

미끄럼 접촉을 하는 탄소강의 경도차 조합에 따른 마모특성변화 연구

The Change of Sliding wear properties of Carbon Steel against several hardened steels

이 한 영, 김 근 영*

계명대학교 재료공학과, * 계명대학교 대학원

ABSTRACT Although wear resistance of material improves with increasing its hardness, it is known that the wear resistance of steel is varied with hardness of counter material. In this context, wear properties of steel must be depended on the difference of hardness between the testpiece and the counter material.

In this study, using the pin-on-disc type wear machine, annealed carbon steels were tested against alloy tool steels with various levels of hardness. Then the changes of wear properties of carbon steel according to the hardness of counter material were investigated and the morphology of worn surface after test were evaluated .

The results indicate that if there are no remarkable difference of hardness between them, wear resistance of carbon steel in running-in wear decreases with increasing the hardness of counter material. However, its wear properties at the range of high sliding speed have no relation with hardness of counter material. It is clear that wear properties is influenced by the formation of oxide of steel on their worn surface during wear.

keywords : hardness, counter material, wear property, carbon steel, oxide of steel

1. 서 론

재료의 마모특성은 마찰거리, 하중, 마찰속도, 접촉면적, 분위기 등 많은 사용조건에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이러한 측면에서 마모라는 현상은 아주 복잡하고 규칙성도 없어 예측하기 어려운 영역으로 인식되어 있다[1].

재료의 경도는 재료의 마모특성에 미치는 많은 영향인자 중 하나이다. 이것의 영향은 응착마모에 대한 Holm-Archard식과 많은 실험결과에 의해 이미 밝혀져 있듯이 일반적으로 재료의 경도가 높을수록 마모율이 저하하는 것으로 알려져 있다[2]. 그러나

이러한 사실도 전술한 대로 마모현상에 미치는 영향인자가 많다는 점을 감안한다면 역학적인 법칙과 달리 완전한 법칙이라 할 수 없을 것이다. 이러한 측면에서 재료가 접촉하여 상대운동하면서 마모될 때는 접촉하는 상대재가 필히 존재하므로 상대재의 재질, 경도, 거칠기 등에 따라서 그 재료의 마모특성도 변화할 것이 분명하다.

Egawa[3-7]는 철강재료를 열처리해 동일 소재간의 경도 수준을 여러 가지로 조합하여 상대재의 경도에 따른 마모특성을 조사하였다. 그 결과, 상대재(roller)의 경도가 높아질수록 시편(plate)의 마모는 감소하였으나 이들의 마모특성을 결정하는 인자는 경도가 아니라 마모형태(severe wear or

mild wear)임을 밝히고 속도 및 하중에 대한 절삭재료의 마모형태도를 작성하였다. 그러나 이들 마모형태는 일반적으로 접촉면에 생성되는 산화물의 생성유무로 구분되어 지나 이러한 구분방법은 정량적이지 못한 것이 사실이다. 이것은 마모면에 생성되는 산화물의 대소가 있기 때문이다. 일반적으로 고경도 재료의 마모면은 저경도 재료에 비해 산화물의 생성이 용이한 것으로 알려져 있다. 마모면에 생성되는 산화물이 하중, 속도 등과 같은 시험조건에 따라 변화하듯이 시편과 상대재의 경도차의 정도에 따라서 산화물의 생성속도 및 생성량에 차이가 있을 것으로 예상되어 상대재 경도에 따라 재료의 마모특성이 변화할 것으로 생각되어진다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 열처리를 통해 경도를 3수준으로 한 alloy tool steel을 상대재로 carbon steel의 미끄럼 마모특성을 각각 조사하고 시편과 상대재의 마모면을 관찰하여 carbon steel의 미끄럼 마모특성에 미치는 상대재의 경도의 영향을 해석하였다.

