

강재의 단축인장 시험과 마모와의 관계

오흥국*, 연규현**, 김태훈***

RELATION BETWEEN UNIAXIAL TENSILE TEST AND WEAR IN STEELS

Hung-Kuk Oh*, Kyu-Hyun Yeon**, Tae-Hun Kim***

Abstract

The reorientations of the atoms by frictional shear deformation at the surface induce cracks at the boundary of the grain. The cracks grow and propagate in regions where the hydrostatic component of stress is least compressive because the compressive component restores the cracks by three-dimensional crystallizing π -bondings. The materials with Lüder's band have very small amount of wear at the initial state. It suggests that initial frictional shear deformation be consumed to the formation of the Lüder's band. The average wear amounts of the materials increase very steeply as the ϕ_u , the stress-strain ratio at the ultimate point, decreases.

Key Words : wear(마모), tensile(인장), reorientation(재정렬), shear, deformation, tension

1. 서론

산업현장에서 사용되고 있는 기계장치와 그 기계장치의 요소 부품들이 손상되고 고장이 발생하는 원인의 75%는 미끄럼 운동을 하는 표면의 마모와 마찰에 기인한다고 한다. 이를 회복 시키는데 소요되는 비용은 독일의 경우 CNP의 약 4%에 해당한다고 한다. 마찰에 대한 연구는 레오나르도 다빈치에 의해 평면과 경사면에서 미끄러지는 물체의 마찰력을 계산한 것이라 할 수 있다. 이와 같이 마모와 마찰에 대한 연구는 인류의 역사와 같이 하는 가

장 오래된 분야이지만 마모와 마찰에 영향을 미치는 변수는 헤아릴 수 없이 많으므로 과학자들은 연구에 있어서 제한적인 조건을 많이 가정하지 않을 수가 없었다. 그러므로 대부분의 연구가 극히 미시적(micro) 관점에서 수행되어 왔기 때문에 그 결과들은 많은 변수들이 복합적으로 작용하고 있는 실제의 거시적(macro) 현상과는 차이가 클 수 밖에 없고 이를 보정하기 위한 상수들의 값의 범위가 클 수 밖에 없었다.

기계구조용 탄소강과 합금 공구강은 금형용 재료에서 가장 많이 사용되고 있는 강재이며 내마모성이 우수하여

* 아주대학교 기계 및 산업공학부
** 영진전문대학 기계계열
*** 아주대학교 기계공학과

야 한다. 실제 산업현장에서는 기계부품이나 공구 또는 금형이 사용 중 마모가 어떻게 진행 될 것인지를 예측하여 대책을 세우는 것이 중요하다. 그리고 이러한 재료들로 제작한 금형의 부품들이 마모되는 경향이 어떤 경우는 사용 초기에 마모가 심하고 그 후로는 마모의 진행이 점점 작아지는 경우와, 사용 초기에는 마모가 작으나 갈수록 점점 커지는 경우도 있고, 처음부터 끝까지 균일한 마모가 진행되는 경우도 있어 그 예측이 무척 어렵다.

마모에 관한 최초의 고안된 계산식은 1940년 스웨덴의 Holm⁽¹⁾에 의해서 만들어 졌으며, 그는 원자를 마모의 관점에 도입하여 마모 체적을 계산하는 식을 만들었고 1950년대에 들어와서 Archard와 Hirst⁽²⁾가 adhesion theory of wear이론을 발전 시켰으며 1957년 소련의 Kragelsky^(3,4)에 의하여 최초로 피로이론이 도입되어 마모연구 발전의 중요한 계기가 되었다. 1968년까지 Kragelsky가 주축이 된 소련의 과학자들에 의해서 많은 연구가 이루어졌다. 1973년에 들어와서 피로이론에 있어서 보다 발전된 이론으로 미국의 Suh⁽⁵⁾에 의해 제안된 이탈이론(delamination theory)가 제안 되었다.

본 연구의 목적은 강재의 마모 특성을 규명하기 위해 마모실험을 하여야 하는 경우에 시간이 장시간 소요될 뿐만 아니라, 번잡한 실험장치와 방법이 필요하고 그 비용이 많이 요구되고 있으므로 거시적인(macro) 마모특성이 필요한 산업현장에서 비교적 간단하고 단시간에 할 수 있는 인장실험과 현미경 조직검사를 이용하여 마모특성을 규명하는데 있다.

