

고온압연공정에서 강종 및 감면율 변화에 따른 마찰계수 변화 분석

허종욱¹ · 이형직² · 나두현¹ · 이영석[#]

Analysis of Friction Coefficient Dependent on Variation of Steel Grade and Reduction Ratio in High Temperature Rolling Process

J. Her, H. J. Lee, D. H. Na, Y. Lee

(Received June 8, 2009 / Revised June 25, 2009 / Accepted June 30, 2009)

Abstract

Experimental and numerical studies were performed to examine the effect of material temperature and reduction ratio on friction coefficient during hot flat rolling. We carried out a single pass pilot hot flat rolling test at the temperatures range of 900~1200°C and measured the spread of deformed material while reduction ratio varied from 20% to 40%. Materials used in this study were a high carbon steel and two alloy steels. The dimension of specimen used in hot rolling experiment was 50mm×50mm×300mm. We performed a series of finite element simulation of the hot rolling process to compute the friction coefficient change in terms of steel grade and reduction ratio. Results showed that temperature dependency of friction coefficient is not noteworthy but the effect of reduction ratio on friction coefficient is quite large. For high carbon steel, friction coefficient at reduction ratio of 30% is lower than that at that of 20%. Meanwhile friction coefficient at reduction ratio of 40% was one and half times large compared with that at that of 20%. The effect of steel grade on friction coefficient was significant when reduction ration was large, e.g., 40%.

Key Words: High Temperature Rolling, Finite Element Analysis, Friction Coefficient, Width Spread, Reduction Ratio

1. 서론

고온압연공정에서 소재는 여러 개의 패스(pass) 또는 압연기(stand)를 순차적으로 거치면서 특정한 두께 또는 형상의 제품으로 만들어진다. 이 때 소재는 각 패스별로 약간씩 다른 온도에서 그리고 다른 감면률로 변형이 되어진다. 이때 각 패스별 출측(exit) 소재의 두께를 정밀하게 제어하는 것은 중요하다. 이를 위해 각 패스에서 압연하중(Roll Force) 값은 정확하게 예측되어야 한다[1].

한편 압연하중 값은 마찰계수 값의 변화에 매우 밀접하다[2]. 따라서 정확한 압연 하중을 산출하기 위하여 우선적으로 고온 압연공정에서의 소재의 마찰계수 값을 알아야 한다. 여기서 마찰계수는 쿨롱(Coulomb) 마찰계수를 의미한다[3].

냉간 압연공정에 사용되는 마찰계수의 경우는 냉간 압연과 거의 비슷한 하중조건에서 마찰계수를 측정할 수 있다. 하지만 고온압연 공정에서의 마찰계수 측정실험은 고온에서 소재표면의 산화막 때문에 실험조건 설정이 매우 어렵다. 따라서

1. 중앙대학교 기계공학부

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 중앙대학교 기계공학부,

E-mail: ysl@cau.ac.kr

고온압연공정에서 마찰계수를 측정하는 것은 현실적으로 어렵다. 그러므로 고온압연공정에서 마찰계수 계산은 열간 압연 공정에서 조업자의 경험에 의존하고 있거나 아니면 오래 전에 제안된 수식에 의존하고 있다.

1952 년에 Ekelund 는 고온압연공정에서 소재 온도에 따른 마찰계수 구하는 식을 제안하였다 [4]. 하지만 이 식은 고온에서의 온도 변화만 고려 되어졌고 감면율에 대한 고려는 없다. 그리고 이 식에서는 강종의 변화에 대해서는 언급이 없다. Ekelund 수식은 롤과 소재의 표면상태 또는 재질에 따른 마찰계수의 변화는 언급되어 있다. 그럼에도 불구하고 일반적으로 고온압연공정에서 마찰계수를 어떤 상수로 고정시켜놓고 압연해석을 하는 경우가 많다. 그 이유는 Ekelund 의 수식이 그렇게 큰 신뢰가 없기 때문이라고 보여진다.

