

# 순수 알루미늄의 판재압연 및 공형압연시 가공경로에 따른 변형분포와 기계적 성질의 예측

김성일<sup>1</sup>· 변상민<sup>#</sup>

## Study of the Effect of Loading Path on the Strain and Mechanical Properties of Aluminum with Flat and Groove Rolling Experiment

S. I. Kim, S. M. Byon  
(Received August 5, 2008)

### Abstract

The effect of loading path changes on the strain and mechanical properties of a commercial pure aluminum was studied using flat rolling and groove rolling. Material during flat rolling undergoes a continuous monotonic compressive loading, while one during groove rolling experiences a series of cross compressive loading. Four-pass flat rolling and groove rolling experiment are designed such that the aluminum undergoes the same amount of the strain at each pass. The rolling experiment was performed at room temperatures. Specimens for tensile test are fabricated from the plate and bar rolled. In addition, the strain distribution for the plate and bar cold rolled specimens is also calculated by finite element method. The results reveal that differences of loading path attributed by monotonic loading(flat rolling) and cross loading(groove rolling) significantly influence the mechanical properties such as yield stress, ultimate tensile stress, strain hardening and elongation. It is clear that the different loading path can give raise to change the deformation history, although it is deformed with same amount of strain for same material.

**Key Words:** Loading Path, Cross Loading, Monotonic Loading, Groove Rolling, Flat Rolling

### 1. 서 론

자동차, 선박, 항공기 등의 수송용 기기를 제조할 때 매우 다양한 금속재료가 사용되는데 각각의 부품에 적합한 금속재료를 선정할 때에는 재료의 가격, 무게와 강도, 연성 등의 기본적인 기계적 성질 등이 우선 고려되며 성형성, 용접성, 도장성, 내부식성, 내충격성, 피로특성 등 세부적인 요구특성이 2차적으로 고려된다. 그러나, 최근 국제 유가급등과 급변하는 환경문제로 인하여 이들의 보편적인 기계적 특성을 대신하여 비중 대

비 특성(예, 강도/비중)이 1차적인 고려대상이 되고 있으며 이와 같은 특성이 우수한 새로운 초고강도 강재(Advanced High Strength Steels, AHSS)와 알루미늄합금, 마그네슘합금, 티타늄합금소재의 개발수요가 급증하고 있다[1].

이와 같은, 수송기기용 소재의 기계적 특성 향상과 경량 소재개발을 위한 대부분의 연구들은 합금설계, 미세조직제어(공정설계), 구조설계 관점에서 진행되고 있다[1]. 이들 연구분야들은 독립적으로 진행되는 것보다는 상호 간 연관성을 고려하여 연구가 이루어질 때 더욱 우수한 결과가 예상된다.

1. ㈜POSCO 기술연구소 자동차소재연구그룹  
# 교신저자: 동아대학교 기계공학부, E-mail: smbyon@dau.ac.kr

본 연구에서는 서로 다른 가공경로로 가공되지만 동일한 변형량을 부여한 동일한 성분의 금속 재료가 서로 다른 기계적 성질을 나타내는 현상을 해석하여 냉간성형 방법(공정설계)의 중요성과 이를 구조설계에 응용하는 방안에 대해 고찰하고자 하였다.

가공방법에 따른 금속재료의 기계적 성질 및 거동의 변화는 가공시 소재에 부여되는 변형인자에 따라 변화하는 미세조직 때문이다. 일반적으로 냉간 성형시의 소재의 기계적인 거동은 변형량과 변형속도에 크게 의존하고 열간 성형시에는 변형량, 변형속도, 온도 및 시간 등에 의존하는 것으로 알려져 있다[2]. 이와 같은 미세조직, 변형저항(유동응력)과 변형인자간의 구성관계(constitutive relation)에 관해서는 오래 전부터 많은 연구자들의 연구가 있었다[2]. 그러나, 소재를 원하는 형상으로 성형하는 과정이 여러 단(stage)으로 이루어진 경우에는 최종 형상에 도달하는 가공경로에 따라 최종 제품의 재질 및 미세조직이 변화하는데, 이에 관한 연구는 부족한 상태이다. 본 연구에서는 이와 같은 냉간 성형 시 가공경로에 따른 소재의 가공이력과 기계적 재질의 변화를 검토하고자 한다.

소재가 각각 다른 외력 조건에 의해 2단 이상의 변형 단계를 거친 과정을 “변형이력(deformation history)” 이라고 한다. 열간 성형시의 변형율 이력에 관한 연구는 서로 다른 재결정 및 상변태와 같은 금속조직 변화에 기인한 소재물성에 관한 것이었다[3-6]. 이에 반해, 냉간 성형시의 변형이력에 관한 연구는 대부분 서로 다른 집합조직 형성에 의한 소재물성 변화 및 이방성에 관한 것으로서 특히, 판재 성형에 관한 것이 대부분이었다. Ghosh[7]는 2축 인장을 받고 있는 판재의 2축 변형비 변화에 의해 소재의 경화율이 실험적으로 달라지는 것을 실험적으로 고찰하였다. Lloyd와 Sang[8]은 서로 수직된 인장응력을 2단에 걸쳐 판재에 나누어 가할 경우 유동응력과 연성(ductility)의 변화가 소재에 따라 다르게 나타남을 실험적으로 확인하였다. Fernandes와 Vieira[9]은 일련의 수직 압연-인장 실험을 통해서 항복과 유동응력 거동에 미치는 변형이력의 효과가 전위의 미끄러짐에 기인한 슬립 시스템의 변화와 관련됨을 광학 현미경 및 TEM을 이용하여 증명하였다.