2. 삼차원 결정화 파이 결합에 의한 입자들의 회전과 입자 경계에서의 크랙

단축 인장실험에서 최대 인장응력 점을 지나면 입자 안에 있는 삼차원 결정화 파이 결합의 원자들이 재정렬하고 쌍정을 만들기 때문에 입자들이 회전한다.⁽⁶⁾ 최대점 이후부터는 입자간 전위의 이동이 어렵기 때문에 입자들은 쌍정에 의해서 변형된다. 입자들의 회전이 입자경계의 코너와 불규칙한 곳에서는 움직임이 부적합하여 입자 경계에 크랙을 만든다.

특히 미끄럼 띠에 있는 입자들은 많은 입자 경계 크랙을 만들고 또 표면에 요철을 만든다.

단축 인장실험에서의 몇 가지 파단 양상을 Fig. 1에 도시하였다.⁽⁷⁾ Fig. 1 (a)는 미끄럼 띠 위에서 전단에 의해서 단결정들이 분리된 양상이다. Fig. 1 (b)는 FCC구조 안의

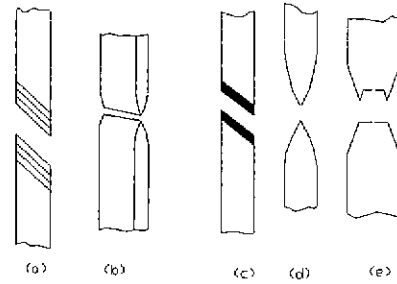


Fig.1 Type of fracture produced under uniaxial tension

많은 미끄럼 면들은 서로간에 교차하여 넥킹을 만들기 때문에 넥킹이 칼날 끝으로 줄어들어 파단 된 FCC단결정의 양상이다. Fig. 1 (c)는 표면에 제정렬된 미끄럼 띠와 요철에서의 크랙에 의해 파단 되어진 결정 즉, 국부적으로 변형된 띠에 있는 FCC합금결정의 파단 양상이다. Fig. 1 (e)는 비교적 연성인 공업 재료들의 꺾과 콘 모양의 파단 양상이다. 3축 인장응력 때문에 빨리 커지는 넉(neck)안의 중심부 크랙들 때문에 파단이 된다.

3. 단축인장 실험에 있어서의 워더스 띠

많은 금속들, 그리고 특히 저 탄소강, 국부적이고 이중적 형태의 천이(遷移)를 나타낸다. 이는 응력변형을 곡선에서 항복점을 유발한다.

항복점을 갖고 있는 금속들은 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이, 탄성에서 소성거동으로 점진적인 천이를 하는 곡선을 갖는다기 보다는, Fig. 3과 비슷한 하중-연신도와 대등한 곡선을 갖는다. 하중이 점차 증가되고 탄성변형도 증가하다, 갑자기 하중이 떨어지고, 대략 어떤 일정한 하중 값에서 파동을 하다, 다시 증가되면서 변형을 더 일으킨다. 급격한 하중감소가 발생한 점을 상 항복점이라고 부른다. 일정한 하중을 하 항복점이라 부르고, 그리고 이때 일어나는 연신을 항복점 연신이라 부른다.

항복점 연신과정을 통해서 일어난 변형은 이종(異種)이다. 상 항복점에서 변형된 금속의 불연속적인 띠, 종종 눈으로 잘 볼 수 있으며, 휠레트와 같이 응력이 집중되는 곳에서 나타나며 띠의 형성과 일치하는 하중은 하 항복점까지 떨어진다. 그 후 띠는 시편의 전체길이에 걸쳐서 전개되면서 항복점 연신을 일으킨다. 통상의 경우 몇 개의 띠들이 응력집중이 되는 몇 개의 곳에서 형성될 것이다. 이 띠들은 일반적으로 인장 축에 대해서 대략 45°이다. 이

