



고에너지용 저합금강 제동디스크의 마모 특성 평가

Evaluation of Wear Characteristics of Low-alloy Steel Brake Discs for High Energy Capacity

이동규 · 김경일 · 조규섭 · 김경택*

한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소

Dong-gyu Lee · Kyung-il Kim · Gue-Serb Cho · Kyung-taek Kim*

Research Institute of Intelligent Manufacturing & Materials Technology, Korea Institute of Industrial Technology, 21999, Incheon, Korea

[요약]

본 연구에서는 항공기 및 고속전철 등 대형 수송기기의 제동디스크에 적용되는 Ni-Cr-Mo-V계 및 Ni-Cr-Mo계 저합금강의 합금 성분 변화에 따른 마모 특성을 평가하였다. 경도시험 결과, C-Mo-V강의 경도는 $39.4 \pm 0.9\text{HRc}$ 로 가장 높았고, Ni-Cr-Mo강이 $32.4 \pm 0.6\text{HRc}$ 로 가장 낮았다. 마찰계수는 수직하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 수직하중 1 N에서 Ni-Cr-Mo강의 마찰계수가 0.842, 수직하중 5 N에서 Mn-Cr-V강이 0.696으로 가장 높았다. Ni-Cr-Mo강은 수직하중 1 N에서 마모흔의 폭 $711 \mu\text{m}$, 깊이 $8.24 \mu\text{m}$, 마모량 11 mg, 수직하중 5 N에서 폭 $1,017 \mu\text{m}$, 깊이 $19.17 \mu\text{m}$, 마모량 17 mg으로 가장 큰 마모흔의 폭, 깊이 및 마모량을 보여 주었다. 마모기구 분석 결과, 모든 시편에서 패임, 박리 및 응착이 관찰되었고, Ni-Cr-Mo강에서 소성변형이 더 우세하게 관찰되었다.

[Abstract]

In this study, wear characteristics and microstructure changes due to changes in alloy composition of Ni-Cr-Mo-V and Ni-Cr-Mo low-alloy steels used in brake discs for transportation system such as aircraft and high-speed trains. As a result of the hardness test, the hardness of C-Mo-V steel was the highest at $39.4 \pm 0.9\text{HRc}$, and the hardness of Ni-Cr-Mo steel was the lowest at $32.4 \pm 0.6\text{HRc}$. The friction coefficient tended to decrease as the vertical load increased. At a vertical load of 1 N, the friction coefficient of Ni-Cr-Mo steel was the highest at 0.842, and at a vertical load of 5 N, Mn-Cr-V steel was the highest at 0.696. Ni-Cr-Mo showed the largest wear scar width, depth, and wear amount, with a width of $711 \mu\text{m}$, a depth of $8.24 \mu\text{m}$, and a wear amount of 11 mg under a vertical load of 1 N, and a width of $1,017 \mu\text{m}$, a depth of $19.17 \mu\text{m}$, and a wear amount of 17 mg under a vertical load of 5 N. As a result of wear mechanism analysis, ploughing, delamination, and adhesion in all specimens, with plastic deformation being more prominently observed in Ni-Cr-Mo.

Key word : Brake discs, Coefficient of friction, Ni-Cr-Mo-V Low alloy steels, Wear mechanism, Wear test.

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.532>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 4 July 2024; Revised 9 August 2024

Accepted (Publication) 14 August 2024 (30 August 2024)

*Corresponding Author; Kyung-taek Kim

Tel: +82-32-850-0213

E-mail: kkt@kitech.re.kr

1. 서론

철계소재는 항공우주, 조선 및 자동차 산업 등 다양한 산업 분야에서 사용되며, 상온 및 고온에서의 기계적 물성이 우수하기 때문에 많은 분야에서 필수적인 재료로서 사용되어지고 있다. 이 중 합금 원소의 비율이 5 wt.% 미만으로 비합금 강보다 높은 강도와 기계적 특성을 갖는 저합금강은 수송용 항공기 및 고속전철 등 대형 수송기기의 제동디스크로서 널리 사용되고 있다.

항공기 및 고속전철용 제동디스크는 승객의 안전과 직결되는 부품인 치명성 부품으로 분류되어 있기 때문에 제동디스크의 성능과 내구성에 대한 신뢰성 평가는 매우 중요하다.

