

## SCM435 강의 고온마찰계수 계산

성중의<sup>1</sup>, 조상흠<sup>1</sup>, 이형직<sup>2</sup>, 이영석<sup>#</sup>

# Computation of High Temperature Friction Coefficient of SCM435 Steel

J. U. Sung, S. H. Cho, H. J. Lee, Y. Lee

(Received March 10, 2011 / Revised May 18, 2011 / Accepted May 20, 2011)

### Abstract

In this study, an approach designed to compute high temperature friction coefficients for SCM 435 steel through a pilot hot rolling test and a finite element analysis, is proposed. Single pass pilot hot flat rolling tests with reduction ratios varying from 20 to 40% were carried out at temperatures ranging from 900 to 1200°C. In the proposed approach, the friction coefficient is calculated by comparing the measured strip spread and the roll force with the simulation results. This study showed that the temperature and reduction ratio had a significant influence on the friction coefficient. As both material temperature and reduction ratio become higher, the friction coefficient increases monotonically. This finding is not in agreement with the Ekelund model, which is widely used in the analysis of the hot rolling process. In the present work, the friction coefficient at a reduction ratio of 40% was found to be 1.2 times greater than that at a reduction of 30%. This higher friction coefficient means that an increment of the roll thrust force is expected at the next stand. Therefore, a roll pass designer must understand this phenomenon in order to adjust the reduction ratio at the stands while keeping the driving power, the roll housing structure and the work roll strength within the allowable range.

**Key Words** : High Temperature Rolling, Friction Coefficient, Width Spread, Roll force, Finite Element Analysis

### 1. 서 론

열간 판 압연 패스스케줄(pass schedule)을 설계할 때, 설계자는 각 패스(pass)별 감면율을 설정한 후에 각 패스에서의 압연하중(roll force), 토크(torque), 추력(thrust force)를 정확히 예측할 수 있어야 한다. 이 때 소재와 롤(roll) 접촉면에서의 평균 쿨롱 마찰계수(mean Coulomb friction coefficient)는 압하력, 토크, 추력에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수이다[1]. 편의상, 이하에서는 평균 쿨롱 마찰계수를 마찰계수라 부르기로 한다.

많은 연구자들이 마찰계수를 측정하는 방법을

제시하였고, 그것을 측정했다. 냉간압연에서 마찰계수는 실험적으로 측정할 수 있다. Liu, Tieu와 Wang은 롤 표면에 센서를 부착하여 롤 압력(Roll Pressure)을 측정하였다[2]. 그들은 소재가 롤을 통과할 때의 롤 압력값을 분석하여 마찰계수를 측정하였다. Jeswiet는 소재 표면에 작용하는 힘을 측정하였다. 힘은 폭 방향, 롤 진행방향 그리고 수직방향, 이렇게 3가지 방향으로 측정된다[3]. 측정된 값을 이용하여 롤 토크와 롤 진행방향의 힘을 계산하고 Ford모델에 적용시켜 마찰계수를 계산하였다[4].

하지만 고온압연에서는 소재의 온도가 높고 소

1. 중앙대학교 기계공학부

2. POSCO 기술연구소 선제연구그룹

# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부,

E-mail: ysl@cau.ac.kr

재표면에 산화막이 생성되기 때문에 마찰계수의 직접적인 측정이 어렵다. 이러한 문제점들 때문에 고온압연공정에서 앞의 두 연구에 사용된 실험적인 방법을 적용하여 마찰계수를 측정하는데 어려움이 있다.

Ekelund는 고온압연에서 마찰계수가 온도의 함수로 표현된다고 가정하여 경험적 수식을 제시하였다[5]. 하지만 측정방법에 대한 구체적인 설명은 주어지지 않았었다. Hum, Colquhoun 그리고 Lenard는 압연온도(500℃)에서 감면율과 롤 속도에 함수로 알루미늄의 마찰계수를 측정하였다[6]. 센서를 사용하여 롤 압력과 전단응력을 측정하였다. 그리고 두 값의 관계를 이용하여 마찰계수를 계산하였다. 하지만 측정장치 제작 및 설치가 매우 복잡하고 매우 비싸다.

