

금속 볼 밸브의 볼 · 시트 마멸 특성에 관한 실험적 연구

배준호 · 정구현^{*}

울산대학교 기계공학부

Wear Characteristics of Metal Ball and Seat for Metal-Seated Ball Valve

Junho Bae and Koo-Hyun Chung^{*}

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received January 5, 2016; Revised January 31, 2016; Accepted January 31 2016)

Abstract – The wear characteristics of metal ball and seat in a metal-seated ball valve significantly affect the performances such as leakage and valve torque. In this work, the wear characteristics of metal ball and seat are experimentally investigated. A stainless steel ball and seat with a high corrosion-resistant coating are prepared and a component level test was performed. The hardness and surface roughness of specimens cut from the metal ball and seat are measured before and after the test using a micro-Vickers hardness tester and confocal microscopy, respectively. In order to assess the wear characteristics, the surfaces of the specimens are carefully examined after the test. The confocal microscope data show that the surface roughness values of both the ball and seat increase by a factor of 3-4, which may lead to an increase in valve torque. However, the wear of the seat is found to be more significant than that of the ball. In addition, a comparison of the surfaces of the ball and seat before and after testing revealed that adhesive and abrasive wear are the major wear mechanisms. The results of this study may aid in the design of metal-seated ball valves from the tribological point of view.

Keywords – abrasive wear (연삭 마멸), adhesive wear (응착 마멸), metal-seated ball valve (금속 볼 밸브), surface roughness (표면 거칠기), stainless steel (스테인리스 스틸)

1. 서 론

밸브는 다양한 산업에서 널리 사용되고 있는 기계요소 중 하나로써, 배관을 통해 흐르는 유체의 유량을 원활하게 제어하는 데 이용된다[1, 2]. 효과적으로 밸브를 설계하기 위해서는 밸브 내 유체의 유동특성에 대해서 이해하는 것이 요구되는데, 예를 들어, 유체 내에서 발생하는 공동(cavitation)은 소음(noise) 및 진동 (vibration)을 유발할 뿐만 아니라[3, 4], 밸브의 중요한 성능 중 하나인 밸브 토크에 직접적인 영향을 미치게 된다[5, 6]. 또한, 작동유체 속에 존재할 수 있는 입자들은 밸브 부품들의 침식마멸 (erosive wear) 을 유발할 수 있으며

[7, 8], 특히, 밸브 개폐 시 발생하는 반복적인 접촉 미끄럼 운동은 표면파손을 유발하여 표면 거칠기를 증가시키고[9], 나아가 심각한 마멸을 초래한다. 이러한 밸브의 파손 현상은 결과적으로 누유(leakage)를 유발하여 밸브 시스템 전체의 치명적인 파손으로 이어질 수 있으므로[10-12], 밸브의 수명을 향상시키기 위해서는 구성품들의 내마모성을 고려한 설계가 요구되며[13, 14], 이에 따라 표면 열처리 및 코팅 등을 통하여 내마모성을 향상시키기 위한 연구가 수행되고 있다[15].

상대적으로 우수한 기밀성을 가지고 있으며, 산업현장에서 다양하게 활용되고 있고 있는 금속 볼 밸브의 경우에는, 누유 성능을 향상시키기 위하여 예압(preload)가 가해지기도 하며, 밸브 개폐 시 볼과 볼을 지지하는 시트 사이에 접촉 미끄럼 운동이 발생하므로,

^{*}Corresponding author : khchung@ulsan.ac.kr
Tel: +82-52-259-2744, Fax: +82-52-259-1680

내마모특성을 고려한 설계가 특히 요구된다. 일반적으로 금속 볼 밸브의 유지 보수를 위해서 시트의 소재는 볼의 경도보다 낮은 소재가 이용되나, 반복적인 볼과 시트의 접촉 미끄럼 운동은 결과적으로 볼의 파손을 유발하게 되므로, 밸브 토크의 증가를 유발하며, 나아가 볼과 시트의 정합 접촉(conformal contact)에 영향을 미쳐 누유를 발생시킬 수 있다. 그러므로, 금속 볼 밸브의 기밀성을 유지하여 수명을 향상시키기 위해서는 볼과 시트의 접촉 미끄럼 운동 시 발생하는 마멸 기구에 대한 이해를 바탕으로, 이를 저감시키기 위한 표면 설계가 요구된다.