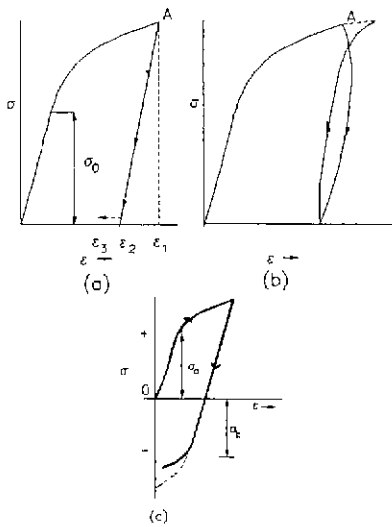


Fig. 2 Typical true stress-strain curves for a ductile metal

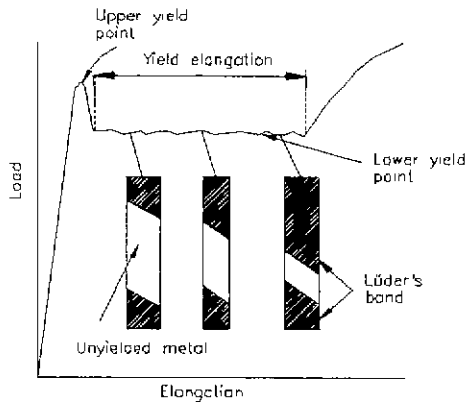


Fig. 3 Typical yield-point behavior

띠들은 뒤틀림 띠, 하트만 선(Hartmann lines), 또는 스트레처 스트레인(stretcher strains)이라고 부른다 또 이런 형태의 변형은 종종 피오버트 효과(piobert effect)라고 언급되기도 한다. 뒤틀림 띠가 여러 개 발생한 때, 항복점 연신 과정 동안은 곡선이 불규칙으로 될 것이고, 각각의 조그(jog)의 교차는 새로운 뒤틀림 띠를 발생시킨다. 뒤틀림 띠가 시편의 전체길이에 걸쳐서 전개된 후, 흐름은 통상과 같은 방식으로 변형의 증가와 함께 증가한다. 이는 항복점 연신이 끝났음을 표시한다.

항복점 현상은 근본적으로 저탄소강에서 발견되었다.

뚜렷한 상항복점과 하항복점 그리고 10%가 넘는 항복점 연신을 저탄소강에서 얻을 수 있다. 최근에는 항복점이 일반적인 현상으로 받아들여지게 되었다. 철과 강 외에도 항복점들은 복합결정 몰리브데넘, 티타늄, 알루미늄 합금들 그리고 철의 단결정체, 카드미움, 아연, 알파와 베타 황동 그리고 알루미늄에서 관찰되고 있다.

통상 항복점은 작은량의 틈새의 불순물 또는 대체 불순물과 관련이 될 수가 있다. 예를 들면 저탄소강에서 탄소와 질소를 Wet-Hydrogen처리에 의해서 거의 완전히 제거하면 항복점을 제거할 것이다. 그러나 이 불순물 중 0.001% 정도만 첨가되더라도 항복점이 다시 나타날 수가 있다.

예리한 상항복점을 얻기 위해서는 수많은 실험인들이 영향을 미친다. 탄성적으로 견고한 실험기를 사용하고, 시편의 축 정열을 주의깊게 하고, 시편들은 응력집중이 되지 않은 것을 사용하고, 하중은 큰 비율로, 또 온도변화가 작은 상태에서 실험을 함으로써 예리한 상항복점을 얻을 수 있다 응력집중을 피하게 하면 첫번째 뒤틀림 띠는 시편의 중앙에 나타나도록 만들 수가 있고, 상항복점은 하항복점의 대략 2배가 될 수도 있다. 그러나 상항복점이 하항복점보다 10%에서 20% 큰 것을 얻는 것이 더 통상적이다. 뒤틀림 띠는 3차원 결정화 파이 결함들의 조직 안에서 원자들이 재 정열함에 의해서 발생하는 쌍정띠이다. 이는 질소와 탄소 같은 불순물 원자의 구름에 의해서 쉽게 발생될 수가 있다. 쌍정띠의 변형경화가 아주 빨리 진행되므로 이 띠는 시편을 따라서 전개된다 쌍정에 대한 응력은 아주 작기 때문에 항복점은 아주 빠르게 감소한다.

4. 3차원 결정화 파이 결함과 마모 기구

미끄럼 접촉의 영향은 재료의 표면에 소성전단변형을 일으킨다. 표면의 전단은 요철 사이에서의 부착력(adhesion)에 의해서 일어나기도 한다. 또한 더 단단한 물체에 있는 요철이 표면에 홈을 파는 것에 의해 일어날 수도 있다. 이 홈을 파는 작용은 재료에 연한 층이 있는 경우에는 더 심해질 수가 있다.

표면에서 마찰력에 의한 전단응력은 입자들 안의 원자들을 재정렬 시키고 입자들을 회전시킨다. 이것이 입자들의 경계에서 크랙을 유도한다. 크랙들은 정수압 응력성분의 압축성이 최소인 곳으로 성장하는데 그것은 인장성분이 3차원 결정화 파이 결함에 의해서 방향 재정렬을 시키기 때문이다.^[6] 마모기구에 의해서 얇은 층으로 찢은 판재

같은 입자들이 발생된다. 단단한 입자의 경계에서 크랙들은 쉽게 생겨날 수 있으므로 크랙들은 또한 단단한 카바이드 입자의 선을 따라서 전개 될 수가 있다

5. 탄소강과 특수 합금강에 대한 단축 인장실험과 마모실험

5.1 실험방법

실험에 사용한 재료들은 국내에서 구입하였으며 성분분석과 조직검사를 하여 재료의 재종과 재질이 한국공업규격과 일치하는 것을 선택하였다.