제동디스크의 마모특성은 제동성능과 내구성을 결정하는 중요한 요소 중의 하나로서 제동 시에 발생하는 제동페드와의 마찰은 디스크의 표면 손상과 마모로 이어지며, 이는 제동 성능의 저하와 부품의 교체 주기를 결정짓게 된다. 따라서 제동디스크의 마모 특성을 정확히 이해하고 평가하는 것은 수송기기의 운전 안정성 및 승객의 안전성을 향상시키는데 필수적이다.

마모 특성은 사용 환경, 화학 조성 및 경도 등 다양한 요인에 의해 결정되며[1]-[3], 이러한 요소들은 마모특성에 복합적으로 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구가 매우 중요하다.

국외에서는 Rai 등[4]이 보고한 Ni-Cr-Mo-V강의 다양한 미세구조에 따른 마모특성 차이에 대한 연구가 진행되었으며, Woodford 등[5]이 뜨임 취성과 저온 오스테나이트화 열처리를 결합한 Ni-Cr-Mo-V강의 상변화에 대한 연구가 보고되고 있다.

국내에서는 Goo 등[6]이 보고한 Ni-Cr-Mo계 제동디스크의 마찰특성 등에 대한 연구가 진행되었으며, 최근에 Jo 등[7]이 Ni-Cr-Mo-V계 저합금강의 미세조직과 기계적 특성 및 열물리적 특성에 대한 연구가 보고되고 있으나, Ni-Cr-Mo-V계 저합금강의 마찰 및 마모 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 높은 제동에너지 흡수능을 갖는 Ni-Cr-Mo-V계 및 Ni-Cr-Mo계 저합금강을 제조하여 마모시험을 진행하였으며, 합금성분 변화에 따른 마찰/마모특성 및 미세조직의 변화를 연구하였다.

II. 시험방법

2-1 시편 준비

본 연구에 사용된 Ni-Cr-Mo-V 및 Ni-Cr-Mo 저합금강의 화학성분을 분광광도계(OES, OBLF QSN_750)로 분석한 결과를 표 1에 나타내었다. 합금명은 합금원소 중 많이 첨가된 원소로 하였으며, 4종의 합금명은 Cr-Mo-V(#1), C-Mo-V(#2), Mn-Cr-V(#3), Ni-Cr-Mo(#4)로 명명하였다.

목표 화학조성의 합금원소를 소수점 셋째자리까지 측량하

여 원료를 준비하고, 유도 용해로에서 30 kg을 용해온도 1,600°C에서 용해하였으며, 사형으로 제작된 1인치 Y-블록 주형(T25 mm×L210 mm×H130 mm)에 주입하여 시편을 제조하였다. Y-블록 주조품의 열처리 공정은 그림 1에 나타난 바와 같이 1,040°C에서 2시간 유지 후 공냉하여 균질화 열처리를 실시한 후 퀴칭은 940°C에서 1시간 유지 후 수냉하였으며, 템퍼링은 620°C에서 2시간 유지 후 수냉하였다. 경도시험은 각 시험편 표면을 연마한 후 로크웰 경도기(Mitutoyo, Wizhard)를 이용하여 자동 시험 하중 제어 조건으로 다이아몬드 압자를 이용하여 무작위로 3회 측정하였다.

2-2 마모시험 및 분석

마모시험은 시험규격 ASTM G99[8]에 따라 Pin-on-Disc type의 마모시험기(Anton Paar TRB³)를 사용하여 상온 및 건조 상태에서 진행하였다. 시험편의 규격은 디스크 형태로 $\phi 15 \times T7.5$ mm로 가공 후 표면 연마하였으며, 상대재는 SUJ2 재질의 마찰볼($\phi 6$)을 사용하였다. 주요 시험 조건은 track radius 4mm, 하중 1, 5 N, linear speed 5 cm/s 및 sliding distance 300m의 조건으로 진행하였다. 마모흔의 조도 및 표면 미세조직분석은 각각 공조점레이저현미경(CLSM VK Analyzer) 및 주사전자현미경(Quanta 200 F)으로 관찰하였다.

표 1. Ni-Cr-Mo-V, Ni-Cr-Mo 합금의 명칭 및 화학적 조성
Table 1. Alloy designation and chemical composition(in wt.%) of Ni-Cr-Mo-V, Ni-Cr-Mo alloys.

