

고주파 열처리에 따른 SPS5 강의 마모특성 변화에 대한 연구

김민호*, 이경엽#, 백영남**, 홍재성***, 함영삼****

A Study on the Wear Behavior of SPS5 Steel Surface-Treated by Induction Hardening Method

Min Ho Kim*, Kyong Yop Rhee#, Young Nam Paik**, Jai Sung Hong*** and Young Sam Ham****

ABSTRACT

In this study, the tempering effect on the wear characteristics of induction-hardened SPS5 steel was investigated. For this purpose, three tempering conditions were applied to control the hardness of heat-treated SPS5 steel. Ball-on-disk wear tests have been performed using zircornia balls on the tempered specimens to determine the variation of wear characteristics. The results showed that friction coefficient decreased with increasing hardness for induction hardening conditions. This seems to occur because real contact area between specimen and mating ball was affected by the specimen hardness.

Key Words : Wear Rate(마모율), Induction Hardening(고주파열처리), Ball-on-Disk(볼온디스크)

기호설명

- V_n = n th asperity's wear volume
- W = normal force on the surface
- I = wear volume per wear length
- p_m = pressure on the surface of the n th asperity
- H = indentation hardness

1. 서론

많은 부품 요소로 구성된 기계들은 어떠한 식으로든 상대적인 마찰로 인한 마멸 현상을 보이게

되며, 이로 인하여 기계 정밀도 및 정확도의 감소, 원치 않는 소음 등이 발생하게 되어 결국 파손에 이르게 된다. 그런데 Archard 의 마모 이론¹에 따르면 마찰력이란 하중이 표면을 수직으로 누르는 힘에 대한 저항력의 함수로 표시될 수 있으며, 즉 표층 경화 정도에 따라 마모 현상을 어느 정도 억제할 수 있다고 볼 수 있다. 따라서 금속 또는 비금속 부품에 있어 표면 강화를 위한 다양한 표면 처리에 대한 연구가 이루어졌으며,²⁻⁴ 또한 표면강화 처리에 따른 마모특성을 규명하고자 하는 연구가 상당히 시도되었다. Na 와 Anders 는 강에 DLC film 을 입혀 마모 특성 변화를 살펴보았으며,⁵⁻⁶

접수일: 2006 년 4 월 17 일; 게재승인일: 2006 년 7 월 11 일

* 경희대학교 일반대학원 기계공학

교신저자: 경희대학교 기계산업시스템공학부

E-mail rheeKy@khu.ac.kr Tel.(031) 201-2565

** 경희대학교 기계산업시스템공학부

*** 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단 경량전철연구팀

**** 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 시스템인터페이스연구팀

Izciler 는 AISI 8620 강에 침탄 처리를 한 후 침탄 깊이에 따른 연마 마모 거동을 살핀 바 있다.⁷ Juliet 은 스퍼터링 및 열 용사 코팅으로 인한 마찰 계수의 변화를 연구하였으며,⁸ Totik 은 AISI 4140 강 의 고주파 열처리를 가한 후 그 특성 변화를 발표 하였다.⁹ 한편 고주파 열처리 는 유도 전류를 코일 에 인가하여 순간적으로 가열 및 냉각하여 일정 깊이의 경화층을 소재 표층에 형성하는 방법이다. 고주파 열처리로 표면경화처리를 했을 경우, 재료 의 내부는 그대로 둔 채 표층의 일부만을 경화처 리 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 공정이 간단하 고 비용이 저렴해 최근 들어 다양한 금속재 표면 강화에 폭넓게 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 철도차량 대차판의 마모특성 향상을 위한 기초연 구로서 SPS5 강재에 대해 세 경우의 표면경도를 발생하기 위한 고주파 열처리를 수행하였다. 이후 마모시험을 통해 표면경도에 따른 각각의 마모특 성 변화를 규명하였다.

