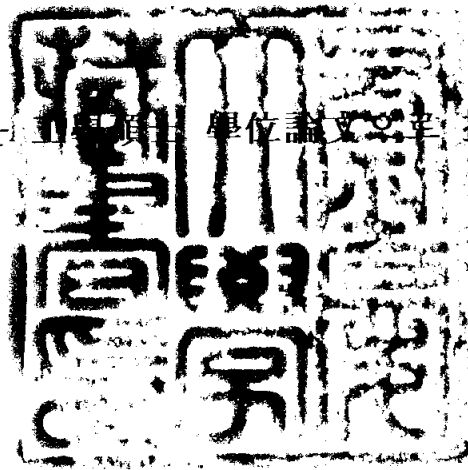


工學碩士 學位論文

CrN 코팅 膜의 트라이볼로지 특성

指導教授 金 亨 資

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2004年 8月

釜慶大學校 産業大學院

機械設計學科

徐 東 源

이 論文을 徐東源의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2004年 8月

主

審

李 守 鍾



委

員

金 榮 大



委

員

金 亨 資



목 차

Abstract	iii
Nomenclatures	v
List of tables	vi
List of figures	vii
1. 서론	1
2. 마찰 · 마모 이론	3
2.1 미끄럼 마찰	3
2.2 응착 마모	4
2.3 연삭 마모	8
2.4 부식 마모	10
3. 실험장치 및 실험방법	13
3.1 시험편	13
3.2 실험장치	18
3.3 실험방법	22
3.4 실험조건	23

4. 실험결과 및 고찰	24
4.1 부식환경하의 마모형태의 분류	24
4.1.1 중마모 형태	24
4.1.2 경마모 형태	27
4.2 온도 변화에 의한 CrN 코팅의 마모 거동	30
4.2.1 증류수 중에서의 거동	30
4.2.2 3% NaCl 수용액 중에서의 거동	32
4.2.3 6% NaCl 수용액 중에서의 거동	34
4.3 재질에 따른 마모 거동	40
4.4 마모면 분석	44
4.4.1 표면구조	44
4.4.2 표면거칠기	47
4.5 마모형태의 천이모델	51
5. 결론	53
References	54

Tribological Behavior of CrN coatings on Tool Steels

Dong - Won Seo

Department of Mechanical Design

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

Cutting tools are normally exposed to hot and cyclically loaded condition. To increase lifetime of the tool and to improve accuracy of the products, the tool surface should be kept sound conditions and free from wear. Thick chromium nitride(CrN) coating was considered for this purpose, especially in corrosive environment, in this study.

CrN film was coated by physical vapor deposition technique and characterized by electron micro probe analysis and scanning electron microscopy etc. The tribological behavior of the CrN coated specimen was examined with a wear tester in comparison with a un-coated specimen.

Wear rate were evaluated in the aqueous solution of several NaCl concentrations(0~6%) and temperatures(35~75°C).

The CrN coated specimen indicated the smallest wear volume of all and it demonstrated very stable tribological characteristics in spite of the change of NaCl concentrations and temperatures. Through this study, the validity of the CrN coating application on machineries working in corrosive environments has been established.

Nomenclatures

d : Depth of wear groove

F : Frictional force

N : Normal force or normal load

H : Hardness of the metal surface

L : Sliding distance

r : Indenter radius

T : Water temperature

V : Sliding velocity

W : Weight of the wear volume

Ws : Specific wear rate

θ : Half apex angle of the conical indenter

μ : Friction coefficient

List of tables

Table 1 Mechanical properties of CrN coatings	16
Table 2 Mechanical properties of specimen	17
Table 3 Chemical composition of specimen	17
Table 4 Test conditions	23

List of figures

Fig. 1 Holm's model of direct contact	4
Fig. 2 Archard's model of direct contact	6
Fig. 3 Two-body and three-body abrasion	9
Fig. 4 Abrasive wear modeling	10
Fig. 5 Dimensions of specimen	14
Fig. 6 Configuration of specimen	15
Fig. 7 Experimental set-up	19
Fig. 8 Detail of wear test rig	20
Fig. 9 Electron microscope	21
Fig. 10 Surface roughness tester	21
Fig. 11 Wear volume as a function of sliding distance ; severe wear type	25
Fig. 12 Worn surface of specimen ; NaCl concentration = 6%, temperature = 75°C, sliding distance = 1447.2m	26
Fig. 13 Wear volume as a function of sliding distance ; mild wear type	28
Fig. 14 Worn surface of specimen ; NaCl concentration =distilled water. temperature = 35°C, sliding distance = 1447.2m	29
Fig. 15 Wear volume as a function of sliding distance and temperature in distilled water	31
Fig. 16 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ; Material = SKH51-CrN, NaCl concentration = 3%	33
Fig. 17 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ; Material = SKH51-CrN, NaCl concentration = 6%	35
Fig. 18 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ;	

Material = SKH51, NaCl concentration = 6%	37
Fig. 19 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ;	
Material = SUS304, NaCl concentration = 6%	39
Fig. 20 Wear volume as a function of sliding distance and materials ;	
Temperarure = 35°C	41
Fig. 21 Wear volume as a function of sliding distance and materials ;	
Temperarure = 60°C	42
Fig. 22 Wear volume as a function of sliding distance and materials ;	
Temperarure = 75°C	43
Fig. 23 Worn surface of specimen ; Material = SKH51-CrN, NaCl concentration =	
6%, temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m	45
Fig. 24 Worn surface of specimen ; Material = SKH51, NaCl concentration = 6%,	
temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m	45
Fig. 25 Worn surface of specimen ; Material = SUS304, NaCl concentration =	
6%, temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m	46
Fig. 26 Surface roughness of worn surface in severe wear ; Material =	
SKH51-CrN, NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding	
distance = 1447.2m	48
Fig. 27 Surface roughness of worn surface in severe wear ; Material = SKH51,	
NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance =	
1447.2m	49
Fig. 28 Surface roughness of worn surface in severe wear ; Material = SUS304	
NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance =	
1447.2m	50
Fig. 29 Wear mechanism modeling	52

1. 서 론

기계구조물 및 기계부품은 마멸에 의한 표면손상으로 인하여 그 정밀도와 기능이 저하하여 수명이 한정되는 일이 많고, 때로는 이것이 파괴의 원인이 되는 경우도 흔히 볼 수 있다.¹⁾

최근, 표면의 손상을 예방하기 위하여 금속의 절삭이나 소성가공과 관련된 산업에서는 금속표면 개선법에 착안하여, 여러 종류의 코팅법이 널리 응용되고 있는데 이는 고품질의 박막을 물리적 및 화학적 방법으로 표면에 증착 및 형성시켜 내식성, 내마모성 및 내열성을 향상시키는 표면 개선법으로서 기존의 작업환경보다 훨씬 가혹한 절삭, 마모 조건하에서 고속절삭가공이나 정밀소성가공의 생산성을 향상시킬 수 있다. 코팅은 공구, 금형, 사출성형 기계부품 및 신소재 등과 같이 내마모성과 재료강도의 향상이 요구되는 분야에 널리 사용되고 있으며 내부식성이 요구되는 산업분야에서도 응용되어 큰 효과를 올리고 있다. 이러한 성공적인 응용 예를 보면, 앞으로 광범위한 기계 부품 및 구조물의 부재에도 이러한 박막의 코팅법이 널리 응용될 것으로 기대된다.

위와 같이 코팅에 관심이 집중되는 이유는 코팅 피막은 내열성이 우수하고 경도가 매우 높으며, 마찰계수가 작아 내마모성이 우수한 성질 외에 화학적으로 안정하기 때문에 열적, 화학적 차단막의 역할을 수행하여 코팅내부의 재료를 보호하기 때문이다.

특히, 질화크롬(chromium nitride, CrN) 코팅은 증착온도가 낮으며 상대적으로 열적 안정성이 높고²⁾, 마모저항이 뛰어나며^{3, 5)}, 또한 부식저항이 높기 때문에^{6, 7)}

다양한 기계요소에서 TiN을 대체할 수 있는 실용적인 대안으로서 그 보급이 확대되고 있다. 음극 방전 증착, 마그네트론 스퍼터링 등 다양한 물리적 증착(physical vapor deposition, PVD)기술이 CrN 코팅을 피복 시키는데 이용되어져 왔다. 이 코팅에 대하여 기계적, 트라이볼로지적, 부식적 특성을 이해하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔지만^{2,9)} 부식 환경의 인자 변화에 따른 CrN 코팅의 트라이볼로지 특성을 면밀하게 검토한 연구는 부족한 실정이다.

부식 마모에 영향을 미치는 인자로는 속도, 경도, 인성, 접촉압력 등의 기계적인 인자와 재료의 조직, 상대재료의 성질, 온도, 윤활제, 산등의 화학적 부식인자가 있다.^{10,11)} 부식환경에서 이용되는 많은 내식성 재료들은 표면에 부동태 피막을 형성함으로써 외부의 부식환경을 효과적으로 차단시켜 내부금속을 보호하고 있다.

이러한 재료들의 표면에 마모와 같은 외부의 물리적인 힘에 의해 부동태 피막이 파괴될 수 있으며, 이러한 피막의 파괴는 재료의 일부분에 집중된 부식과 응력을 유발하여 재료는 예상치 못한 파손을 일으킬 수 있다.¹²⁾

따라서 본 연구에서는 부식 환경에서 CrN 코팅의 트라이볼로지 특성을 규명하기 위하여 CrN 코팅 시편과 코팅되지 않은 시편에 대하여, 부식 환경의 중요 인자인 부식 용액의 농도와 온도 변화에 따른 마찰·마모 거동을 비교 연구하고자 한다.

2. 마찰 · 마모 이론

2.1 미끄럼 마찰

정지하고 있는 두 면이 건조상태에서 서로 접촉하고 있을 때 접촉면의 접선 방향으로 가해진 힘이 어떤 값을 초과하면 전반적인 미끄럼이 발생한다. 이 경우에 실험적으로 다음과 같은 거시적인 법칙이 관찰되었다.

- (i) 두 접촉물체가 서로 접선방향으로 운동할 때 마찰력은 두 면의 상대속도의 반대방향으로 작용한다.
- (ii) 마찰력은 수직력에 비례한다.

$$F = \mu N$$

이 관계로부터 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \frac{F}{N}$$

- (iii) 마찰력은 겉보기 면적과는 무관하다.

“Amontons과 Coulomb의 법칙”으로 알려진 이 법칙들은 건조 미끄럼 마찰을 지배하는 법칙으로서 공학적 응용에 사용되어져왔다.

미끄럼 접촉을 미시적으로 관찰하면 돌기들의 탄성변형 및 소성변형, 경작(ploughing), 그리고 응착 접합부의 전단 등이 발생한다. 마찰의 미시적 모델에서 마찰의 직접적인 원인이 되는 것은 크게 두 그룹 즉, 변형과정과 응착 과정으로 이루어져 있다. 일반적으로 이 두 그룹에 속하는 과정들은 서로 독립적이지 않으나 특별한 상황에서는 하나의 과정이 지배적이어서 다른 과정은 무시될 수 있다.

