

# 밸브시트 재료의 깰링 특성에 관한 실험적 연구

박성준<sup>#</sup>, 김영태<sup>\*</sup>, 이상조<sup>\*\*</sup>

## An Experimental Study on the Galling Characteristics of Valve Seat Materials for Water Works

Sung-Jun Park<sup>#</sup>, Young-Tae Kim<sup>\*</sup> and Sang-Jo Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Contamination of environment induces the shortage of drinkables. In this trend, the leakage of water that occurs by breakage or erosion of rubber valve seats is serious problem. Rubber is apt to cause breakage between two materials when they contact with each other. The possible way to avoid leakage of water by damage and breakdown of rubber is to replace that with metal. Because of this reason, nowadays, rubber is being substituted with metal as valve seat materials for water works. In tribology, a severe form of wear is characterized by local, macroscopic material transfer, removal, or formation of surface protrusions when two solid surfaces experience relative sliding under load. One of the major problems in sliding of metals is galling due to bad surface quality. Experimentally, there are various elements which influence on incipient galling, such as hardness, surface roughness, temperature, load, velocity and external environments. This paper is aimed at verifying the galling tendencies according to hardness, surface roughness, load and velocity and showing how much effect the factors have on the galling tendencies

**Key Words** : Galling (깰링), Material transfer (물질 전이), Seizure (용착), Threshold galling stress (임계 깰링 응력), Hardness (경도), Surface roughness (표면 거칠기)

### 1. 서론

최근 급속한 산업화와 개발로 인하여 환경 오염 문제가 심각해지고 사용 가능한 물의 부족사태가 초래되고 있다. 이를 해결하기 위해 댐의 건설이 이루어지고 있지만 이것 역시 근본적인 문제점을 해결하지는 못하고 있다. 최근에 정부에서는 환경노동위원회 소관으로 수도법 중개정법률안을

제안하였다. 이 법률안 역시 비효율적으로 이용되는 물의 양이 많으므로 물 수요관리를 강화하기 위한 것이다.

이런 문제들에 대한 해결책의 일환으로 현재 수도용 버터플라이 밸브의 고무시트를 내구성이 크고 파손에 강한 금속 밸브 시트로의 교체가 매우 중요한 사안으로 대두되고 있다. 본 연구에서는 기존에 사용되고 있던 고무재료 시트를 내식

<sup>✉</sup> 접수일: 2003년 5월 29일; 게재승인일: 2004년 1월 9일

<sup>#</sup> 교신저자: 연세대학교 나노과학기술연구원

Email: [sipark@yonsei.ac.kr](mailto:sipark@yonsei.ac.kr) Tel: (02) 2123-2818

<sup>\*</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 연세대학교 기계공학부

성이 우수한 스테인리스 스틸 계열의 금속재료로 교체할 수 있는 가능성 및 교체시 얻을 수 있는 효과에 대해서 마찰학적 특성 중의 하나인 깰링 실험을 통해 확인하였고 선택된 재료를 이용하여 실제적으로 관련업체에서 버터플라이 밸브 시트에 적용하였다. 현재 사용되고 있는 고무 시트의 경우는 시트간의 마찰 및 재료의 경화 현상으로 노후 파손이 발생하고 재료의 균열이 일어나 누수가 발생한다. 실제로 환경부의 보고에 따르면 수도 시설물에서 가장까지 가는데 노화로 인해 16.8%의 누수 손실이 보고 되고 있다. 그러나, 금속의 경우 마찰 마멸 특성 및 수압에 대한 저항성이 고무보다 훨씬 좋으므로 노화를 지연시킬 수 있고 노화나 파손으로 인한 누수 손실을 줄일 수 있으며 고무에 비해 훨씬 긴 수명을 가지는 장점이 있다. 본 연구를 통해 여러 스테인리스 재료에 대해서 깰링 특성을 파악하고 이중에서 버터플라이 밸브에 가장 적합한 조합을 찾아내어 이를 실제 버터플라이 밸브 제작에 활용하여 제품을 생산할 수 있도록 한다. 버터플라이 밸브의 일반적인 구조는 Fig. 1 에 나타내었다.