지금까지 연구자들은 인장 혹은 비틀림 테스트 기를 통한 가상적인 변형이력에 의해 소재 거동

을 분석하는 실험적인 방법에 의존하였다. 또한 냉간 성형 부분의 변형이력에 관해서는 판재(sheet) 연구 쪽에 국한되어 있었다. 본 연구에서는 체적성형(bulk forming) 공정인 판(plate) 평롤 압연 및 봉재(rod) 공형 압연의 실제 공정을 대상으로 하였다. 압연에는 냉간 상태의 순수 알루미늄 소재를 사용하였다. 분석 방법으로써 실제 다단 평롤 및 공형 압연 테스트를 통해서 소재 변형거동을 실험적으로 비교하였으며 유한요소 소성변형 해석을 적용하여 변형이력의 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편준비와 압연 실험방법

본 연구에서 사용된 재료는 상용되고 있는 순도 99.8% 가공용 알루미늄으로 두께 28mm, 폭 140mm, 길이 300mm의 판재와 지름 28mm, 길이 300 mm의 봉재이었다. 여기에서 봉재는 판재를 기계가공하여 제작하였다.

준비된 알루미늄 판재와 봉재는 초기 가공이력을 제거하기 위하여 500℃에서 1시간 동안 어닐링 열처리 후 로(furnace)내에서 냉각시켰다. 사용

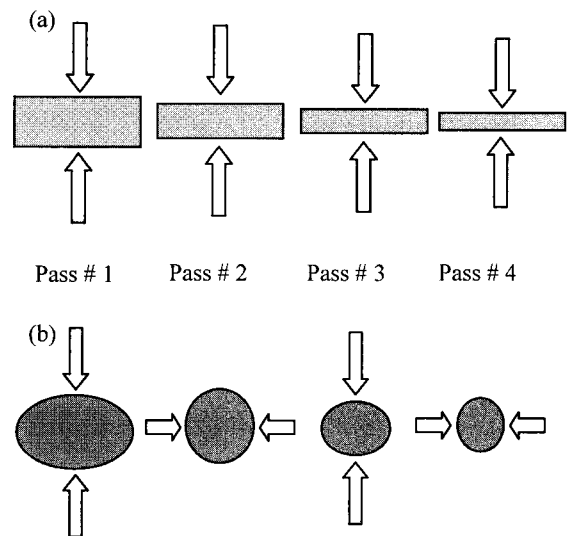


Fig. 1 Schematic for the change of loading(strain) path for a four-pass rolling sequence. The arrow indicates the loading direction. (a) Cross section of workpiece at each pass in flat rolling and (b) Cross section of workpiece at each pass in groove rolling

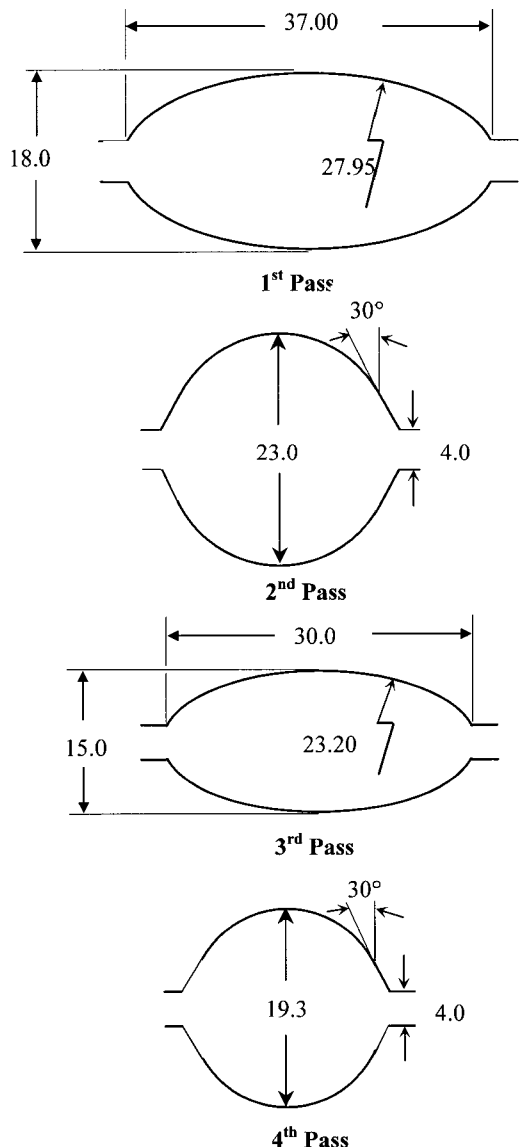
된 시험압연기는 2단 수평압연기(75kW, DC 모터)이었으며 DCI(Ductile Casting Iron)를 사용하였다. 롤의 직경은 310mm, 폭은 320mm이었으며 압연속도는 33m/min으로 일정하게 하였다.