2.2 응착 마모(adhesive wear)

응착 마모의 이론으로서 중요한 것은 Holm¹³⁾의 이론이며, 그 개요는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 두 고체면 A와 B는 실제접촉을 하고 있는 상태로서 양 재료의 임의의 접촉점에서 두 표면원자 a1은 B면의 원자 b1, b2, . . .와 순차적으로 만나게 되지만 그 사이에 어떤 확률로서 B면의 원자가 제거되어 진다고 가정하면 실제 접촉을 하는 B부분의 면적 A_r 과 하중 P 와의 사이에는

$$P = fA_r \quad (1)$$

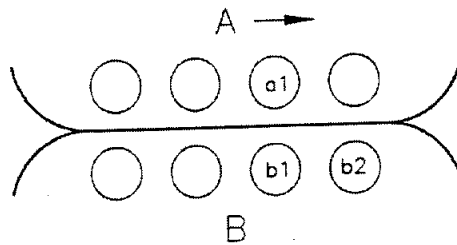


Fig. 1 Holm's model of direct contact

의 관계가 성립한다.

여기서 근접 원자간 거리를 d 라고 하면 접촉 원자수는 $A_r/d^2 (= P/d^2 f)$ 가 되고 미끄럼거리 L 사이에서 만나는 원자수는 L/d 가 된다.

따라서, 미끄럼거리 L 사이의 접 측면 전체에서 만나는 원자총수 N_a 는

$$N_a = \frac{P}{d^2 f} \times \frac{L}{d} \quad (2)$$

이 되며, 서로 만나는 원자가 상대측 원자에 의하여 제거되어지는 확률을 Z 라 하고, 1개의 원자가 제거되어지는 마모체적을 d^3 으로 근사 시키면 결국 미끄럼거리 L 사이에서의 마모체적 V 는 다음과 같이 표시된다.

$$V = Z N_a d^3 = \frac{ZLP}{f} \quad (3)$$

또한 소성유동압력 f 는 연질재료 경도 H_v 와 같기 때문에 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{ZLP}{H_v} \quad (4)$$

즉 마모량은 미끄럼거리 L 과 하중 P 에 비례하고 소성유동압력 f 에 반비례한다는 것이 된다. 그러나 실제 마모분은 원자크기에 비하여 상당히 크다는 점에서 Archard¹⁴⁾는 좀 더 거시적인 마모기구를 제창하였다.

즉 Fig. 2에 표시한바와 같이 반경 a 인 원형 접촉점이 n 개 존재한다고 가정하면 (5)식이 된다.

$$A_r = n \pi a^2 \quad (5)$$

Fig. 2(a)와 같이 접촉상태에서 미끄럼이 일어나면 (b)와 같이 접촉면적이 감소하고 (c)에 이르러 접촉부분의 면적은 “0”으로 되어 분리되지만, 계속하여 (a)와 같은 접촉점이 다시 반복되어 식(5)는 항상 유지된다.

1개의 돌기가 접촉할 때 미끄럼거리는 $2a$ 가 되고 전체 미끄럼거리 L 사이의 접촉점의 총수 N_p 는 $nL/2a$ 가 된다.

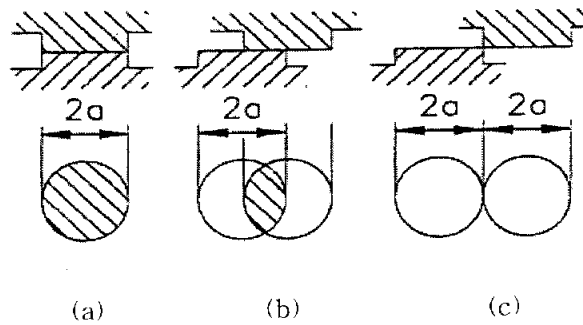


Fig. 2 Archard 's model of direct contact

따라서, N_p 는

$$N_p = \frac{nL}{2a} = \frac{PL}{2\pi f a^3} \quad (6)$$

이 되며, 마모분은 접촉부에서 확률 Z 로서 $2a$ 가 되는 반구상으로 형성된다고 가정하면 미끄럼거리 L 사이의 마모체적 V 는 다음 식으로 주어진다.

$$V = \frac{2}{3} Z N_p \pi a^3 = \frac{ZLP}{3f} \quad (7)$$

즉, 마모량은 식(7)과 같이 LP/f 에 비례하고 이와 같은 개념이 성립하는 마모 현상은 윤활제 등을 포함하지 않는 모든 건조마모의 경우이다.

많은 연구의 실험결과에서 마모체적 V 는 대체로 하중 P 에 비례하여 증가하지만 재료의 소성유동압력 f 나 미끄럼거리 L 과 마모체적 V 와의 관계는 복잡하다.

또한 Holm 및 Archard의 이론에서는 미끄럼속도의 영향이 포함되어 있지 않지만 이것은 접촉점의 온도에 크게 관련하기 때문에 중요하며 철강재료의 건조마모의 경우는 마모분 자체가 마모에 관련하기 때문에 접촉하는 두 물체의 마모기구의 이해를 혼란시킨다.

또한 마찰면의 온도와 마찰속도 구역은 하중을 독립시켜 변하게 하는 것이 실험상 무척 어렵기 때문에 이에 대한 마모현상 해명은 많이 진행되어 있지 않다.

2.3 연삭 마모(abrasive wear)

연삭 마모는 경하고 거친 표면 혹은 경한 돌출부가 있는 표면과 이보다 연한 표면이 서로 미끄럼 운동을 할 때 발생된다. 이 형태의 마모 기구는 연삭 기구와 같이 미소한 칩(micro chip)이나 슬리버(silver)를 생성하며, 결과적으로 연한 재료의 표면에 흠이나 긁힌 자국을 남긴다.

연삭 마모는 두 가지 형태로 나뉘어진다. 두 물체 사이의 마모(two-body wear)와 세 물체 사이의 마모(three-body wear)가 있다. 첫 번째 형태는 침식마모(erosive wear)로 주로 유체나 공기와 함께 분사되는 연삭 입자의 침식작용에 의해 표면의 마모를 유발시키는 것이다. 두 번째 형태인 세 물체 사이의 마모는 금속 가공 공정에서 중요하며, 상대하는 두 표면사이의 윤활제에 포함된 마모입자에 의해 연삭 마모가 유발된다. 따라서 윤활유를 사용할 때에는 생성된 마모입자들을 제거하기 위한 적절한 여과방법이 고려되어야 한다. 연삭 마모에서 마모율은 작용하중에 비례하고 재료의 경도에 반비례한다. 재료의 경도가 증가하면 마모율은 감소하지만 상대 재료 경도의 1.3배 정도에서 포화 상태가 된다. Fig. 3은 두 물체, 세 물체의 연삭 마모를 나타낸 것이다.

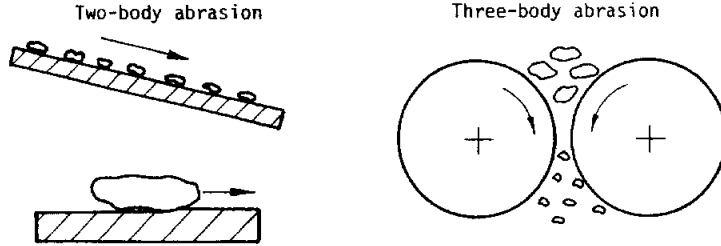


Fig. 3 Two-body and three-body abrasion

연삭 마모율과 경도의 관계를 설명하기 위하여 Fig. 4의 원뿔형 압자 모델을 가정한다. 여기에서 L 은 미끄럼 길이, W 는 작용 하중, r 은 눌러진 자국의 반경, d 는 눌러진 깊이, θ 는 원추의 반각이다. 재료의 경도를 H 라고 하면 경도의 정의에 의하여 다음의 관계식이 성립된다.

$$H = \frac{W}{\pi r^2} \quad (8)$$

$$r^2 = \frac{W}{\pi H} \quad (9)$$

제거된 부분은 삼각 기둥으로 볼 수 있으므로 제거된 재료의 부피 V 는

$$V = \frac{1}{2} (2r) dL = L r^2 \cot \theta \quad (10)$$

식(9)을 식(10)에 대입하여 마모율을 구하면

$$R_w = \frac{V}{L} = \frac{\cot \theta}{\pi} \frac{W}{H} \quad (11)$$

즉, 마모율은 하중에 비례하고 경도에 반비례함을 알 수 있다.

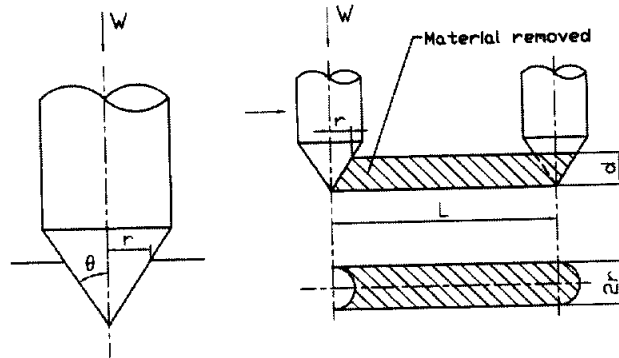


Fig. 4 Abrasive wear modeling

2.4 부식 마모(corrosive wear)

부식 마모는 표면과 주위 환경사이의 화학 작용 혹은 전해 작용에 의해 발생한다. 즉, 부식 마모는 생성된 미세한 부식물들이 마모입자가 되어 떨어져 나오는 현상이다. 접촉면들 사이의 미끄럼 운동이나 연삭 작용에 의해 부식층이 파괴되거나 제거되면, 새로운 부식층의 형성과 제거과정은 계속 반복된다.

주위의 환경조건 하에서 화학작용에 의하여 발생하는 현상이며, 종류가 매우 다양하고 발생원인이 복잡하다. 부식을 잘 유발시키는 물질은 증류수, 해수, 산소, 산성물질 및 공기중의 황화수소나 이산화황 등이 있다.

일반적으로 치밀하고 마찰 계수가 작은 피막은 기계적 저항성이 크며 부식 감량이 적고, 마찰 계수가 크고 두께가 두꺼우며 깨지기 쉬운 피막은 기계적 저항성이

작아 기계적인 작용에 의해 부식 방지 피막이 쉽게 제거되며 피막 자체의 내식성 또한 낮다고 알려져 있다.

부식 마모는 단순히 전해질 용액 중에서 용액의 종류나 농도를 변수로 하는 부식 마모 연구 방법과 용액 중에서 부하 전위를 변수로 하는 연구 방법이 주로 채택되고 있다. 용액 중의 금속은 양극 부하 전위에서는 물론 부하 전위가 없을 경우에도 산화물 형태의 부동태 피막을 가지고 있는 것이 일반적이며, 부식 마모 속도는 이 부동태 피막의 파괴에 의해 마모 속도가 가속된다고 보고되고 있다^{15,16)} 왜냐하면, 이 부동태 피막은 일반적으로 취약하며 파괴된 부분이 보다 더욱 양극화하게 되므로 부식 및 부동태 피막의 탈락에 의한 마모가 가속되기 때문이라 하였다.

부식 마모는 부식과 마모의 복합 작용 및 이들의 상승 작용에 의해 마모 속도가 영향을 받는다. 즉, 부식 환경 및 부식 매질의 종류와 마모 재료의 전기 화학적 특성 등 건조 마모에서는 영향을 미치지 못하는 요소들에 의해서 크게 영향을 받으며 어떤 경우는 부식 마모의 거의 전부가 이들에 의해 일어날 수 있다. Kader 등^{17,18)}은 부식 마모의 구성 요소를 순수 기계적 마모량과 전기 화학적 용해량으로 구성되어 있다고 하여 다음 식으로 나타내었다.

$$W_{\text{corr}} = W_{\text{mech}} + W_{\text{diss}}$$

여기서 W_{corr} 는 총 부식 마모량

W_{mech} 는 순수 기계적 마모량이며

W_{diss} 는 마모시 용액중으로 용해되는 금속 이온의 량이다.