예를 들면 Kwak 과 Hwang 은 고온 압연 공정에서 마찰계수를 고려하여 압연 하중 및 압연 동력의 모델식을 제안하였다[5]. 이들은 연구에서 쿨롱 마찰 계수, 0.3 을 사용하였다. 마찰계수가 어떻게 결정 되었는지에 대한 정확한 설명은 없다. 우리는 실제 압연공정 중 각 패스(pass) 및 스탠드(stand)에서 보다 정확한 압하력을 계산하기 위해서는 온도, 강종 및 감면율의 변화에 따른 마찰계수 변화를 반드시 알아야 한다.

따라서 본 연구에서는 강종, 온도 및 감면율(압하율) 변화에 따른 폭 퍼짐 변화 압연실험결과와 유한요소해석결과를 연계시켜 마찰계수를 계산하는 방법을 제시한다. 우리는 이를 위해 고온 평판 압연실험을 수행하였다. 소재의 초기 온도는 900, 1000, 1100, 1200℃이고 패스 별 감면율 변화는 20, 30, 40%이다. 실험에 사용된 재료는 고 탄소강 POSCORD80M, 합금강 SCM435 그리고 베어링강 SUJ2 이다. 고온압연 실험을 통해 마찰계수를 측정하는 방법은 고온압연 유한요소 모사를 통해 예측된 소재의 폭 퍼짐량과 실험에서 측정된 소재 폭 퍼짐량을 비교하여 마찰계수를 산출하는 것이다.

본 연구자는 고온 압연 유한요소해석모사를 수행하기 위해서 필요한 소재의 응력-변형률 곡선을 고온압축실험장비(Greeble3500)를 사용하여 구하였다. 우리는 고온(1000℃, 1100℃, 1200℃)에서 세 개 강종에 대한 응력-변형률 곡선을 구하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에서 사용된 재료는 SCM435, SUJ2 그리고 POSCORD80M 이다. 본 재료의 화학적 성분은 Table1 에 나타나 있다.

Table 1 Chemical composition of SCM435, SUJ2 and POSCORD80M

| Steel | C | Si | Mn | P | S |
|------------|------|------|------|-------|-------|
| SCM435 | 0.34 | 0.19 | 0.74 | 0.011 | 0.006 |
| SUJ2 | 0.98 | 0.21 | 0.36 | 0.014 | 0.004 |
| POSCORD80M | 0.82 | 0.19 | 0.48 | 0.011 | 0.005 |

2.2 고온 압축 실험

본 연구에서는 고온에서 소재의 응력-변형률 곡선을 구하기 위하여 세가지 강종에 대하여 고온(1000℃, 1100℃, 1200℃)에서의 압축실험을 실시하였다. 본 연구자는 Fig.1 처럼 빌렛(Billet)단면 1/4 부분의 아홉 개 지점에서 소재를 채취하고 시편을 만들었다. 이러한 이유는 고온 압축실험에서 시편채취위치에 따라 응력-변형률 곡선이 달라질 가능성이 있기 때문이고 그 차이가 유한요소해석 결과에 미치는 영향에 대해 확인하고자 했기 때문이다.

본 연구에서는 최대 응력-변형률 곡선과 최소응력-변형률 곡선의 상대적인 차이가 적음을 확인하였다. 두 곡선의 차이는 SCM435 의 경우 9MPa, SUJ2 의 경우 13MPa 그리고 POSCORD80M 의 경우 7MPa 이었다. 본 연구자는 아홉개의 응력-변형률 곡선 중 평균 응력-변형률 곡선을 선택하여 유한요소 모사에 사용하였다. Fig. 2 는 세 강종의 빌렛 단면에서 아홉개 지점의 평균 응력-변형률 곡선이다.