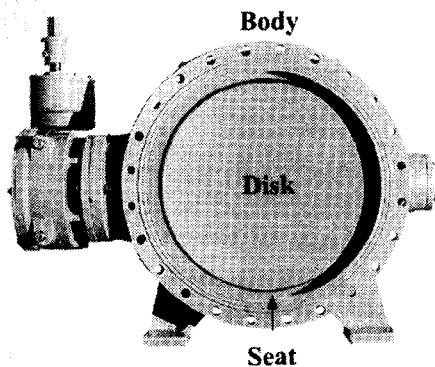


Fig. 1 The photograph of butterfly valve

Budinski<sup>1</sup> 는 초기상태에서의 깰링을 금속과 금속의 마멸에서 표면의 소성변형과 응착의 상호작용으로 정의하고 여러 금속 재료에 대한 깰링 실험을 행하였다. 실험을 통해 거의 모든 금속에서 깰링이 발생할 수 있다는 결과를 얻었으며 깰링의 저항성을 높이기 위한 방법으로 연마 가공이나 연삭 가공 표면을 제안하였다. Schumacher<sup>2</sup> 는 Brinell

경도 측정기를 응용하여 보다 쉽게 깰링을 측정할 수 있는 방법을 고안하였다. Kawana 와 Ichimura 는 코발트 코팅재료를 수중에 장기간 방치할 경우 나타날 수 있는 부식 한계를 향상시키기 위해 CrN 코팅을 통해서 마모와 부식을 막고 깰링 현상을 줄이려고 노력했다.<sup>3</sup> 그러나, 한편에서 Sheldon<sup>4</sup> 은 크롬(Cr) 코팅이 깰링을 줄이는 데는 효과적이지만 다른 외부적 환경에서는 마모의 발생으로 치명적일 수 있다고 반박하였다.

Bernick<sup>5</sup> 이 수압 실린더를 이용한 실험에서 깰링을 측정하려는 시도는 있었지만 반응이 느리고 정밀도면에서 불확실한 데이터를 이용함으로써 결과에 대한 신뢰성이 떨어진다. 본 연구에서는 이러한 점들을 고려 보완하여 3 축 이송계를 이용한 깰링 실험을 통해 분석하였다.

본 논문에서 두 재료간의 깰링 특성에 대한 실험을 행하여 이를 파악하고 실험 후의 각 금속별 표면특성을 분석함으로써 밸브시트 재료로 깰링에 가장 저항력이 좋은 스테인리스 조합을 선정하였다. 또한 접촉 압력과 미끄럼 속도에 따른 깰링의 특성에 관한 실험적 연구를 시도하였다. 시험에 사용된 시편은 Austenite 계열 (STS304, STS316), Ferrite 계열 (STS444), Martensite 계열 (STS410A) 및 스테인레스 합금 밸브 시트 재료이며 깰링 특성이 좋다고 보고되고 있는 크롬 코팅된 시편도 비교 분석하였다.

## 2. 이 론

본 연구는 깰링실험을 통해 기존에 사용되는 고무 밸브 시트가 아닌 내식성, 내마모성이 좋은 금속 시트를 선정하여 버터플라이 밸브에 실제 적용하는데 목적이 있다. 금속 시트가 접촉할 경우에 나타날 수 있는 문제점 중에 한쪽 금속이 접촉 후 뜯겨 나가거나 마모되는 현상을 볼 수 있는데 이를 깰링이라고 통칭해서 말한다. 실제 금속의 접촉에서 가장 큰 문제점은 이러한 깰링에 관한 것이다. ASTM<sup>6</sup>에서는 깰링을 “어떤 하중 하에서 두 재료가 접촉상태로 상대적인 미끄럼 운동을 하였을 때 발생하는 물질의 전이 또는 표면 요철간 상호 작용에 의한 형태” 라고 정의하고 있다. 깰링은 흡착 마멸 상태의 초기 단계로써 무윤활 상태나 높은 하중에서 발생하기 쉽다. 발생 형태는 표면의 소성 변형으로 나타나며 마모 형태 중에서

심각한 요소 중의 하나이다.

깁링과정에서 관찰할 수 있는 것은 하중의 정도, 접촉 표면의 형상에 의해 두 접촉면 사이의 형태가 결정된다는 점이다. 따라서, 깁링은 표면 처리, 하중, 접촉 표면 특성에 의해 제어할 수 있게 된다. 실험에 의한 각 금속재료의 표면 분석은 깁링의 기구를 이해하는 데 한층 도움이 될 것으로 생각한다.

본 연구에서는 정마찰력과 동마찰력의 차이를 깁링에 대한 평가 기준으로 하고 그 값을 깁링 경향으로 표현하였다. 또한 단계적으로 하중을 가하면서 깁링이 발생하기 시작할 때의 접촉 표면의 압력을 임계 깁링 응력이라고 한다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 장치는 Fig. 2 와 같이 병진운동 마찰계 위에 시편을 제작하여 고정시킨다. 시편과 병진 운동하는 스피ن들의 콜릿에 척킹되는 핀(pin)은 플레이트(plate) 시편과 동종재료 또는 이종재료이다. 먼저 다양한 하중이 가해진 상태에서 윗 부분에 장착된 시편을 1 회전 시킨 후 병진운동을 시작한다. 시작 시점의 접선력을 측정하고 플레이트 시편의 최초 접촉면의 형상을 관찰한다.