본 연구에서는 두 가지 종류의 압연가공시험을 하였으며 이를 Fig. 1에 나타내었다. 첫번째 압연가공은 평롤(flat roll)을 이용하여 단면이 사각형인 판(plate)을 계속 한 방향으로 힘을 가하여 두께를 줄여가는 평압연(flat rolling)이었으며 Fig. 1(a)에 나타내었다. 두번째 압연가공은 초기 단면이 원 형태의 소재를 상하 압하에 의해 단면을 타원형 형태로 만들고(Pass 1), 그 다음 1 패스에서 만들어진 타원형 형태의 단면에 좌우에서 압하를 가하여 다시 원 형태의 단면을 만드는 과정(Pass 2), 이러한 과정을 반복하면서 단면을 줄여가는 4 패스로 이루어진 공형압연(groove rolling)이었다(Fig. 1(b)). 두 가지 형태의 압연에 의한 변형량과 유동응력 사이의 구성관계를 비교하기 위해서는 두 압연 공정 사이의 각 패스별 등가 변형량(equivalent strain)이 일치하여야 한다. 이를 위해서 두 압연 공정의 패스 스케줄을 압연이론에 근거해서 각 패스별 등가 변형량이 같도록 설계하였다[5]. Table 1은 평압연과 공형압연의 경우 각 패스의 롤 간격과 이로 인해 발생하는 변형량 및 변형속도를 나타내었다. Fig. 2는 공형압연 패스 스케줄 설계로부터 얻은 각 패스별 공형 형상이다. Table 1에서 변형속도는 서로 다른 것으로 나타나는데, 냉간 압연시 이와 같은 작은 변형속도 영역에서 약간의 크기 차이는 실험결과에 거의 영향을 미치지 않았다.

판(plate) 소재를 압연하는 절차는 설계된 패스 스케줄에 따라 롤간격을 설정한 다음 각 패스별 출측 두께가 얻어지도록 압하를 수행하는 방법으로 하였다. 압하의 방향이 1패스에서 4패스까지 모두 압연방향에 수직인 한 방향이므로 소재 취입은 일관되게 두께를 줄이는 방향으로 이루어진다. 이에 반해 봉재 소재를 압연하는 절차는 다소간 복잡하다. 소재 압연방향이 진행 방향에 수직인 2가지 방향이 존재하므로 이것을 구현하기 위해 소재를 다음 공형에 90° 돌려서 취입한다. 즉, 이전 패스에서 폭 퍼짐이 일어나는 부분이 다음 패스에서는 압하가 일어나는 부분이 되어 단면을 줄이면서 길이방향으로 소재 변형을 유도한다. 총 4 패스이므로 압하가 일어나는 방향이 2번씩 반복된다. 판압연의 경우와 비교할 때 2번의 압하 방향 차이가 존재한다.

**Table 1 Roll gap setting, strain and strain rate for flat and groove rolling experiments**

Pass No.	Flat rolling			Groove rolling		
	Roll gap (mm)	Strain	Strain rate (1/s)	Roll gap (mm)	Strain	Strain rate (1/s)
1	19.51	0.42	5.50	4.0	0.42	6.52
2	14.03	0.80	6.24	4.0	0.80	5.53
3	10.12	1.18	7.32	4.0	1.18	6.87
4	7.41	1.54	8.39	4.0	1.54	5.94



**Fig. 2 Roll groove shape and design parameters for a four-pass groove rolling experiment(unit: mm)**

### 2.2 기계적 성질 평가

인장시편은 압연에 의해 얻어진 소재 모양에 따라 판형과 봉상형 두 가지로 제작되었다. 판형 시편의 경우에는 압연된 후 소재의 중심부를 시편으로 제작하기 위해서 시편을 압연길이 방향으로 중심부 주위를 일정간격으로 절단한 다음 인장시편으로 가공하였다. 봉상형 인장시편은 공형 압연된 후 얻은 소재를 인장시편으로 기계 가공하였다. 인장시편은 ASTM E8 규격[10]으로 하였는데 판형 시편은 폭: 20mm, 두께: 7.41mm, 게이지부 길이: 50mm이었으며 봉상 시편은 직경: 6.25mm, 게이지부 길이: 25mm이었다.

본 압연시험의 단점은 인장시편을 가공하기 위해서 압연재 전체가 시편제작에 소요된다는 점이였다. 따라서, 다단 패스 압연 실험 시 중간패스 후 인장시편을 제작할 경우 차후 압연실험을 수행할 수 없으며 이를 해결하기 위해 중간 패스 압연 후 소재의 항복강도를 경도로 측정하여 간접적으로 평가하였다. 각 중간패스 압연의 압연재 일부분만을 절단하여 경도실험을 수행하였으며 소재 후단 부분에서 채취하였다. 경도측정은 Micro-Vickers 시험기를 사용하였으며 50g의 하중을 적용하였다. 전체 압연가공 단계에서 소재의 경도값은 4회 측정된 값들의 산술평균값으로 하였다. 소재의 경도값의 항복강도 환산은 초기 압연전 소재와 최종 4패스의 압연후 소재의 측정된 항복강도와 경도값을 상대 비교하여 예측하였으며 그 결과를 Table 2에 상세히 나타내었다.

