

5% 크롬 냉간 압연용 작업롤의 피로손상 평가에 대한 연구

곽길준* · 김광수** · 이시우*** · 여원구**** · 박영철*****

Assessment of fatigue damage in 5% chrome cold rolling work roll

G.J. Kwak, K.S. Kim, S.W. Lee, W.K. Yeo and Y.C. Park

Key Words : Multiaxial fatigue(다축 피로), mean stress(평균 응력), 5% chrome alloy(5% 크롬강), cold rolling work roll(냉간 압연 롤)

Abstract

The role of fatigue on the surface damage of 5% chrome cold milling work roll is evaluated. Uniaxial and torsional fatigue tests are carried out, and the baseline data for fatigue life evaluation are established. An appropriate multiaxial fatigue parameter is developed from the fatigue data. Fatigue tests are also performed under compressive mean stresses, and a mean stress model is formulated. A computer program is developed to assess the interaction of fatigue and grinding of the roll. The fatigue damage is computed for selected servicing conditions. It is found that the fatigue damage can be an important issue when the effect of mean stress is ignored, however the fatigue damage is negligibly small when the effect of mean stress including the residual stresses currently used is fully accounted. The result indicates that spalling due to the growth of thermal shock cracks is more important than fatigue damage in roll surface failure.

1. 서 론

최근 철강업계에서는 생산성 향상과 고품질화를 위하여 압연시 판재의 이송속도 및 하중을 점점 증가시키는 추세에 있다. 따라서 냉간 압연용 롤에 걸리는 하중환경은 더욱 혹독해지며 이에 따라 롤의 절손 및 스펀링(spalling)등의 롤사고를 유발할 위험성이 더욱 증가되고 있다. 이러한 위험성을 줄이기 위하여 롤 제조업체에서는 기존의 Ni-grain 롤으로부터 고강도, 고 내마모성을 갖는 고 크롬강으로 롤 소재를 대체해 나가는 추세에 있다.

롤 표면 손상의 해석은 열충격 균열성장과 피로손상의 측면에서 수행될수 있다. 그러나 해석 및 실험상의 어려움으로 연구가 부진한 상태에 있다. 이 연구에서는 피로측면에서 롤 표면 손상을 살펴보기로 한다. 롤 재료에 대한 피로현상은 주

로 연구실 용 소형 롤을 사용하여 실험을 수행하며 [1,2] Hertz 접촉응력과 결부하여 해석한다. 그러나 체계적 피로이론을 정립하기 위해서는 피로 시편을 사용하여 피로기구 및 파라메터에 대한 연구가 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 최근에 롤 재료로 많이 쓰이고 있는 5% 크롬강에 대한 기본 물성실험과 피로실험을 수행하고 롤 표면 경화층의 연삭 깊이와 피로손상의 상호작용을 고려하여 롤 피로손상을 평가하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 다축 응력 해석

피로수명 예측 파라메터는 응력과 변형율의 함수로 주어지며 롤 표면층의 피로수명을 계산하기 위하여 응력과 변형율에 대한 데이터가 요구된다.

이러한 데이터는 냉연판재, work roll 과 backup roll 을 포함한 3 차원 유한요소 해석에서 얻어진다. Fig.1 은 유한요소 해석을 통해 얻어진 롤표

* 포항공대 대학원

** 포항공대

*** **** 포항제철

**** 한국중공업

면의 응력분포이다. 본 연구에 사용된 유한요소 해석에 대한 자세한 설명은 문헌[3]에 자세히 설명되어 있다. 롤 응력의 유한요소 해석에서는 롤 열처리 과정에서 생성된 잔류응력은 포함되지 않았다. 잔류응력은 Disk method[4], X-ray diffraction method[5]를 이용하여 측정하였으며, 롤 전체의 응력은 유한요소 해석결과와 잔류응력의 합으로 나타낼 수 있다.