Alloys	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
#1	0.16	0.78	0.52	0.004	0.008	1.046	0.83	1.096	0.116	0.011	bal
#2	0.21	0.66	0.43	0.004	0.009	0.84	0.41	1.43	0.094	0.007	bal
#3	0.19	0.78	1.07	0.004	0.008	0.954	1.13	0.512	0.11	0.015	bal
#4	0.21	0.48	0.96	0.015	0.012	1.11	0.94	0.62	-	0.041	bal

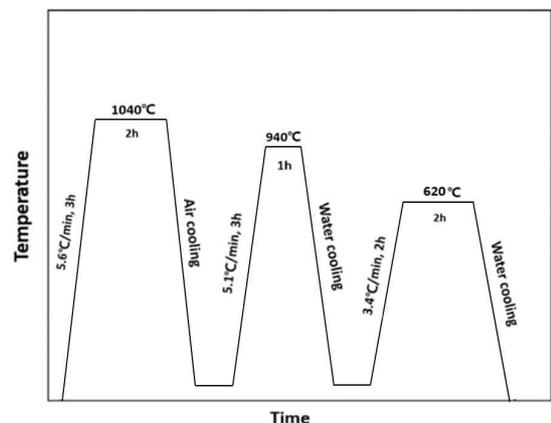


그림 1. Ni-Cr-Mo-V, Ni-Cr-Mo 합금의 열처리 사이클 공정도
Fig. 1. Schematic illustration of heat treatment cycles for Ni-Cr-Mo-V and Ni-Cr-Mo alloys.

III. 결과 및 고찰

3-1 경도시험 결과

각 합금의 평균 경도는 표 2에 나타낸 바와 같이 합금원소 중 Mo의 함금량에 비례하여 Mo의 함금량이 가장 많은 #2의 경도가 39.4±0.9HRc로 가장 높았으며, 다음으로 Mo의 함금량이 많은 #1의 경도는 37.8±0.6로 두 번째로 평균 경도가 높았다. 상대적으로 적은 Mo 함량을 갖는 #3 및 #4의 경도는 각각 33.2±0.5HRc 및 32.4±0.6HRc을 나타내었다.

합금의 경도는 합금 설계 시 합금의 경화능 및 경도특성에 영향을 미치는 합금원소인 Mo의 함금량에 비례한 경도값을 보여 주었으며, 상대적으로 높은 Mo 함량을 갖는 #1 및 #2 합금이 낮은 Mo 함량을 갖는 #3, #4 합금에 비해 높은 경도를 갖는 것을 확인하였다.

3-2 마찰계수의 변화

마찰계수는 마모진행 중에 발생하는 마찰력을 수직력으로 나눈 값으로 상대재의 종류, 접촉면의 상태 및 시험조건 등에 따라 달라지는 상대적 특성이다. 그림 2는 각각 수직하중 1 N 및 5 N의 조건에서 실험 후 얻은 마찰계수의 변화를 나타내었다.

마모시험 초기단계에서 수직하중 1 N에서의 마찰계수는 완만하게 증가하면서 안정화 단계로 접어드는 반면, 수직하중 5 N에서의 마찰계수는 마모시험 초기단계에서 급격하게 증가한 후 감소하면서 안정화 단계로 접어드는 경향을 보이고 있다. 이러한 차이는 고하중 상태에서 마찰 시 표면에 상대적으로 많은 양의 마모편이 생성되고, 생성된 마모편이 표면의 마모를 감소시키는 보호막 역할을 하기 때문으로 사료된다.

수직하중 1 N에서의 마찰계수는 그림 2. (a)에서 볼 수 있듯 #4의 평균 마찰계수가 0.842로 가장 높았고 #2의 평균 마찰계수가 0.690으로 가장 낮았다. #1의 평균 마찰계수는 0.836, #3의 평균 마찰계수는 0.814를 나타내었다. 수직하중 5 N에서의 마찰계수는 그림 2. (b)에서 볼 수 있듯 #3의 평균 마찰계수가 0.696으로 가장 높았고, #4의 평균 마찰계수가 0.557로 가장 낮았다. #1의 평균 마찰계수는 0.619, #2의 평균 마찰계수는 0.588을 나타내었다.