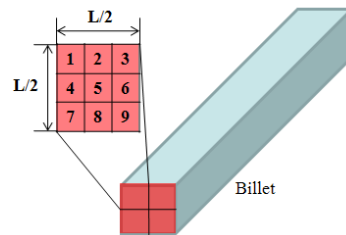
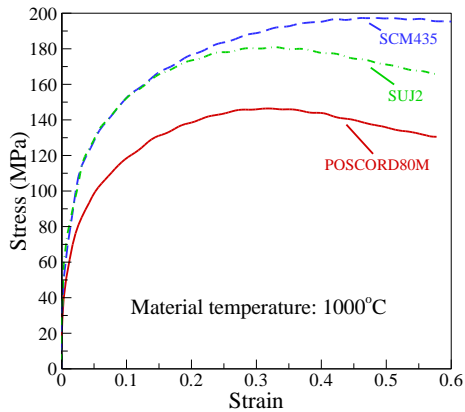
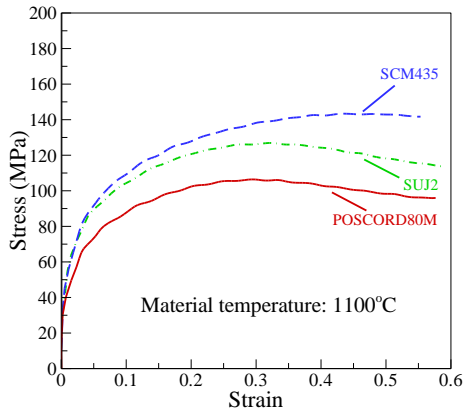


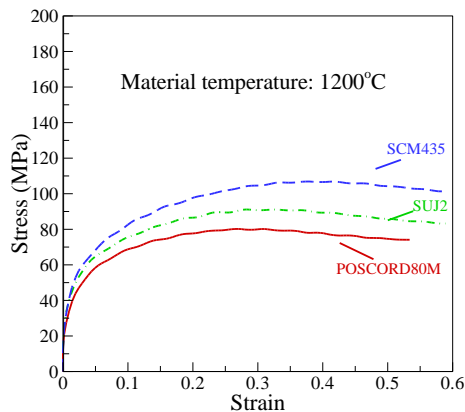
Fig. 1 Shape of specimen



(a) Material temp. : 1000°C



(b) Material temp. : 1100°C

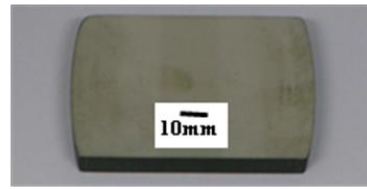


(c) Material temp. : 1200°C

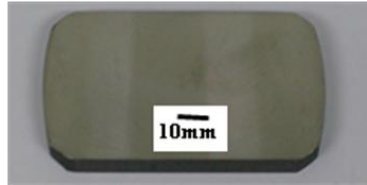
Fig. 2 Stress-strain curve

2.3 판 압연실험

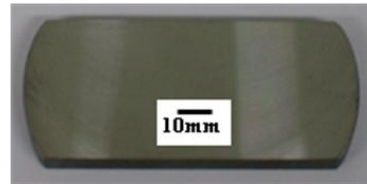
본 연구에서는 소재가 고온 압연이 될 때 감면율과 마찰계수의 관계를 산출 하기 위하여 판 압



(a) Specimen shape (Reduction ratio: 20%)



(b) Specimen shape (Reduction ratio: 30%)



(c) Specimen shape (Reduction ratio: 40%)

Fig. 3 Specimen shape POSCORD80M at each reduction ratio at the temperature of 900°C

Table 2 Measured spread at different temperatures, reduction ratios for three types of steels

| Initial Temp. (°C) | Reduction ratio (%) | Measured spread (mm) | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-------|-------------|
| | | SCM 435 | SUJ2 | POSCO RD80M |
| 900 | 20 | 77.85 | 78.55 | 78.99 |
| | 30 | 84.59 | 84.51 | 85.07 |
| | 40 | 93.58 | 94.70 | 95.08 |
| 1000 | 20 | 78.39 | 79.06 | 79.29 |
| | 30 | 84.90 | 85.41 | 85.33 |
| | 40 | 95.04 | 96.36 | 95.66 |
| 1100 | 20 | 78.53 | 79.18 | 79.12 |
| | 30 | 85.29 | 85.89 | 85.23 |
| | 40 | 95.44 | 96.10 | 95.94 |
| 1200 | 20 | 79.02 | 79.87 | 79.55 |
| | 30 | 85.47 | 85.60 | 85.22 |
| | 40 | 95.36 | 97.45 | 96.79 |