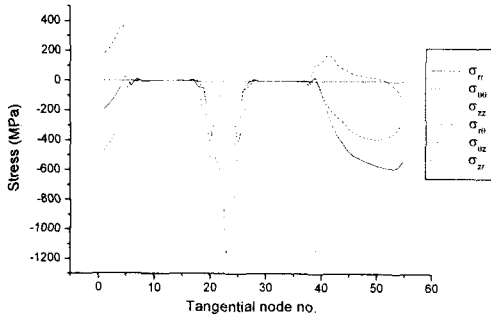


Fig.1 Stress distribution of roll surface

2.2 다축 피로 이론

다축피로수명 예측을 위한 파라미터는 문헌에 매우 많이 존재하며 이들에 대해 잘 정리된 논문들도 여럿 존재한다[6,7]. 본 연구에 쓰이는 각각의 파라미터에 대한 특성과 적용범위는 문헌[8]에 상세히 정리되어 있다. 이 연구에서는 Shear fracture 와 Normal fracture 두 측면에서 롤 재료의 피로실험 결과를 분석한 후 어떠한 Parameter 가 적합한지 결정할 것이다. 본 연구에서 쓰일 critical plane 파라미터는 shear fracture parameter 인 Kandil-Brown-Miller(KBM) parameter[9]와 normal fracture parameter 로서 본 연구에서 제안된 parameter 를 쓸 것이다.

본 연구에서 쓰인 KBM parameter 는 기존의 KBM parameter 에서 plastic strain term 을 무시하고 (본 연구에 사용된 재료의 소성변형은 무시할만한 크기이다.) strain based parameter 를 stress based parameter 로 변형하여 사용하였다. 이 파라미터는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\tau + s_1\sigma_n^* = 2[1 + (1-\nu)s_1](\sigma_f^* - 2s_2\sigma_n^0)(2N_f)^b \quad (1)$$

여기서 s_1 은 원래의 KBM parameter 의 정의에 쓰이는 s 를 $(1+\nu)$ 로 나눈 값이며, s_2 는 평균응력이 인장일때는 1, 압축일때는 실험을 통하여 결정할 수 있다. σ_n^* 은 normal stress excursion 이며 σ_f^* , b

는 Coffin-Manson equation 에 나타나는 피로계수, σ_n^0 는 critical plane 에서의 평균수직응력, N_f 는 피로수명이다. 이 KBM parameter 는 그동안 많은 연구자들에 의해 검증은 받아왔으나 본재료의 파괴기구와는 맞지 않는 단점이 있다. 이에 따라서 본 연구에서는 압축평균응력을 갖는 경우에도 적용가능하며 본재료의 파괴기구와 부합하며 평균응력을 잘 반영할 수 있는 식(2)의 파라미터를 제안하였다.

$$\Delta\sigma_n + k_1 I_\sigma^* + k_2 I_\sigma^m = 2\tau_f (2N_f)^b \quad (2)$$

$\Delta\sigma_n$ 은 Maximum normal stress plane 에서의 Normal stress range 이며 I_σ^* 는 hydraulic stress excursion, I_σ^m 는 mean value 이다. 여기서 상수 k_1 과 k_2 는 각각 일정진폭 일축 피로시험, 비틀림 피로시험, 및 일축 평균응력 피로시험을 통하여 결정할 수 있다.

σ_n^* 은 normal stress excursion 이며 τ_f 은 $(1 + \frac{k_1}{3})\sigma_f$

와 같다. 피로손상의 해석은 가능한 모든 주어진면에 대하여 수행하여 critical plane 을 결정하였다.

피로 손상은 Miner 의 선형 손상 축적법칙[10]에 의해 계산하였다. Cycle counting 은 Rainflow cycle counting[11]법을 사용하였다. 이때 KBM parameter 는 shear stress profile 을, 그리고 normal stress parameter 는 normal stress profile 을 사용하였다.