### 3. 유한요소 소성해석 모델

본 연구에서는 선·후단부를 제외한 소재의 대부분이 거의 변동 없이 가공되는 압연 소성변형을 해석하기 위해서 정상상태 유한요소모델을 도입하였으며, 판 및 공형 압연시 롤깎에서의 복잡한 소성변형 현상을 기술하기 위해서 3차원 해석방법을 사용하였다[11]. 정상상태 해석을 위해서는 구속되어 있지 않은 소재 표면(즉, 자유표면, free surface)을 예측할 수 있는 기법이 요구된다. 본 논문에서는 유선추적(streamline tracing)에 의해 자유표면을 반복적으로 찾는 방법을 사용하였다[12].

#### 3.1 유선추적

압연하기 전 소재 표면상의 입자는 변형되는 동안 입자의 속도 방향과 크기에 따라 변형후 위

**Table 2 Predictions of yield strength in the intermediate passes from the hardness tests**

Material parameters	Initial specimen	Rolling process	Pass no.			
			1	2	3	4
Equivalent strain	0.0	Flat	0.42	0.80	1.18	1.54
		Groove	0.42	0.80	1.18	1.54
Measured hardness	29.2	Flat	41.3	47.7	50.2	52.1
		Groove	43.7	44.2	47.6	48.7
Measured yield stress (MPa)	41.2	Flat	-	-	-	118.8
		Groove	-	-	-	133.9
Predicted yield stress* (MPa)	41.2	Flat	88.1	106.5	116.1	118.8
		Groove	108.8	111.3	128.2	133.9
Flow stress Curve (MPa)		Flat	$\bar{\sigma} = 108.9(0.001 + \bar{\epsilon})^{0.143}$			
		Groove	$\bar{\sigma} = 122.4(0.001 + \bar{\epsilon})^{0.158}$			

\* Yield stresses after intermediate passes are predicted by Boltzman fitting on the basis of measured hardness (for all passes) and measured yield strength(for initial material and final product after fourth pass)

치가 결정된다. 정상상태에서 입자의 이동은 유선을 따라서 이루어지는데,  $\chi^i$ 를 입자 흐름의 위쪽 위치라고 하고  $\chi^{i+1}$ 를 같은 유선 위의 바로 근접한 아래쪽 위치라고 하면 다음 관계가 근사적으로 성립한다.

$$\chi^{i+1} = \chi^i + v^i \Delta t^i \quad (1)$$

$$\Delta t^i = \frac{\Delta \chi_s}{v_s^i} \quad (2)$$

여기서,  $v^i$ 는 정규 요소 좌표계  $\zeta - \eta - \gamma$ 에서 정의된  $\chi^i$ 에서의 국부 속도 벡터를 나타내고  $v_s^i$ 는 이것의 크기를 나타낸다.  $\Delta \chi_s$ 는 진행 스텝 크기를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 사용해서 입측 단면상의 주어진 점에서 출발하여 출측 단면상의 임의의 위치까지 전체 유선을 형성할 수 있다.

#### 3.2 자유표면 탐색

한번의 유선추적에 의해 생성된 초기 소재 표면은 종종 롤의 위치 안쪽으로 예측되는 물리적

으로 맞지 않는 부정확한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 소재표면이 롤과 접촉상태에 있어야 한다는 기본적인 요구조건에 부합하도록 하는 부가적인 기법이 필요하다. 본 연구에서는 초기 예측된 유선위치와 보정되어야 하는 새 접촉위치 사이의 거리가 최소가 되도록 하는 방향으로 반복적으로 유선위치를 이동시키는 투영기법(projection scheme)을 도입하였다. 결과적으로 새롭게 보정된 표면 유선 위치는 롤과의 접촉을 잘 유지하면서 실제 압연 후 소재의 형상을 정확하게 예측해 준다. 이와 관련된 자세한 사항은 참고 문헌[12]에 자세하게 기술되어 있다.

### 3.3 계산절차

**Step 1:** 판재 및 봉재의 3차원 해석을 수행하기 위해 유한요소 격자를 생성하는 단계

초기 격자는 입측 단면 모양을 압연방향으로 길게 확장한 다음, 롤이 소재를 점유하고 있는 체적만큼 격자를 압축하여 롤 갭에서의 격자 형상을 초기 생성한다. 롤 갭을 빠져나간 소재에서의 격자 형상은 롤 갭 출측의 격자 형상과 동일하다고 가정한다.

**Step 2:** 주어진 격자에 기초하여 소성변형 유한요소해석을 수행하는 단계

반복횟수가 처음일 경우에는 초기 격자를 사용해서 해석을 수행하지만, 자유표면을 해석한 이후에는 자유표면과 이로 인해 조정된 새로운 격자 시스템에 기초하여 유한요소해석을 수행한다.