2. 실험방법

본 연구는 시편 제작, 고주파 열처리, 경도 및 마모특성 시험으로 구성하여 진행하였다. 시료 소 재로는 기계구조용강 혹은 스프링강으로 많이 사 용되고 있는 중탄소강인 SPS5 강을 적용하였다. 마 모 시험은 Ball-on-Disk 방식을 적용하여 수행하였 으며 상대 마모재로 지르코니아(ZrO₂) 볼을 사용하 였다.

2.1 시편 제작

마모 시편으로 직경 30mm 의 원반형 시편을 제 작하였다. 외곽 형상은 연마 여유를 두고 밀링 가 공하였으며, 상하면은 연마 처리 하여 고주파열처 리를 하였다. 열처리에 들어가기에 앞서 내부에 존 재할 수 있는 가공경화 및 변형응력을 풀어주고 고른 내부 조직을 얻기 위해 노멀라이징 처리를 하였다. Table 1 에 시료의 주요 성분을 나타내었다.

Table 1 Major chemical content of SPS5 steel

(unit : wt%)

| | C | Si | Mn | P | S |
|------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| SPS5 | 0.50-0.65 | 0.15-0.35 | 0.65-0.95 | ≤0.035 | ≤0.035 |

2.2 고주파열처리

노멀라이징을 거친 시료는 15KHz 의 유도 전 류가 인가된 코일을 약 5 초간 통과시켜 850℃이 상 가열되는 즉시 유냉시켜 약 5 mm 이상의 경화 층이 형성될 수 있도록 하였다. 열처리로 경화층 이 생성된 시편은 템퍼링을 통해 내부의 균질성을 도모하는 한편 3 단계의 표면경도를 가지도록 템 퍼링 온도를 달리 적용하였다. 열처리 공정을 통 해 치수의 변화가 생길 수 있으므로 열처리가 끝 난 후 평면 연마를 통해 치수를 조정하였다.

2.3 경도시험

시료의 표면은 #2000 까지 사포로 연마하여 거 칠기를 조정하였다. 이 때의 표면 거칠기는 약 Ra = 0.2 μm였다. 경도 시험은 약 980.7 mN 의 힘으로 콘 형상의 다이아몬드 압입자를 눌러 약 15 초간 지속하고 압입흔의 크기를 통해 경도를 측정하였 다. 오차를 줄이기 위해 서로 다른 부위에 대해 3 회 이상 경도를 측정하여 그 값을 기록하였다.

2.4 마모시험

마모 시험은 3 개의 지르코니아(ZrO₂) 볼을 시 료 표면에 동시에 접촉시켜 회전시키는 Ball-on-disk type 으로 진행하였다. 약 19.7N 의 수직 하중 을 부과하였으며 회전 속도는 150 rpm 을 적용하 였다. 데이터는 매초당 샘플링되어 저장되었으며 시험에 사용된 주요 조건을 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Condition of wearing test

| Load | Velocity | | Time | Distance |
|-------|----------|---------|--------|----------|
| 19.7N | 150rpm | 180mm/s | 3hours | 1.95km |

마모량은 센서를 통해 초기표면의 위치에 대 한 깊이로 표시되나, 이 결과값에는 상대마모재의 마모량이 포함되어 있으므로 그 자체를 순수한 마 모 시편의 마모량으로 보기에 는 무리가 있다. 따 라서 이를 보정하기 위한 몇 가지 방법이 적용되 고 있다. 첫째 시험 전후의 시료의 질량 손실을 통해 마모량을 얻는 방법, 둘째 프로파일러를 통 해 마모 트랙의 단면을 구하고 그 회전 체적을 산 정하는 방법, 셋째 상대마모재에 나타나는 타원형 의 마모흔으로부터 상대마모재의 마모량을 계산한

후 전체 결과값에서 그 부분을 추출해 버리는 방법 등이다. 본 연구에서는 프로파일러를 통해 일정 단면적을 구하고 그 회전체적을 산정하는 방법을 사용하였으나, 일부 데이터는 최종 마모량에서 상대마모재의 마모량을 추출하는 세 번째 방법을 적용하였다.