2.3 마모-피로손상-연마 상호작용

마모와 연마는 압연롤에 작용하는 접촉응력의 크기를 더욱 높이는 역할을 한다. 이것은 Hertz 의 contact stress solution 을 통하여서 알 수 있다. 특히 마모의 경우에는 롤의 사용후 일정사용시간이 지나면 표면의 조도를 감소 시키는 역할을 하게 되는데 이러한 표면조도의 감소가 압연판재와 압연롤간의 slip 을 유발하게 된다. 이러한 slip 은 결국 국부적인 열충격을 발생시켜 롤 표면의 thermal cracking 등의 문제를 발생시킨다. 그러나 이러한 마모와 조도 및 피로파괴에 관해서 아직까지는 명확하게 알려진 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 마모에 의한 표면조도 감소의 문제는 무시하였다. 포항제철 1냉연공장의 현장 조업 자료를 분석한 결과 냉간압연시 압연롤의 마모량은 매우 무시할만한 정도인 것으로 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 연삭으로 인한 응력의 상승만을 고려하기로 하였다.

3. 실험 방법

3.1 재료 및 시편

시험에 사용된 재질은 실제 냉간압연용 롤에 쓰이는 것과 동일한 5%크롬강 으로서 한국중공업(주)에서 생산되는 재질을 이용하였다. 시편의 제작은 우선 Ingot 을 만든후에 Forging 을 하였다. 그 후 최종 시편의 크기보다 0.5mm 정도 두껍게 1차 가공을 하였다. 열처리는 980°C 에서 20 분간 Austenitizing 을 한후에 60°C 에서 Oil Quenching 을 하였다. 이후에 130°C 에서 3 시간동안 tempering 을 한후에 Air cooling 을 하였다. 시편의 경도는 62(HRC)로서 선정하였다. 실제 압연롤의 경도는 이보다 높은 값을 갖지만 이 값은 롤에 잔류응력이 존재하기 때문이다. 따라서 disk method 를 이용하여 측정된 잔류응력과 실제 압연롤의 경도를 비교분석하여 잔류응력이 없는 경우의 압연롤의 경도를 역으로 산출하였다. 재료의 기본적인 물성을 얻기 위한 단순인장시험(monotonic tensile test)은 ASTM [12] 의 규격에 따라 gauge section 이 $6\phi \times 40mm$ 인 시편을 사용하였다. 피로시편은 인장시편보다 Gage section 이 20mm 더 짧은 시편을 사용하였다.

시편의 가공은 재질의 경도가 매우 높음으로 Diamond tip 을 장착 한 선반을 이용하여 1회 연삭량이 0.05 mm 이하가 되도록 가공하였으며 가공중에 연삭유로서 충분히 냉각을 시켰다. 1회 연삭량을 작게 한 이유는 1회 연삭량이 너무 많을 경우 시편에 열이 발생하여 물성이 변하는 것을 방지하기 위한 것이다. 이후에 시편의 gage section 과 round 부위의 가공을 위하여 disk grinder 를 이용하여 1회 연삭량이 0.02mm 이하가 되도록 연마하였다. 가공을 마친 후의 시편을 3 개를 Sampling 하여 경도와 조적사진을 검사한 결과 가공전과 차이가 없음을 확인하였다. 외형가공을 마친 시편은 선반을 이용하여 사포 400, 600, 800, 1000, 1200 그리고 1500 번 순으로 외형을 연마한 뒤 0.3 과 0.1 μm 의 산화알루미나(Al_2O_3) 를 이용하여 연마(mirror-like polishing)을 하였다.

3.2 실험 방법

본 연구의 모든 인장 및 피로실험은 인스트론(Instron)사의 8521 Fatigue testing system 을 이용하였다. 피로실험의 수행 시에 stress 와 strain 은 8521system 에 연결되어서 PC 에서 작동하는 National Instrument 사의 GPIB Board 를 이용하였으며 열었으며, 장비의 control 은 Instron 사의 MAX 라는 제어프로그램을 이용하였다. 실험은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 인장시험과 압축실험을 통하여 monotonic stress-strain curve 를 얻는 실험을 수행하였다. 둘째로 일정진폭 하중 하에서의 단순인장 피로실험과 피틀림 피로실험을 통하여 기본적인 피로 물성치를 확보하였다. 셋째로 압축 평균응력의 영향을 평가하기 위하여 압축평균응력을 준 상태에서 피로실험을 수행하였다. 실제로 FEM 해석 결과와 잔류응력을 토대로 하여 평균 응력을 계산하여 보면 롤의 반경방향의 모든 부분이 압축평균응력상태에 있으므로, 이 실험은 이러한 압축평균응력의 영향을 평가하기 위한 것이다.