**Step 3:** 자유표면 예측 및 격자 재 조정하는 단계

변형의 대칭성에 의해 4분의 1 해석을 수행할 경우에 대칭면을 제외한 나머지 면들은 기하학적으로 구속되어 있지 않은 자유표면이다. 앞서 언급한 것처럼 먼저 유선들을 추적함으로써 압연 전 입자들이 압연 후 어떤 위치로 이동되었는지를 계산하여 기본적인 자유표면을 예측한다. 예측된 표면이 롤과의 접촉조건을 만족하도록 유선을 투영법에 의해 반복적으로 이동시켜 최종적인 자유표면을 결정한다. 예측된 자유표면에 기초하여 격자 밀도가 초기 설정한 것과 증가하도록 격자점(node) 들을 조정한다.

**Step 4:** 자유표면 수렴을 위한 유한요소 반복 계산하는 단계

Step 3에서의 유선 추적은 자유표면을 계산하기 전의 기하학 및 격자에 기초하여 얻은 유한요소

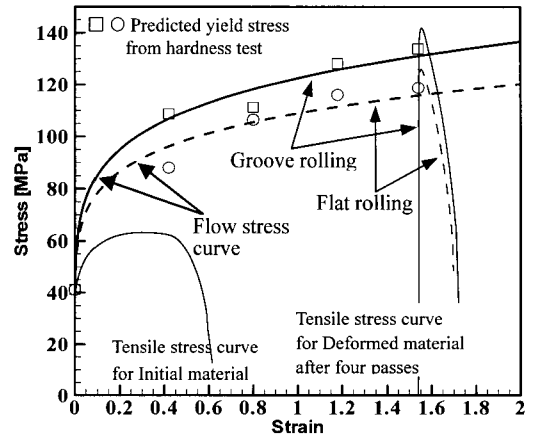


Fig. 3 Flow stress curve obtained from tensile tests and hardness tests

결과로부터 이루어진다. 따라서, 새롭게 계산된 자유표면 및 격자에 기초한 유한요소해석이 이루어져야 올바른 해석결과를 얻을 수 있다. 자유표면 예측을 다시 수행하여 수렴 정도를 평가하고 목표에 도달하면 유한요소해석을 완료하고 그렇지 않으면, Step 2 ~ Step 4를 반복한다.

## 4. 연구결과 및 토론

### 4.1 압연중 소재의 실험적 항복 강도

Fig. 3에는 Table 2에 나타낸 것처럼 압연 전 초기 소재 및 최종 4패스 후 소재의 인장시험으로부터 얻은 항복응력 값(0.5% off-set)과 중간 패스에서 압연 후 소재의 경도 테스트 결과로부터 환산한 항복응력 값으로 예측된 유동응력(flow stress) 곡선을 나타내었다. 판재 압연과 공형 압연 모두 4패스 압연중 기계적 성질변화를 잘 확인할 수 있으며 경도측정값으로 환산된 항복강도가 잘 예측되었음을 알 수 있다. 또한, 판재 압연과 공형 압연 후 얻은 소재의 유동응력 그래프를 비교하면 공형 압연으로부터 가공된 소재의 경우가 확연히 판재 압연의 경우보다 유동응력이 높음을 알 수 있다. 변형율이 증가할수록 이러한 편차는 더 심해짐을 또한 알 수 있다. 이것은 판재 압연과 공형 압연되는 동안에 소재의 미세 결정구조의 형성이 다르게 진행되었음을 의미한다.

Table 3는 최종 패스 압연한 후 소재의 인장시험으로부터 얻은 기계적 특성을 판재 압연의 경우와 공형 압연의 경우를 비교하여 나타내었다. 최

**Table 3 Mechanical properties of aluminum after flat rolling and groove rolling tests**

Case	Strength(MPa)		Elongation(%) up to			
	Yield	Ultimate	Y/U*	Ultimate Fracture	F-U**	
As-annealed	41.2	63.2	0.65	31.8	61.6	29.8
Flat rolling	118.8	125.9	0.94	1.4	15.7	14.3
Groove rolling	133.9	141.8	0.94	1.7	18.4	16.7

\*Y/U denotes the ratio of yield stress to ultimate tensile stress

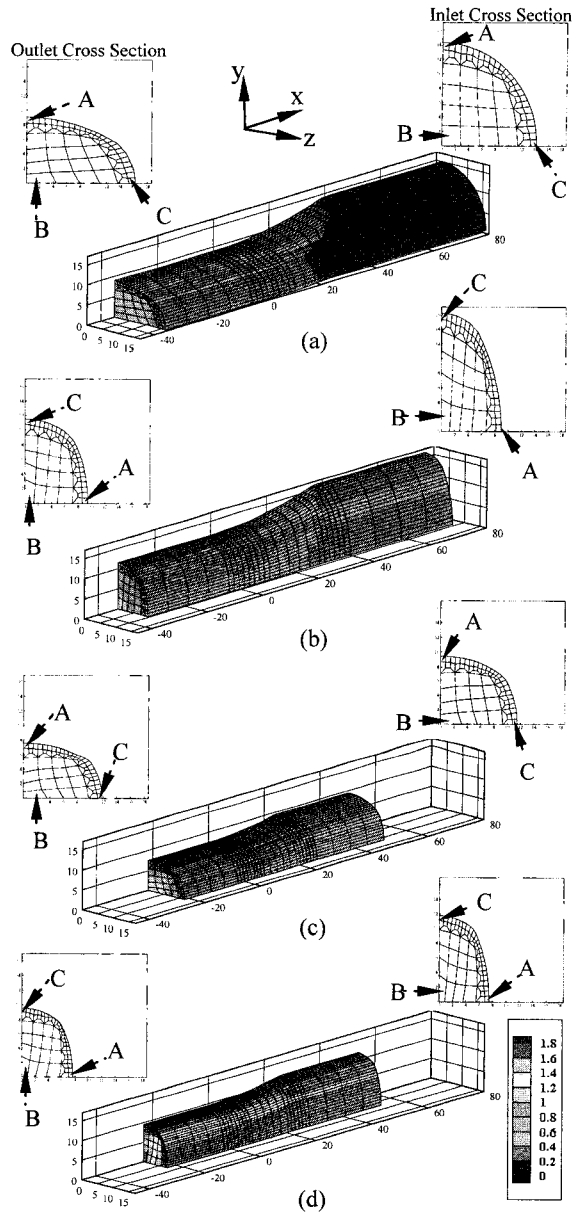
\*\*F-U denotes the difference between elongations at the fracture and ultimate stress