3. 결과 및 토의

고주파열처리 후 템퍼링 정도에 따라 3 가지의 경도를 가지도록 온도 조건을 달리 적용하였다. 모든 템퍼링 과정은 약 2 시간에 걸쳐 각각 진행되었으며, 이때의 템퍼링 온도 및 얻어진 각 시편의 경도는 Fig. 1 에 나타내었다. 시편에 적용하는 템퍼링 온도와 얻어지는 경도와의 관계는 대략 선형적 관계로 설명될 수 있다.

경도 변화가 SPSS 의 마모특성에 미치는 영향을 이해하기 위해, 열처리를 통해 3 단계의 경도를 가지게 된 시편과 원래 시편과의 마모 특성을 비교하여 보았다. Fig. 2 는 각 경도별 마찰계수 측정 결과를 시험 시간에 대해 나타낸 것으로, 마모 초기에는 외력에 대한 마찰 계수의 거동이 다소 불규칙한 증가 경향을 보였다. 이것은 마모재간 직접 접촉 또는 절삭 작용과 같은 급격한 움직임이 마모 초기 단계에 주요한 인자로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

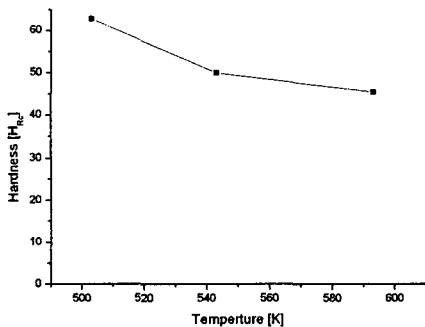


Fig. 1 Variation of hardness as a function of tempering temperature

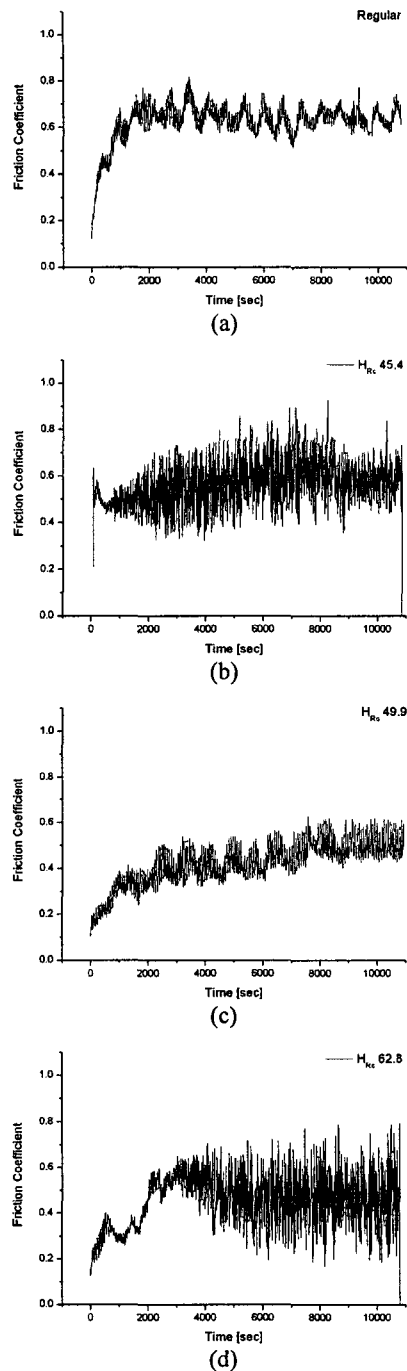


Fig. 2 Variation of friction coefficient for specimens with different hardnesses

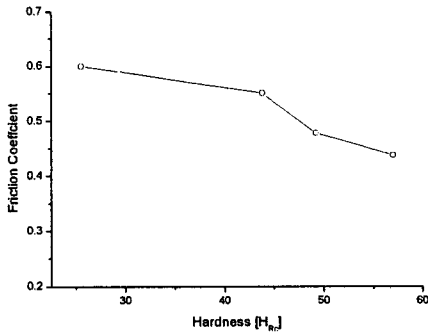


Fig. 3 Effect of harness on the friction coefficient

이러한 영향은 마찰 계면 사이에 충분한 마모 입자가 발생되어 윤활 및 연마의 역할을 수행하게 되면서 점차 감소하게 된다. 약 8000 초 이상의 시간이 소요되었을 때 취득 데이터의 진동 폭이 감소하거나 혹은 진동 축이 일정한 경향으로 지속됨을 알 수 있었다. 따라서 8000 초 이후의 이러한 결과를 선별하여 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에 나타나있듯 마찰계수는 경도에 따라 대략 0.45~0.6 정도를 기록하였다. 표면의 경도가 높을수록 마찰계수는 대체적으로 감소하는 추세를 보였으나, 경도가 높은 일부 시료에서는 취득 데이터의 분산 폭이 커지는 경향도 관측되었다. 이는 경화된 표면 일수록 작용하는 하중에 대한 저항력이 크고 마모 작용이 어렵기 때문인 것으로 파악된다.