수직하중이 증가함에 따라 평균 마찰계수는 모두 감소하는 경향을 보였으며, 이와 같은 결과는 자동차용 디스크 브레이크의 마모 특성을 연구한 Jeon 등의[9] 연구결과에 따르면 수직하중이 작을수록 접촉면에 형성된 강력한 응착력에 의해 마찰계수가 높아지기 때문에 상대적으로 하중이 증가할수록 평균 마찰계수는 감소하는 것으로 판단된다.

표 2. 열처리 후 시험 합금의 경도

Table 2. Hardness of alloys after heat treatment.

Hardness(HRC)			
Cr-Mo-V(#1)	C-Mo-V(#2)	Mn-Cr-V(#3)	Ni-Cr-Mo(#4)
37.8±0.6	39.4±0.9	33.2±0.5	32.4±0.6

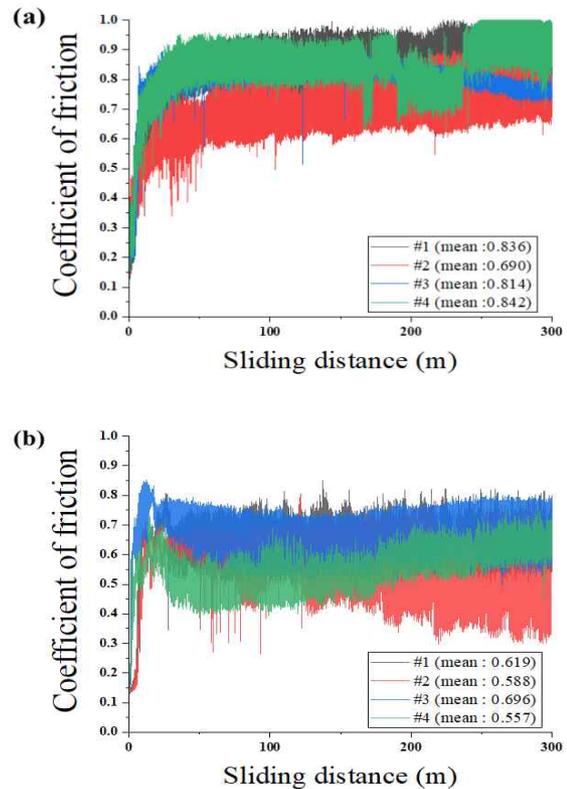


그림 2. 핀온디스크 마모시험 중 마찰계수의 변화

Fig. 2. Variations in coefficient of friction during pin-on-disc wear test; (a) Load 1N and (b) Load 5N.

3-3 마모흔의 형상

그림 3과 그림 4에는 각각 수직하중 1 N 및 5 N으로 시험한 시편을 공초점레이저현미경을 이용하여 분석한 마모흔의 형상을 나타내었다. 마모흔의 깊이는 최대 깊이에서 최소 깊이의 차로 계산하였다. 그림 3 및 그림 4에서 볼 수 있듯 V이 포함된 #1~#3 시편에 비해 V를 포함하지 않은 #4 시편에서 마모흔의 폭이 상대적으로 넓은 것을 확인할 수 있다.

공초점레이저현미경 분석을 통해 측정된 마모흔의 폭 및 깊이를 표 3에 나타내었다. 마모흔과 깊이를 분석한 결과, 수직하중 1 N에서 #1의 마모흔의 폭은 547 μm, 깊이는 6.858 μm였다. #2의 마모흔의 폭은 352 μm, 깊이는 7.617 μm였고, #3의 마모흔의 폭은 504 μm, 깊이는 7.877 μm였다. #4의 마모흔의 폭은 711 μm, 깊이는 8.24 μm였다.

수직하중 5 N에서 #1의 마모흔의 폭은 829 μm, 깊이는

17.113 μm 였다. #2의 마모흔의 폭은 787 μm , 깊이는 14.304 μm 였고, #3의 마모흔의 폭은 531 μm , 깊이는 18.603 μm 였다. #4의 마모흔의 폭은 1017 μm , 깊이는 19.174 μm 였다.