실험의 진행은 Fig. 4와 같은 흐름도에 의해서 진행하였다.

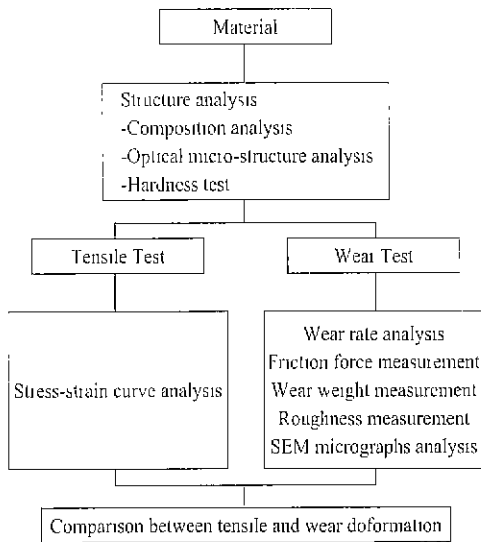
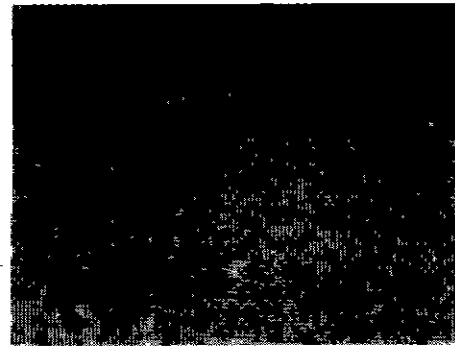


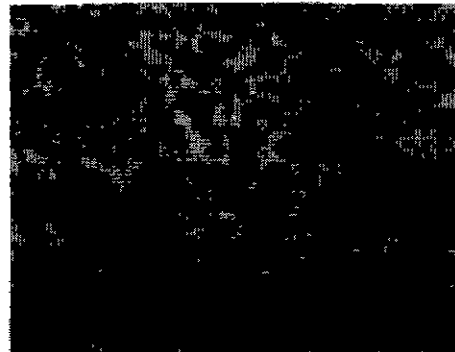
Fig. 4 Experimental flow chart

5.2 실험재료의 합금조성과 조직분석

실험에서 사용한 재료들은 한국공업규격으로 SM20C, SM45C, STD11 그리고 STS303강이며, 재질분석용과 인장실험용, 마모실험용 시편등을 동일한 봉재에서 채취하였다. 각 재질별 합금의 조성과 조직은 Table 1과 Fig. 5와 같다.



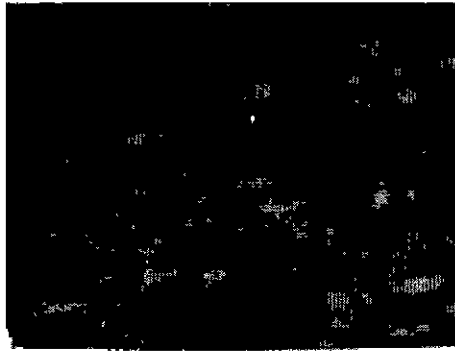
(a) SM20C steel (mag. × 200)



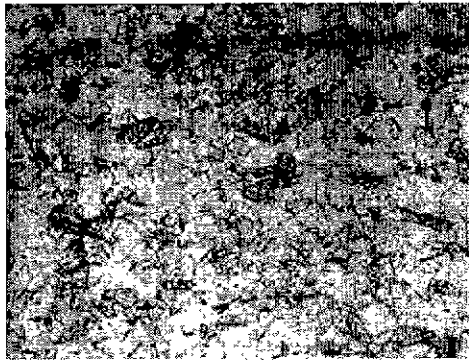
(b) SM45C steel (mag. × 200)