이 때 순수하게 전기화학적 부식에 의한 용해량은 $W_{diss} = k \int i(t)dt$ 에 의해 계산되는데 이는 마모 시험중 전기 화학적 방법으로 시편과 보조전극 사이에 흐르는 전류값을 Faraday 법칙¹⁹⁾에 의해 금속의 감량으로 환산한 값이다.

이 들의 계산에 의하면 부식 마모는 그 구성이 부식과 마모의 단순한 합일 뿐 부식과 마모 사이의 복합 작용, 상승 작용 등의 요소를 구별해 낼 수 없다. 또한, 마모 과정시 측정되는 전류값은 용해량 뿐 아니라 이 때의 산화물 생성량도 있으나 이를 무시하였는데 이 이유를 Kader 및 Yahagi 등^{20,21)}은 철 및 주철의 합금에서 양극 부하 전위하에서 전기화학적 용해량은 총 부식 마모량의 7% 미만으로 얼마 되지 않기 때문이라고 하였으며, Buckley 등²²⁾의 연구(부하 전위가 없을 경우)에서도 용해량은 부식 마모량에 거의 영향을 미치지 않는다고 하였다. 용해량 산정 방법에 있어서 문제점은 Yahagi 등에 의하면 마모를 시키지 않는 상태에서의 분극 데이터로부터 구한 전류 값의 적분 값이 마모시 용해량과 같다고 하여 계산하였다. 이는 마모 과정에 관한 표면 조건의 변화를 고려하지 못한 것으로 실제 마모 거동시 분극곡선은 마모를 시키지 않을 때의 분극곡선과 큰 차이가 있다는 사실을 간과한 것이다.

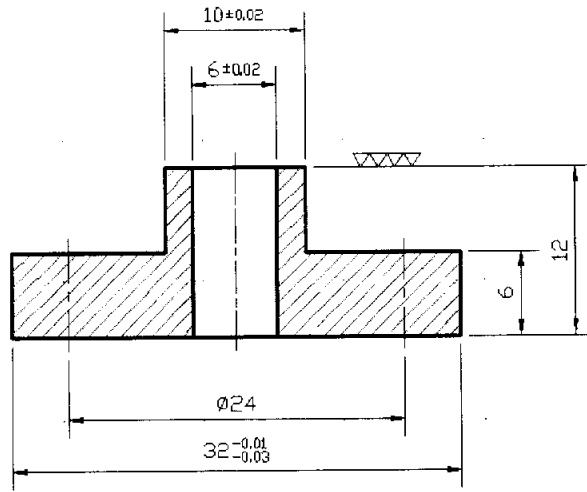
3. 실험장치 및 실험방법

3.1 시험편

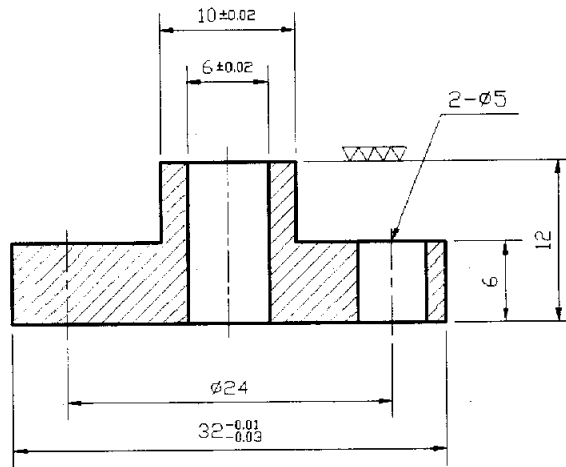
부식환경에서 질화크롬(CrN)코팅의 트라이볼로지 특성을 알아보기 위하여 SKH51 공구강을 사용하여 질화 크롬 코팅 시편(SKH51-CrN), 코팅되지 않은 시편(SKH51)을 준비하였고 상, 하 시편은 동일 재료의 쌍으로 제작하였다. 또한 비교 연구를 위하여 내식성 재료인 SUS304 시편도 준비하였다. Fig. 5에 시험편의 치수를 나타내었고 Fig. 6에 제작된 시험편의 외형을 나타내었다.

CrN 코팅은 진공 용기 중에서 음극방전 PVD 방법에 의하여 증착되었다. 코팅 전에 SKH51 시편의 표면을 폴리싱하고 이물질을 완전히 제거하였다. 코팅조건은 N_2 압력 $7.5 \sim 10^{-3}$ Torr, 코팅온도 $700^{\circ}C$, 바이어스 150V, 방전전류 80~90A 이며 약 2시간 동안 코팅을 수행하였다.

Table 1은 CrN 코팅막의 기계적 성질이며 Table 2, 3은 SKH51 및 SUS304의 기계적 성질 및 화학적 성분이다.

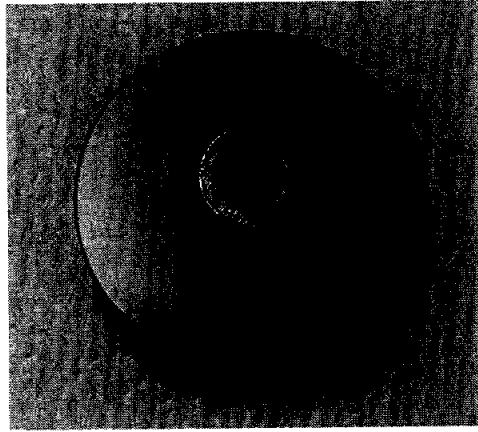


(a) Upper specimen

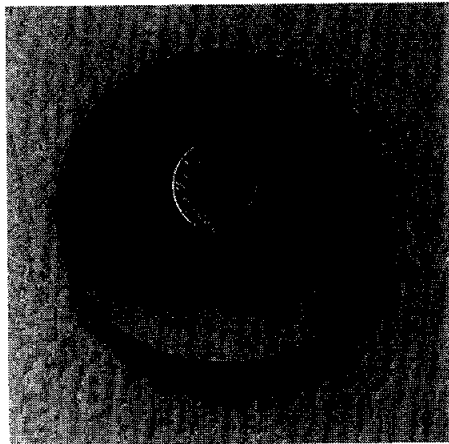


(b) Lower specimen

Fig. 5 Dimensions of specimen



(a) Upper specimen



(b) Lower specimen

Fig. 6 Configuration of specimen

Table 1 Mechanical properties of CrN coatings

Micro hardness (HV 0.05)	1750
Friction Coefficient (dry)	0.5
Coating thickness (μm)	10.08
Internal stress (GPa)	-1.5 ~ -2.0
Coating color	silver gray

Table 2 Mechanical properties of specimen

Mechanical properties	SKH51	SUS304
Hardness (H _{RC} , HB)	H _{RC} 55~57	HB 187
Elongation (%)	0.15	35
Compressive strength (MPa)	5831	-
Tensile strength (MPa)	2370	510
Young's modulus (GPa)	216	148

Table 3 Chemical composition of specimen

Chemical composition (wt.%)	SKH51	SUS304
C	0.73~0.83	≤0.08
Si	≤0.40	≤1.00
Mn	≤0.40	≤2.00
P	≤0.03	≤0.04
S	≤0.03	≤0.03
Cr	3.80~4.50	≤18.00~20.00
Mo	4.50~5.50	-
Ni	-	≤8.00~11.00
W	5.50~6.70	-
V	1.60~2.20	-

3.2 실험장치

Fig. 7은 마모실험장치이며, Fig. 8의(a), (b)는 Fig. 7의 마모실험장치 “A”부분의 개략도를 나타낸 것이다. 마모실험장치를 탁상드릴의 테이블에 고정하고 드릴 척에 결합용 척을 취부하여 시험편이 회전되는 구조이다.

이 척을 통해서 전달되는 회전력과 수직하중이 고정시켜 놓은 하부 시험편에 전달되며, 상부 및 하부 시험편은 부식용액 중의 온도 변화가 가능한 로 속에 장치되어 있고 온도 콘트롤러에 의하여 액온을 20℃에서 90℃의 범위 내에서 임의로 설정할 수 있도록 하였다.

Fig. 9는 가공면의 변질층 및 조직을 관찰하기 위한 전자현미경이고 Fig. 10은 표면거칠기를 측정하기 위한 표면거칠기 측정기이다.

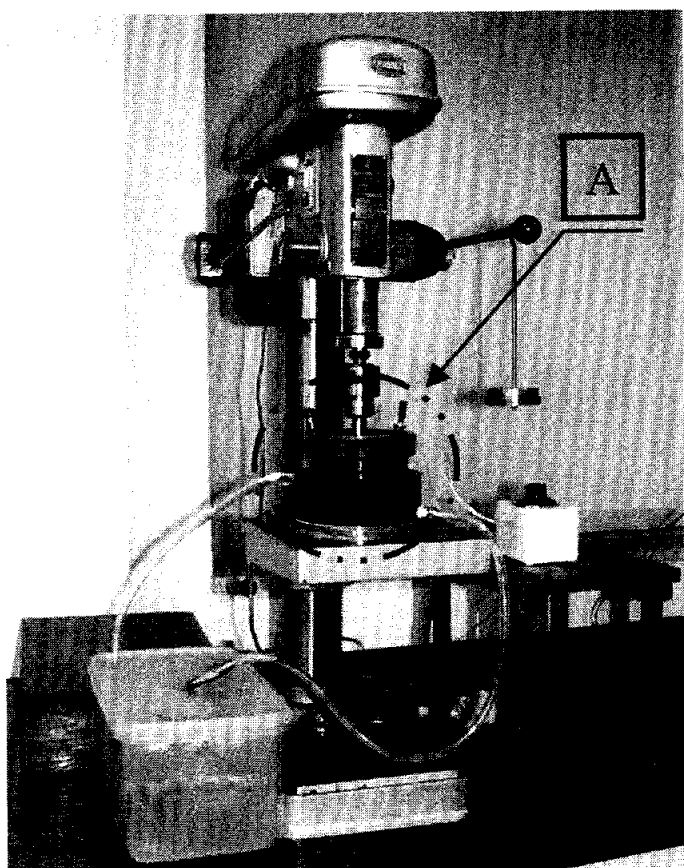
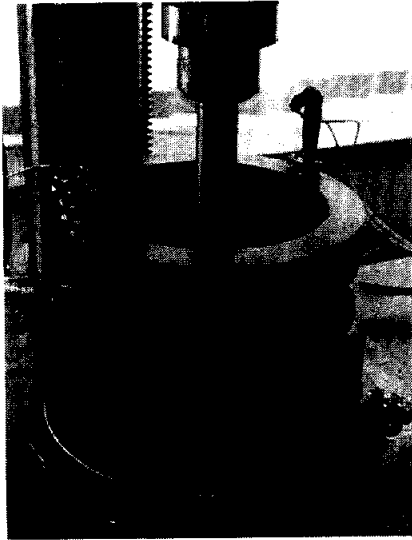
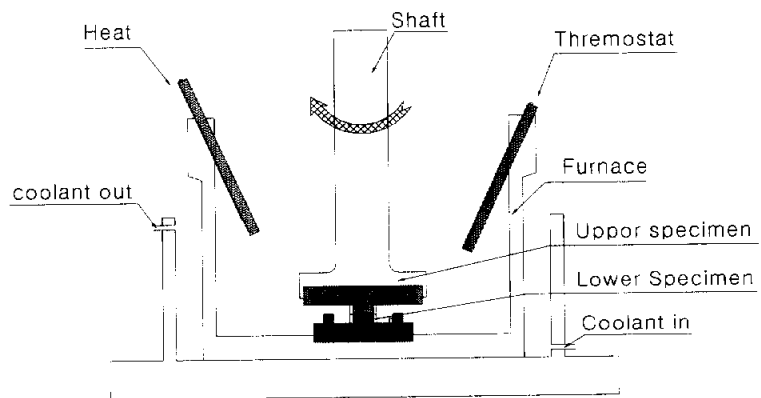