마모시험이 완료된 시편은 각각의 마모 깊이 결과를 가진 마모 흔적이 남게 된다. 이로부터 마찰 운동에 따른 시편의 체적 손실량을 계산할 수 있으며, 마찰제간 접촉점에서 소성변형이 있음을 전제한다면 Archard wear equation의 적용이 가능해진다. 마찰에 따른 체적 손실은 마찰 지속 구간의 길이, 적용된 수직 항력의 교호 작용에 영향을 받는다. 즉, 마찰 운동을 통해 떨어져 나가는 체적을 단위 운동 길이당 체적으로 나타내면 식 (1)과 같이 표현된다.,

$$I^* = \sum \frac{V_n}{2r} = \frac{W}{3p_m} \quad (1)$$

여기서 V_n 은 마찰 표면에서 접촉하게 되는 돌기(asperity)의 단위 체적을 말하며 보통 반구 형태로 가정한다. 한 접촉점에서의 하중(W_n)과 압력

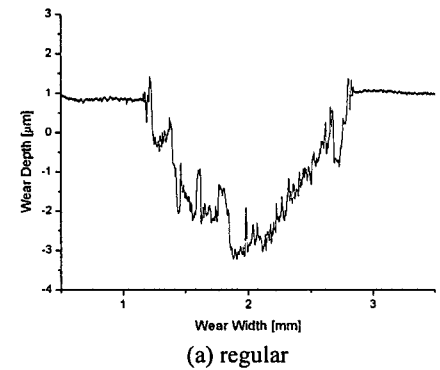
(p_m)과의 관계는 $W_n = \pi r^2 p_m$ 이며, 식 (1)은 마찰제간 모든 접촉점에서 마모된 입자를 방출하는 것을 의미한다. 그러나 실제로는 모든 접촉점에서 마모입자가 방출되지 않으므로 수정계수 k 를 써서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I = k \times I^* = \frac{k}{3} \times \frac{W}{p_m} = K \frac{W}{H}$$

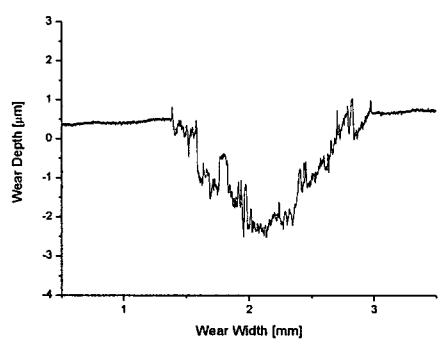
$$\therefore \frac{K}{H} = \frac{I}{W} \quad (2)$$

K/H 의 단위는 [mm^3/Nm]이며, 본 연구에서는 이들 지표를 활용하여 마모율을 계산하고 비교하였다.

마모체적을 구하기 위하여 표면 프로파일러를 통해 마모 트랙의 단면적을 구하였으며 그 대표적인 예를 Fig. 4에 도시하였다.