Table 1 Components of materials

Material		Chemical composition(%)									
		C	Si	P	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	S	Fe
SM20C	Standard	0.18-0.23	0.15-0.36	≤0.03	0.3-0.6	≤0.2		≤0.2	≤0.3	≤0.035	Balance
	Analysis	0.19	0.07		0.58					0.08	
SM45C	Standard	0.42-0.48	0.15-0.35	≤0.03	0.6-0.9	≤0.2		≤0.2	≤0.3	≤0.035	Balance
	Analysis	0.046	0.21		0.9						
STD11	Standard	1.40-1.60	≤0.4	≤0.03	≤0.6	11.0-13.0	0.8-1.2		≤0.25	≤0.03	Balance
	Analysis	1.4	0.33		0.82	6.5	0.98				
STS303	Standard	≤0.15	≤1.0	≤0.2	≤2.0	17-19	≤0.6	8-10		≤0.15	Balance
	Analysis	0.03	0.83		1.48	18.96	0.2	7.8	1.1	0.01	



(c) STD11 steel (mag. × 200)



(d) STS303 steel (mag. × 200)

Fig. 5 Microstructure photographs of (a) SM20C, (b) SM45C, (c) STD11 and (d) STS303

5. 3 인장 실험

인장실험편은 한국공업규격 B0801에 의하여 Fig. 6과 같이 제작하고, SHIMADZU 1242 만능시험기에서 인장 실험을 하였다. 인장실험 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

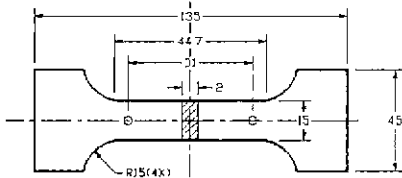
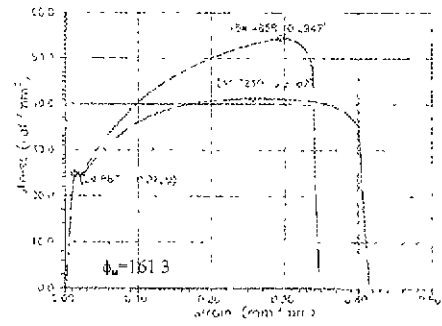
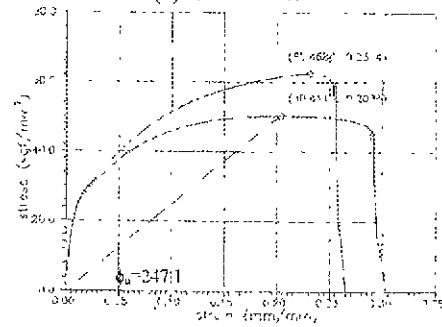


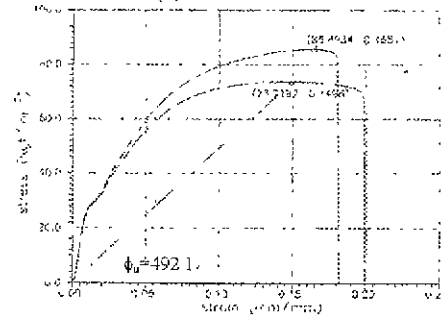
Fig. 6 Specifications of tension specimen (KS B0801 14 B) (dimensions in mm)



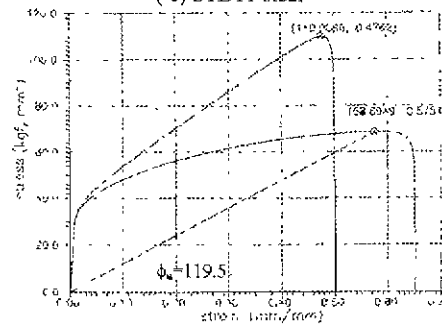
(a) SM20C steel



(b) SM45C steel



(c) STD11 steel



(d) STS303 steel

Fig. 7 Tensile test results of stress-strain curve

5.4 마모실험과 결과

5.4.1 마모실험기의 제작

핀과 디스크사이의 접촉면적이 비교적 일정한 핀과 마스크(PIN ON DISK)방식을 채택하였다(Fig. 8). 마찰력(friction force)의 변화는 센서에 의하여 컴퓨터에 입력기록이 되고 회전수는 디지털적산계에 입력이 되는 것이 Fig 9에서 보여진다. 조립된 실험기의 모습은 Fig. 10과 같다.