마모량은 표 3에서 알 수 있듯이 수직하중 1 N에서 #1의 마모량은 9 mg이었다. #2의 마모량은 7 mg이었고, #3의 마모량은 9 mg이었다. #4의 마모량은 11 mg이었다. 수직하중 5 N에서 #1의 마모량은 14 mg이었다. #2의 마모량은 12 mg이었고, #3의 마모량은 15 mg이었다. #4의 마모량은 17 mg이었다.

Ni-Cr-Mo-V계 합금(#1~3/1 N)에서는 마모량을 비롯하여 깊이와 폭이 비슷한 경향을 보였으며, Ni-Cr-Mo계 합금(#4/1 N)에서 마모량, 폭 및 깊이에서 높은 경향을 나타내었다. 또한 수직하중 5 N에서의 분석 결과에서도 수직하중 1 N에서의 분석 결과와 동일한 거동으로 Ni-Cr-Mo계 합금에서 다른 시편에 비해 상대적으로 높은 경향을 나타내었다. 이러한 거동을 보이는 원인은 V이 첨가되지 않은 Ni-Cr-Mo계 저합금강인 #4에 비해 내마모성을 향상시키는 합금원소인 V이 첨가된 Ni-Cr-Mo-V계 저합금강인 #1~3에서 상대적으로 우수한 내마모성을 갖기 때문으로 판단된다.

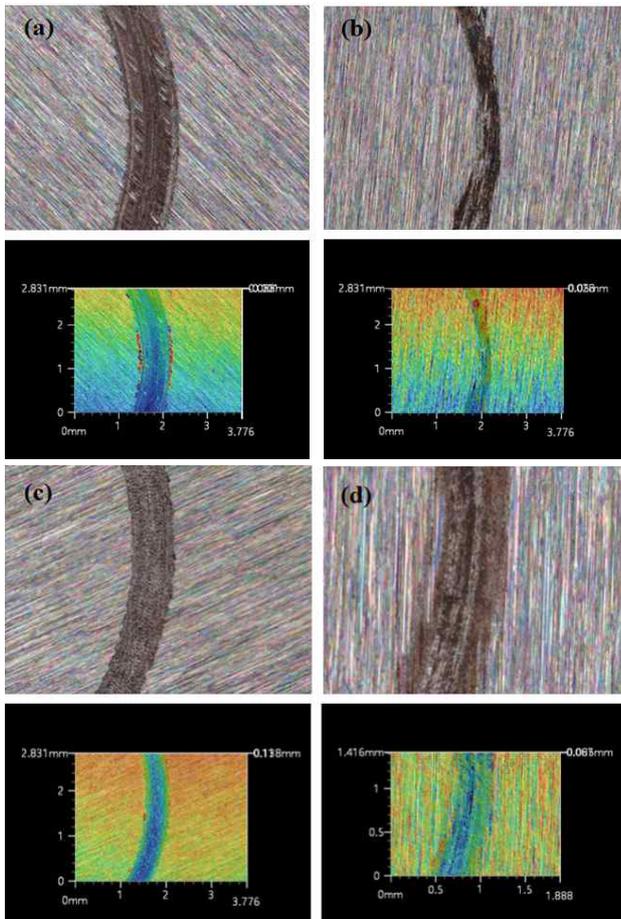


그림 3. 공초점현미경으로 분석한 마모흔의 형상(Load 1 N)
Fig. 3. Shape of wear scars analyzed with CLSM; (a) Cr-Mo-V, (b) C-Mo-V, (c) Mn-Cr-V, (d) Ni-Cr-Mo.