Fig. 7 Experimental set-up



(a) Actual view



(b) Schematic

Fig. 8 Detail of wear test rig

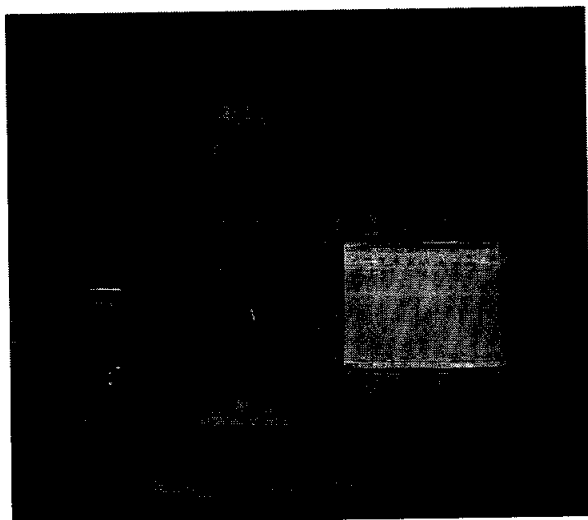


Fig. 9 Electron microscope

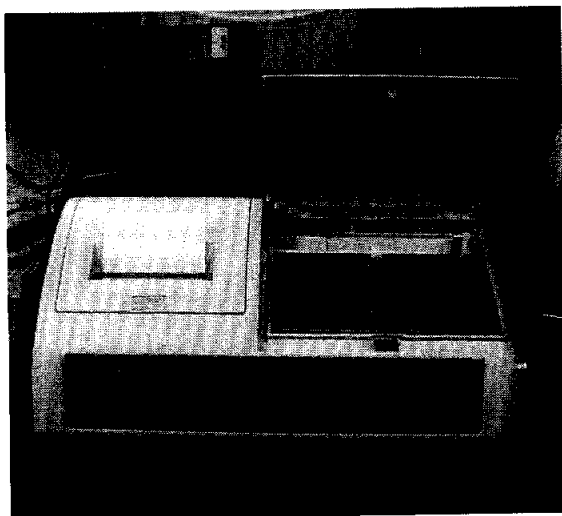


Fig. 10 Surface roughness tester

3.3 실험방법

시험편의 마찰면을 시험개시 전에 최대높이 표면거칠기(R_{max}) $0.5\mu m$ 이하로 폴리싱한 후 증류수로 세정하고 아세톤 안에 약 10분간 초음파 세정한 다음 시험편을 부식 환경하의 로 중에서 상부 시험편은 결합용 척에 장착해서 회전하도록 하였고, 하부 시험편은 로의 바닥면에 장착한 후 고정하여 마모 실험장치의 스핀들에 수직하중과 회전력을 가한다.

시험편의 마모량은 일정 온도 조건마다 일정 미끄럼거리 동안 시험편을 회전시킨 후 상부 및 하부 시험편을 함께 장치에서 빼내어 시험편의 손실중량을 정밀 전자 저울로 측정하여 실험 전과 실험 후의 중량변화를 체적으로 환산하여 구한다.

중량측정 전에 매회 증류수로 세정한 후 아세톤에서 약 10분간 초음파 세정을 행한 다음 손실중량을 측정한다.

모든 실험은 두 번 이상 반복하여 실시하고 평균값을 결과치로 사용하였다.

3.4 실험조건

부식환경하에서 부식용액농도, 액온, 하중, 속도 등의 인자가 마모특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 수직하중 100N, 미끄럼속도를 0.201m/s로 일정하게 하고, 부식액 농도를 증류수, 3% 및 6% NaCl의 3단계로 하였으며, 액온은 35℃, 60℃, 75℃로 변화를 주었고, 최대미끄럼거리는 1447.2m로 하였다.

또 재질에 따른 마모량 변화를 비교하기 위해서 SKH51-CrN, SKH51 및 SUS304 시편에 대하여 농도 6% NaCl과 액온 35℃, 60℃, 75℃를 실험조건으로 선정하였다.

Table 4는 실험조건의 조합을 나타낸 것이다.

Table 4 Test conditions

NO	Normal load (N)	Sliding velocity (m/s)	Material	Concentration of NaCl (wt. %)	Water temperature (℃)
1	100.0	0.201	SKH51 -CrN	Distilled water	35
					60
					75
				3.0	35
					60
					75
				6.0	35
					60
					75
2	100.0	0.201	SKH51	6.0	35
60					
75					
3			SUS304	6.0	35
					60
					75

4. 실험결과 및 고찰

4.1 부식환경에서 마모형태의 분류

본 실험에 있어서의 마모형태는 일정 미끄럼거리에 대하여 마모량이 직선적으로 증가하는 ‘중마모(重磨耗, severe wear)’ 상태가 미끄럼거리 최후까지 계속 이어지는 형태와 중마모 상태가 이어지던 도중에 어떤 미끄럼거리에서 마모량이 대단히 작은 ‘경마모(輕磨耗, mild wear)’ 상태로 천이하는 형태로 되는 두 마모곡선이 얻어진다. 먼저 ‘중마모’ 형태와 ‘경마모’ 형태의 대표적 예를 설명한다.

4.1.1 중마모(重磨耗, severe wear) 형태

Fig. 11은 수직하중을 100N, 미끄럼속도를 0.201m/s로 일정하게 하고 액온 75℃인 6% NaCl 수용액 중에서 마모 실험하였을 때의 마모진행 곡선을 나타낸 것이다. 미끄럼 거리 1447.2m까지 중 마모에서 경마모 상태로의 천이를 나타내지 않고, 거의 선형적으로 중마모 상태가 이어진다. 마모 중 마찰음이 크고 회전축 방향의 진동이 크며 변동적이다. Fig. 12는 액온 75℃인 6% NaCl 수용액 중에서 미끄럼거리 1447.2m까지 실험한 시험편의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상이며, Fig. 12(a)의 전체도에서 알 수 있듯이 마찰면은 연삭 마모의 양상을 나타내고 있어 매우 거칠다. 또 Fig. 12(b)는 마찰표면을 확대한 것으로 코팅 피막이 손상되어 표면의 일부가 박리된 것이 관찰되고 있다.

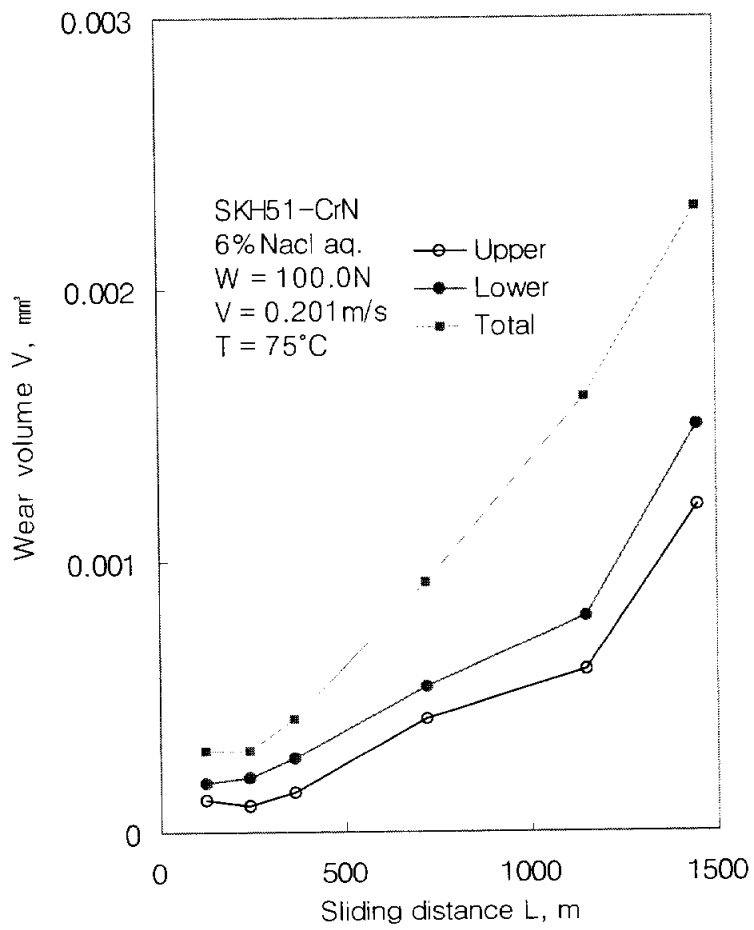
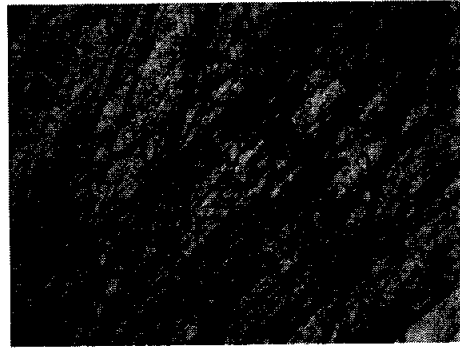
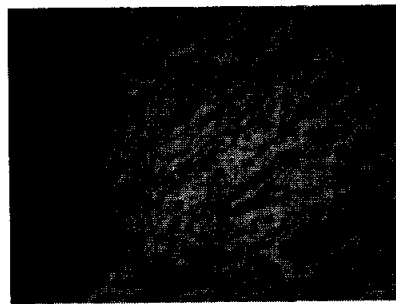


Fig. 11 Wear volume as a function of sliding distance ; severe wear type



Sliding direction

(a) Wear track($\times 50$)



(b) Abrasive particle($\times 50$)

Fig. 12 Worn surface of specimen ; NaCl concentration = 6% temperature = 75°C, sliding distance = 1447.2m

4.1.2 경마모(經磨耗, mild wear) 형태

Fig. 13은 수직하중 100N, 미끄럼속도를 0.201m/s로 일정하게 하고 액온 35℃인 증류수중에서 마모 실험하였을 때의 마모 진행곡선을 나타낸 것이다. 마모 진행곡선은 미끄럼거리 약 700m까지는 마모가 거의 일어나지 않으며, 1200m 부근에서 서서히 마모량이 증가하지만 약 1400m 이후는 마모율이 대단히 낮은 경마모 상태를 나타내고 있으며, 이때의 미끄럼거리를 천이거리라 하며, 이후부터는 마모량이 매우 적게 나타나고 있다. 경마모 형태에 도달하면 회전축 방향의 진동은 일정하며 마찰음도 작다. Fig. 14는 액온 35℃인 증류수 중에서 미끄럼거리 1447.2m까지 실험한 시험편의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상이다.