2. 실험방법

2.1 시편

본 연구에서는 시편으로 시판되는 일반구조용 탄소강인 SM45C 환봉에서 소정의 Pin형상(Φ6×15mm)으로 가공하였다. 시험 전 시편의 경도는 Hv 190정도인 것으로 밝혀졌다. 상대재는 합금공구강 STD11의 환봉에서 Φ80×8mm의 Disc형태로 가공한 후 열처리를 행하였다. 열처리는 650℃에서 30분간 유지한 뒤 소입온도인 1020℃에서 20분간 유지하는 2단계 가열방법을 취한 뒤 유냉하였다. 이후 tempering처리를 490℃, 630℃, 750℃의 3온도에서 각각 행하여 열처리 후 상대재의 경도를 HRC 30, 42, 56의 3수준으로 하였다. 시편 및 상대재의 화학조성을 Table. 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Pin	0.43	0.24	0.7	0.01	0.02	-	-	-
Disc	1.45	0.35	0.26	0.02	-	12.4	0.89	0.23

이들 시편과 상대재의 접촉면은 시험전 600# Abrasive paper를 이용하여 연마한 뒤 Pin-on-Disc형 미끄럼마찰마모시험기 [8]를 이용하여 마모시험을 하였다. 이때 하중은 5.6N 단일하중에서 미끄럼속도를 8조건(0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5m/sec)으로 변화 시켰다. 그리고 모든 시험은 실온의 대기중 무윤활 상태에서 총 마찰거리를 6km로 하여 행하였다. 마모량 측정은 소정의 마찰거리마다 시험을 중단하고 중량 감소를 측정하여 마모량을 산출하였으며 모든 시험은 동일 조건에서 2-3번의 시험을 하여 이들의 평균값을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상대재 경도에 따른 미끄럼마모 특성 변화

Fig.1은 여러 속도에서 미끄럼거리 증대에 따른 마모량의 변화를 상대재 경도에 따라 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 어느 것도 속도에 따라 정도가 상이하나 모두 거리증대에 따라 마모량이 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 그러나 상대재의 경도에 따라서는 동일 속도라도 마모경향이 변하고 있음을 알 수 있다. 특히 HRC 42 상대재의 0.25m/s와 0.5m/s의 저속시험인 경우 2km부근에서 마모정도가 급변하는 현상이 관찰된다.

Fig.2는 Fig.1의 결과에서 각 상대재 경도별로 거리에 대한 마모율의 변화를 초기마모영역 및 정상마모영역으로 구분하여 미끄럼속도에 대해 도시한 것이다. 어느 것도 0.5m/sec-1m/sec부근에서 마모율의 극대치를 나타내어 극대치를 보이는 속도영역이 상대재 경도와 무관하다는 Egawa의 결

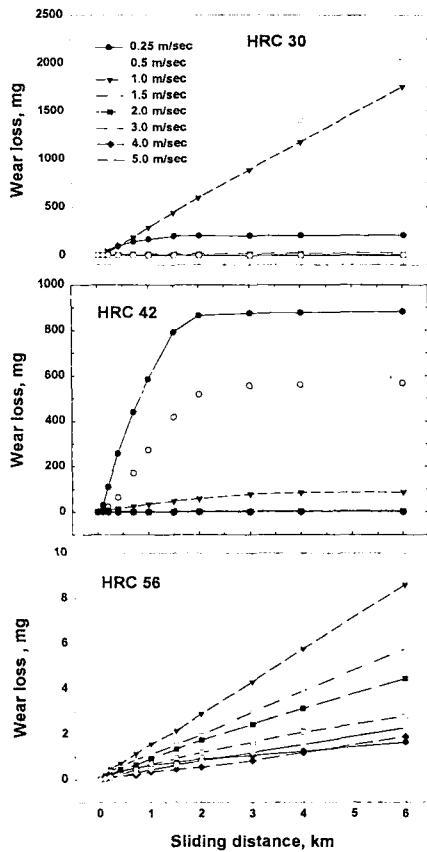


Fig.1 Wear characteristics as a function of sliding distance at various sliding speeds according to the hardness of disc