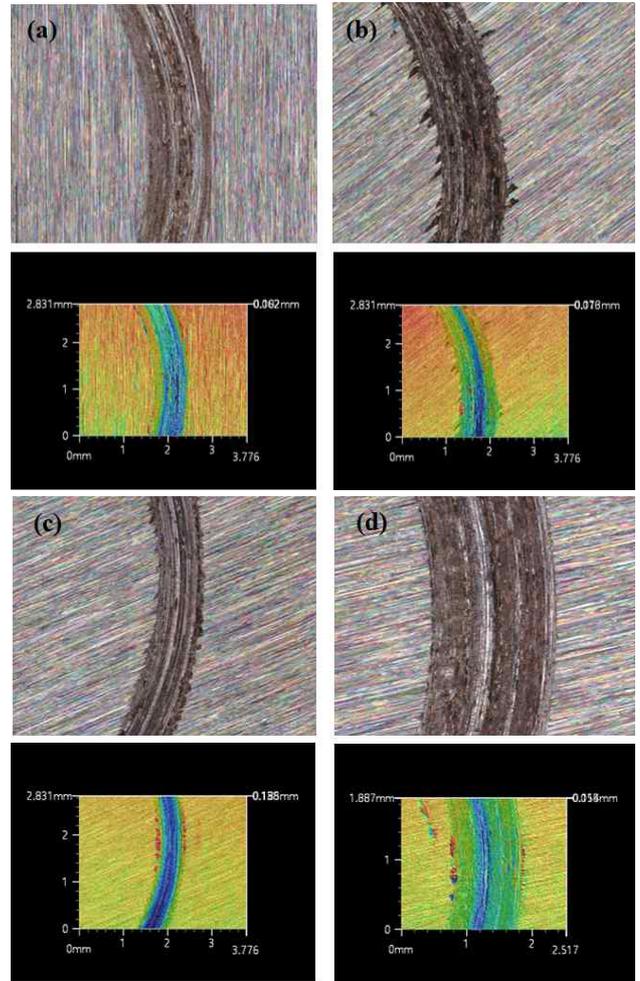


그림 4. 공초점현미경으로 분석한 마모흔의 형상(Load 5 N)
Fig. 4. Shape of wear scars analyzed with CLSM; (a) Cr-Mo-V, (b) C-Mo-V, (c) Mn-Cr-V, (d) Ni-Cr-Mo.

표 3. 저합금강의 마모흔의 폭, 깊이 및 마모량
Table 3. Width, depth and wear loss of wear scars in low alloy steel.

1 N	#1	#2	#3	#4
wear scar width	547 μm	352 μm	504 μm	711 μm
max-min depth	6.858 μm	7.617 μm	7.877 μm	8.24 μm
wear loss	9mg	7mg	9mg	11mg
5 N	#1	#2	#3	#4
wear scar width	829 μm	787 μm	531 μm	1,017 μm
max-min depth	17.113 μm	14.304 μm	18.603 μm	19.174 μm
wear loss	14mg	12mg	15mg	17mg

3-4 표면 미세조직 분석

그림 5에 각각 수직하중 1N 및 5N으로 시험한 시편의 표면

을 주사전자현미경을 이용하여 표면 미세조직을 분석한 결과를 나타내었다.

마모흔의 표면 미세조직은 하중이 증가함에 따라 표면이 상대적으로 깨끗해지는 것을 볼 수 있으며, 이와 같은 결과는 연삭에 의한 마모가 주로 발생하고 있기 때문으로 판단된다.

시편의 주요 마모기구는 지속적인 미끄럼운동으로 인해 마모진행 방향으로 발생하는 패입(ploughing), 높은 응력 하에서 반복접촉이 발생하는 곳에서 발생하는 박리(delamination), 지속적인 마찰로 인해 강하게 응착된 응착부가 슬립면을 따라 파괴되어 나타나는 응착(adhesion) 및 높은 접촉응력에 의해 발생하는 응착 마모와 높은 열이 지속적으로 발생하면서 소성변형이 (plastic deformation)이 관찰되었다.