본 연구에서는 실제 표면 특성을 고려하여 금속 볼 밸브를 설계 및 제작하였으며, 밸브의 성능을 평가하기 위한 실험으로써, 밸브를 반복적으로 개폐하는 실험을 수행하고, 실험 전후 볼과 시트의 표면을 비교·분석하였다. 금속 볼 밸브의 성능을 평가하기 위한 실험은 실제 작동 환경을 고려하여 수행하였으며, 볼과 시트 표면 분석을 통하여 마멸 기구를 이해하고자 하였다. 또한, 마멸 기구에 대한 이해를 바탕으로 볼과 시트의 내마모성을 향상시키기 위한 표면 설계 기술을 제안하고자 하였다. 이러한 연구 결과는 높은 내마모성 및 내구성을 가지는 금속 볼 밸브 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험

2-1. 실험 시편

금속 볼과 시트 사이에서 발생하는 마멸 기구와 표면파손 특성을 평가하기 위해서, 앞서 언급한 바와 같이, 금속 볼 밸브를 실제로 제작하였다. Fig. 1(a)는 금속 볼 밸브 구성 부품을 나타내는 사진으로써, 금속 볼 밸브는 볼과 시트, 그리고 이들을 결합하기 위한 2개의 하우징으로 구성되어 있다. 볼과 시트는 4" 밸브 기준으로 제작되었으며, 재료로는 각각 A351과 A240가 사용되었다. 또한, 제작 후 두 시편 모두 열처리 및 부식 방지 코팅(high corrosion resistance coating)이 적용되었다. 볼과 시트의 표면 경도 및 표면 거칠기를 측정하기 위하여 각 시편은 Fig. 1(b)와 (c)에 제시한 바와 같이 절단되었다. Fig. 1(c)에 표시된 바와 같이 시트 중간 부분에 가로로 형성된 얇은 선이 존재하는데, 이 선은 볼과의 접촉 부분을 나타내는 영역이며, 시트 제작과정에서 형성된 것으로 판단된다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 실험 전의 금속 볼과 시트의 공초점 현

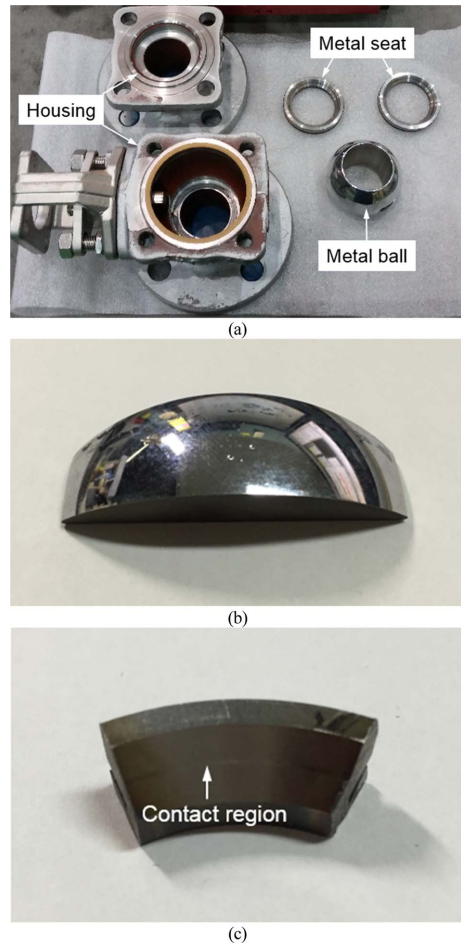


Fig. 1. Photographs of (a) components of metal-seated ball valve before the test, (b) metal ball, and (c) metal seat specimens cut for measurement.