대 인장응력에 대한 항복응력의 비(Y/U)로써 가공경화의 진행 정도를 고찰할 수 있다. 판재 압연의 경우와 선재 압연의 경우 Y/U 비가 0.94로 동일한 경화 정도를 나타냄을 알 수 있다. 압연 전 초기 소재에 비해 가공경화가 거의 포화 되었음을 나타내고 있다. 파단까지의 연신율과 인장응력에서의 연신율과의 차이 F-U는 소재의 가공성과 관련이 있다. 판재압연의 경우보다 공형 압연의 경우가 F-U 값이 다소 큰 것으로 나타났다. 이것으로 선재압연으로 얻은 소재의 경우가 판재압연으로부터 얻은 소재보다 더 높은 강도를 유지하고 또한 가공성도 우수할 것으로 예상된다.

#### 4.2 유한요소 압연해석

공형 압연으로 얻은 소재의 유동응력이 판재 압연으로 얻은 소재의 유동응력 보다 높게 나타나는 실험결과를 변형이력 측면에서 고찰하기 위해서 필요한 요소별 변형량 정보를 유한요소 해석을 통하여 얻었다. 공형 압연과 판재 압연 모두 소재 단면이 상하 및 좌우 대칭이므로 1/4 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 각 패스별 선재압연 해석에 사용된 격자 시스템 및 유효변형량 분포를 보여주고 있다. 공형압연은 단면을 축소시켜가며 최종적으로 원형으로 가공하는 공정으로써, 이전 패스에서 압연된 소재를 90° 방향으로 회전시켜서 압연을 수행한다. 본 유한요소해석에서는 이전 패스에서 압연 후 단면을 90° 회전시켜서 다음 패스의 입측 단면으로 전달하는 방법으로 다단 공형 압연공정을 구현하였다. 이 때, 이전 패스 출측 단면의 각 요소별 변형량은 다음 패스의 입측 단면 해당 요소에 100% 전달되는 것으로 가정하였다. (냉간압연



**Fig. 4 Finite element meshes and effective strain distributions for (a) the first, (b) second, (c) third and (d) fourth pass groove rolling**

상태이므로 압연 후 패스간 회복 및 재결정 현상은 일어나지 않는 것으로 가정하였다.) A, B, C는 변형을 이력을 고찰하기 위해서 선택한 요소를 나타낸다. A 및 C 요소는 롤 표면과 자유표면을 패스별로 번갈아 가며 접하고 B는 양 대칭축의

중심에 있는 요소이다.

Fig. 5는 각 패스별 판재 압연 해석에 사용된 격자 시스템 및 유효변형률 분포를 보여주고 있다. 선재압연과 판압연의 변형률 이력을 비교 고찰하기 위해서 최종 패스를 기준으로 공형압연에서의 위치와 동일한 요소 3점을 선택하였다. 자유표면 요소에 A점, 롤 접촉 후 표면 요소에 C점, 대칭면의 중심 요소에 B 점을 두었다. 공형 압연에서는 이 점들이 패스가 진행됨에 따라 90° 회전하지만 판재 압연에서는 상대적 위치가 패스가 바뀌더라도 변화가 없음을 알 수 있다.

변형률 분포 측면에서 비교해 보면, 공형압연에서는 상하 및 좌우로 압축하중 이력을 가지는 중심 요소 B에서 최대변형률 분포를 보이는데 반해, 판재압연에서는 롤과 마찰의 영향을 많이 받는 표면 요소인 C점에서 최대 변형률 분포를 보이고 있다. 판재에서 변형 구속의 영향보다 마찰의 영향이 더 큰 요인으로 분석된다.

유한요소해석에 있어서 A, B, C 점에서의 패스에 따른 변형이력이 공형 및 판재에서 어떻게 다르게 나타나는지를 상호비교하기 위하여 Fig. 6에 패스별 변형률 변화를 나타내었다. 서로 상대적 비교를 가능하게 하기 위해서 유효변형률 값으로 각 변형률 성분값을 나눈 무차원량을 사용하였다.