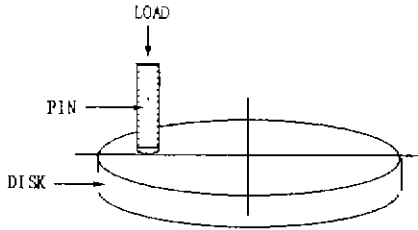


Fig. 8 Pin on disk test configuration

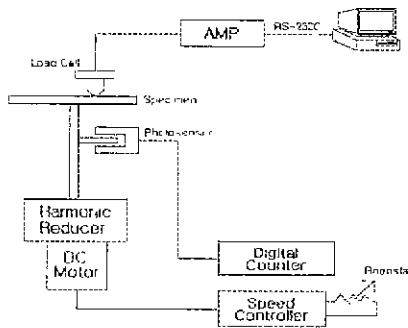


Fig. 9 Measuring system for wear tester



Fig. 10 Experimental set up for measuring arrangement (pin-on-disk)

5.4.2 마모실험과 결과

시험의 규격은 Fig. 11과 같으며 핀에 걸리는 하중은 500g이다. 핀과 원판사이의 접촉면은 경면레평을 하여 평균 면조도가 0.03미크론(Ra0.03(μm))이다. 실험 중에 발생하는 마찰열에 의해서 미치는 영향을 작게 하기 위하여 접촉면의 선속도를 0.154m/sec에서 0.176m/sec 정도의 저속도(=70~80rpm)로 상온 대기중에서 실험하였다. 습기의 변화, 접촉면의 변화, 마모찌거기가 실험결과에 반영되는 것을 억제하기 위하여 측정주기를 탄소강과 합금강은 100만 회전/주기, 스테인리스강은 주기를 10만 회전/주기로 하였다.

매주기가 종료되면 마모된 중량은 초음파세척하여 불순물을 제거한 후에 전자저울로 측정하였다. 마찰력의 변화는 30초당 로드셀로 측정되어 측정치가 컴퓨터로 입력되었다. 마모된 표면은 에폭시수지로 마운트하여 전자주사현미경(scanning electron microscope)으로 분석하였다.

마모실험조건이 Table 2에, 그리고 마모가 된 웨도 밑에 있는 재료의 단면현미경 조직모습이 Fig. 12와 Fig. 13에 있다.

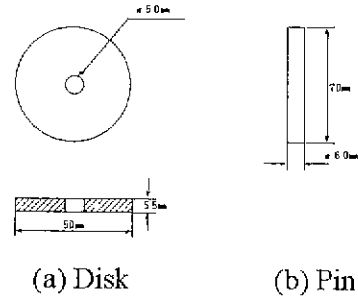


Fig.11 Specification of pin and disk

Table 2 Wear test conditions

Wear Type	Pin-on-disk type	
	Material	SM20C, SM45C, STD11
Environment	Room temperature	Room temperature
Linear velocity	0.154m/s ~ 0.176m/s	0.154m/s ~ 0.176m/s
Sliding distance	660km	66km
Applied load	500gr	500gr
Measuring step	5steps	5steps
	1x10 ⁶ rot./step (132km/step)	1x10 ⁶ rot./step (13.2km/step)

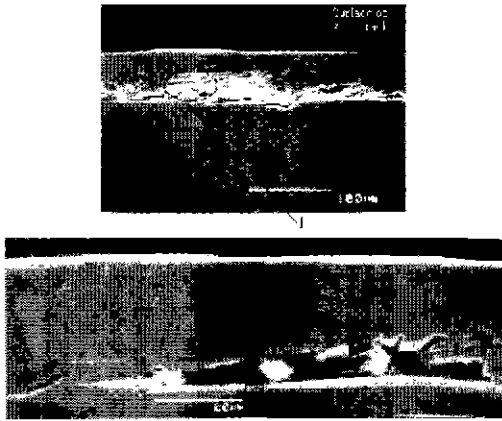


Fig. 12 Scanning electron microscope photographs (HITACHI 2300 ; power 25kV). Subsurface cracks and void formation during wear test in hot rolled SM20C steel against SM20C steel ($H_B = 152\text{kg/mm}^2$, normal load = 0.5kg, sliding velocity = 0.165%, sliding distance=396km)

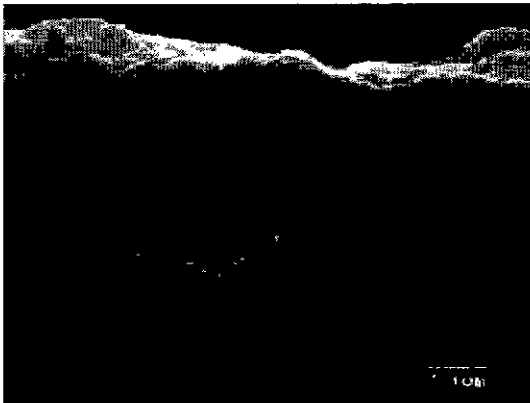


Fig. 13 Scanning electron microscope photographs (HITACHI 2300 ; power 25kV). Subsurface cracks and void formation during wear test in hot rolled SM45C steel against SM45C steel($H_B = 199\text{kg/mm}^2$, normal load = 0.5kg, sliding velocity = 0.165%, sliding distance=396km)

마모실험 결과는 Table 3과 Fig. 14에 있다.