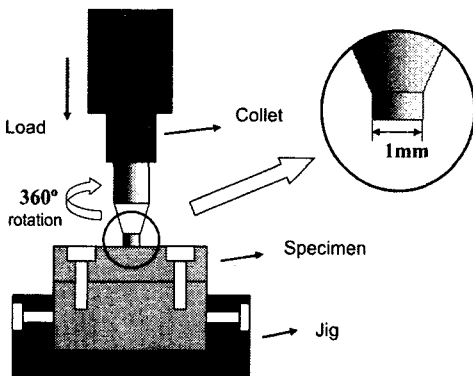


Fig. 2 Experimental setup for galling test

미끄럼 운동시 두 물체간의 국부적인 용융이 발생함에 따라 정·동마찰이 발생한다. 7 실험에서 측정된 두 마찰력의 차이를 깁링이 발생할 수 있는 경향의 크기로 보고 이 값을 밸브 시트 재료 선정에 적용하였다. 실험에 사용된 시편은 편평도

를 동일하게 하기위하여 머시닝센터에서 앤드밀링 작업을 하였다. 실험 후 와이어 방전을 이용하여 시편을 절삭하고 표면 분석을 하였다. 표면 분석은 EDS, SEM 그리고 광학현미경을 이용하였다.

#### 3.2 내부식성 시험

양극 분극 시험에 사용된 재료는 구상 흑연 주철, 304L 오스테나이트 계열 스테인리스강 (Cr-8Ni-1.0Si-1.5Mn-0.02C) 및 444 페라이트 계열 스테인리스강 (18Cr-2Mo-0.6Si-0.6Mn-0.02C)이다. 양극 분극 시험은 시험용 시편을 SiC 연마지를 사용하여 600 grit 까지 연마하였고 시험용액은 35℃ 3.5 wt% NaCl 을 이용하였다. 전위는 양극방향으로 60 mV/min 의 속도로 전위를 증가시키면서 시험하였다. 양극 분극 시험 결과는 Fig. 3 과 같으며, 공식 전위 순위는 444 페라이트 계열 스테인리스강, 304 L 오스테나이트 계열 스테인리스강, 구상 흑연 주철 순이다. 결과를 보면 시트 소재가 밸브 바디와 디스크의 소재로 사용되는 주철보다 내부식성 측면에서 우수하고 버터플라이 수도밸브는 개폐가 극히 드물기 때문에 모든 실험은 건식 운할 상태에서 실시하였다.

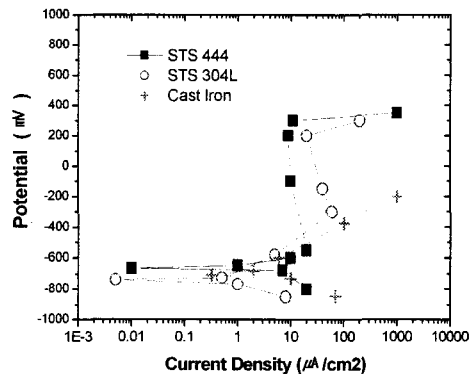


Fig. 3 Electrochemical anodic polarization test results

### 4. 실험결과

#### 4.1 경도에 의한 영향

##### 4.1.1 실험 내용

본 절의 실험은 접촉 압력 즉, 하중과 미끄럼 속도에 대한 실험에서 기본 데이터로 사용된다. 경도에 의한 실험에서는 스테인리스 스틸 중

STS304, STS316 및 STS444 를 택하여 실험 시편으로 사용하고 각 시편들의 조합에서 깰링 경향이 낮게 나타나는 시편의 조합을 찾아 낸다. 즉, 임계 깰링 응력이 높게 나타나는 조합을 실험을 통해서 확인하였다.

스테인리스 스틸 계열에서 현재까지 실험된 결과를 보면 보통 100kg/cm<sup>2</sup> (약 9.8MPa)에서부터 깰링이 발생한다고 보고되고 있으므로 <sup>1</sup> 그보다 높은 13MPa 에서 실험을 실시하였다. 미끄럼 속도는 120mm/min 로 일정하게 하였다.

각 시편의 경도는 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Hardness of specimens (HRB)

Specimen	1st.	2nd	3rd	Average
STS 304	65.2	77.3	76.2	72.90
STS 316	78.8	80.8	82.4	80.66
STS 444	78.9	82.4	79.7	80.33

#### 4.1.2 실험 결과

실험 결과는 재현성을 위해 3 회 실험한 결과의 평균값을 산출하여 계산하였다. Fig. 4 에서 주목할 만한 점은 STS304 가 포함된 조합에서 깰링의 경향성이 매우 크게 나타난 것이다. 이와 같은 결과는 실험 시편 중에 가장 경도가 낮은 재료 표면에 냉간 용융이나 소성 변형이 일어나면서 용착된 것으로 보인다. 또한 STS304 와 STS304 에서는 동종재료에서 나타날 수 있는 친화성의 영향으로도 해석할 수 있다.