Fig.2 에 가장 높은 일정진폭하중 하에서의 피로실험을 한 hysteresis loop 이 있다. Fig.2 에서 보듯이 가장 높은 하중 하에서도 plastic strain energy 는 거의 없으며 이러한 경향은 Fig.3 의 Bauschinger effect 로 설명할수 있다. 따라서 시험중의 온도변화는 plastic strain 이 거의 없으므로 매우 작을 것으로 기대된다. 실제로 실험중에 다양한 frequency 에 대해서도 시편의 온도는 30°C 정도로 상온이었으며 온도변화는 거의 없었다. 따라서 열에 의한 수명의 영향은 거의 없는 것으로 판단하는 것이 합리적일 것이다.

파형은 삼각파였으며 일정진폭 피로시험의 수행 시에 주파수는 1-4 Hz 이었으며 R=-1 로 실험을 수행하였다. 실험은 응력제어로 행하여 졌으며 피로수명은 시편이 완전히 파단 되었을 때의 사이클 수로 간주하였다. 그러나 시험재료의 재질이 매우 Brittle 하므로 이 수명을 균열 발생수명으로 볼 수 있다. 보통 다축 피로시험은 중공 시편

를 사용하여 strain control 로 행하지만 여기서는 gage section 의 diameter 가 작은 solid specimen 으로 stress control 하에 실험을 수행하였다. 이것은 중공 시편 제작상의 문제점도 있지만 시편재료가 LCF 영역을 포함한 관심영역에서 선형탄성 변형거동을

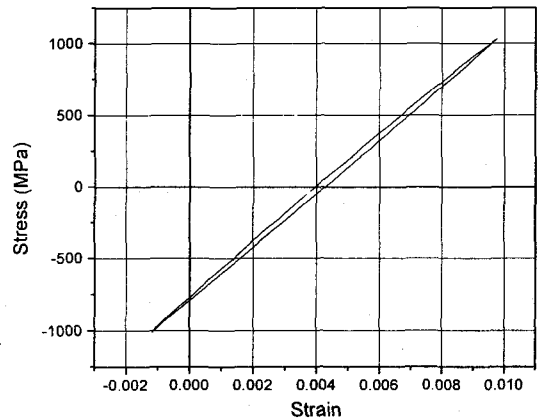


Fig.2 Typical hysteresis loop at 1000MPa

를 사용하여 strain control 로 행하지만 여기서는 gage section 의 diameter 가 작은 solid specimen 으로 stress control 하에 실험을 수행하였다. 이것은 중공 시편 제작상의 문제점도 있지만 시편재료가 LCF 영역을 포함한 관심영역에서 선형탄성 변형거동을

보이므로 증공시편을 사용할 필요가 없었기 때문이다. 시편재료는 strain control 하에서 cyclic hardening/softening, 혹은 stress control 하에서 cyclic creep 등 소성변형과 관련된 transient behavior도 전혀 보이지 않았다. 따라서 stress control 과 strain control 은 같은 결과를 주게 된다.

압축평균응력에 대한 실험은 mean stress 를 일정하게 유지시킨 상태에서 stress 의 amplitude 를 변화시키면서 실험을 수행하였다. mean stress level 은 100 MPa 로 수행하였다. 그러나 좀더 정확한 데이터를 얻기 위해서는 여러가지의 compressive mean stress level 에 대해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 생각되어 진다.

4. 결과 및 고찰

4.1 인장실험

재료의 인장 및 압축실험 결과가 Fig.3.와 Table.1. 에 정리되어 있다. 압축응력 실험 시에는 -2500MPa 까지 실험을 수행하였으나 재질은 파단되지 않았다. 그러나 실험장치의 시편 물림부 pressure 의 한계로 인하여 시편과 Grip 부의 미끄럼이 발생하였고 따라서 더 이상의 stress level 에 대해서는 실험이 불가능하였다. 차후에 더 높은 stress level 로 실험을 수행하기 위해서는 hydraulic pressure 를 이용하는 방법보다는 mechanical type 의 grip 을 쓰는 것이 더 유용할 것이다. Fig.3 을 토대로 계산하여 보면 본 재질이 선형성을 갖는 range 는 대략 2500MPa 정도이며 이는 본 연구의 모든 피로실험에서의 cyclic stress-strain relation 의 선형성을 가정할 수 있도록 해준다.

