

# 알루미늄 합금 극저온 압연의 오일러리안 해석에서 미세조직 변화 예측

윤상현<sup>1</sup>, 이용신<sup>#</sup>, 남원종<sup>2</sup>, 박경태<sup>3</sup>

## Prediction of Microstructural Changes during Cryogenic Rolling of Al alloys using an Eulerian Analysis

S.H. Yoon, Y-S. Lee, W-J Nam, K-T Park

### Abstract

This paper is concerned with the prediction of micro structural changes of Al alloys during cryogenic rolling using an Eulerian finite element analysis. The main objective of cryogenic rolling is to obtain ultra-fine grains by severe plastic deformation at the extremely low temperature. Thereby, this simulation focuses on micro structural developments - the texture development and the changes in the size and shape of grains. The former one may be modeled using a crystal plasticity theory while the other can be predicted by a streamline technique. Applications to three pass rolling are given.

**Key Words** : English Key Word: Times New Roman 9pt (한글 바탕체 9pt), Carbon Fiber, Cutting Force, Carbon Fiber, Cutting Force

### 1. 서론

나노결정재료는 100nm 이하의 결정립 크기로 인하여 일반적인 공학재료보다 강도가 매우 높으나 연성은 작은 편이었다. 최근에는 높은 강도를 유지하며 연성도 향상된 나노결정재료가 보고되고 있다. 나노결정구조의 재료를 만드는 방법에는 극대의 전단변형을 이용하는 ECAP, 극저온에서 나노 분말로부터 벌크재를 Cryo-milling 법, 또는 벌크 판재를 극저온에서 압연(Cryogenic Rolling)하는 방법 등이 있다. 위의 방법들 중에서 극저온 압연공정은 단순공정장치에 의한 제조 방법으로 타 방법에 비해 생산경쟁력이 가장 강한 방법이다. 즉 극저온 압연은 극한 조건에서 나타나는 재료 고유의 특성을 이용하여 금속계 구조재료의 다기능화 및 고기능화를 추구하며, 이를 응용하여 금속계 구조재료의 기존 제조 공정의 단순화하는 장점이 있다.

제조공정 변수 중 제어가 가장 용이한 온도를 극저온 범위까지 확장하여 극저온 가공(cryogenic working)을 금속계 구조재료에 적용, 미세조직 변화를 연구하고, 이를 제어하여 고기능, 다기능 금속계 구조재료를 제조하는 신개념의 극한압연 공정을 확립하는 것이 궁극적인 연구 목적이다.

이를 위해서는 실험적 연구외에 이론적 모사가 병행되는 것이 효율적이다. 본 논문에서는 극저온 압연의 정상상태 공정을 오일러리안 해석을 통하여 미세조직의 변화를 예측하고 각종의 압연공정 조건이 미세조직의 변화에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

### 2. 이론적 배경

극저온에서 압연공정 중인 소재는 결정립 내부의 슬립시스템의 활동으로 인한 소성변형을 겪으며 결정립의 미세화를 수반한다.

1. 국민대학교 생산기술연구소  
2. 국민대학교 신소재공학부  
3. 한밭대학교 신소재공학부  
# 교신저자: 국민대 기계자동차공학부, yslee@kookmin.ac.kr

결정립의 미세화는 국부적인 물질점이 겪는 변형이력을 추적하여 예측하며, 변형집합 조직의 예측은 결정 소성학에 의해 모델링 될 수 있다.

## 2.1 변형이력추적

유선 추적법은 오일러리안 검사체적 내에서 물질점의 유동 궤적 즉 유선을 추적한다. 이러한 유선추적 법에서는 오일러리안 검사체적 내에 있는 유선상에서 하류에 있는 입자의 위치를 현재의 위치에 대한 Taylor 급수 전개에서 2 차항 까지 취한 후에 입자의 속도와 유선 상의 거리로 구한다. 유선은 유선상의 점들의 좌표 값들로 정의된다. 유선상의 점은 압연소재의 물질점으로 수많은 결정립 들로 이루어진다. 본 연구에서는 마이크로 크기의 결정립 변형과 매크로 입자의 변형간에는 기하학적 구속조건이 같도록 Taylor 가정을 적용한다. 즉 물질 점의 형상변화와 물질점을 구성하는 대표적인 결정립의 형상변화가 같을 것으로 가정한다. 따라서 결정립의 크기 및 형상 변화를 예측하기 위하여 유선을 따라 입자의 변형구배텐서를 추적한다. 변형구배텐서의 변화는 아래의 식으로 구한다.

$$F' = \int \dot{F} dt = \int LF \frac{dx_c}{|u_c|} \quad (1)$$

일단 변형구배텐서의 변화를 구하면 결정립의 크기 및 형태변화를 예측할 수 있다.