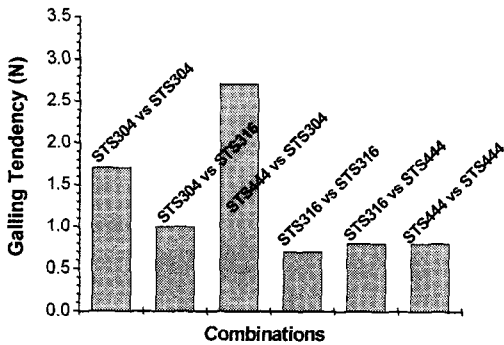


Fig. 4 Galling tendency with material combinations

이 현상을 좀더 자세히 살펴보기 위해 Fig. 5 와 같이 광학현미경을 이용하여 STS304 표면을 500 배로 확대하여 관찰하였다. 우측 상단에는 기존에 있었던 표면의 요철들이 남아있고 중앙 부분에는 표면이 파괴되어 있는 것이 보인다. 파괴된 부분들은 재료가 녹아서 진흙처럼 붙어있는 형상이 관찰되었다. 이는 냉간 용융(cold welding)의 효과로 볼 수 있다.

STS316 과 STS316 의 조합에서는 동종재료임에도 불구하고 깰링현상이나 친화성으로 인한 현상은 전혀 나타나지 않았다. 이러한 실험 결과는 재료간에 친화성보다는 경도에 의한 영향이 더 크다는 것을 말해주고 있다. 즉, 재료의 경도가 높으면 높을수록 냉간 용융, 소성변형의 영향이 적기 때문에 깰링현상은 잘 일어나지 않을 것이라고 예측이 가능하다.

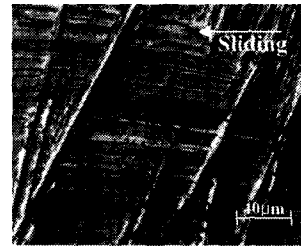


Fig. 5 Optical micrograph of STS304 surface ( pin : STS304 )

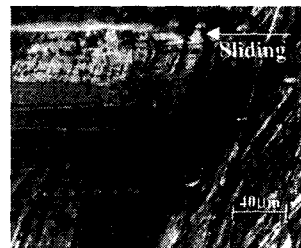


Fig. 6 Optical micrograph of STS304 surface ( pin : STS444 )

Fig. 6 은 용착이 크게 나타난 표면을 보여주고 있다. 예상대로 변형량이 많았으며 가운데 부분의 요철이 국부적인 용융에 의해 녹아 붙었다가 떨어지면서 뜯긴 흔적이 남아있다. 즉, 경한 편 (STS444)이 지나가면서 상대적으로 연한 플레이트 (STS304) 표면이 뜯겨진 것이다.

## 4.2 표면 거칠기에 의한 영향

### 4.2.1 실험 내용

표면 거칠기가 깰링에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 실험을 실시하였다. 실험조건은 하중은 13MPa, 미끄럼 속도는 120mm/min 로 설정하여 실험하였다. 실험에 사용한 시편은 경도에 의한 실험에서 깰링 발생 경향이 가장 작은 STS316 과 STS444 시편조합으로 하였다. 플레이트는 STS444 로 하였으며 표면 거칠기 초기 조건을 다양하게 하기 위하여 WA60V 와 WA80V 두 종류의 연삭 슷돌을 이용하여 평면 연삭기로 시편 표면을 전처리하였다.

### 4.2.2 실험 결과

표면 거칠기에 따른 깰링 발생 경향성은 Fig. 7 나타내었다. 표면 거칠기 값이 클수록 표면 사이의 마찰이 커지고 실 접촉 면적이 넓어지기 때문에 국부적인 용융이 더 크게 일어난 것으로 생각된다. 따라서, 표면 거칠기에 대한 깰링 발생 경향은 거의 선형적인 비례관계를 나타내었다.