중마모 경우와 비교하면, 마모 트랙에서 연삭 줄무늬가 적게 나타나고 있으며 코팅 피막의 손상도 심하지 않음을 알 수 있다

Fig. 11과 Fig. 13에서는 상부, 하부 시험편의 마모량을 구분하여 나타내었지만 두 시험편의 마모량의 차가 매우 적으므로 이하에서는 마모량을 전 마모량으로 나타내기로 한다.

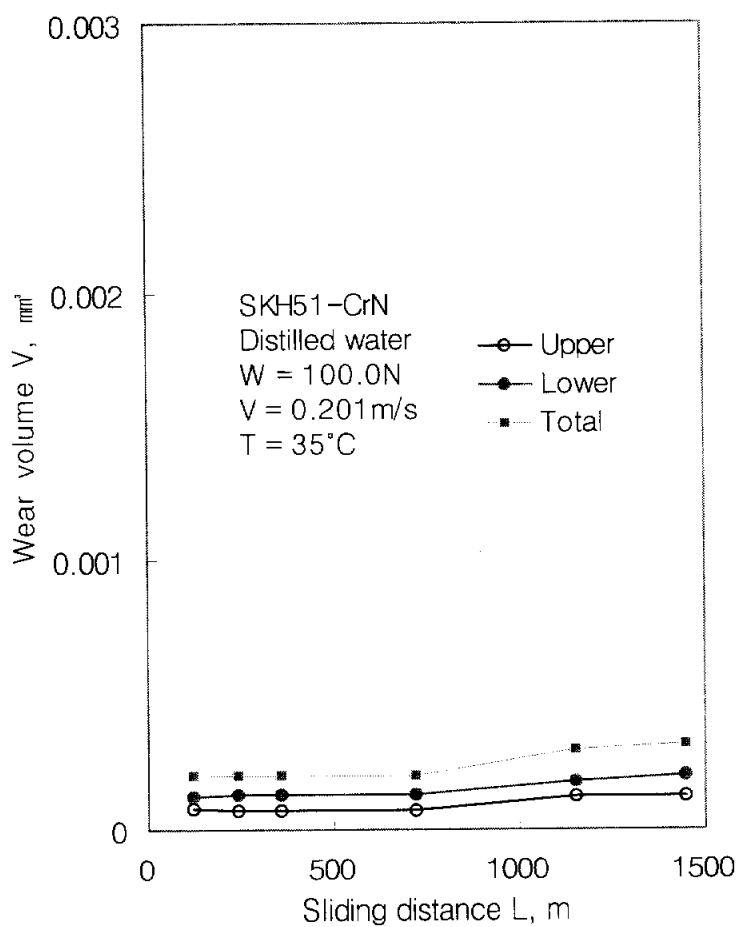
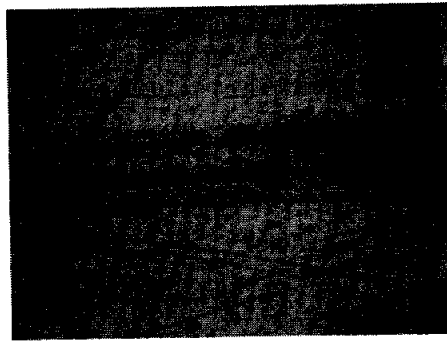


Fig. 13 Wear volume as a function of sliding distance ; mild wear type



Sliding direction

(a) Wear track($\times 50$)



(b) Abrasive particle($\times 50$)

Fig. 14 Worn surface of specimen ; NaCl concentration = distilled water,
temperature = 35°C, sliding distance = 1447.2m

4.2 온도 변화에 의한 CrN 코팅의 마모 거동

4.2.1 증류수 중에서의 거동

Fig. 15는 증류수 중에서 실험한 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 실험 초기에는 마모량이 각 온도별로 거의 같지만 액온 60℃와 75℃인 경우에는 각각 미끄럼거리 400m 부근이내에서 경마모 상태로의 천이가 일어나서 700m부근부터 조금씩 더 경마모 상태가 된다. 액온이 35℃일 때에 미끄럼거리는 약 700m, 60℃일 때는 약 450~520m의 미끄럼거리에서 경마모 상태로 천이한다. 액온이 75℃일 때는 미끄럼거리 400m부터 조금씩 마모 상태가 이어진다. 같은 농도의 수용액 중에서 수용액 온도가 높아지면 경마모 형태보다는 중마모 형태로 천이 되는 것을 알 수 있다.

그러나 액온 75℃일 때, 비록 미끄럼거리 400~1200m부근에서 경마모 상태로의 천이가 일어나지만 천이점까지의 마모량은 액온 35℃와 비교하면 차이가 거의 나지 않은 마모량에 해당함을 나타내고 있다.

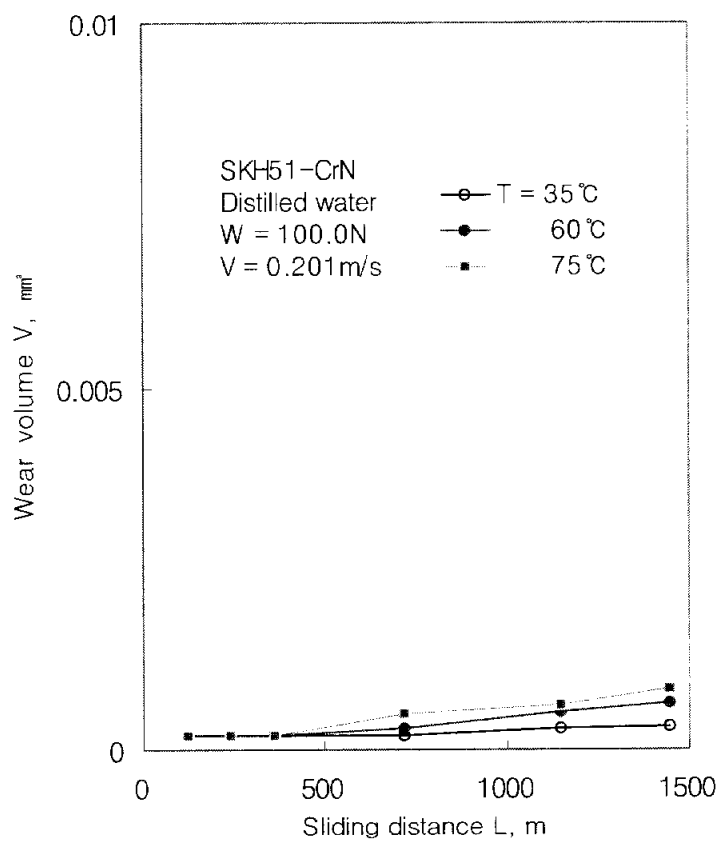


Fig. 15 Wear volume as a function of sliding distance and temperature in distilled water

4.2.2 3% NaCl 수용액 중에서의 거동

Fig. 16은 3% NaCl 수용액 중에서 실험한 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 실험 초기에는 증류수 중의 경우와 거의 같은 마모진행곡선의 경향을 갖지만 액온이 35℃와 60℃에서는 미끄럼거리 700m 부근에서 경마모 상태로 천이하기 시작하여 1400m부근까지 정상적인 경마모로 천이한다. 이것은 증류수 중의 경우보다 조금 짧은 미끄럼거리를 갖는다. 증류수 중에서는 천이가 일어나지 않았던 35℃에서 미끄럼거리 700~1200m부근에서 천이가 일어나고, 75℃의 고온에서는 1200m 부근에서 코팅부분이 조금씩 벗겨지면서 천이가 일어나는 것이 확인되었다. 3% NaCl 수용액 중에서 마찰 실험한 후에는 용액이 황갈색으로 변색하였다.

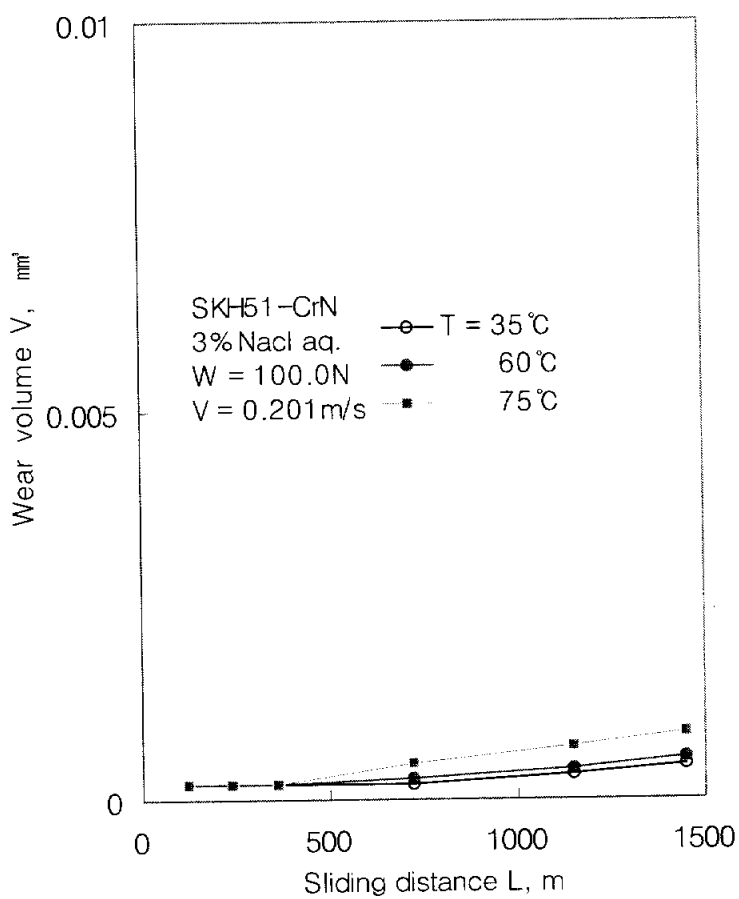


Fig. 16 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ;

Material = SKH51-CrN, NaCl concentration = 3%

4.2.3 6% NaCl 수용액 중에서의 거동

Fig. 17은 SKH51-CrN 재질을 6% NaCl 수용액 중에서 실험한 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 3% NaCl 수용액 중의 경우보다는 현저히 마모량이 증가되었으며, 액온이 35℃에 있어서는 미끄럼거리가 비교적 짧은 400m부근이내에서 경마모 상태로 천이하기 시작하여 미끄럼거리 1400m부근까지 조금씩 마모량이 증가된다. 액온 60℃에 있어서는 3% NaCl 수용액 중의 경우와 비교하면 조금 더 심한 모양으로 천이가 일어나며, 천이가 일어나는 미끄럼거리는 3% NaCl 수용액 중의 것보다 조금 더 긴 420~1400m부근이며, 35℃와 60℃의 경우, 증류수 및 3% NaCl 수용액 중의 것 과 비교하면 마모 역으로의 천이하는 다소 긴 미끄럼거리에서 일어났다. 6% NaCl 수용액 중에서 마모 실험한 후 용액의 색깔은 3% NaCl 수용액 중의 경우보다 진하게 변색하였다.