본 연구에서는 일반적인 판 압연실험과 유한요소모사를 통해 마찰계수를 계산하는 방법을 제시한다. 본 연구에서는 폭퍼짐이 있는 판 압연 실험을 수행한다. 롤에 치입되는 소재단면형상은 정사각형이다. 3개의 감면율(20%, 30%, 40%)과 4개의 소재초기온도(900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃)가 고려되었다. 본 연구에서는 별도의 복잡한 측정장비 없이 각 압연조건에서 폭퍼짐과 압하력을 측정하였다. 유한요소해석을 사용하여 마찰계수를 0.2에서 0.5까지 0.01단위로 변화시켜 마찰계수에 변화에 따른 폭퍼짐과 압하력을 계산하였다. 실험으로 측정된 폭퍼짐을 유한요소해석으로 계산된 폭퍼짐과 비교하여 상대적인 차이를 구하였다. 각 조건에서 폭퍼짐의 상대적 차이와 압하력의 상대적인 차이가 최소화 되는 마찰계수를 산출하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 SCM435 이며 화학적 구성성분은 Table 1 에 나타나있다.

### 2.2 판 압연실험

본 연구자는 판 압연실험을 수행하여 소재의 폭퍼짐과 압하력을 측정하였다. Table 2는 SCM435강종에 대한 소재온도와 감면율 변화에 따른 측정된 폭퍼짐과 압하력을 나타낸 것이다.

판 압연실험에 사용된 압연기의 최대 압하력은 600ton이고 최대 허용 감면율은 40%이다. 롤 직경은 720mm이고 롤 속도는 1.33m/s이다. 압연 중 롤

Table 1 Chemical composition of SCM435

Steel	C	Si	Mn	P	S
SCM435	0.34	0.19	0.74	0.011	0.006

Table 2 Measured spread and roll force at different temperatures and reduction ratio

Material Temp (℃)	Reduction ratio (%)	Spread (mm)	Roll force (kN)
900	20	77.85	1019.2
	30	84.59	1156.4
	40	93.58	1705.2
1000	20	78.39	764.4
	30	84.90	940.8
	40	90.04	1332.8
1100	20	78.53	607.6
	30	85.29	803.6
	40	95.44	1156.4
1200	20	79.02	431.2
	30	85.47	725.2
	40	95.36	548.8

냉각을 위한 물의 공급은 없었다. 빌렛(billet)을 길이방향으로 절단하여 시편을 만들었다. 시편단면의 치수가 70mm×70mm이고 길이는 250mm이다.

압연 전 시편전체에 걸쳐서 균질한 온도를 확보하기 위해 시편은 가열로에 실험온도(900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃) 보다 약 10 도 높은 상태에서 30 분 동안 가열되었다. 가열로에서 빠져 나온 소재는 약 5 초 이내에 바로 압연되었다. 실험에 적용된 감면율은 20%, 30%, 40% 이다. 본 연구에서 이런 두 가지 조건을 조합하여 총 열두 번의 압연실험이 수행 되었다.

## 3. 유한요소 해석

압하력 및 폭퍼짐을 계산하기 위해 상용 유한요소 프로그램 ABAQUS 6.9-1.을 사용하여 압연 실험을 모사하였다. 소재의 요소개수는 3010개 이고 롤의 요소 개수는 5980개이다. 소재의 길이방향 요소 크기는 7.143mm이고 롤의 길이방향 요소 크기는