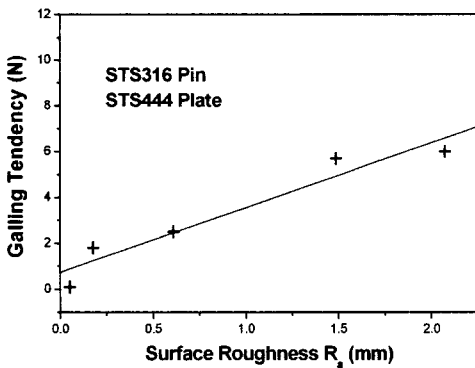


Fig. 7 Galling tendency with surface roughness

## 4.3 하중에 의한 영향

### 4.3.1 실험 내용

깰링은 접촉 압력이 증가할수록 쉽게 발생할 것으로 예측할 수 있다. 따라서, 하중에 대해 정량적으로 평가하고 또한 같은 스테인리스 종류 중에 어떤 조합에서 임계 깰링 응력이 가장 높게 나타나는 지를 확인하였다. 이러한 임계 깰링 응력의 범위는 기계적 접촉이 있는 장비에 응용하고자 할 때 사용조건으로 적용할 수 있다.

실험 시편으로 STS304, STS316, STS410A, STS444, STS410A (Cr coated), STS444 (Cr coated), Stainless alloy 시편을 사용하였다.

경도에 의한 실험에서 주로 STS304 가 포함된 조합에서 13MPa 보다 작은 압력에서도 깰링이 발생하였으므로 더 작은 조건인 6MPa 에서부터 최대 32MPa 까지 압력범위를 정하였다. 최대 압력 조건은 일반적인 금속의 임계 깰링 응력보다 약 3 배 가까이 되는 값이다. 미끄럼 속도는 모든 조합에서 일정하게 120mm/min 로 설정 하였다.

## 4.3.2 각 조합별 실험결과

### 4.3.2.1 STS304 조합

Fig. 8 은 STS304 플레이트와 다른 핀 재질과의 조합에 대하여 다양한 하중에 따른 깰링의 경향성을 나타내고 있다. 실험 결과를 보면 STS410A 핀 과 STS304 플레이트의 조합에서 매우 급격한 깰링 발생 경향의 변화가 있음을 알 수 있다. STS304 간의 조합의 경우는 19~26MPa 에서 기울기가 크게 나타났다. STS410A 핀의 실험에서 13~19MPa 사이에서 기울기가 크게 변하므로 이 구간에서 표면에 큰 변화가 있을 것으로 예측할 수 있다. 이와 같은 결과를 확인하기 위하여 19MPa 조건에서 표면을 SEM 및 EDS 를 이용하여 분석하였다.

19MPa 하중 조건에서 STS410A 핀으로 실험한 STS304 플레이트 표면을 SEM 을 통해 분석하면 Fig. 9 와 같다. 표면에 원래 모재가 아닌 다른 물질들이 불규칙하게 배열되어 있는 것을 볼 수 있다.

Si, P, Cr, Mn 은 공통 원소이고 Mo 은 STS410A 에만 존재하므로 STS304 플레이트 표면의 Mo 성분 을 조사하면 전이 발생 여부를 확인할 수 있다.

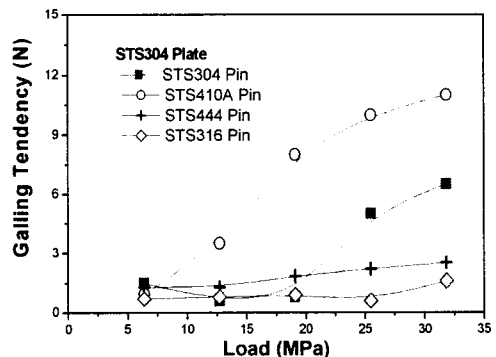


Fig. 8 Experiment result on STS304 plate



Fig. 9 SEM image of STS304 surface at 19MPa

Table 2 에 EDS 를 이용하여 STS304 표면의 화학성분을 분석한 결과를 제시하였다. 분석 결과를 보면 STS410A 와 STS304 간의 조합은 19MPa 정도의 압력에서 매우 치명적인 손실을 입을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2 EDS analysis of STS304 surface at 19MPa (pin : STS410A)

Element	Si	P	Cr	Mn	Mo	total
Weight Percent	3.77	0.01	38.42	18.54	39.26	100

#### 4.3.2.2 STS410A 조합

STS410A 플레이트 위의 각 조합별 실험은 Fig. 10 에 나타내었다. STS410A 플레이트와의 조합에서는 19MPa 부근에서 깰링 발생 경향이 작아지는 것을 볼 수가 있는데 이는 국부적으로 높은 압력을 받아서 용융된 재료가 오히려 정지 마찰력을 줄이는 효과, 즉 melting lubrication 으로 생각된다.