연실험을 실시 하였다. 압연실험에 사용된 소재 길이는 250mm 이고 소재 단면의 치수는 70mm×70mm 이다. 압연기의 최대 압하력은 600ton 이고 최대 허용 감면율은 40% 이다. 롤 직경은 720mm 이고 롤 속도는 1.33m/s 이다. 압연 중 롤 냉각을 위한 물의 공급은 없었다.

소재의 초기 온도는 900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃이고, 감면율은 20%, 30%, 40%이다. 본 연구에서는 이런 두 가지 조건을 조합하여 한 강종마다 총 열 두번의 압연 실험이 실시 되었다. Fig. 3 은 초기 소재 온도 900℃ 일 때 POSCORD80M 강종의 압연 후 소재의 단면 형상을 보여준다. 그리고 Table 2 는 세 강종에 대한 초기 온도와 감면율 변화에 따른 폭 퍼짐 량을 나타낸 것이다.

3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 판 압연 폭 퍼짐 실험과정을 상용 유한 요소 프로그램 ABAQUS 6.7-1 을 사용하여 FE 모사하였다. 소재의 총 요소개수는 4700 개 이고 롤의 요소 개수는 2200 개이다. 소재의 최소 요소 크기는 7mm 이고 롤의 최소 요소 크기는 40.79mm 이다. 그리고 요소 형식은 C3D8T (8-node tri-linear displacement and temperature) 이다. 그리고 롤, 소재 및 하중 조건의 대칭성을 이용하여 1/4 대칭조건(Symmetric)을 사용하였다. Fig.4 는 FE 모사에 사용된 유한요소 모델을 삼차원으로 나타낸 모습이다.

또한, 본 연구에서는 고온 압연 시 소재와 롤이 접촉할 때 온도 차에 따른 열 전달이 고려 되어졌다. 따라서 본 연구에서는 대류 열 전달 계수를 10W/m²℃로 하였다. 그리고 롤과 소재의 접촉 열 전달 계수는 참고문헌[6]을 참고 하여 7.0kW/m²℃로 하였다. 또한, 대기의 온도는 20℃도로 일정하게 유지 되어졌다. 롤 및 소재의 크기는 실험에 사용된 크기와 동일하게 유지 하였다. 소재의 진입속도는 롤 속도에 95%인 1.27m/s 로 가정하였다.

열간 압연 공정에서 상온인 롤과 고온의 소재가 접촉할 때 소재표면온도는 국부적으로 600℃ 까지 떨어진다. 따라서 우리가 열간 압연해석에서 열 전달을 고려 하려면 소재 표면온도 상태에 맞는 응력-변형률 곡선이 필요하다. 따라서 본 연구자는 1000℃ 이하에서의 기계적 물성을 얻기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 우리는 실험에서 측정된 온도 별 최대인장응력(UTS) 값

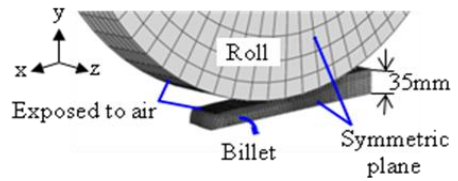


Fig. 4 Three-Dimensional FE model

들의 증가 비율을 계산하였다. 그리고 그 비율을 적용하여 1000℃ 이하의 온도(900~600℃)구간에서 응력-변형률 곡선을 가정하였다.