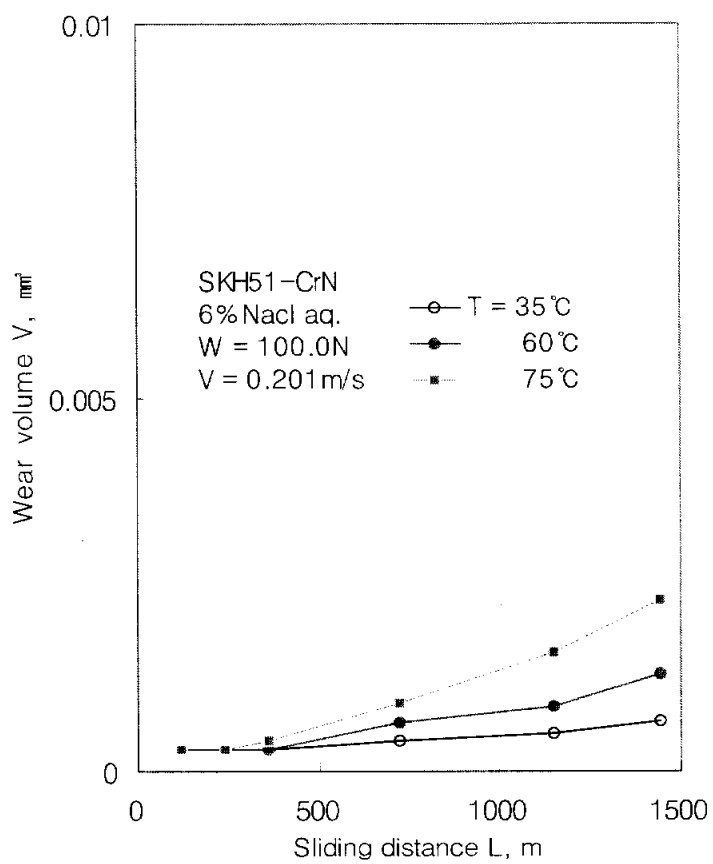


Fig. 17 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ;

Material = SKH51-CrN, NaCl concentration = 6%

Fig. 18은 SKH51 재질을 6% NaCl 수용액 중에서 실험한 마모진행곡선을 나타낸 것이다. SKH51-CrN 재질과 비교하면 6% NaCl 수용액 중의 액온이 35℃에 있어서는 미끄럼거리가 비교적 짧은 250m부근이내에서 경마모 상태로 천이하기 시작하여 미끄럼거리 400m부근에서 마모가 거의 일어나지 않으며 1200m 부근에서 마모형태로 천이한다. 액온 60℃에 있어서는 미끄럼거리가 짧은 300m 부근에서 천이가 일어나서 400m에서는 마모가 없다가 1400m까지 중마모로 천이되었다. 75℃에서는 더욱 짧은 240m 부근에서 천이가 일어나서 400~1400m까지 중마모로 천이가 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

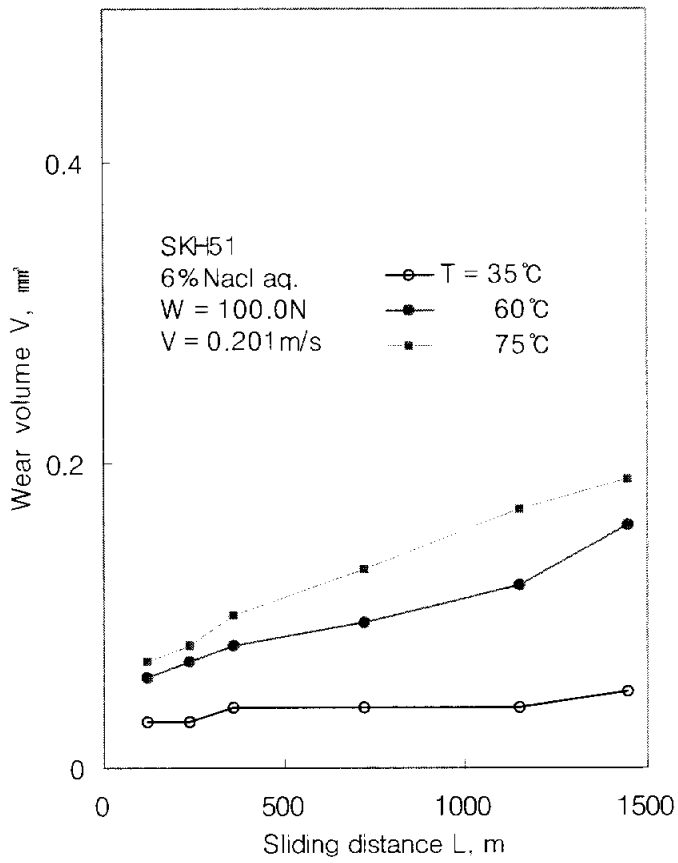


Fig. 18 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ;

Material = SKH51, NaCl concentration = 6%

Fig. 19는 SUS304 재질을 6% NaCl 수용액 중에서 실험한 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 액온이 35℃와 60℃에 있어서는 미끄럼거리 400m까지는 중마모 형태를 유지하며 이후부터는 경마모 상태로 천이한다. 75℃에서는 1400m부근까지 급속도로 중마모가 지속되는 것을 알 수 있고 액온의 변화에 따라서 마모상태의 천이가 많이 변화되는 것을 알 수 있다.

또한 SUS304는 내식성 재질로 알려져 있지만 SKH51-CrN 재질에 비하여 마모량이 현저하게 많은 것을 알 수 있다.

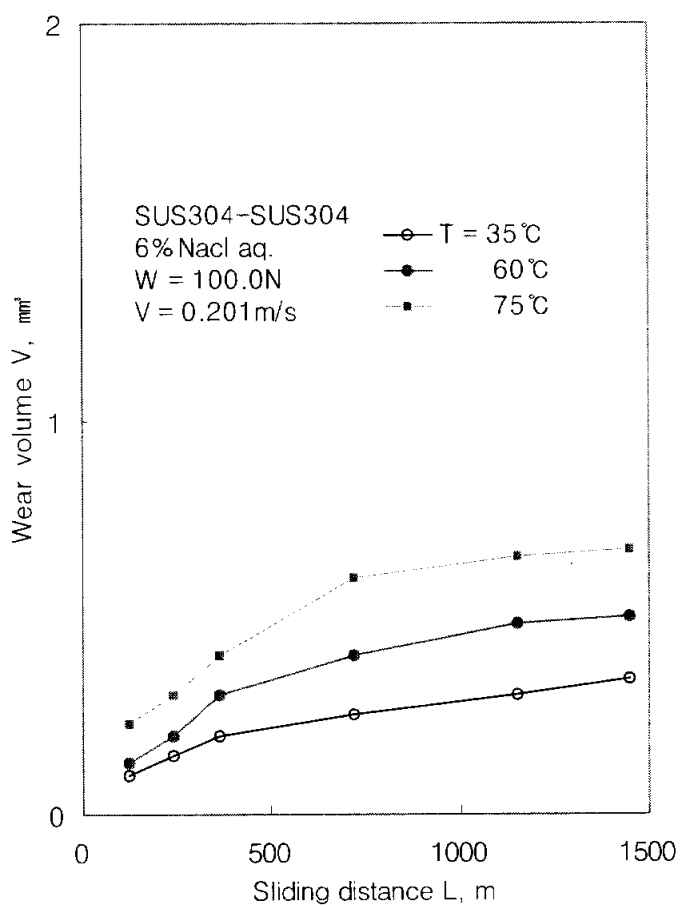


Fig. 19 Wear volume as a function of sliding distance and temperature ;

Material = SUS304, NaCl concentration = 6%

4.3 재질에 따른 마모 거동

수직하중 100N, 미끄럼속도 0.201m/s, 농도 6%로 일정하게 하고 재질별 SKH51-CrN : SKH51 : SUS304에 대해 액온 35℃, 60℃, 75℃의 변화에 의해서 재질별 마모량을 비교한 것이다.

Fig. 20은 액온 35℃, 6% NaCl 수용액 중에서 실험한 재질별 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 그래프에서 보면 재질별로 마모량을 비교했을 때 SKH51-CrN이 다른 재질보다 마모량이 적어 내마멸성이 강하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 21은 액온 60℃, 6% NaCl 수용액 중에서 실험한 재질별 마모진행곡선을 나타낸 것이다. SKH51-CrN 재질이 다른 재료와 비교하면 현저히 마모가 잘 안 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 22는 액온 75℃, 6% NaCl 수용액 중에서 실험한 재질별 마모진행곡선을 나타낸 것이다. SKH51-CrN 재질은 다른 재질과 비교하면 마모가 잘 안 된다는 것을 그래프로 확인 할 수 있으며 35℃, 60℃의 경우와 비교하면 마모량이 증가한 것을 확인할 수 있다.

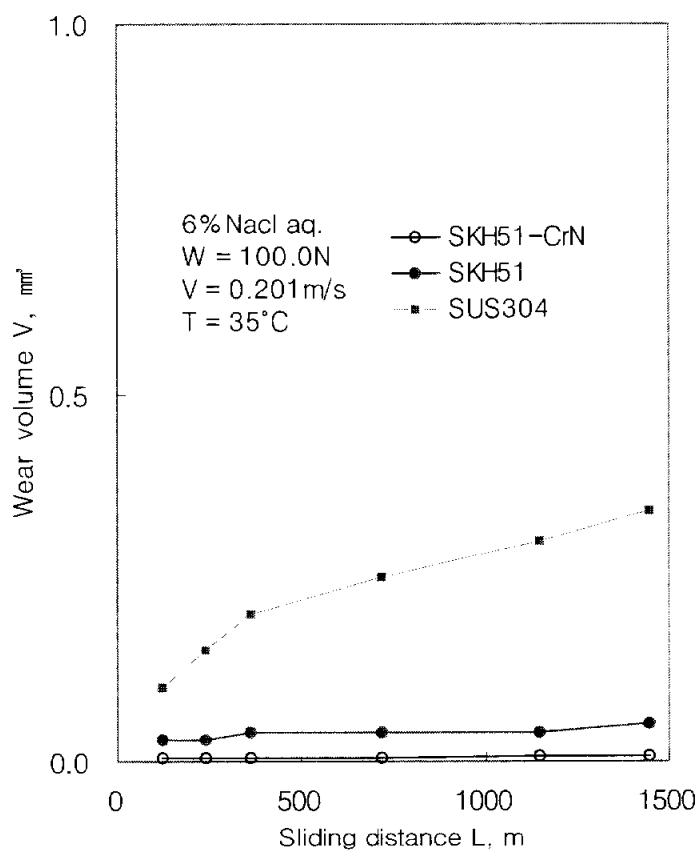


Fig. 20 Wear volume as a function of sliding distance and materials ;

Temperarure = 35°C

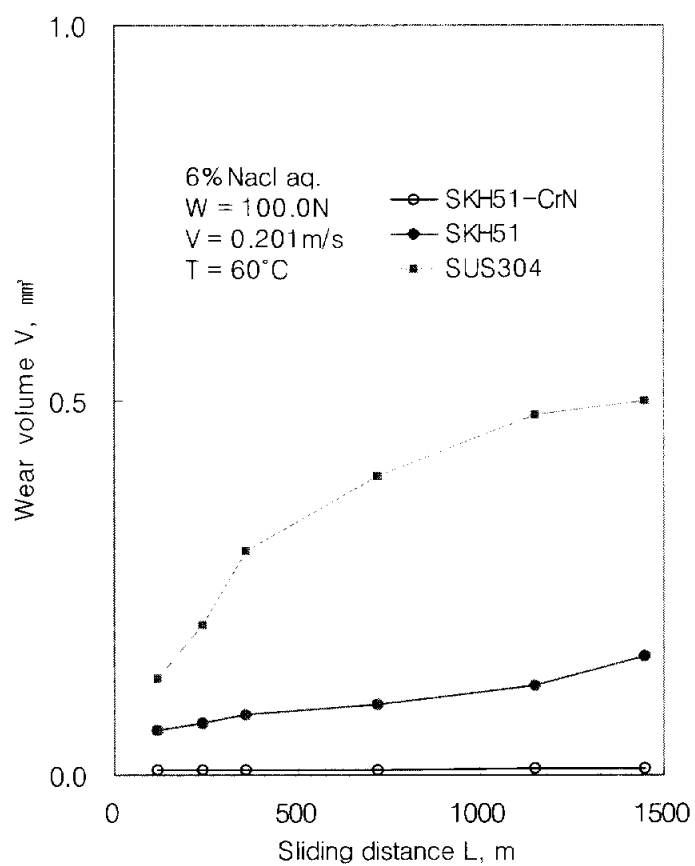


Fig. 21 Wear volume as a function of sliding distance and materials ;