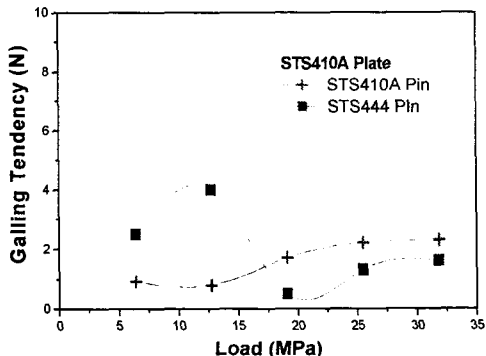


Fig. 10 Experiment result on STS410A plate

Table 3 에서는 압력 조건이 13MPa 로 실험한 STS410A 시편과 19MPa 로 실험한 시편의 표면 성분을 분석한 결과이다. Table 3 의 (a)와 (b)에 의하면 STS444 에 있는 원소인 N 이 STS410A 로 전 이량이 갑자기 증가한 것을 알 수 있다.

Table 3(a) EDS analysis of STS410A surface at 13MPa (pin : STS444)

Element	N	Si	P	Cr	Mn	total
Weight Percent	1.78	3.31	2.27	77.21	15.43	100

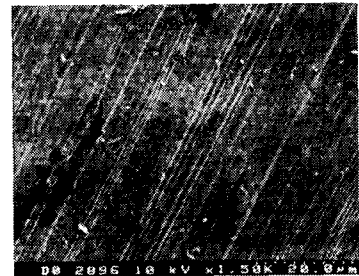
Table 3(b) EDS analysis of STS410A surface at 19MPa (pin : STS444)

Element	N	Si	P	Cr	Mn	total
Weight Percent	10.57	5.19	2.29	67.98	13.97	100

두 표면을 SEM 을 통해 확대 분석한 것은 Fig. 11 에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 모재가 아닌 다른 물질들이 거의 없는 반면 Fig. 11(b)에서는 티끌과 같은 다른 물질들이 불규칙하게 배열되어 있다.



(a) STS410A surface in 13MPa



(b) STS410A surface in 19MPa

Fig. 11 SEM pictures of STS410A in 13 and 19MPa

### 4.3.2.3 기타 조합

앞에서의 실험을 제외한 다른 조합에서는 모든 하중 범위에서 깰링이 발생하지 않았다. 특히 코팅된 재료의 깰링 발생 경향은 낮았다. 표면의 성분 분석에서도 물질 전이는 관찰되지 않았다.

### 4.3.2.4 실험 결과

본 절의 하중에 대한 실험 결과를 정리하여 Fig. 12 와 같이 각 조합별로 임계 깰링 응력을 구하였다. 깰링 발생 경향이 클수록 실제 실험 시편의 표면도 일치된 변화가 있었다. 이러한 결과는 실제 깰링이 본 실험에서 정의한 깰링 발생 경향과 밀접한 관계가 성립한다는 것을 의미한다

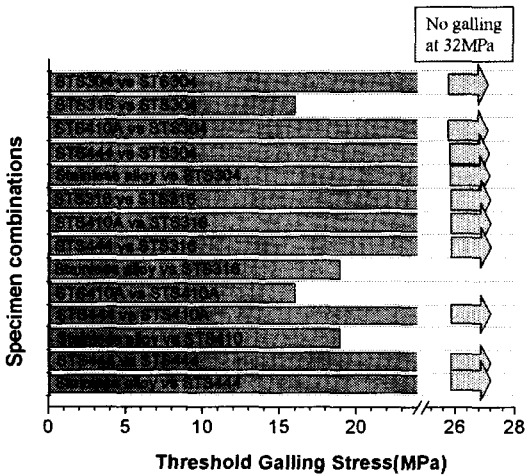


Fig. 12 Threshold galling stress

## 4.4 속도에 의한 영향

### 4.4.1 실험 내용

일정한 하중 하에서 다양한 미끄럼 속도에 따른 깰링현상을 살펴보았다. 속도 벨브가 실제 개폐될 때 하중에 의한 영향도 있지만 동시에 미끄럼 속도에 의해서도 부식 및 재료의 전이 등 영향을 받게 된다. 속도의 범위는 60~2010mm/min 으로 설정하고 압력은 26MPa 로 일정하게 가하였다. 이 값들은 실제 조건보다 매우 큰 값이다. 열악한 환경의 테스트를 통해 깰링이 발생하지 않는다면 그보다 좋은 환경에서 당연히 깰링 현상이 나타나지 않아 벨브의 수명이 길다고 할 수 있다.

하중의 실험 결과로부터 대략 깰링 발생 경향

의 크기가 5N 을 넘어서게 되면 시편 표면에 큰 변화가 있음을 확인할 수 있다. 따라서 속도 실험에서도 5N 을 임계 깰링 경향으로 보고 치명적인 표면 손상이 일어나는 기준으로 설정하여 각 그래프마다 기준선으로 도시하였다.

### 4.4.2 각 조합별 실험

실험은 시편 6 종· 18 조합에서 행하였고 그 중 STS304 조합 실험을 도시하면 Fig. 13 과 같다. 임계선을 기준으로 깰링이 증가 또는 감소하는 다양한 양상을 얻을 수 있었다.