과[6]와 일치한다. 일반적으로 상대재의 경도가 높을수록 마모가 적은 것으로 알려져 있으나 이 속도영역에서 초기마모의 경우는 상대재의 경도가 HRC 42, 30, 56의 순으로 마모율이 감소하는 것으로 밝혀져, HRC 30과 HRC 42 상대재의 마모율이 역전되어 있다. 그러나 미끄럼 속도가 증가할수록 어느 것도 감소하여 4m/s 이후는 거의 유사한 값을 나타내어 고속에서는 상대재 경도의 영향이 없어짐을 알 수 있다. 반면, 정상마모의 경우 저속에서는 일반적인 경향대로 상대재 경도가 높을수록 마모가 적어지는 경향인 것으로 밝혀졌다. 정상마모영역에서도 미끄럼 속도가 증가할수록 이들의 마모

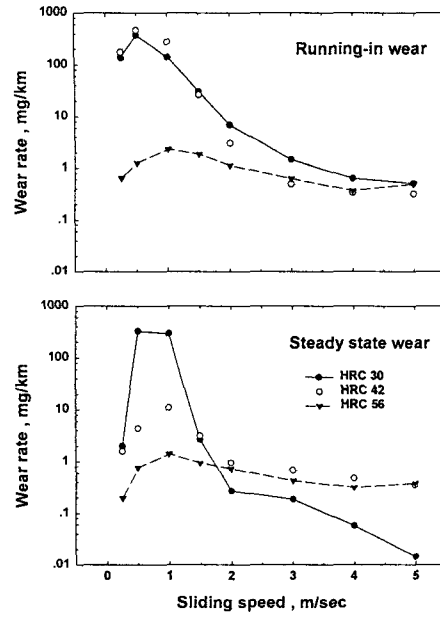


Fig.2 Wear characteristics as a function of sliding speed according to the hardness of counter material at each wear region

율은 초기마모의 경우와 유사하게 감소하고 있으나 경도 HRC 30 상대재의 경우에 현저한 감소를 보이는 것이 주목된다. 이러한 마모특성의 변화는 상대재의 경도 변화에 따라 시편의 마모형태가 변화되었기 때문으로 추정된다.

3.2 마모면 해석

Fig.3은 상대재 경도별로 0.5m/s 및 4m/s의 속도에서 시험한 시편의 마모면을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. HRC 30 상대재로 0.5m/sec에서 시험한 마모면(a)에는 응착된 후 prow변형된 부위가 다수 관찰되나 HRC 42 상대재로 시험한 시편의 마모면(c)에는 소량의 흑색 화합물이 분포되어 있고 scratch가 관찰된다. 그러나 HRC 56 상대재로 시험한 시편