Temperarure = 60°C

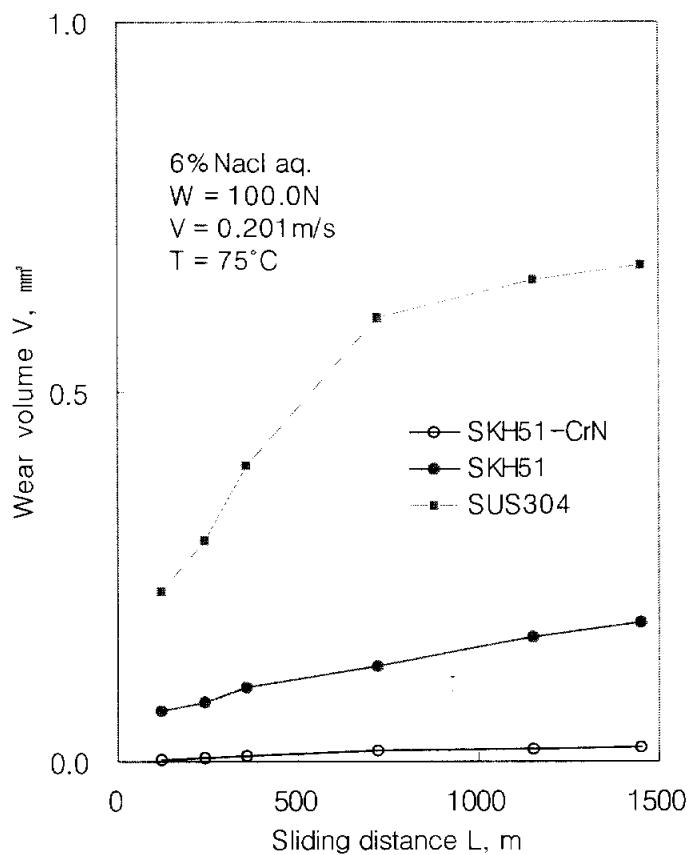


Fig. 22 Wear volume as a function of sliding distance and materials ;

Temperarure = 75°C

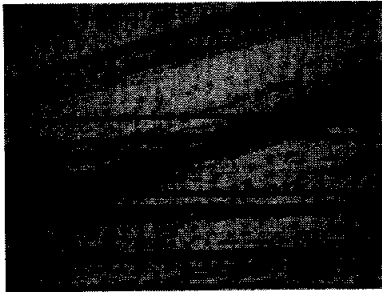
4.4 마모면 분석

4.4.1 표면구조

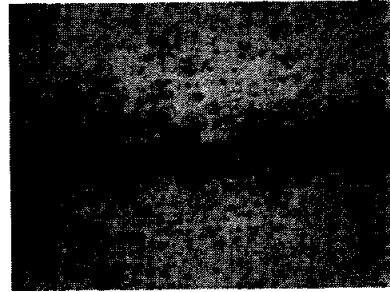
Fig. 23은 수직하중을 100N, 미끄럼속도를 0.201m/s로 일정하게 하고 미끄럼거리 1447.2m 액온 60℃인 6% NaCl 수용액 중에서 마모 실험하였을 때의 SKH51-CrN의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상이다. 마모트랙에는 연삭 줄 무늬가 생기면서 코팅피막이 손상되어 있고 마찰면은 코팅피막이 손상된 부위에 표면의 일부가 박리된 형상이 거칠게 나타나고 오목부에서 이착물이 관찰되고 있다.

Fig. 24는 상기와 동일 조건으로 마모 실험하였을 때의 SKH51의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상이다. 마모트랙에는 연삭 줄 무늬가 뚜렷하게 나타나고 있으며 마찰면은 마모에 의해서 띠 형상이 거칠게 나타나고 오목부에서 이착물이 관찰되고 있다.

Fig. 25는 상기와 동일 조건으로 마모 실험하였을 때의 SUS304의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상이다. 표면에는 부식생성물의 입자를 확대한 형상으로 마찰면(a)와 이착물(b)을 나타내고 있다. 마찰면은 마모에 의해서 움푹 파진 형상이 거칠게 나타나고 오목부에서 이착물 응착된 것이 관찰되고 있다.

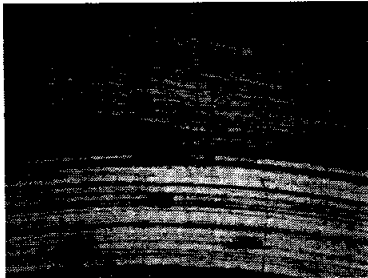


(a) Wear track($\times 50$)

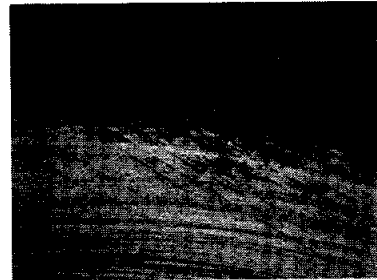


(b) Adhesive particle($\times 50$)

Fig. 23 Worn surface of specimen ; Material = SKH51-CrN, NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m

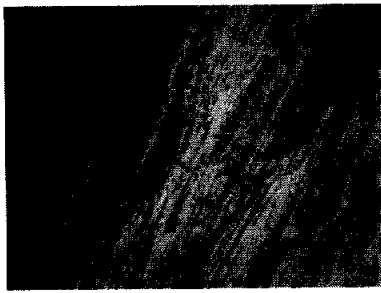


(a) Wear track($\times 50$)



(b) Adhesive particle($\times 50$)

Fig. 24 Worn surface of specimen ; Material = SKH51, NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m



(a) Wear track($\times 50$)



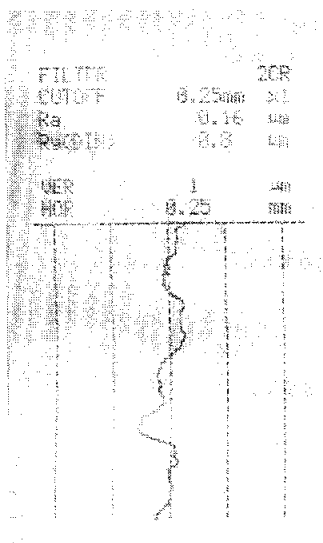
(b) Adhesive particle($\times 50$)

Fig. 25 Worn surface of specimen ; Material = SUS304, NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m

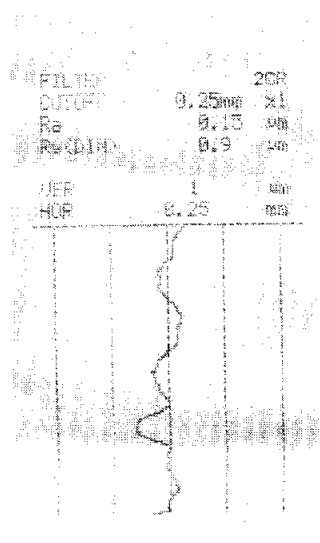
4.4.2 표면거칠기

Fig. 26-28은 수직하중 100N, 미끄럼속도 0.201m/s, 액온 60℃ 인 6% NaCl 수용액 중에서 미끄럼거리 1447.2m로 실험하였을 때 재질별 마모역에 대한 표면거칠기 단면곡선을 나타낸 것이다. Fig. 26은 재질 SKH51-CrN에 대한 단면곡선이며 상부, 하부 시험편의 최대높이 표면거칠기(Rmax) 평균값이 0.85 μ m로 측정되었다.

Fig. 27은 SKH51의 경우이며 상부, 하부 시험편의 최대높이 표면거칠기 평균값이 1.45 μ m로써 코팅된 시편보다 높게 나타났다. Fig. 28에서 재질 SUS304일 때의 상부, 하부 시험편의 최대높이 표면거칠기 평균값은 7.8 μ m로써 가장 높은 값을 보였다. 즉, 마모가 되기 어려운 시편일수록 낮은 표면거칠기가 측정되었다.

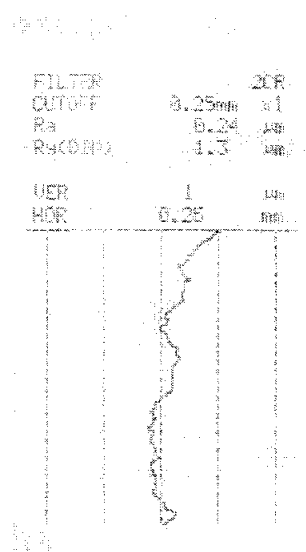


(a) Upper specimen

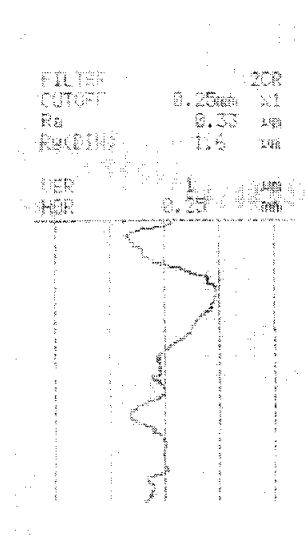


(b) Lower specimen

Fig. 26 Surface roughness of worn surface in severe wear ; Material = SKH51-CrN, NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m

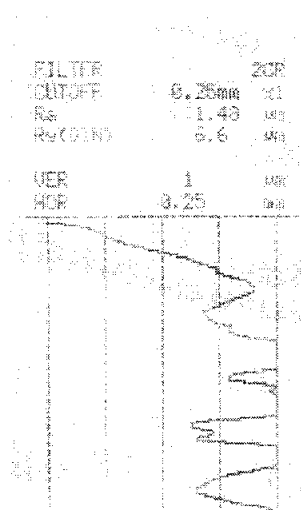


(a) Upper specimen

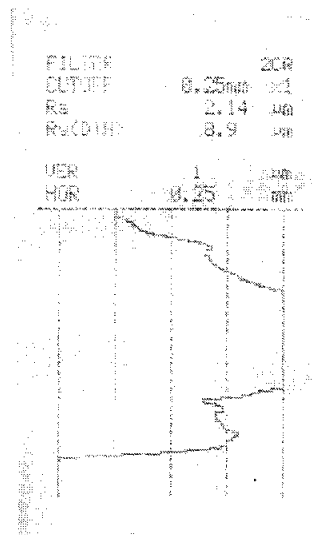


(b) Lower specimen

Fig. 27 Surface roughness of worn surface in severe wear ; Material = SKH51,
 NaCl concentration = 6%, temperature = 60°C, sliding distance =1447.2m



(a) Upper specimen



(b) Lower specimen

Fig. 28 Surface roughness of worn surface in severe wear ; Material = SUS304

NaCl concentration = 6% temperature = 60°C, sliding distance = 1447.2m

4.5 마모형태의 천이모델

내식성 재료 SUS304와 공구강 재료인 SKH51 및 SKH51 표면에 CrN 코팅한 것을 수직하중 100.0N, 미끄럼속도 0.201m/s로 일정하게 하고 증류수, 3% 및 6% NaCl 수용액 중에서 각각 액온을 35℃, 60℃, 75℃로 하여 마찰 실험한 결과, 중마모 상태에서 경마모 상태로의 천이가 일어나는 마모형태의 모델을 다음과 같이 생각 할 수 있다.