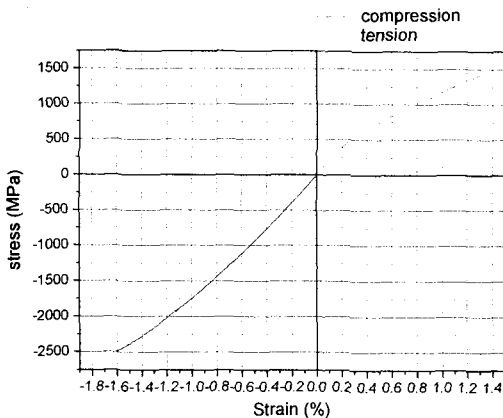


Fig.3 Monotonic stress-strain relation

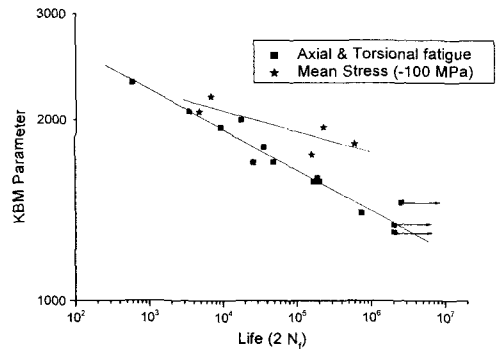
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
인장	455.5	1334.25	190.4
압축	2000	N/A	180.65

Table.1 Monotonic stress-strain data

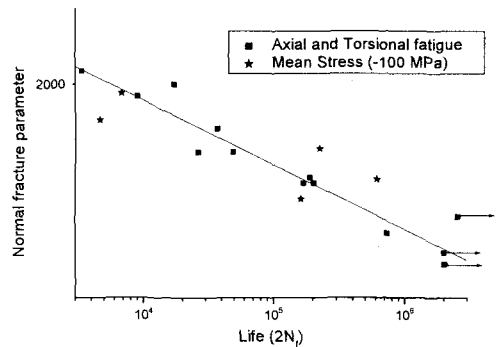
4.2 피로실험

Fig.4 ,Table.2 에 본 재질에 대한 Axial fatigue 와 Torsional fatigue 의 실험결과가 주어져 있다. 실험은 앞서 기술한 대로 stress control 로 이루어 졌다.

Table.2 의 자료에서 AF 계열의 시편들은 단순인장압축피로실험을 의미하며 TF 계열은 비틀림피로, AM 계열은 mean stress(-100MPa)를 준 상태에서의 시편들이다. 시편의 파단각도는 axial fatigue 의 경우는 시편의 중심축에 대해 90° 로 기울어져 있으며 torsion 의 경우는 45° 방향으로 기울어져 있다. Fig.7 은 axial fatigue 와 torsional fatigue 에 의하여 파단된 시편의 그림이며 fracture mode 가 normal fracture 임을 알수 있다.



(a) KBM Parameter



(b) Normal fracture Parameter
Fig.4 Fatigue test

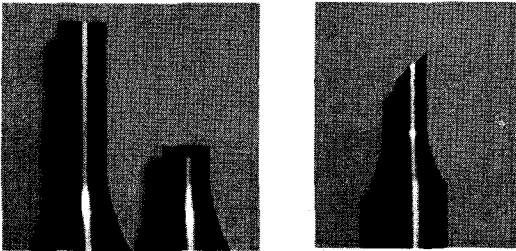
Specimen #	Stress amp'	$2 N_f$
AF001	950	580
AF002	850	3366
AF003	800	9026
AF004	700	48872
AF005	650	201664
AF006	650	169636
AF007	650	204064
AF008	600	>2.56E+06
AF009	550	>2.00E+06
TF001	1000	17190
TF002	900	36908
TF003	850	26192
TF004	800	190626
TF005	700	734024
TF006	650	> 2.00E+06
TF007	650	> 2.03E+06
AM001	900	6842
AM002	850	4638
AM003	800	224074
AM004	750	616420
AM005	720	162678