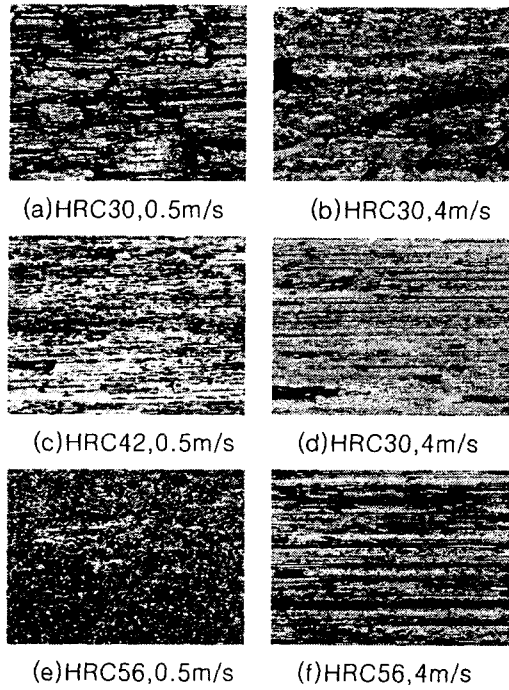


Fig.3 Optical micrographs on worn surface of pin

의 마모면(e)에는 미세하게 분포된 다량의 흑색화합물이 관찰된다. 4m/sec의 마모면에는 어느 것이나 회색 화합물과 흑색 화합물이 관찰되나 상대재의 경도가 높아질수록 그 양이 많아지고 scratch도 많아짐을 알 수 있다. 이들 화합물들은 EDX 분석 결과 어느 것에서도 산소가 관찰되어 이들은 철산화물인 것으로 밝혀졌다. 그러나 HRC 30 상대재로 0.5m/sec에서 시험한 마모면에서는 산소관찰이 안되어 산화물 생성이 없는 것으로 밝혀져 이경우의 마모형태는 기계적 파괴마모 영역에 해당되나 속도가 증가하거나, 상대재 경도가 증대할수록 산화마모로 천이됨을 알 수 있다.

Fig.4는 이들의 상대재 마모면을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 0.5m/s의 경우 HRC30 상대재 마모면(a)에는 시편과 마찬가지로 화합물이 거의 없으며 거시적으로도 금속광택을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 중간경도인 HRC42 상

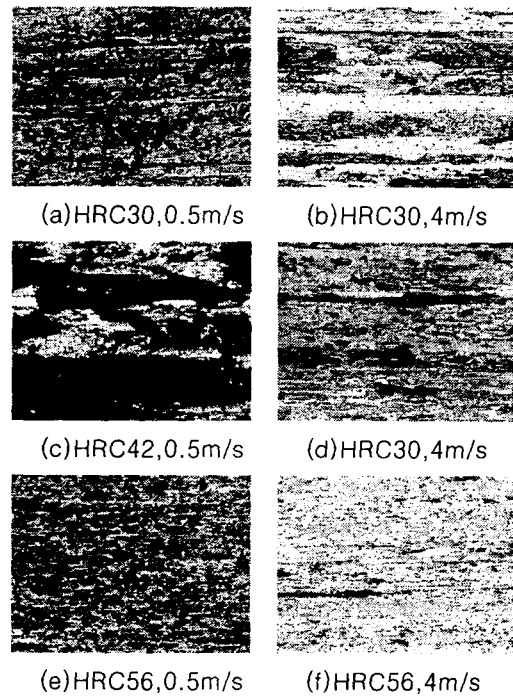


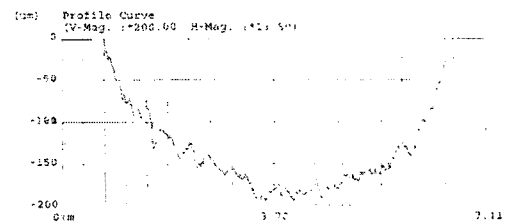
Fig.4 Optical micrographs on worn surface of disc

대재(c)에는 흑색화합물이 다량으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 이들은 거시적으로 적색을 나타내고 커다란 덩어리 형태로 강하게 부착되어 있는 것으로 밝혀졌다. HRC 56 상대재(e)에는 소량의 흑색화합물이 미세하게 존재하고 거시적으로도 HRC 42 상대재와 달리 미세한 입자형태로 마모면에 분포되어 있었다. 4m/sec의 경우는 대부분 회색의 화합물이 관찰되나 이들은 거시적으로 적갈색인 것으로 확인되었다. 이 속도에서도 이들 화합물은 0.5m/s의 경우와 마찬가지로 HRC42 상대재의 경우(d)에 거의 전면을 덮고 있어 가장 많다는 것을 알 수 있다. 상대재에서 관찰된 이들 화합물도 EDX분석 결과 산소가 검출되어 시편과 마찬가지로 철산화물인 것으로 밝혀졌다. 따라서 이들 산화물은 색상으로 미루어 저속에서 관찰되는 적색산화물은 Fe_2O_3 계 철산화물이며 적갈색산화물은 Fe_3O_4 계 철산화물임이 분명하다[9]. 이와 같이 중간경도의 상대재의 경우에 산화물이 대량으로 발생하

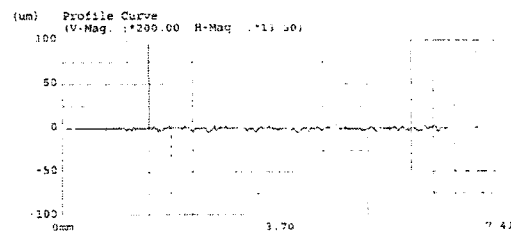
는 이유는 불명확하나 상대재의 마모정도에 의존하는 것으로 생각되어 진다.