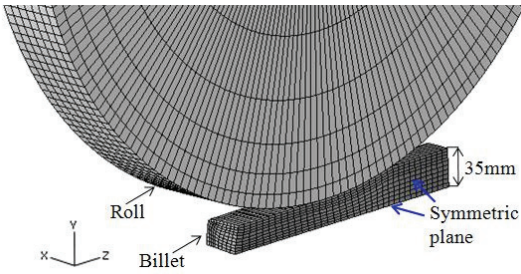


Fig. 1 Three-Dimensional FE model

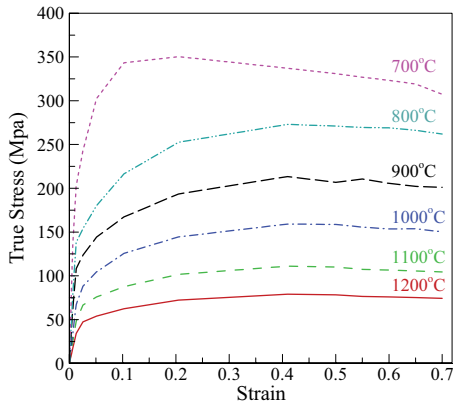


Fig. 2 Stress-Strain Curve of SCM435

9.834mm이다. 그리고 요소 형식은 C3D8T(8-node tri-linear displacement and temperature)이다. 롤, 소재 및 하중 조건의 대칭성을 이용하여 1/4 대칭조건 (Symmetric)을 사용하였다. Fig. 1은 FE 모사에 사용된 유한요소 모델을 삼차원으로 나타낸 모습이다.

고온 압연실험에서 900°C~1200°C의 소재가 상온인 롤과 접촉할 때 소재표면온도는 국부적으로 700°C~850°C까지 떨어진다. 고온 압연해석에서 온도변화에 따른 압하력과 폭퍼짐을 계산하기 위해서 소재 표면온도 상태에서의 응력-변형률 선도가 필요하다. 본 연구에서 900°C~1200°C에서 소재의 응력-변형률 선도를 구하기 위해 GREEBLE® 고온압축장비와 원통형시편을 사용하였다. 시편의 제원은 길이 15mm, 직경 10mm이다. 900°C 이하에서 응력-변형률 선도는 1m 이 측정된 SCM435 응력-변형률 곡선을 차용하였다[7]. Fig 2는 SCM435 강종의 응력-변형률 곡선이다.

또한, 본 연구에서는 고온압연 시 소재와 롤이 접촉할 때의 열전달을 고려하였다. 대류 열전달 계수를 10W/m<sup>2</sup>°C로 설정하였다. 그리고 롤과 소

재의 접촉 열전달 계수는 7.0kW/m<sup>2</sup>°C로 하였다[8]. 또한 대기의 온도는 20°C도로 일정하게 유지 되도록 설정하였다. 소재의 진입속도는 롤 속도에 95%인 1.27m/s로 설정하였다. 길이방향으로 시편의 중간지점이 롤 갭에 위치할 때의 압하력과 폭퍼짐을 선택하였다.

#### 4. 마찰계수 계산

마찰계수를 산출하기 위해 폭퍼짐의 측정값과 유한요소 계산값을 비교하였다. 동시에 압하력의 측정값과 유한요소 계산값의 비교도 수행하였다. 최종적으로 폭퍼짐의 상대적 차이가 최소화 되는 마찰계수를 산출하였다.

##### 4.1 폭퍼짐 비교

압연에서 폭퍼짐은 감면율과 마찰계수 영향을 받는다. Fig. 3 (a)는 소재가 압연하기 전 소재모습과 압연 후 소재단면형상 모습을 보여준다.

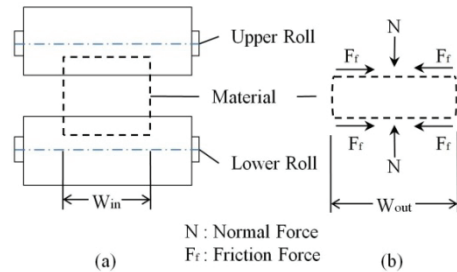


Fig. 3 (a) work rolls and incoming material shape (b) outgoing material shape

감면율이 증가할수록 폭퍼짐은 당연히 증가한다. 하지만 마찰계수 값의 증가는 폭퍼짐을 억제한다. Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같이 마찰력은 소재의 중심 방향으로 작용한다. 일정한 수직하중조건에서 마찰계수의 변화는 마찰력을 변화시키면서 폭퍼짐에 영향을 미친다. 본 연구자는 유한요소 해석으로 마찰계수를 변화시키면서 계산된 폭퍼짐 값과 실험으로 측정된 폭퍼짐을 비교하였다. 이를 위해 실험에서 측정된 폭퍼짐 SPR<sub>exp</sub>과 유한요소 해석으로 계산된 폭퍼짐 SPR<sub>cal</sub>의 상대적인 차이를 식(1)을 사용하여 산출하였다.

$$\text{Relative spread} = \left( \frac{\text{SPR}_{\text{exp}} - \text{SPR}_{\text{cal}}}{\text{SPR}_{\text{exp}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Lenard 는 열간압연에서 마찰계수는 0.2~0.5 범  
위에서 변화한다고 언급하였다[9]. 그래서 마찰계  
수를 0.2 에서 0.5 까지 0.01 단위로 변화시키면서  
유한요소해석을 수행하였다. 입력한 마찰계수에  
의해 계산된 상대적 차이가  $\pm 0.5\%$  범위를 만족  
하면, 입력한 마찰계수가 각각의 조건에서의 평균  
마찰계수가 된다.