판재압연의 경우는 A, B, C 점에 관계 없이 패스별 일정한 변형률 분포를 보이지만, 공형 압연의 경우는 A, B, C 위치에 따라서 큰 차이를 나타내고 있다. 특히, 공형 압연시 A점과 C점은 서로 지그재그 형태로 A점이 높으면 C점이 낮아지고, C점이 높아지면 A점이 낮아지는 경향을 보인다. 이는 롤 접촉면과 자유표면 사이를 A점과 C점이 서로 교번하면서 압연되기 때문이다. C점이 A점보다 더 큰 진폭을 보이고 있는데 이것은 1 패스 타원 공형 압연시 C점이 장축의 꼭지점이 되어 이후 패스에서 더 큰 변형률으로 압연되기 때문이다. Table 1에 나타난 바와 같이 평균적으로 두 공정의 단면 유효변형률은 서로 같게 설계되었지만, 변형률의 성분값은 공정별로 차이가 발생한다. 즉, 공정별로 변형률 이력의 차이가 발생한다.

이상의 유한요소해석으로 확인한 두 압연가공 방법에 따른 변형이력 차이는 소재의 미세조직을 변화시킬 것으로 예상된다. 특히, 이때의 미세조직은 변형이력의 차이에 의해 전위밀도, 결정립의 형상이나 크기뿐만 아니라 변형집합조직도 서로 다르게 발달할 것이다. 공형 압연은 가공방법이

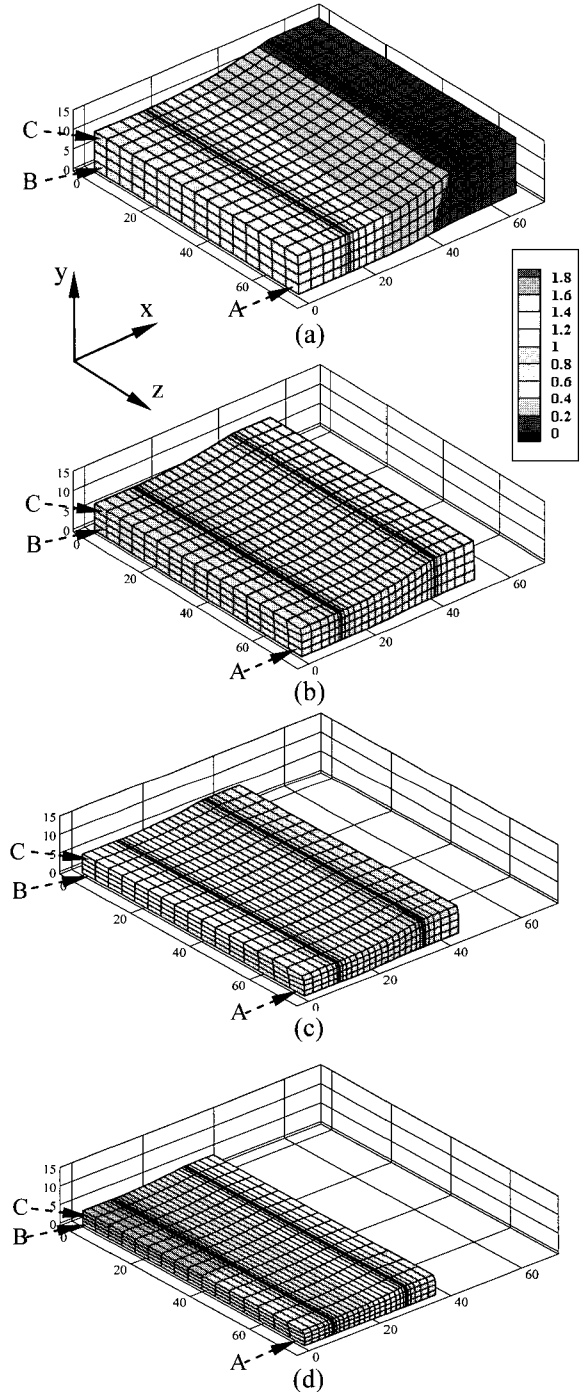


Fig. 5 Finite element meshes and effective strain distributions for (a) the first, (b) second, (c) third and (d) fourth pass flat rolling