(a) fatigue test

KBM		Normal fracture	
σ_f	878.2899	τ_f	1785.747
b	-0.0671	b	-0.0671
s_1	1.429	k_1	0.643587
s_2	0.625869	k_2	6.864523

(b) coeff of parameters

Table2. Fatigue test data



Axial Torsional
Fig5. fracture of fatigue test specimen

4.3 피로손상-연마 상호작용 해석

통상 압연롤의 하중조건은 strip의 폭 변경이나 압연율의 변화에 따라 변화하며 따라서 롤의 연삭 전까지의 campaign을 정확하게 정의 할 수 없다.

따라서 본 연구과제에서는 각 stand 별로 가장 하중이 많이 걸리는 압연작업을 선정하여 이에 대한 피로수명을 평가하였다. 이러한 롤의 피로수명을 평가하기 위하여 본 연구과제에서는 롤의 피로

수명을 예측할 수 있는 프로그램을 작성하였다. 이 프로그램의 algorithm이 Fig.6에 주어져 있다.

Fig.6에서 보듯이 본 프로그램은 롤의 stress 분포를 FEM 해석의 결과를 이용하여 계산하게 된다. 여기에 Disk method와 X-ray diffraction에서 얻은 잔류응력을 더하여 전체 응력을 결정하였다.

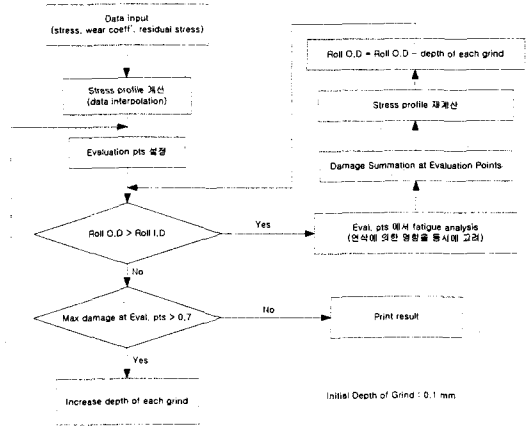


Fig6. Algorithm of damage evaluation program

피로수명의 평가는 롤 반경 방향으로 미리 선정된 점들에 대하여 행하였다. 이러한 점에서의 응력은 cubic spline interpolation scheme을 이용하여 유한요소해석 결과에서 구하게 된다. 이렇게 구한 stress를 가지고 롤 일 회전에 대한 stress history를 구하며, 이를 이용하여 본 연구에서 제안된 normal fracture criteria와 shear fracture criteria를 가지고 롤의 피로수명을 평가하게 된다. 이 프로그램을 이용하여 포항제철 1냉연공장 #1 stand에서의 피로손상을 계산한 결과가 Fig.7에 주어져 있다.

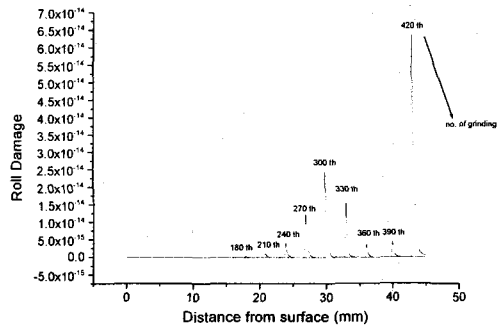


Fig.7 Fatigue damage at #1 Stand

수명의 평가는 현장 데이터 중에서 1 회 연삭 시까지 생산되는 strip 의 길이인 200km 를 기준으로 하였으며 이 길이는 포항제철의 롤 사용기준에 의거하여 선정된 것이다. 여기서 1 회 연삭량은 0.1mm 로 선정하였다. Fig.7 에서 보듯이 피로손상은 무시해도 좋을 정도로 적었다. 이 결과는 압축 평균 응력의 영향을 피로모델에 포함하여 계산한 것이다. 만약 평균응력의 영향을 무시할 경우 피로손상은 매우 크게 된다 (Fig.8).