#### 4.2 압하력 비교

압하력의 경우 상대적 차이를 폭퍼짐처럼 엄격  
하게 두지 않았다. 그 이유는 일반적으로 압하력  
을 측정하게 되면 측정오차가 상당히 크기 때문  
이다. 따라서 본 연구에서는 마찰계수의 산  
출 기준을 압하력 상대오차보다 폭퍼짐 상대오차  
를 중점으로 하여 마찰계수를 변화시켰다. 이러한  
기준에서 본 연구자는 모든 감면율과 온도조건에  
서 압하력을 계산하였다. Fig. 4 는 감면율 변화에  
따른 측정된 압하력과 계산된 압하력을 나타낸다.  
측정된 압하력은 압하력 측정의 오차 때문에 불  
규칙적인 반면에 계산된 압하력은 각 감면율에서  
소재초기온도 변화에 따른 압하력의 변화가 일정  
한 경향성을 보였다.

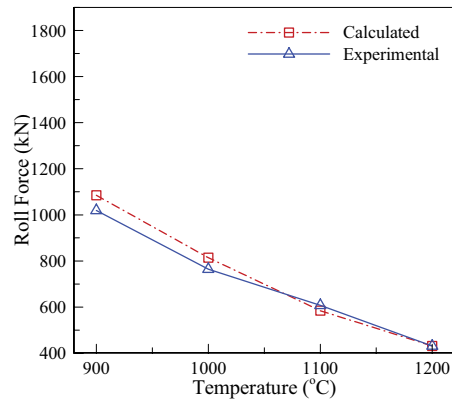
감면율 20%에서 계산된 압하력과 측정된 압하  
력 차이는 크지 않다. 900℃에서 최대 오차가  
6.4%정도 발생하였다. 감면율이 30%의 경우  
1100℃를 제외한 온도조건에서 16.1%~24.3%의 오  
차를 보였다. 특히 900℃에서 높은 오차를 보여주  
었다. 감면율이 40% 인 경우 800℃, 900℃에서 압  
하력의 차이가 크지 않지만 1100℃에서는 12.3%  
오차를 보였다. 1200℃에서 측정된 압하력을 보면,  
감면율이 30%인 경우 측정값보다 감면율이 40%인  
경우 측정된 값이 작게 나왔다. 이는 감면율 40%,  
1200℃에서 측정한 압연하중 값에 오류가 있음을  
나타낸다. 그러한 이유로 이 조건에서는 -44% 오  
차를 보였다.

#### 4.3 Ekelund 모델

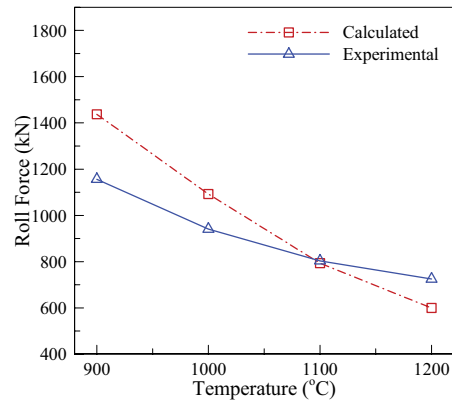
참고로 Ekelund 는 고온압연공정에서의 마찰계  
수를 구하는 수식을 다음과 같이 정의 하였다[5].  
롤 표면의 거칠기에 따라서 (2)식은 롤 표면이 거  
칠 때 사용되며, (3)식은 롤 표면이 부드러울 때  
사용된다.