Fig.5는 HRC30 상대재의 마모면을 미끄럼방향과 수직방향으로 측정한 단면 profile의 일례를 나타낸 것이다. 마모에 의해 생성된 groove는 0.5m/s에서 200 μ m 정도로 최대가 되고 속도가 증가할수록 감소하는 것으로 밝혀졌다. 한편 HRC42 상대재의 마모면의 속도에 대한 이들의 변화도 이와 유사한 경향인 것으로 밝혀졌으나 0.5m/s에서의 groove는 HRC30 상대재에 비해 현저히 적은 것으로 확인되었다. 그러나 마모형태의 전이가 이루어지기 직전인 약 1.5km에서 확인한 이들의 마모면의 profile에서는 HRC42 상대재의 경우는 6km에서 생성된 groove와 유사한 깊이의 profile이 얻어 졌으나 HRC30 상대재의 경우는 50 μ m의 groove가 관찰되었다. 이것은 HRC42 상대재의 경우는 초기마모에서 마모가 되고 이후는 마모되지 않으나 HRC30 상대재의 경우는 점진적으로 형성되는 것으로 생각할 수 있다. 결국 HRC30 상대재의 0.5m/s에서는 산화물 발생이 없어 두 표면이 강하게 응착되어 초기, 정상 구분없이 점진적으로 시편과 상대재가 공히 마모가 진행되나 HRC42 상대재의 경우는 시험초기에 상대재에 생성되는 다량의 산화물로 인해 시편은 abrasive적으로 마모가 급증하고 미끄럼거리가 증대함에 따라 시편에서도 산화물이 생성된 이후는 급격히 마모율이 감소하는 것으로 생각된다. 이것이 초기마모영역에서 HRC30과 HRC42상대재의 마모율의 역전이 일어난 이유로 생각되어 진다. 그러나 미끄럼 속도가 증대함에 따라 시편 및 상대재는 산화물생성이 용이해지므로 마모율은 상대재경도와 관계없이 어느 것도 감소하게 되나 고경도의 상대재 마모면에 생성된 산화물은 시편에 abrasive적으로 작용하게 됨을 알 수 있다. 이것은 HRC 42, 56상대재의 마모면에 scratch가 관찰되는 것으로 미루어 추정할 수 있다.

반면 저속도에서 시험한 HRC 56 상대재 마모면의 단면 profile에서는 마모면이 들출된 것으로 확인되어 상대재 마모면에서 관찰된 적색의 산화물은 대부분 시편에서 이착된 산화물인 것으로 생각되었다. 그러나 고속영역에서의 마모면에는 소량의 groove가 형성된 것이 관찰되어 고속에서는 마찰 열에 의한 재료의 연화로 인해 다소 마모가 발생하는 것으로 생각되었다.



(a) 0.5m/s



(b) 3.0m/s

Fig.5 Profile curve of worn track on HRC30 Disc

이상의 결과 상대재 경도에 따른 재료의 마모특성 변화는 egawa의 결과[5]와 마찬가지로 마모형태와 관련이 깊음을 알 수 있다. 그러나 이들 마모형태는 시편과 상대재의 산화물발생 시기 및 정도에 의존하는 것으로 생각된다.