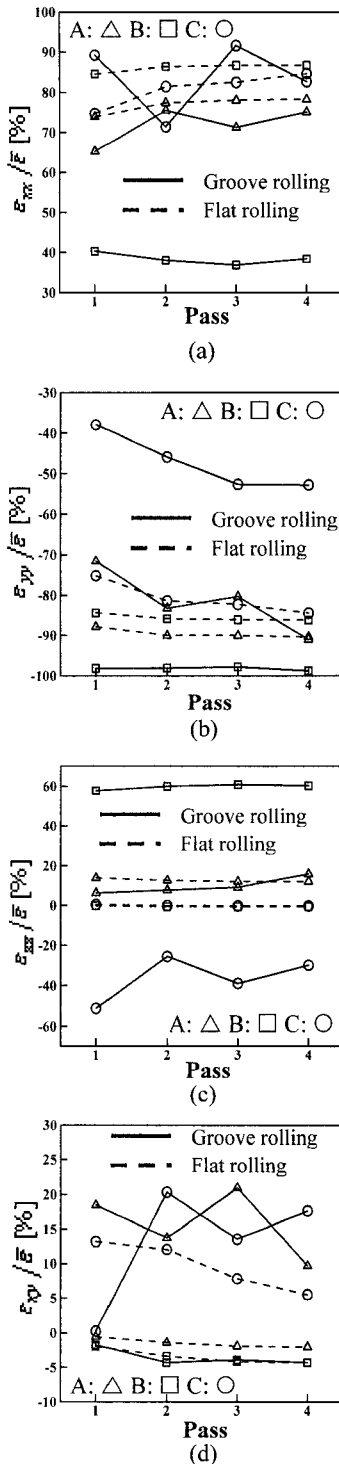


Fig. 6 Comparison of strain components of (a)  $\epsilon_{xx} / \bar{\epsilon}$ , (b)  $\epsilon_{yy} / \bar{\epsilon}$ , (c)  $\epsilon_{zz} / \bar{\epsilon}$  and (d)  $\epsilon_{xy} / \bar{\epsilon}$  between groove and flat rolling at each pass

압출(extrusion)이나 인발(drawing)과 유사함으로 이들 가공방법으로 가공한 경우와 유사한 집합조직을 구성할 것으로 판단된다. 따라서, 압연패스가 반복됨에 따라 서로 다른 기계적 성질을 나타낸 것으로 판단된다. 이는 동일한 성분의 소재에 동일한 변형을 부여하더라도 최종 미세조직 및 기계적 성질이 달라질 수 있음을 확인한 결과이다. 따라서, 이와 같이 공형 압연으로 제조된 소재를 수송용 기기의 보강재 또는 단순한 형상의 부품에 적용하는 구조설계 관점의 연구가 진행된다면 강도/비중이 우수한 부품 소재의 개발이 합금성분의 변화 없이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 서로 다른 가공방법으로 같은 변형을 부여한 동일한 소재의 기계적 성질 변화를 변형이력에 따라 해석하여 예측하였으며 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- (1) 압연가공 후 평균 변형율이 각 패스별로 동일한 4 패스의 판재압연과 공형압연 후 기계적 거동을 고찰하면 공형압연을 통해서 얻은 소재의 강도가 판재 압연으로 얻은 소재보다 상당히 높고 또한 가공성도 보다 더 양호한 것으로 나타났다.
- (2) 공형압연된 소재의 변형을 분포는 소재 심층부에서 최대를 나타내고 소재와 롤과의 접촉위치가 패스마다 변하여 변형율의 분포가 불균일하였지만, 판재압연된 소재는 최대변형율이 압연 롤과의 접촉부인 표층부에서 나타났으며 변형율의 분포는 균일하였다.
- (3) 공형압연된 소재와 판재압연된 소재의 기계적 성질 및 거동의 차이는 가공경로의 차이에 의해 발생한 변형이력 차이에 기인한 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] D. R. Cramer, M. M. Brylawski, 1996, Ultralight - hybrid vehicle design: Implications for the recycling industry, The 3<sup>rd</sup> annual recycling



- conference, Chicago, reprinted by The Hypercar Center Rocky Mountain Institute, pp. 1~8.
- [2] J. G. Lenard, M. Pietrzyk, L. Cser, 1999, *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products*(Elsevier Science Ltd., Netherlands), pp. 73~75.
- [3] S. B. Davenport, R. L. Higginson, 2000, Strain path effects under hot working: an introduction, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.98, pp. 267~291.
- [4] R. L. Higginson, C. M. Sellars, 2002, The effect of strain path reversal during hot rolling on austenitic stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.338, pp. 323~330.
- [5] S. Choi, Y. Lee, P. D. Hodgson, 2002, A comparative study of microstructures and mechanical properties obtained by bar and plate rolling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.24 pp. 329~336.
- [6] P. Pinheiro, W.A. Monteiro, R. Barbosa, P. R. Cetlin, 2004, The effect of strain path on the mechanical behavior and dislocation arrangements in the hot working of copper, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.368, pp. 280~285.
- [7] A. K. Ghosh, W. A. Backofen, 1973, Strain hardening and instability in biaxially stretched sheets, *Metallurgical and Materials Trans. A.*, Vol.4, pp. 1113~1123.
- [8] D. J. Lloyd, H. Sang, 1979, The influence of strain path on subsequent mechanical properties-orthogonal tensile paths, *Metallurgical and Materials Trans. A.*, Vol.10, pp. 1767~1772.
- [9] J. V. Fernandes, M. F. Vieira, 1997, Strain distribution in copper tensile specimens prestrained in rolling, *Metallurgical and Materials Trans. A.*, Vol.28, pp. 1169~1179.
- [10] ASTM International <http://www.astm.org/Standards/E8.htm>
- [11] S. M. Byon, S. M. Hwang, 2001, FEM based process optimal design in steady-state metal forming considering strain-hardening, *Computer & Structure*, Vol.79, pp. 1363~1375.
- [12] H. J. Kim, T. H. Kim, S. M. Hwang, 2002, A new free surface scheme for analysis of plastic deformation in shape rolling, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol.104, pp. 81~93.