Fig. 14 에서는 코팅 재료 중 STS410A(Cr coating) 시편의 실험을 나타내고 있다. 이 실험에서는 속도에 따라 깰링 경향이 지속적으로 증가하는 조합도 있었다.

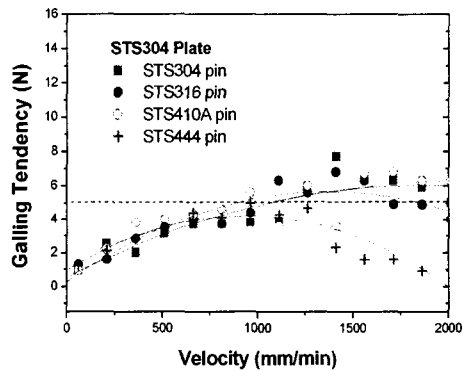


Fig. 13 Velocity effect on galling for STS304 plate

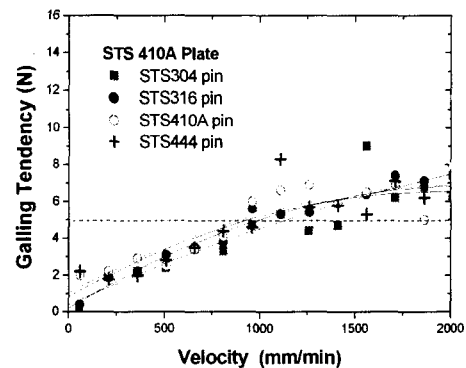
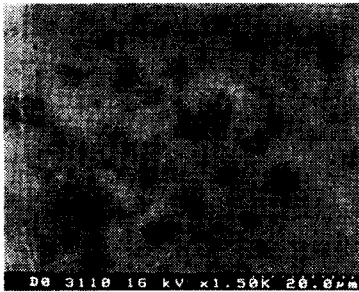


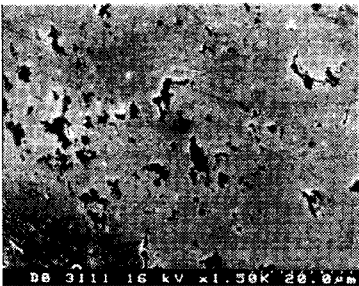
Fig. 14 Velocity effect on galling for STS410A plate

STS410A (Cr coated)와 STS444 pin 간의 조합 실험에서 STS410A 표면을 분석하면 Fig. 15 와 같다.

Fig. 15(a)는 실험 전의 표면을 나타내고 있는데 이 물질이 전혀 없는 반면 Fig. 15(b)에서는 모재에 없는 다른 물질들이 보인다. 이런 모양의 물질들은 pin 의 원소가 전이된 것으로 예측할 수 있고 EDS 분석을 통해서 명확하게 확인하였다. Table 4 의 (a)와 (b)를 비교해보면 Mo 전이량의 증가로 깰링 발생을 판단할 수가 있다.



(a) STS410A surface before experiment



(b) STS410A surface after experiment

Fig. 15 STA410A surface at 1960mm/min

Table 4(a) EDS analysis of STS410A surface before experiment

Element	Si	P	Cr	Mn	Mo	Total
Weight percent	1.66	4.91	91.71	1.25	0.47	100

Table 4(b) EDS analysis of STS410A surface at 960mm/min

Element	Si	P	Cr	Mn	Mo	Total
Weight percent	1.77	1.85	83.82	0.94	11.62	100

#### 4.4.3 실험 결과

나머지 조합에 대해서도 동일한 실험을 통하여 표면을 분석한 결과 Fig. 16 과 같이 깰링이 발생하지 않는 속도 구간을 얻을 수 있었다. Fig. 16 에서 속도의 변화가 깰링 발생에 미치는 영향을 나타내고 있으며 각 조합별로 깰링이 발생하지 않는 안전 속도 범위를 제시하였다.