Table 3 Wear test results

Material	SM20C steel against SM20C steel(a)		SM20C steel against SM45C steel(b)	
	Wear amount (gr)	friction force (gr)	Wear amount (gr)	friction force (gr)
Rotation Of disk ($\times 10^6$)				
0~1	0.0062	301	0.2905	365
1~2	0.1946	380	0.2861	408
2~3	0.2616	370	0.3244	380
3~4	0.2926	348		
4~5	0.2293	367		

(1) SM20C carbon steel

Material	SM45C steel against SM45C steel(c)		SM45C steel against SM45C steel(d)	
	Wear amount (gr)	friction force (gr)	Wear amount (gr)	friction force (gr)
Rotation Of disk ($\times 10^6$)				
0~1	0.2282	443	0.071	445
1~2	0.1547	424	0.0197	399
2~3	0.2240	406	0.0031	353
3~4	0.0940	411	0.0121	383
4~5	0.0431	426		

(2) SM45C carbon steel

Material	SMD11 steel against SMD11 steel(e)		SMD11 steel against SMD11 steel(f)	
	Wear amount (gr)	friction force (gr)	Wear amount (gr)	friction force (gr)
Rotation Of disk ($\times 10^6$)				
0~1	0.0142	453	0.0568	442
1~2	0.0682	441	0.0252	414
2~3	0.0902	439	0.0483	390
3~4	0.0601	436	0.0540	389
4~5	0.1365	428	0.0394	383

(3) STD11 alloy tool steel

Material	STS303 steel against STS303 steel(e)	
	Wear amount (gr)	friction force (gr)
Rotation Of disk ($\times 10^4$)		
0~1	0.2290	285
1~2	0.1683	268
2~3	0.1566	290
3~4	0.2114	286
4~5	0.1041	281

(4) STS303 stainless steel

6. 단축인장 실험과 마모실험과의 관계

Fig 12와 Fig. 13에서는 마모기구에 의해서 형성된 얇은 층으로 찢은 판재 같은 입자들을 보여준다. 미끄럼 접촉(sliding contact)의 효과는 재료의 표면에서 소성전단변형을 일으킨다. 표면에서 마찰력에 의한 전단응력은 입자들 안에 있는 원자들의 방향을 재정렬시키고 개개의 입자들을 회전시킨다 이것이 입자들의 경계에서 크랙들의 발생을 유도한다.

크랙들은 정수압 응력성분의 압축성분이 최소인 곳에서 성장하는데 그것은 압축성분이 3차원 결정화 파이 결합들에 의하여 크랙들을 억제하기 때문이다.

Fig. 14는 회전수가 증가하는데 따른 마모특성을 보여준다. 웨라이트 재료들인 SM20C, STD11은 마모가 진행되어감에 따라서 점점 더 심하게 마모되어 지고, 반면에 펄라이트 재료인 SM45C는 회전수가 증가함에 따라서 점점 더 마모가 덜 증가한다.

웨라이트와 펄라이트재료 사이의 복합마모(combination wear)는 일정한 마모율을 유지한다. 오스테나이트 재료인 STS303은 회전수가 증가하면서 마모는 작아지지만, 감소율은 비교적 작게 유지되고 있다. 이는 오스테나이트 결정구조가 웨라이트 결정보다 더 치밀하다는 것이다.

단축인장실험에서 워더스피가 있는 재료들인 SM20C와 STD11(Fig. 7)은 마모실험의 초기에 아주 작은 마모량을 갖는다. 이는 초기단계의 마찰전단변형은 워더스피를 형성하는데 소모되기 때문이다. 재료의 평균마모량은 Fig. 7에서 최고점에서의 응력-변형비인 ϕ_n 가 감소하면 아주 가파르게 증가한다.