4. 고온 압연에서 마찰계수 산출

본 연구에서는 고온 압연에서 마찰계수 산출을 위해 판 압연실험에서 측정된 폭 퍼짐량과 판 압연 FE모사에서 계산된 폭 퍼짐량이 비교되었다. FE모사에서 폭 퍼짐량 그리고 실험에서의 폭 퍼짐량은 소재의 길이 방향으로 중심지점에서 계산 되고 측정되었다. 고온 마찰계수측정을 위해 본 연구에서 제안된 방법은 다음과 같다. 식(1)은 측정된 폭 퍼짐량 $Spread_{exp}$ 과 유한요소모사를 통해 계산된 폭 퍼짐량 $Spread_{cal}$ 의 상대적인 차이를 계산한다.

$$Ratio\ of\ relative\ spread(\%) = \left(\frac{Spread_{exp} - Spread_{cal}}{Spread_{exp}} \right) \times 100 \quad (1)$$

본 연구에서는 유한요소해석에서 이 상대적인 차이가 0.5%이하로 떨어질 때까지 반복하여 수행 되었다. 반복하여 유한요소해석을 수행할 때 변경된 마찰계수가 사용 된다. 상대적인 크기 차이가 0.5% 이하일 때 유한요소해석에 사용된 마찰계수가 바로 어떤 온도 그리고 어떤 감면율에서의 마찰계수 값이 된다.

참고로 Ekelund [4]가 제안한 고온 압연과정에서 마찰계수 계산식이 아래에 있다.

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

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

μ 는 마찰계수이고 T는 소재의 온도이다. (2)식은 롤 표면이 거칠 때, 식(3)는 롤 표면이 부드러울 때 사용하는 식이다. Table 3은 식(2), (3) 이 사용된 경우에 소재 온도에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다.

Table 3 Friction coefficient, μ calculated from Eq. (2) and (3)

| Material temp. (°C) | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
|---------------------|------|------|------|------|
| μ from Eq. (2) | 0.6 | 0.55 | 0.5 | 0.45 |
| μ from Eq. (3) | 0.48 | 0.44 | 0.4 | 0.36 |

Eq. (2) 와 (3)에 의해 계산된 마찰계수는 온도가 증가함에 따라 계속 감소한다. 하지만 상대적인 크기는 다르다.

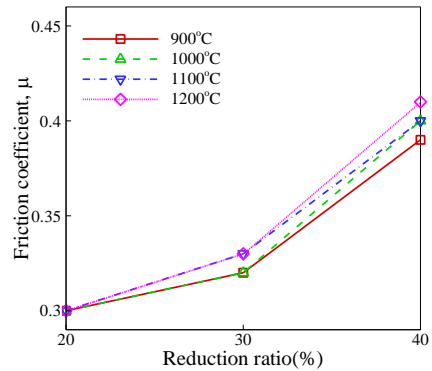
5. 결과 및 토의

마찰력은 소재가 운동할 때 표면에 작용하는 압하력 즉, 수직력(Normal force)과 마찰계수에 의해 결정된다. 그리고 압연 공정에서 롤과 소재의 접촉면적은 감면율이 커질수록 증가한다. 따라서 감면율에 따른 수직력이 비례하여 증가하면 마찰력은 또한 비례하여 변할 수 있다.

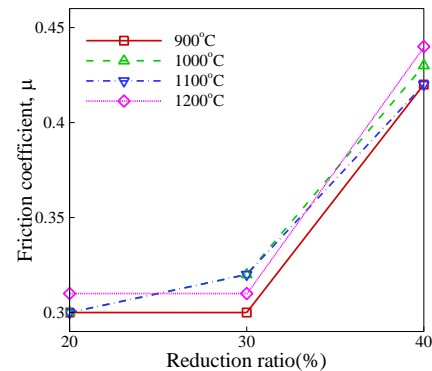
Fig. 5는 판 압연실험과 유한요소법을 연계하여 계산된 마찰계수 값을 나타내고 있다. 세 강종은 감면율과 소재 온도의 조건이 같지만 마찰계수는 상당한 차이를 보이고 있다. 일반적으로 탄소 함유량이 높으면 강도의 값이 증가 하게 된다. 이에 따라 탄소량이 상대적으로 높은 강(SUJ2, POSCORD80M)들은 탄소량이 적은 강(SCM435)보다 마찰계수의 값이 큰 것을 확인하였다. 특히, 마찰계수 차이는 감면율 40%인 경우에 뚜렷하게 관찰 되어진다.