열처리한 고경도의 철강재료는 에너지가 높은 상태이므로 마모되어 드러난 신생면은 산화물발생이 용이하여 산화마모의 경향이 강할 것이 분명하다. 일반적으로 마모면의 산화물은 금속간접촉을 방지하여 마모발생을 방지하는 것으로 알려져 있다.[9] 이러한 측면에서 본 연구에서도 고경도의 재료

일수록 마모율이 감소한 것은 산화물 발생이 많아졌기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서 가장 고경도이면서 가장 높은 에너지상태를 가진 HRC 56 상대재의 마모면에는 HRC42 상대재에 비해 산화물 생성이 적은 것으로 밝혀졌다. 이것은 HRC42 상대재의 경우는 어느 정도 마모가 발생하므로 신생면이 도출되어 마모면에는 상당량의 산화물 생성이 이루지나 HRC 56 상대재의 경우는 시편과의 경도차가 현저하여 주로 시편에서만 마모가 발생하므로 신생면도출이 없어 산화물이 생성 되지 않았기 때문으로 추정된다. 그러나 HRC 56 상대재 마모면에 산화물발생이 적었음에도 불구하고 시편의 마모특성은 HRC 42 상대재의 경우보다 우수하였다. 이것은 Fig.4(a), (c),(e)에서도 알 수 있듯이 상대재경도가 커질수록 시편의 마모면에 산화물 생성이 많아지기 때문으로 생각된다. 이와 같이 시편의 마모양상이 상대재 경도에 따라 상이하고 특히 상대재경도 증가에 따라 산화마모경향이 향상하는 원인은 불명확하나 고경도의 상대재와의 접촉에서 마모발생이 대부분 시편측임을 고려할 때 마모면의 현저한 strain증가에 기인하는 결과인 것으로 추정된다. 그러나 재료강도증가에 따른 접촉압력상승효과도 배제할 수 없다. 따라서 내마모성을 고려한 시편과 상대재와의 경도차는 상대재의 경도가 마모가 발생하지 않을 정도로 현저히 클 경우에 유효함을 알 수 있다. 이상의 결과 상대재 경도에 따른 재료의 마모특성 변화는 시편과 상대재의 마모면에 산화물 생성에 영향을 받는다는 알 수 있다.

4. 결론

열처리에 의해 상대재의 경도를 변화시킨 후 상대재 경도에 따른 철강재료의 미끄럼 마모특성을 조사하고 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정상마모영역에서는 상대재의 경도가 증가할수록 마모율은 감소하였다. 그러나 초기마모영역에서는 상대재와 시편과의 경도차가 현저하지 않을 경우는 상대재의 경도가 클수록 오히려 마모율이 증가한다.
- 2) 고속영역에서의 재료의 미끄럼 마모특성은 상대재의 경도와는 무관해 진다.
- 3) 상대재 경도에 따른 재료의 마모특성은 시편과 상대재의 마모면에 산화물 생성 시기와 정도에 영향을 받는다. 상대재의 경도가 커질수록 시편은 산화물 생성이 많아져 마모량이 감소하나 상대재의 마모가 발생하지 않을 정도로 큰 경도차일 때 시편의 내마모성은 최대가 된다.

reference

- 1) T.Sasada, wear testing method and wear properties, pro. 5th wear symposium of JJSLE (1970)21-30
- 2) Y. Endo, surface science, Youkendo book co. Japan (1985)pp64
- 3) K.Egawa,"Effects of hardnesses of hardened steels on Frictional wear(1st report)" JJSLE, 19,12(1974)897-904
- 4) K.Egawa,"Effects of hardnesses of hardened steels on Frictional wear(2nd report)" JJSLE; 19,12(1974)905-911
- 5) K.Egawa,"Effects of hardnesses of hardened steels on Frictional wear(3rd report)" JJSLE, 26,8(1981)576-581
- 6) K.Egawa,"Effects of hardnesses of hardened steels on Frictional wear(4th report)" JJSLE26,11(1981)771-778
- 7) K.Egawa,"Characteristics of frictional wear of mild steel", JJSLE,26,6 (1981) 424-428
- 8) H.Y.Lee, wear, (2003) in printing
- 9) Karl-Heinz zum Gahr,"microstructure and wear of materials, Elsevier, pp378-380(1987)