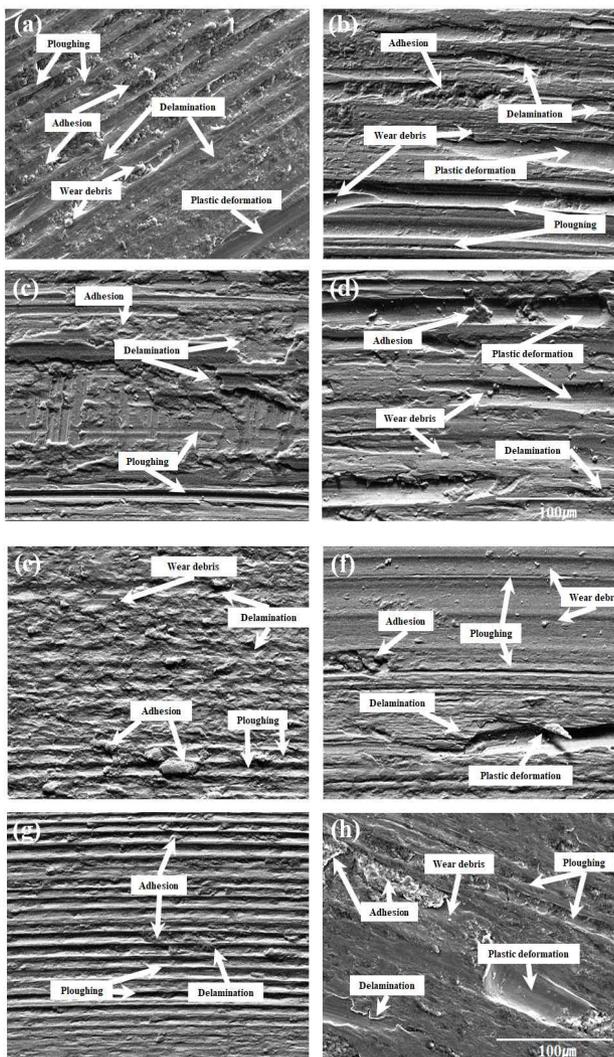


그림 5. 마모시험편의 마모흔에 대한 주사전자현미경 사진
Fig. 5. FE-SEM images of wear scars on wear specimens; (a) Cr-Mo-V; 1 N, (b) C-Mo-V; 1 N, (c) Mn-Cr-V; 1 N, (d) Ni-Cr-Mo; 1 N, (e) Cr-Mo-V; 5 N, (f) C-Mo-V; 5 N, (g) Mn-Cr-V; 5 N, (h) Ni-Cr-Mo; 5 N.

#4에서 #1~3에 비해 소성변형이 우세하게 관찰되었고, 이와 같은 결과는 Ni-Cr-Mo-V강의 표면 마모기구에 대해 연구한 Wang 등의[10] 연구결과에 따르면 합금성분 중 V이 포함된 시편에 비해 Ni-Cr-Mo강에서 내열성이 떨어지기 때문에 상대적으로 소성변형이 우세하게 관찰되는 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 항공기 및 고속전철 등 대형 수송기구의 제동 디스크에 적용되는 Ni-Cr-Mo-V계 및 Ni-Cr-Mo계 저합금강의 합금성분 변화에 따른 마찰/마모특성 및 미세조직의 변화를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경도시험 결과, 경화능 및 경도특성에 영향을 미치는 합금원소인 Mo의 함량이 가장 많은 C-Mo-V강의 경도가 $39.4 \pm 0.9\text{HRc}$ 로 가장 높았으며, Ni-Cr-Mo강의 경도가 $32.4 \pm 0.6\text{HRc}$ 로 가장 낮았다.

(2) 수직하중 1 N에서의 마찰계수는 Ni-Cr-Mo강의 마찰계수가 0.842로 가장 높았고, C-Mo-V강이 0.690으로 가장 낮았다. 수직하중 5 N에서의 마찰계수는 Mn-Cr-V강의 마찰계수가 0.696으로 가장 높았고, Ni-Cr-Mo강의 마찰계수가 0.557로 가장 낮았다. 수직하중이 작을수록 접촉면에 형성된 강력한 응착력에 의해 마찰계수가 상대적으로 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다.

(3) 수직하중이 1 N에서 5 N으로 증가함에 따라 표면에 상대적으로 많은 양의 마모편이 발생하게 되면서 표면의 마모를 감소시키는 보호막이 형성되기 때문에 수직하중 5 N에서의 마찰계수는 마모시험 초기단계에서 급격하게 증가 후 감소하면서 안정화 단계에 이르는 경향을 확인할 수 있었다.

(4) 마모흔의 형상을 분석한 결과 수직하중 1 N에서는 Ni-Cr-Mo강의 마모흔의 폭이 $711 \mu\text{m}$ 로 가장 넓고 깊이는 $8.24 \mu\text{m}$ 로 가장 깊었으며, 마모량은 11mg 으로 가장 많은 것을 확인할 수 있었다. 수직하중 5 N에서도 Ni-Cr-Mo강이 마모흔의 폭은 $1017 \mu\text{m}$, 깊이는 $19.174 \mu\text{m}$ 였으며, 마모량은 17mg 으로 수직하중과 관계없이 V이 첨가되지 않은 Ni-Cr-Mo강에서 상대적으로 높은 값을 보여주었다.