$$\mu = 1.05 - 0.0005T \quad (2)$$

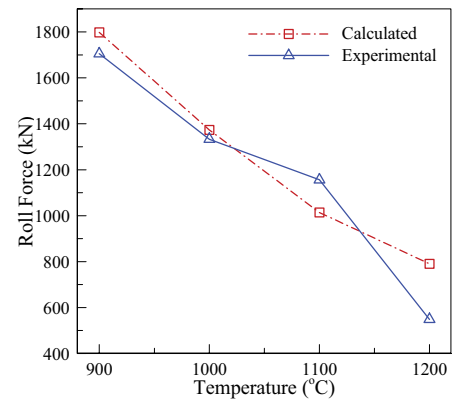
$$\mu = 0.8(1.05 - 0.0005T) \quad (3)$$



(a) 20% Reduction



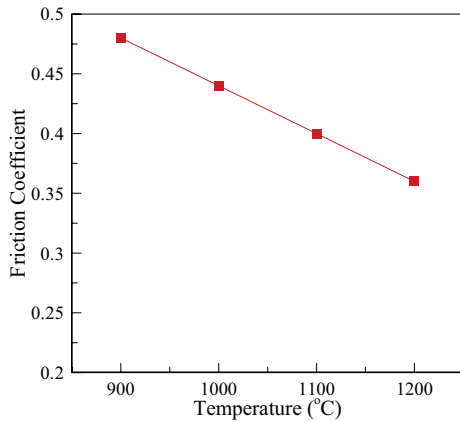
(b) 30% Reduction



(c) 40% Reduction

Fig. 4 Roll force as a function of material temperature for three reduction ratios

여기서  $\mu$  는 마찰계수이며 T 는 소재의 초기온  
도이다. Fig. 5 는 Ekelund[5]의 (3)식을 사용하여 계  
산된 소재온도변화에 따른 마찰계수를 나타낸다.



**Fig. 5 Friction coefficient in terms of material temperature taken from Ekelund model[5]**

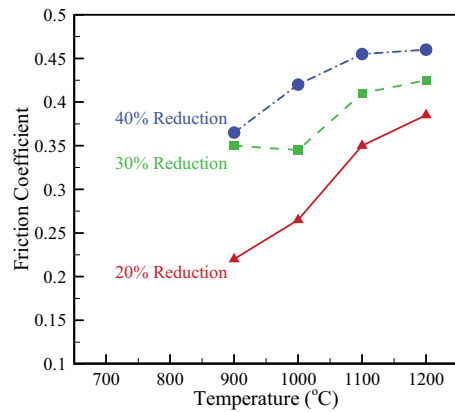
Ekelund 모델[5]에 따르면 감면율변화에 따른 마찰계수변화가 없다.

### 5. 결과 및 토의

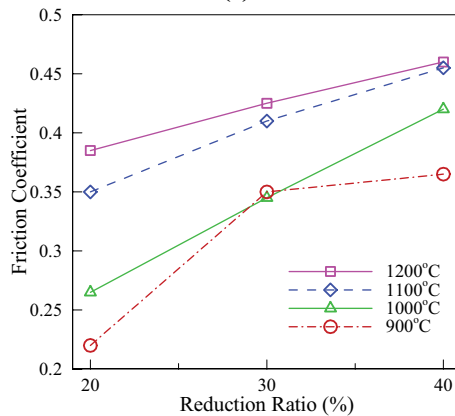
본 연구를 통하여 최종적으로 고온압연에서 마찰계수를 산출하였다. Fig. 6 은 본 연구에서 산출된 마찰계수를 나타낸다. 산출된 마찰계수는 감면율과 온도의 함수로 표시 된다.

#### 5.1 온도가 마찰계수에 미치는 영향

Fig. 6 (a)에서 소재온도가 증가할수록 마찰계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Ekelund 모델과 반대되는 경향성을 보여준다. Ekelund 모델[5]로부터 계산된 마찰계수는 온도가 증가할수록 일정한 차이를 두며 감소하였다. 이러한 경향성은 Ekelund[5]가 마찰계수 수식을 유도하는 과정에서 압연하중을 중요하게 생각했기 때문에 나타난다. 압연하중 수식은 마찰계수를 변수로 포함하도록 만들어졌다. 구체적인 수식의 유도 과정이 보고되지 않았기 때문에 본 연구자는 Ekelund[5]가 수식을 만들 때 어떤 가정을 하였다고 판단된다. 즉, 마찰계수의 증가에 따라 압연하중이 증가한다는 것이다. Ekelund[5]는 자신이 만든 압연하중 수식을 확인하기 위해서 폭퍼짐이 거의 없는 판 압연 하중 실험을 했을 것이다. 그 결과, Fig. 4 와 같이 온도가 증가할수록 압연하중이 감소하는 경향성을 보였을 것이다. 압연하중 수식과 실험값을 일치시키기 위하여 마찰계수 수식을 온도에 따라



(a)



(b)

**Fig. 6 Computed friction coefficient as functions of (a) temperatures and (b) reduction ratios**

감소하는 수식으로 만들었다고 판단된다.