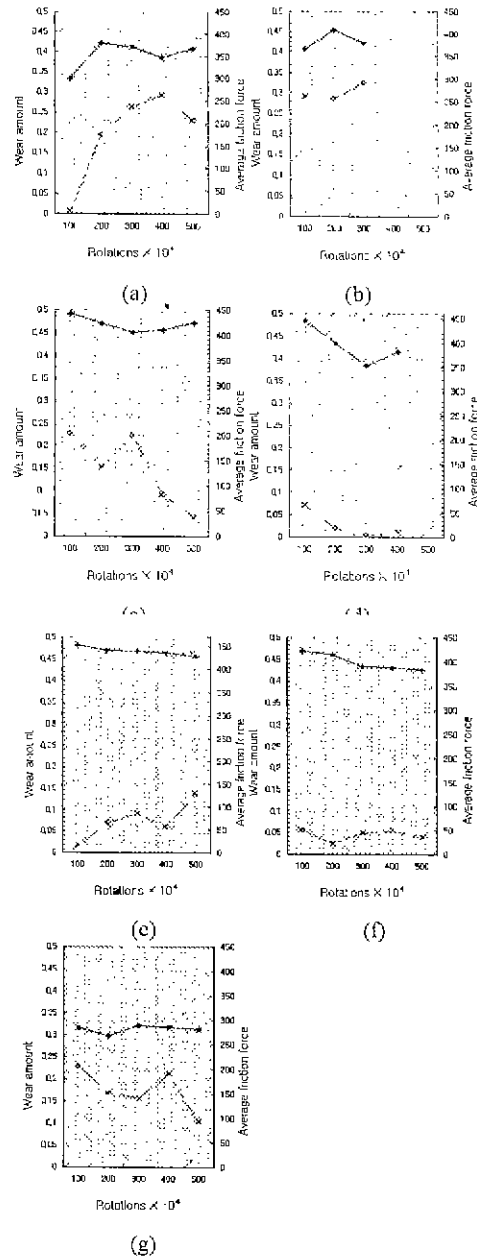


Fig. 14 Wear test results

- (a) Wear of SM20C disk against SM20C pin,
- (b) Wear of SM20C disk against SM45C pin,
- (c) Severe wear of SM45C disk against SM45C pin,
- (d) Mild wear of SM45C disk against SM45C pin,
- (e) Wear of STD11 disk against STD11 pin,
- (f) Wear of STD11 disk against SM45C pin,
- (g) Wear of STS303 disk against STS303 pin

7. 결 론

본 연구에서는 마모 과정 중 원자의 재정립과 크랙의 전개 및 휘더스피의 생성에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 또한 단축인장을 통해 재료의 마모량을 유추할 수 있었다.

- (1) 금속표면에서 마찰 전단변형에 의하여 원자들은 방향을 재정립하게 되고 입자의 경계에 크랙을 발생시킨다.
- (2) 정수압 압축성분은 3차원 결정화 파이결합에 의해서 크랙들이 성장되지 못하게 되므로, 크랙들은 정수압 응력성분의 압축력이 최소인 지역에서 성장하고 전개한다.
- (3) 휘더스피를 가지고 있는 재료들은 초기상태에서는 마모량이 아주 작다. 이는 초기의 마찰 전단변형은 휘더스피를 만드는데 소모됨을 의미한다.
- (4) 재료의 평균마모량은 최대 응력점에서 응력-변형비인 ϕ_{II} 의 크기가 감소하면 아주 가파르게 증가한다.

REFERENCES

- (1) Holm R., "Electrical Contacts", Stockholm. H. Gersbergers, 1946, p. 398.
- (2) Archard J.F., "Contact and Rubbing of Flate Surfaces", J. Appl. Phys., vol. 24, N 8, 1953, pp. 981~988.
- (3) Kragelsky I. V., "Some Concepts and Definitions which apply to Friction and Wear", Acad. Sci. USSR, Moscow, 1957, p. 12.
- (4) Kragelsky I. V., "Wear as a Result of Repeated Deformation of Surface Layers", Izv. Vyssh. Ucheb. Zavedeny. Fizika, No.5, 1958, pp. 119~127.
- (5) Suh N. P., "The Delamination Theory of Wear", Wear, vol.25, N1, 1973, pp. 114~124.
- (6) Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing combined π -bonding orbitals and computer aided material testing system", Ajou univ. press, ISBN 86161-01-X93400, pp. 58~73, 1995.
- (7) W.J.Mcgregor Tegart, "Elements of Mechanical Metallurgy", The Macmillan Company, p. 212, 1996.
- (8) George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Book Company, pp. 70~198, 1988.
- (9) Hung-Kuk Oh, "Behaviros of three-dimensional crystallizing π -bondings in engineering sciences", Ajou univ. press, ISBN 89-86161-03-793400, pp. 13~23, 1995.
- (10) 김성철, 이재우, "페라이트의 연삭저항 및 연삭면 특성", 한국공작기계학회기술학회지, vol. 6, No. 3, pp. 17~25, 1997.