(a) regular



(b) induction-hardened ($H_{Rc}=62.8$)

Fig. 4 Comparison of wear depth between regular and induction-hardened specimens

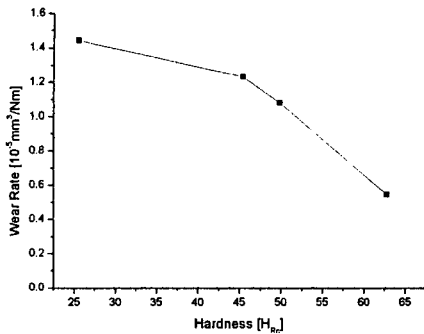
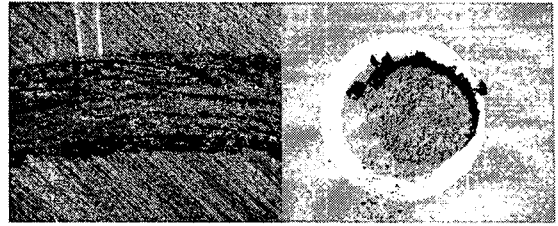


Fig. 5 Variation of wear rate as a function of hardness

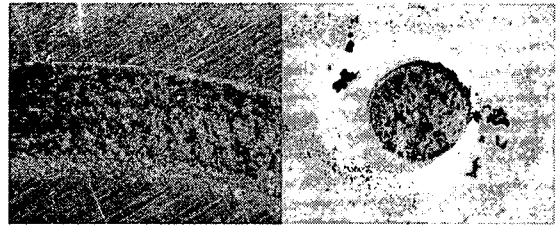
프로파일링을 통해 얻어진 단면을 통해 마모 체적의 근사값을 얻을 수 있었으며 식 (2)을 이용하여 마모율을 구할 수 있었다. 열처리 전후의 프로파일링 결과, 두 시편 모두 비슷한 모양의 접촉을 하고 있으나, 고주파열처리를 적용하지 않은 시편 쪽의 실제 접촉면적이 조금 더 큼을 알 수 있다.

경도 변화에 따른 마모율 변화를 이해하기 위하여 Fig. 5 에 마모시험에 의한 경도별 마모율 변화를 나타내었다. 마모율 결과에서도 마찰계수에서 보여지던 경향과의 유사성을 볼 수 있다. 열처리되지 않은 시편은 로크웰 경도 약 24 전후 값을 나타내고 있으며, 열처리된 시편에 비해 마모율이 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 정도로 제일 컸다. 반면 고주파열처리로 경화된 표면을 가지게 된 시편은 마모율이 점점 감소하여 $0.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 까지 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이것은 기본 소재가 가지는 탄소 함량으로 인해 열처리 후 생성되는 마르텐사이트 + 시멘타이트 경화 조직의 발생 정도에 차이가 나기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 현상의 원인은 금속 결정구조 실험 등을 통해 추후 규명해보고자 한다.

한편 마모 현상은 접촉하는 두 물체 사이에서 발생하는 현상이며 크게 구분하면 상대마모재에 의한 plowing 에 의한 마모, 응착에 의한 마모 혹은 마모된 입자에 의한 연마 작용 등으로 나누어 생각할 수 있다.¹ 이들 현상은 동일 시편이라 하더라도 항상 복합적으로 작용하지만, 현미경 등을 통해 주로 어떤 현상이 지배적으로 발생했는지를 확인하는 것은 가능하다. Fig. 6 은 마모 시편과 상대마모재인 지르코니아 볼에 나타난 마모 흔적을 40 배율의 광학현미경으로 촬영한 것이다. Fig. 6 (a)는



(a) regular



(b) induction-hardened ($H_{Rc}=62.8$)

Fig. 6 Comparison of waer profile between regular and induction-hardened specimens (x40)

