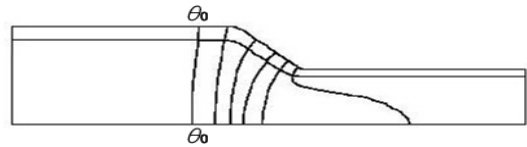


Fig. 11 Effect of extrusion ratio on temperature distribution

(a) ER=3.114, half die angle=40°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta \theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 426 [K]$)

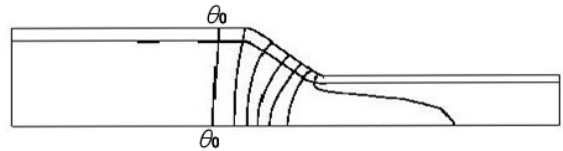


Fig. 12 Effect of extrusion ratio on temperature distribution

(b) ER=4.0, half die angle=40°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta \theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 446 [K]$)

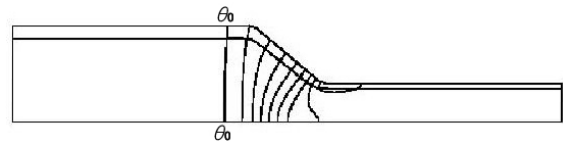


Fig. 13 Effect of extrusion ratio on temperature distribution

(c) ER=6.25, half die angle=40°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta \theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 485 [K]$)

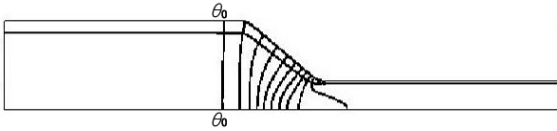


Fig. 14 Effect of extrusion ratio on temperature distribution

(d) ER=9.0, half die angle=40°, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta\theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 519 [K]$)

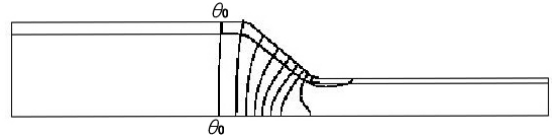


Fig. 17 Effect of extrusion die angle on temperature distribution

(c) Half die angle=40.0°, ER=6.25, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta\theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 485 [K]$)

압출비와 온도의 관계를 Fig. 11로부터 Fig. 14까지 보여 주고 있다. 압출 반각을 40°로 유지한 상태에서 압출비만을 3.114, 4.0, 6.25, 9.0으로 다르게 하였을 때 나타나는 온도 변화를 검토하여 보았다. 압출비가 커짐에 따라 소성변형량이 커지게 되고 이것이 소성가공열로 변화되면서 온도상승을 가져오는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 15에서 Fig. 17까지는 압출각이 온도 변화에 미치는 영향을 보여주고 있다. 압출비를 6.25로 유지한 채로 압출 반각만을 22.5°, 30°, 40°로 달리 하였다. 압출각이 커짐에 따라 온도분포가 상승하게 되는데 그 이유는 압출각이 커짐에 따라 급격한 변형으로 소성가공열 발생률이 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

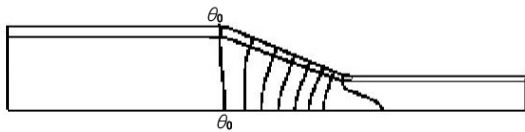


Fig. 15 Effect of extrusion die angle on temperature distribution

(a) Half die angle=22.5°, ER=6.25, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta\theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 469 [K]$)

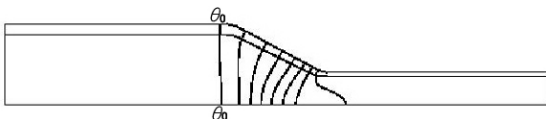


Fig. 16 Effect of extrusion die angle on temperature distribution

(b) Half die angle=30.0°, ER=6.25, Rc/Ro=0.867, vi=22.6mm/s

($\theta_o = 300 [K]$, $\Delta\theta = 20 [K]$, $\theta_{max} = 474 [K]$)

5. 결 론

구리와 알루미늄으로 조합된 이중 복합소재를 정수압 압출공정으로 성형하여, 에너지 소산을 고려하여 경계면의 변형경로 및 압출현상을 수치계산 및 실험적으로 비교 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압출비가 커짐에 따라 소성 변형량이 커지게 되고 이것이 소성가공열로 변화되면서 온도상승을 가져오는 것을 확인할 수 있다.
2. 온도변화에 미치는 압출비와 압출각의 영향을 비교해 볼 때, 압출비와 압출각 모두 그 값이 증가할수록 온도 증가를 가져오지만, 절대적인 소성 변형량을 결정하는 압출비의 영향이 중요함을 알 수 있다.
3. 하드니스는 변형 소재의 중심부보다 표면에서 큰 값으로 발전하며, 유효변형률과 유사한 특성을 보여 주어 변형경화 정도를 나타내는 정성적인 물리량인 것을 확인하였다.
4. 그리고 압출비와 압출각이 커지게 되면 소성가공시 발생하는 마찰열에 의한 압출재의 온도 상승은 무시할 수 없는 공정 변수임을 확인 하였다.

향후 본 모델로 이중 복합재 정수압 압출 공정중의 소재에 따라 변형을 고려한 설계 자료로 활용할 수 있는 특성을 예측할 수 있게 되었다.

참고문헌

1. Nishihara, M., NEL/AIRAPT International Conference on Hydrostatic Extrusion, Reprints, Univ. Stirling,

- Scotland, pp. 33-81, 1973.
2. Ahmed, N., "Extrusion of Copper-clad Aluminium Wire," *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 2, pp. 19-32, 1978.
 3. Osakada, K., Limb, M. and Mellor, P. B., "Hydrostatic Extrusion of Composite Rods with Hard Cores," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 15, pp. 291-307, 1973.
 4. Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, pp. 154-170, 1969.
 5. Mori, K. I., Osakada, K. and Shiomi, M., "Finite Element Modelling of Forming of Solid Metal with Liquid Phase," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 27, pp. 111-118, 1991.
 6. Shiomi, M., Mori, K.I., and Osakada, K., "Simulation of Steady-state Hydraulic Extrusion Using Rigid-Plastic Finite Element Method," *JSME*, Vol. 59, No. 568, pp. 192-197, 1993.
 7. Park, H. J., *Bonding Criterion in Bi-Metal Hydrostatic Extrusion*, PhD thesis. KAIST, 1997.
 8. Hartley, C. S., Srinivasan, R., "Residual Stresses in Copper-Clad Aluminium," *Residual Stress in Science and Technology*, Vol. 2, pp. 867-874, 1987.
 9. Lee, Y. S and Dawson, P. R., "Obtaining Residual Stresses in Metal Forming after Neglecting Elasticity on Loading," *ASME J of Applied Mechanics*, Vol. 111, p. 318, 1989.
 10. Hart, E. W., "A Phenomenological Theory for Plastic Deformation of Polycrystalline Metals," *Acta Metallurgica* Vol. 18, pp. 599-610, 1970.
 11. Hart, E. W., "Constitutive Relations for the Non-Elastic Deformation of Metals," *General Elastic Company Corporate Research and Development*, 1975.