## 2.2 결정소성학

결정 소성학에서는 변형률속도텐서( $d^{(g)}$ )와 스핀텐서( $\omega^{(g)}$ )를 각 슬립시스템의 전단변형률속도( $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ )와 슬립방향벡터와 슬립면 법선벡터로 정의된 Schmid 텐서의 조합으로 표현한다.

$$d^g = \frac{1}{2}(L + L^T) = \sum_{\alpha=1}^{N_s} P^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)} \quad (2)$$

$$\omega^g = \frac{1}{2}(L - L^T) = \dot{R}^* R^{*T} + \sum_{\alpha=1}^{N_s} Q^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)} \quad (3)$$

결정립의 변형률속도를 구하기 위해서는 각 슬립시스템에서의 전단변형률속도( $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ )와 분해전단응력( $\tau^{(\alpha)}$ )의 관계를 규명하는 마이크로 구성방정식을 필요로 한다. 즉

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\alpha}^{(\alpha)} \frac{\tau^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \right| \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \quad (4)$$

윗 식에서 분해전단응력( $\tau^{(\alpha)}$ )은 결정립의 진응력을 현재형상에서의 슬립시스템에 투영하여 다음과 같이 구한다.

$$\tau^{(\alpha)} = \text{tr}(P^{(\alpha)} \sigma^{(g)}) \quad (5)$$

슬립시스템의 변형경화는 하드니스의 발전식으로 묘사되며 본 연구에서는 Voce에 의해 제시되어 Kocks에 의해 수정된 것을 사용하였다[ 1].

슬립시스템의 구성방정식(4)에 결정립의 변형률속도와 슬립시스템 상의 전단변형률의 관계식(2)과 결정립에 미치는 응력과 슬립시스템상의 전단응력의 관계식(5)를 적용하면 단결정에 대한 응력과 변형률속도의 관계식을 구할 수 있다.

다결정 변형의 해석에서 결정립 집합체의 거시적 소성변형은 각 결정립들의 미시적 점소성 변형의 중첩으로 나타난다. 본 연구에서는 Taylor가 제시한 바와 같이 모든 결정립의 변형률속도텐서는 다결정집합체의 변형률속도텐서( $d$ )와 같은 것을 가정하였다. 즉 한편 다결정 집합체의 진응력은 각 단결정의 응력을 평균하여 구한다. 다음과 같이 결정립 집합체의 응력과 변형률 속도의 관계식을 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{1}{N_g} \sum_{g=1}^{N_g} \left\{ \sum_{\alpha=1}^{N_s} \dot{\gamma}^{(\alpha)} P^{(\alpha)} \otimes P^{(\alpha)} \right\}^{-1} d \quad (10)$$

변형이 진행됨에 따라 집합체내의 각 결정립들은 현 방위에서 각각 달리 회전을 하게 된다. 현재형상에서의 회전텐서( $R^*$ )는 각 결정격자의 회전속도를 나타내는 식(3)에서  $\dot{R}^*$ 를 얻어 적분하여 구할 수 있다.

## 3. 유한요소해석

본 연구의 모델링 프로그램에는 연속압연 공정을 해석할 수 있도록 오일러리안 유한요소격자의 출구에서의 변형이력이 후속압연공정의 입구격자에 사상(Mapping)하는 알고리즘을 갖추었다. 롤 직경 80mm, 패스 당 압하율 30% 인 압연공정의 연속 세 패스 공정을 시뮬레이션하였다.

### 3.1 결정립 크기

Fig. 1 에서는 연속 세 패스에서의 결정립 크기 및 형상의 변화를 보여주고 있다. 두께 방향으로 결정립 미세화가 달리 진행되는 것을 예측하고

있다. 표면이나 중심부보다는 그 사이에서 결정립 미세화가 보다 빨리 진행되고 있다. 표면에서는 물과의 접촉시에 중립점을 지나며 전단의 방향이 바뀌는 것이 결정립 미세화를 늦추는 것으로 분석된다. 중심부에서는 전형적인 평면압축변형에 의한 변형이력을 겪어 전단이 복합되는 중간부보다 결정립 미세화가 작은 것으로 사료된다. 중간부의 최소 결정립 크기는 표면이나 중심부에 있는 결정립 크기보다 약 30% 정도 작은 것으로 예측되고 있다.