열처리를 하지 않은 시편의 마모 사진으로서, 상대마모재인 지르코니아 볼에 비해 상대적으로 연질인 시편이 많이 깎여나갔음을 쉽게 확인할 수 있다. 또한 마모 과정을 통해 생성된 입자들이 상대마모재의 마모면 경계부에 테두리를 이루며 분포하고 있음을 관찰할 수 있다. 반면 Fig. 6 (b)는 $H_{Rc}=62.8$ 로 강화된 시편의 현미경 사진이며, 시편이 깎여나간 흔적보다는 입자의 응착 및 연마에 가까운 흔적이 많음을 관찰할 수 있다. 상대마모재에 묻은 마모 입자들 역시 테두리부보다는 마모면 전반에 걸쳐 넓게 분포해있다. 이를 통해 볼 때, 열처리 전후 시편의 마모 현상은 상대마모재에 의한 plowing 으로부터 응착 및 연마 마모로 그 지배 현상이 변화되어 갔다고 판단된다. 그러나 이러한 판단을 뒷받침하기 위해서는 SEM 을 이용한 마모 트랙에서의 미시적 분석이 요구된다. 이는 향후 연구 과정에서 규명할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 고주파 열처리 후 템퍼링을 통해 3 가지의 각기 다른 경도를 지닌 SPS5 강 의 마모특성을 규명하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 표면 경도의 증가에 따라 마찰 계수, 마모율

등은 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 경도를 마찰력의 주요 인자로 삼은 Archard 와 부합된다. 구체적으로 열처리도 하지 않은 경우 열처리 한 경우에 비해 최대 64%정도 더 마모가 발생하였다.

2) 경도가 높은 시편일수록 상대 마모재와의 응착 현상이 발생하였다. 경도가 증가함에 따라 plowing 마모에서 응착마모로 변화를 나타냈다. 시편 상에 응착된 마모 입자는 연속적인 마찰력의 진행을 방해하는 요소로 작용하였으며 이러한 과정으로 인해 마찰계수, 마모율 등은 전체적으로 감소하는 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 ‘유지보수 성능 향상 기술지원 연구’과제의 지원을 받아 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bhushan, B. and Gupta, B. K., "Handbook of Tribology," McGraw-Hill, New York, 1991.
2. Oh, S. M., Kim, J. K. and Rhee, B. G., "Tribological Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics Prepared by Ion-Assisted Reaction," J. of the Korean Society of Precision Eng., Vol. 21, No. 4, pp. 103-108, 2004.
3. Podgornik, B., Vizintin, J. and Leskovsek, V., "Wear properties of induction hardened, conventional plasma nitrided and pulse plasma nitrided AISI 4140 steel in dry sliding conditions," Wear, Vol. 232, No. 2, pp. 231-242, 1998.
4. Kessler, O., Herding, T., Hoffmann, F. and Mayr, P., "Microstructure and wear resistance of CVD TiN-coated and induction surface hardened steels," Surface & coatings technology, Vol. 182, No. 2/3, pp. 184-191, 2004.
5. Na, B. C. and Tanaka, A., "Tribology Characteristics of DLC film Based on Hardness of Mating Materials," Thin Solid Films, Vol. 478, No. 1, pp. 176-182, 2005.
6. Ager, J. W. III, Anders, S., Brown, I. G., Nastasi, M. and Walter, K. C., "Multilayer hard carbon films with low wear rate," Surface & coating technology, Vol. 91, No. 1-2, pp. 91-94, 1997.
7. Izciler, M. and Tabur, M., "Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel," Wear: An international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear, Vol. 260, No. 1, pp. 90-98, 2006.
8. Juliet, P., Gras, R. and Pauleau, Y., "Friction coefficient and wear rate of sputter-deposited thin films and plasma-sprayed thick coatings at high temperature in room," Wear: An international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear, Vol. 210, No. 1, pp. 326-332, 1997.
9. Totik, Y., Sadeler, R., Altun, H. and Gavgali, M., "The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions," Materials & Design, Vol. 24, No. 1, pp. 25-30, 2003.