(5) 마모기구는 모든 시편에서 패입, 박리 및 응착마모가 복합적으로 나타났으며, Ni-Cr-Mo에서 다른 합금들에 비해 내열성이 떨어지기 때문에 소성변형 기구가 우세하였다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업(과제번호; 20007282)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

References

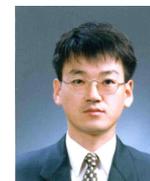
- [1] E. Takeuchi, "The mechanism of wear of spheroidal graphite cast iron in dry sliding," *Wear*, Vol. 19, No. 3, pp. 267-276, 1972. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(72\)90119-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90119-6).
- [2] P. Zhang, F. C. Zhang, Z. G. Yan, et al. "Wear property of low-temperature bainite in the surface layer of a carburized low carbon steel," *Wear*, Vol. 271, No. 5-6, pp. 697-704, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.025>.
- [3] T. T. Matsuo, C. S. Kiminami, W. J. Bottta Fo, and C. Bolfarini "Sliding wear of spray-formed high-chromium white cast iron alloys," *Wear*, Vol. 259, pp. 445-452, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.021>.
- [4] D. Rai, B. Singh, and J. Singh. "Characterization of wear behaviour of different microstructures in Ni-Cr-Mo-V steel," *Wear*, Vol. 263, pp. 821-829, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.014>.
- [5] W. David and R. Stepien. "Control of temper embrittlement in Ni-Cr-Mo-V steel by combining intercritical and low temperature austenitizing heat treatments," *Journal of Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 11, pp. 1951-1963, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02655114>.
- [6] B. C. Goo and C. H. Lim "Development of brake disk materials with Ni-Cr-Mo", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 2, pp. 188-194, 2008. Retrieved from https://railway.or.kr/Publications/sub_04_5.asp.
- [7] M. G. Jo, S. H. Ryu, K. I. Kim, D. E. Kim, et al. "A study on the microstructures and mechanical properties of Ni-Cr-Mo-V low alloy steels", *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 60, No. 4, pp. 251-262, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2022.60.4.251>.
- [8] ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-disk Apparatus, 2017.
- [9] Y. B. Jeon, "Analysis and experimental study on friction and wear characteristics of automobile disc brakes," Master's thesis, Yeungnam University Graduate School, Republic of Korea, 2009. Retrieved from https://yu.dcollection.net/public_resource/pdf/000002041106_20240806161109.pdf
- [10] H. Wang, Z. Wang et al. "Effect of heat treatment on the microstructure and wear resistance of NiCrMoV steel," *Journal of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 585, 2019. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/585/1/012011/meta>.

**이 동 규 (Dong-gyu Lee)**

2023년 2월 : 강원대학교 신소재공학부(공학사)
 2023년 3월~현재 : 인하대학교 신소재공학부(석사과정)
 ※관심분야 : 금속재료 미세조직 분석 및 제어

**김 경 일 (Kyung-il Kim)**

2012년 2월 : 한양대학교 신소재공학부(공학사) 2014년 8월 : 서울대학교 대학원 재료공학부(공학석사)
 2022년 2월 : 서울대학교 대학원 재료공학부(공학박사)
 2018년 12월~현재 : 한국생산기술연구원 지능화부리기술연구소 선임연구원
 ※관심분야 : 금속재료 미세조직 분석 및 제어, 인증체계 및 특성평가

**조 규 섭 (Gue-serb Cho)**

1989년 2월 : 서울대학교 금속공학과(공학사), 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 금속공학과(공학석사)
 1997년 2월 : 서울대학교 대학원 금속공학과(공학박사)
 2002년 8월~현재 : 한국생산기술연구원 지능화부리기술연구소 수석연구원
 ※관심분야 : 금속소재 제조, 금속기 복합 소재 구조 및 성능 평가

**김 경 택 (Kyung-taek Kim)**

1990년 2월 : 인하대학교 금속공학과(공학사), 1992년 2월 : 인하대학교 대학원 금속공학과(공학석사)
 2005년 2월 : 인하대학교 대학원 금속공학과(공학박사)
 1995년 3월~현재 : 한국생산기술연구원 지능화부리기술연구소 수석연구원
 ※관심분야 : 시스템 엔지니어링, 인증체계 및 특성평가