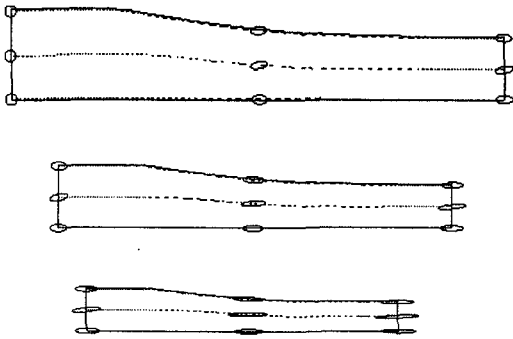


Fig. 1 Changes in shape and size of the grains in the three inlet points.

### 3.2 결정립 우선방위

Fig. 2 에서는 집합조직의 발전을 분석하기 위하여  $\{111\}$  극점도를 보여주고 있다. 표면과 중심부에서 서로 다른 조직이 발달하였음을 보이고 있다. 압하율이 증가함에 따라 집합조직의 윤곽이 뚜렷해짐을 알 수 있다. 두께방향으로는 전단변형 정도의 차이로 인해 불균일한 집합조직이 발달함을 확인할 수 있다. 중심부에서는 평면변형을 압축 변형시에 관측되는 집합조직과 유사한 경향을 보임으로써 중심부에서는 평면변형을 압축변형이 주도적으로 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 중심부에서 나타난 집합조직은 황동형방위 ( $\{110\}<112>$ )로 부터 Taylor 집합조직으로 알려진  $\{4\ 4\ 11\}<11\ 11\ 8>$ 의 안정방위에 이르는  $\beta$ 형 섬유 집합조직이다. 반면에 표면에서는 전단변형의 영향으로  $\{001\}<110>$ 성분을 중심으로한  $\alpha$ 형 섬유 집합조직이 발달하고 있다. 이러한 결과들은 과거에 보고된 실험결과-알루미늄 다결정재의 압연시 두께방향으로 불균일하게 발달하는 집합조직, 판재 중심부에서의  $\beta$ 형 섬유 집합조직의 발달-

와 비슷한 경향을 보여준다. 집합조직에 상응하는 이방성항복 곡면이나 R-값등의 계산은 가능하다.

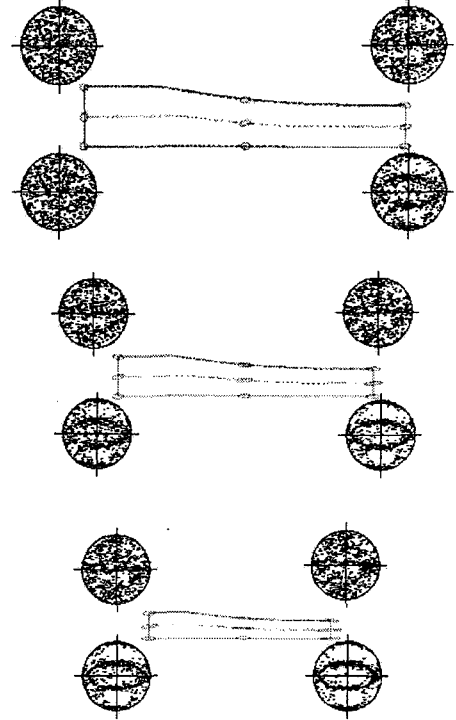


Fig. 2  $\{111\}$  pole figures at the surface and center of the plate during three pass continuous rolling at cryogenic temperature

## 4. 요약

극저온 압연중인 알루미늄 합금의 미세조직의 변화 - 집합조직의 발전과 결정립 크기 및 형상 변화 - 를 예측할 수 있는 오일러리안 유한요소 해석을 수행하였다. 패스 당 압하율 30% 인 연속 세 패스의 압연공정을 시뮬레이션 하여 얻은 결과는 실험에서 관측된 것과 비슷한 경향을 보여, 본 연구의 해석모델의 타당성을 입증하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (KOSEF R01-2003-000-10202-0)의 지원에 의한 것이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.