하지만 본 연구에서는 Ekelund 모델[5]과 달리 압연하중과 함께 추가적으로 폭퍼짐에 대하여 실험값과 유한요소 계산값을 비교하여 마찰계수를 계산하였다. Fig. 6 (a)의 결과 그래프를 보면, 감면율 30%, 온도 900°C에서의 마찰계수 값을 제외하고 모든 조건에서 온도가 증가할수록 마찰계수는 증가함을 보였다. 온도가 높아질수록 감면율에 따른 마찰계수 값의 변화량은 감소하였다. 이러한 경향성은 Pavolv 와 Kuprin 의 연구결과에서도 부분적으로 유사하게 보인다.

Fig. 7 은 Pavolv 와 Kuprin 의 연구에서 온도에 따른 마찰계수 변화 그래프이다.

이 연구에서 사용된 마찰계수 정의 방법이나 실험 조건들은 명시되어 있지 않다. 이 그래프에서 온도의 증가에 따라 마찰계수가 증가했다가

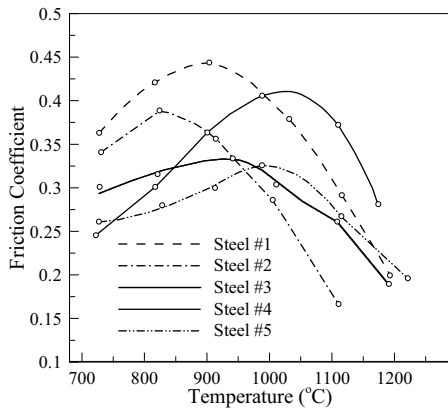


Fig. 7 Variations in the friction coefficient in terms of material temperature[10]

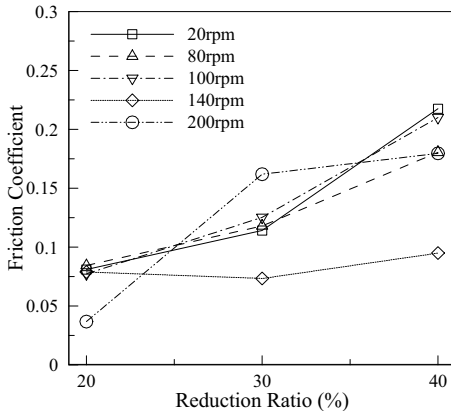


Fig. 8 Variations in the friction coefficient with reduction ratio changed[6]

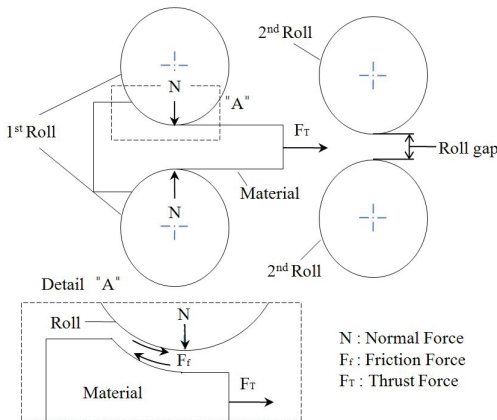


Fig. 9 Thrust force, friction force and normal force in hot rolling

감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해서 마찰계수는 온도변화에 따라 증가할 수도 있다는 것을 알 수 있다.