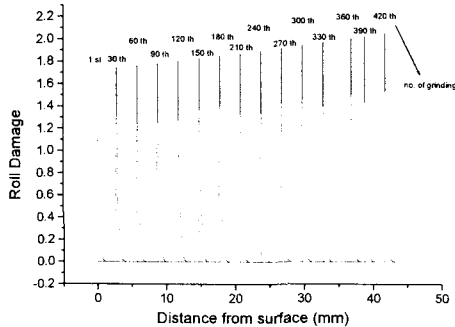


Fig.8 Fatigue damage at #1 stand (Without mean stress)

피로손상은 평균응력 계수의 크기에 따라 민감하게 변화했다. 따라서 피로손상의 신뢰도를 위해서는 평균응력의 영향을 정확히 평가해야 한다. 그러나 이 연구의 압축 평균응력 피로시험에서 얻은 데이터에 상당한 scatter 가 존재하였다. 그러므로 차후 더 많은 실험을 수행하여 더 검증할 필요가 있으며, 피로 파라미터와 피로손상 예측모델의 performance 도 다축피로 시험을 통하여 더 평가가 되어야 할 것이다. 그러나 위의 결과는 max hertz contact stress 와 피로수명의 관계곡선과 비교할 때 [13] 경향이 일치함을 알 수 있다.

위의 결과에서 보듯이 피로손상은 롤 표면손상에 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 따라서 롤 손상 해석은 열충격 균열전전의 측면에서 수행되는 것이 가장 타당하다.

5. 결론

이 연구에서는 피로손상 축적과 연삭의 상호작용 측면에서 롤 표면 손상에 대해 연구를 수행하였다. 또한 피로-연삭량의 상호관계를 해석하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 피로해석 결과는 피로손상이 평균응력에 매우 민감하다는 것을 알려준다. 피로손상 계산에서 평균응력의 영향을 고려할 때 피로는 별 문제가 되지 않았으나 평균응력의 영향을 무시하였을 때는 피로손상이 매

우 커졌다. 현 피로해석 결과에 의하면 피로손상이 너무 적어서 롤 표면 손상에 주 요소가 되지 못함을 말해 준다. 그러나 평균응력 모델 검증과 더불어 피로손상 예측 알고리즘 및 파라미터의 신뢰도에 대한 연구가 혼합 인장-비틀림 시험을 통하여 더 이루어져야 한다고 본다.

후 기

본 연구는 포항제철의 재정적 지원과 한국중공업의 시편제작지원으로 이루어진 것임을 밝힌다.

참고문헌

1. Hanlon, D.N., Rainforth, W.M., and Sellars, C.M., *Wear*, Vol. 203-204, 1997, pp. 220-229.
2. Author in Japanese, *소성과 가공*, Vol. 6, No. 53, 1965, pp. 329-336.
3. 황상무, 김광수, "냉연강판 Edge drop 정밀예측을 위한 유한요소 컴퓨터 시뮬레이터의 개발," 포항공대 연구보고서, 2000
4. "Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.01," ASTM, Philadelphia, 1995, E837-94a
5. "Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.01," ASTM, Philadelphia, 1995, E915-90, E1426-94
6. Garud, Y. S., *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 9, No. 3, 1981, pp. 165-178.
7. You Bong-Ryul and Lee, Soon-Bok, *Internal Journal of Fatigue*, Vol. 18, No. 4, 1996, pp. 235-244.
8. 김광수, "다축 응력하에서의 피로수명 예측기술의 개발," 포항공대 연구보고서, 2000
9. Kandil, F. A., Brown, M. W. and Miller, K. J., "Biaxial Low-Cycle Fatigue Fracture of 316 Stainless Steel at Elevated Temperatures," Book 280, The Metals Society, London, 1982, pp. 203-210.
10. Miner, M.A., *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, No. 3, 1945, p. A-159.
11. Dowling, N. E., *Journal of Materials*, Vol. 7, No. 1, 1972, pp. 71-87.
12. "Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.01," ASTM, Philadelphia, 1995, E8M
13. 한중기술연구소, private communication