감면율 40%인 경우의 평균 마찰계수는 감면율 20% 및 30%인 경우의 평균 마찰계수 보다 약 1.5 배 정도 크다. 감면율이 증가한다는 것은 소재가 받는 수직력의 증가를 의미 한다. 따라서 마찰계수와 감면율이 커진다는 것은 압연방향으로 소재가 받는 힘 (Thrust force)또한 커지는 것을 의미한다. 따라서 소재의 압연방향 힘은 감면률 자체의 증가뿐만 아니라 감면률의 증가로 인한 마찰계수의 증가와 결부되어 있다.

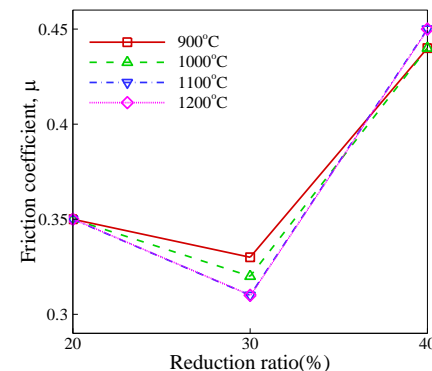
또한, 본 연구자는 소재온도에 따른 마찰계수의 변화도 관찰할 수 있었다. 소재 온도에 따른 마찰계수는 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 특히, 감면율이 작을 때의 마찰계수는 소재온도에 상관없이 일정하였다. 하지만 감면율 40%에서 소재 온도가 증가할수록 마찰계수는 또한 증가하는 모습이 보인다. 따라서 감면율이 클 때의 마찰계수는 소재온도가 증가할수록 커지는 경향성을 보여 주고 있다.



(a) SCM435



(b) SUJ2



(c) POSCORD80M

Fig. 5 Variation of friction coefficient computed from the proposed approach

6. 결론

본 연구에서는 고온 판 압연 공정에서 세 강종에 대한 소재 온도 변화와 감면율에 따른 마찰계수변화를 분석하기 위해서 고온 압축 실험 및 판

압연 실험 그리고 FE모사를 수행하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) FE모사를 통하여 추정된 마찰계수는 감면율에 따라 비선형적인 모습이 보인다. 감면율 40% 인 경우의 마찰계수는 감면율이 20% 및 30%인 경우의 마찰계수 보다 약 1.5배 정도 증가하였다.

(2) 마찰계수와 소재의 초기 온도와의 관계는 불규칙적인 경향이 나타났다. 하지만 감면율 40% 일 때는 소재온도가 증가할수록 마찰계수도 증가하는 경향을 보였다.

(3) POSCORD80M 강종의 경우, 30% 감면율에서의 마찰계수는 20% 감면율에서의 마찰계수보다 오히려 감소하였다.

후 기

이 논문은 2009 년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- [1] Jong-Yeob Jung, Yong-Taek Im, 2000, Improve of Rolling Load Prediction with Consideration of Spread in Hot rolling, J. KSME(A), Vol. 24, No. 11, pp. 2836~2844.
- [2] C. H. Kim, 1996, Tribology in Hot Rolling, J. Kor. Soc. Tribologists Lubric. Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 1~5.
- [3] Cheol Jae Park, Duk Man Lee, 2001, Development of Width Control System at Top of strip for Hot Finishing Mill, J. KSME(B), pp. 152~157.
- [4] UNDERWOOD, L. R., 1952, The rolling of Metals, Vol. 1.
- [5] Kwak Woo-Jin, Hwang Sang-Moo, 1999, Evaluation of Model equation Predicting Roll Force and Roll Power during Hot Rolling, Kor. Soc. Technol. Plast., pp. 265~268.
- [6] L. M. Galantucci, L. Tricarico, 1999, Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach, J. Mater. Process. Technol., pp. 494~501.