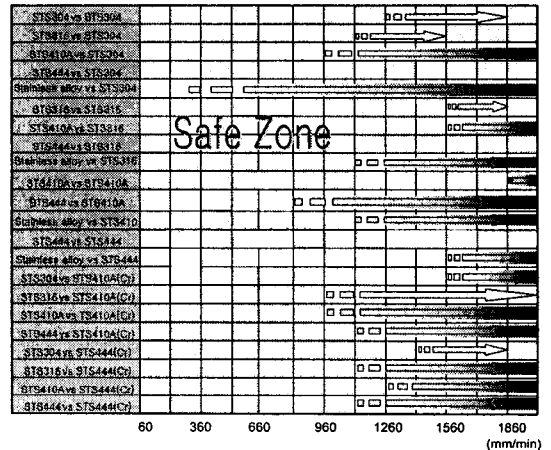


Fig. 16 Range of critical velocity

#### 4.5 결과 고찰

본 논문에서 고려한 여러가지 요인들을 종합적으로 검토해 볼 때 하중 조건과 속도 조건에서 STS316 와 STS444 조합, Stainless alloy 와 STS444 조합 그리고 STS444 와 STS444 조합들이 깰링에 대한 저항성이 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 STS444 동종 재료의 조합은 시간적 요소가 고려되어야 하는 기계적 접촉에서는 적절하지 못하다고 판단된다. 또한 STS444 의 경우에 생산성의 문제가 떨어지므로 결국 하중 조건에서 깰링 발생 경향을 만족하는 Stainless alloy 와 STS304 조합을 최종적인 밸브 시트 재료로 선정한다. 물론 이 조합은 속도에 있어서는 깰링 유발 가능성이 존재하지만 실험 조건이 극한 한계 조건이었다는 점과 수도 밸브의 특성상 빠른 속도로 개폐가 이루어지지 않으므로 하중 특성이 더 주요한 요소라고 고려되므로 적절한 조합이라 결론지을 수 있다. 실제 이 조합에 의한 밸브시트를 가진 버터플라이 수도 밸브가 생산되고 있으며 기존 제품에 비해 좋은 성능을 보이고 있다.



## 5. 결 론

본 연구를 통해 스테인리스 스틸의 깰링 특성을 분석함으로써 최종적으로 수도 밸브 시트에 적용할 재료를 선정하였다. 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하중에 의한 실험에서는 하중이 증가함에 따라 깰링 발생 경향이 대체적으로 증가하였다. 일부 금속 조합에서는 갑자기 감소하는 경향이 있었는데 이것은 국부적인 용융이 원인이다. 또한 동종재료에서는 친화성의 영향이 추가적으로 작용하여 하중에 따라 깰링 발생 경향이 급격히 증가할 것으로 생각되지만 친화성보다는 경도의 영향이 크기 때문에 일정한 정도 이상의 재료 조합은 하중이 증가하여도 깰링 발생에는 큰 영향을 미치지 않는다.

2) 속도의 변화에 따라 각 실험 조합별로 깰링 발생이 증가한 후 감소되는 조합과 계속적으로 증가하는 조합이 있었다. 전자에 속하는 조합은 대부분 깰링 발생 경향의 크기가 낮게 나타났고 완만하게 유지 또는 감소되었다. 이 조합들은 하중에 의한 실험에서 나타났던 깰링 발생 경향이 낮은 조합과 비슷한 양상을 나타내었다. 이것은 시편의 표면 거칠기와 같은 조건만 일정하다면 임계 깰링 응력은 정량적 수치로 볼 수 있다는 것을 의미한다. 후자에 속하는 조합은 깰링 발생 경향이 크게 나타났다. 즉, 임계 속도를 지나면 완전한 용착으로 치명적인 표면 손상을 가져올 수 있다. 물질 전이량이 깰링의 척도는 아니지만 속도에 따른 물질 전이 현상을 확대된 표면의 형상으로 충분히 확인할 수 있었다.

3) 코팅된 재료의 실험에서는 하중으로부터의 영향은 적게 받았지만 속도에 대해서는 큰 영향을 받는 경우도 있었다. 손상의 특징이나 깰링에 미치는 영향은 접촉하는 두 금속의 성질에 따라, 외부 환경(하중, 속도)에 따라 다르게 나타난다는 것을 의미하며 코팅된 표면은 하중의 영향을 적게 받는 역할을 하였다.

## 참고문헌

1. Budinski, G. K., "Incipient Galling of Metals," *Wear*, Vol. 74, pp. 93-105, 1981.
2. Schumacher, W., "New Galling Data Aid in Selecting Stainless Steel," *Materials Engineering*, pp. 60-61, 1973.
3. Kawana, A., Ichimura, H., Iwata, Y., Ono, S., "Development of PVD Ceramic Coatings for Valve Seats," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 86, pp.212-217, 1996.
4. Sheldon, G. L., "Galling Resistant Surfaces on Stainless Steel through Electrosark Alloying," *Journal of Tribology*, Vol. 117, pp. 343-349, 1995.
5. Leslie, M. B., Robert, R. H., Carl, L. W., "Development of a Quantitative Sheet Galling Test," *Wear*, Vol. 48, pp. 323-346, 1978.
6. Standard Test Method for Galling Resistance of Materials, ASTM, 1989.
7. Yang, J.C., Kim, D.E., "A Study on the Characteristics of Stiction and Friction of Textured Surface," *Journal of the KSPE*, Vol. 19, No. 7, pp. 51-58, 2002.