Fig. 29(a),(b)와 같은 마찰 초기에는 부식생성물은 존재하지 않고, 동일 금속면의 접촉으로서 마모 상태는 이착, 응착에 의해 표면이 거칠게되는 중마모 상태를 나타내며, Fig. 29(c)는 스테인레스강의 부동태 피막의 결손부에 부식물의 생성을 나타내고, Fig. 29(d)에서는 마모가 진행함에 따라 마찰면에 흡착한 생성물 양이 증가하지만 계면에 부착해도 곧 마찰에 의해 제거되어 오목부분에 집적한다.

Fig. 29(e)는 집적한 생성물이 포화하는 오목부가 발생되어 그 결과, 연속적으로 접촉면에 생성물이 공급되는 과정으로써 이 상태가 경마모 천이상태이다. Fig. 29(f)는 오목부에서 넘쳐 볼록부에 부착한 생성물은 여기에서 하중을 받으면서 원주방향으로 밀려서 오목부로 이동하는 과정이며, 이때 생성물에 의해 오목면은 보전된다.

Fig. 29(g), (h)는 하중을 받던 생성물로 포화하여 오목부가 없어지고 폴리싱된 마찰면 비율이 높아져 완전한 경마모 상태로 된다.

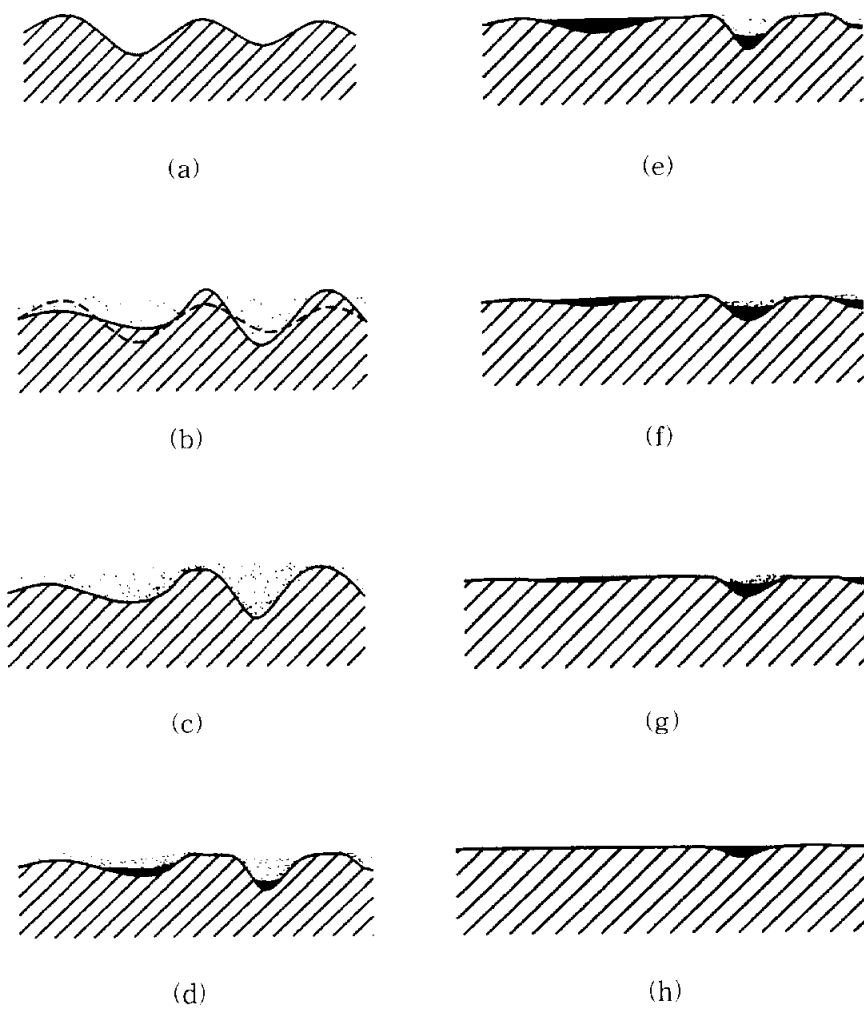


Fig. 29 Wear mechanism modeling

5. 결 론

부식 환경에서 질화크롬(CrN) 코팅의 트라이볼로지 특성을 규명하기 위하여 SKH51 공구강을 사용하여, 질화크롬 코팅 시편, 코팅되지 않은 시편, 그리고 비교 연구를 위하여 SUS304 시편에 대하여 부식 용액의 농도를 0%, 3%, 6%, 온도를 35℃, 60℃, 75℃로 변화시킨 부식 환경에서 마모 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모든 마모 실험조건에서, 질화크롬이 코팅된 SKH51-CrN 시편이 가장 적은 마모량을 보였으며 온도와 농도의 증가에도 불구하고 안정적인 마모 특성을 나타내었다.
- (2) 코팅되지 않은 SKH51 시편과 SUS304 시편은 수용액의 농도와 온도의 영향을 받아 ‘중마모(重磨耗, severe wear)’ 상태에서 ‘경마모(經磨耗, mild wear)’상태로 천이하는 마모형태를 보였으나, SKH51-CrN 시편은 일정 미끄럼 거리에서 천이하지 않고 경마모 상태가 지속되는 것을 알 수 있었다.
- (3) 재질에 따른 마모 거동을 비교한 바, 내식성 재질로 알려진 SUS304 시편에 비하여 SKH51-CrN 시편이 현저하게 낮은 부식 마모 특성을 보였으므로 본 연구를 통하여, 부식 환경에 사용되는 기계부품 또는 구조물에 질화크롬 코팅의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

References

- (1) I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin and V. S. Kombalov : Friction and Wear, Pergamon
- (2) Navin ek and Panjan, Oxidation resistance of PVD Cr, Cr-N and Cr-N-O hard coatings, pp.244-248 (1993)
- (3) Teisuke sato, A crossed-cyling for evaluation of Wear and tribological properties of coated tools, pp.95-100 (1994)
- (4) S.H.Yao, Y.L.Su, The tribological potential of CrN and Cr(C, N) deposited by multi-arc PVD process, Wear, 212, pp.85-94 (1997)
- (5) Z.P.Huang, Y.Sun and T.Bell, Friction behaviour of TiN, CrN and (TiAl)N coatings, Wear, 173, pp.13-20 (1994)
- (6) G.Bertrand, H.Mahdjoub, C.Meunier, A study of the corrosion behaviour and protective quality of sputtered chromium nitride coatings, Wear, 126, pp.199-209 (2000)
- (7) C.Liu, Q.Bi, A.Matthews, EIS comparison on corrosion performance of PVD TiN and CrN coated mild steel in 0.5 N NaCl aqueous solution, Wear, 43, pp.1953-1961 (2001)
- (8) C.Liu, A.Leyland, Q.Bi, A.Matthews, Corrosion resistance of multi-layered plasma-assisted physical vapour deposition TiN and CrN coatings, Wear pp.164-173 (2001)

- (9) S. Ortmann, A.Savan, Y.Gerbig, H.Haefake, In-process structuring of CrN coatings, and its influence on friction in dry and lubricated sliding, *Wear*, 254, pp.1099-1105 (2003).
- (10) 李鎭烈 : 케비테이션에 의한 베어링재의 腐蝕侵蝕 舉動에 관한 研究, 釜山水山大學校 大學院 博士學位 論文. pp.1-5, (1991).
- (11) 朴東基 : STD11재의 磨耗腐蝕 特性에 관한 研究, 釜山水山大學校 大學院 碩士學位 論文, pp.6-8, (1994).
- (12) K. Y. Kim, S. Bhattacharyya, and V. S. Agarwala, *Wear of Materials*, Proc. 3rd Int. Conf. on Wear of Materials, ASME, San Francisco, pp.772, (1981).
- (13) Holm, R., "Electric Contacts," Hugo, Gerbers Fellas, pp. 214, 1946.
- (14) J.F.Achard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", *J. Appl. Phys.* pp. 981-988 (1953)
- (15) I. Iwasaki, S. C. Riemer, J. N. Orlich and K. A. Natarajan : corrosive and abrasive wear in ore grinding, *Wear*, 103, pp.253-267 (1985).
- (16) A. W. Bachlor, G. W. Stachowiak : predicting synerism between corrosion and abrasive wear, *Wear*, 123, pp.281-291 (1988).
- (17) H. Abd-El-Kader and S. M. El-Raghy : Wear-corrosion mechanism of stainless in chloride media, *corr.Sci*, 26, pp.647-653 (1986).
- (18) S. M. El-Raghy, H. Abd-El-Kader and M. E. Abou-El-Hassan : Electro-chemistry of abrasion corrosion of low alloy steel in 1% NaCl solution, *corrosion*, 40, pp.60-61 (1984).

- (19) H. H. Uhlig : "Corrosion and corrosion control", John Wiley & Sons Inc, New York, pp.6, (1976).
- (20) Y. Yahagi and Y. Mizutani : Corrosive wear of cast iron in sulphuric acid, J. Tribol., 109, pp.238-242 (1987).
- (21) Y. Yahagi and Y. Mizutani : Corrosive wear of carbon and austenitic stainless steel in chloride media, Wear, 110, pp.401-408 (1986).
- (22) K. Miyoshi and Buckley : Interaction of sulfuric acid corrosion and mechanical wear A.S.L.E. Trans, 29, pp.43-51 (1984).

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 격려를 해 주신 김형자 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 가운데서도 본 논문을 심사하시면서 완성도를 높일 수 있는 많은 조언과 세심하게 수정 보완해 주신 이수종 교수님, 김영대 교수님, 구영필 교수님 그리고 많은 가르침을 베풀어주신 기계설계학과 교수님들께 깊은 감사를 드립니다.

또한 본 연구를 수행함에 있어 실험과정을 지켜보면서 많은 도움을 주신 기계설계학과 선배님들께 감사를 드리며, 실험에 필요한 자료에서부터 실험장치까지 항상 조언을 해주신 윤상돈 팀장님께 감사를 드립니다.

그리고 어려운 여건 속에서도 학위 이수과정 중 아낌없는 격려와 시간적 배려로 지원해주신 부산인력개발원 황원익 원장님, 허 본 처장님, 그리고 컴퓨터응용기계과 김동수 과장님과 동료 모든 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한 실험재료에 대한 많은 자료제공과 코팅에 관한 기술적인 문제에 대해서 많은 조언과 도움을 주신 발저스한국코팅 유준일 소장님께 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 항상 걱정해주시고 물심양면으로 도와주신 장인, 장모님께 감사를 드리며 늘 곁에서 변함없는 내조로 힘과 용기를 심어준 아내와 딸 효경, 효민에게 고마움을 전합니다.

끝으로 오늘의 배움을 더욱 정진하여 후진 양성에 열과 성을 다할 것을 다짐합니다.

2004년 8월

徐 東 源 拜上