### 5.2 감면율이 마찰계수에 미치는 영향

Fig. 6 (b)를 보면 소재온도가 일정할 때 감면율이 증가할수록 계산된 마찰계수가 증가함을 알 수 있다. 40%인 경우의 마찰계수는 감면율 30%인 경우의 마찰계수보다 약 1.2배 정도 크다. 감면율이 30%인 경우의 마찰계수는 감면율이 20%인 평균마찰계수보다 약 1.1배 정도 크다. Fig. 8 에서 Lenard 의 연구결과[6]를 보면 감면율이 증가할수록 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

### 5.3 마찰계수가 추력에 미치는 영향

연속 압연공정에서 추력에 의하여 다음 압연기에서의 롤 간격(roll gap)을 결정 하게 된다. 이때 추력은 마찰계수의 영향을 받는다. Fig. 9 는 연속 압연공정에서 압하력, 추력(thrust force) 및 수직력을 나타낸다.

1 번 패스 압연기에서 빠져 나오는 소재가 다음 압연기로 이동 한다. 이때 소재를 이동시키는 동력은 1 번 압연기에서 나오는 소재에 걸리는 추력이다. 추력의 크기는 압연방향의 마찰력에 의존한다. 마찰계수가 증가할수록 추력은 증가한다.

일반적으로 마찰계수는 Ekelund [5]의 마찰계수 수식처럼 감면율 변화에 관계 없이 일정하다고 생각했다. 그래서 연속압연공정 설계자는 지금까지 압연기를 통과하고 나오는 추력이 감면율에 상관없이 일정하다고 예상하고 패스스케줄 설계를 했다. 하지만 본 연구에서의 결과에 따르면 감면율이 증가할수록 마찰계수는 증가한다. 즉 어떤 패스에서 감면율이 증가하면 체적일정법칙에 따른 출측속도 증가에 의한 소재의 추력증가와 마찰계수 증가에 의한 소재 추력 증가가 동시에 발생한다. 추력이 증가하면 다음 패스에서 더 많은 감면율을 줄 수 있다. 이는 다음 패스에서 감면율을 증가시켜 패스스케줄 설계 할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 압연공정의 효율을 높일 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고온압연공정에서 SCM435 강종에 대한 소재 온도(900°C~1200°C)와 감면율(20, 30, 40%) 변화에 따른 마찰계수변화를 분석하기 위해

서 판 압연실험과 유한요소해석을 수행하였다. 마찰계수는 폭퍼짐의 측정값과 계산값의 상대적인 차이를 비교하여 산출되었다.

(1) 소재온도가 900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃로 증가할수록 마찰계수는 비선형적으로 증가하였다. 마찰계수의 증가 간격은 일정 하지 않다.

(2) 감면율에 따른 마찰계수는 선형적으로 증가하였다. 온도가 일정할 때 감면율이 20%, 30%, 40%로 증가할수록 마찰계수는 증가하였다.

(3) 감면율 증가에 따른 마찰계수의 증가는 폭퍼짐과 추력에 영향을 준다. 특히 예상 되는 추력을 증가시키게 되면서 이어지는 압연기의 감면율 설정을 기존보다 증가시킬 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] C. H. Kim, 1996, Tribology in Hot Rolling, J. Kor. Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 12, No. 3, pp. 1~5.
- [2] Y. J. Liu, A.K. Tieu, D. D. Wang, W.Y.D. Yuen, 2001, Friction measurement in cold rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 111, pp. 142~145.
- [3] J. Jeswiet, 1998, A comparison of friction coefficient in cold rolling, J. Mater. Process. Technol., pp. 239~244.
- [4] H. Ford, Advanced Mechanics of Materials, Longmans, Green and Co., London, 1963.
- [5] UNDERWOOD, L. R., 1952, The rolling of Metals, Vol. 1.
- [6] B. Hum, H. W. Colquhoun, J. G. Lenard, 1996, Measurements of friction during hot rolling of aluminum strip, J. Mater. Process. Technol., Vol. 60, pp. 331~338.
- [7] K. H. Jung, H. W. Lee, Y. T. Im, 2009, Numerical prediction of austenite grain size in a bar rolling process using an evolution model based on a hot compression test, J. Mater. Sci. Eng., Vol. A519, pp. 94~104.
- [8] L. M. Galantucci, L. Tricarico, 1999, Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach, J. Mater. Process. Technol., pp. 494~501.
- [9] J. G. Lenard, 1991, The effect of temperature on the coefficient of friction in flat rolling, CIRP Ann. Manuf. Technol. , Vol. 40(1) , pp. 223~226.
- [10] Wusatowski, 1960, Fundamentals of Rolling, Oxford University Press. London.