미경(confocal microscope) 사진을 나타내는 것으로써, Fig. 2(b)에는 시트 표면에서 볼과 접촉하는 영역을 확대하여 함께 제시하였다. 볼과 시트 표면에 모두 가공에 의한 것으로 여겨지는 패틴이 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한, 볼과 시트의 평균 표면 거칠기는 공초점 현미경 데이터를 이용하여 얻었으며, 각각 0.2 μm 와 0.3 μm 로 계산되었다. 볼과 시트의 경도는 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 측정하였으며, 각각 780 HV와 600 HV로 나타났다. 금속 볼의 경도가 금속 시트의 경도보다 크기 때문에, 금속 시트의 마멸이 볼의 마멸보다 더 클 것으로 예상되었으며, 이는 일반적인 볼 밸브의 유지 및 보수를 고려할 때 적절하다.

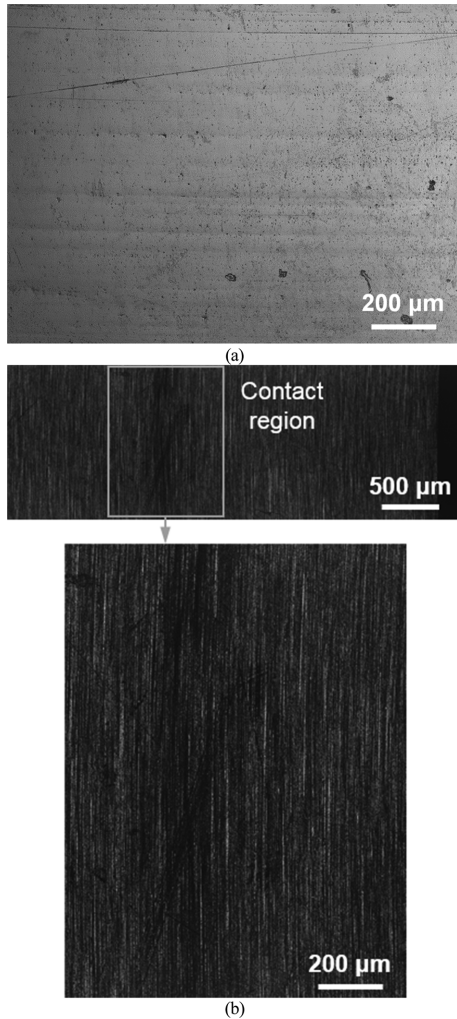


Fig. 2. Confocal microscope images of (a) metal ball and (b) metal seat before the test.

2-2. 실험 장치 및 조건

실제 작동 조건에서 발생하는 볼과 시트의 마멸 현상을 평가하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 실험 장치를 제작하여 활용하였다. 실험 장치에 장착된 볼 밸브는 밸브의 상단에 부착된 구동기에 의하여 0°에서 90°까지 회전할 수 있으며, 이에 따라 개폐가 가능하도록 설계하였다. 또한, 실험장치는 흐르는 유체의 압력을 일정하게 제어할 수 있도록 설계되었으며, 본 실험에서는, 공기를 이용하여 약 4 bar의 압력을 가한 상태에서 실험을 진행하였다. 볼 밸브의 성능을 평가하기 위하여 각 1,000회의 개폐마다 누유여부를 관찰하였으며, 5,000회의 개폐 후 분해하여 볼과 시트

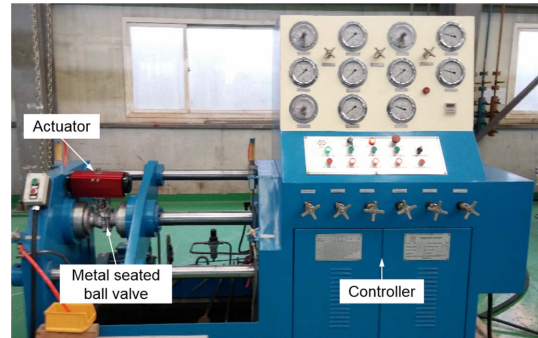


Fig. 3. Photograph of experimental setup for metal-seated ball valve.

사이에서 발생하는 마멸 특성을 실험전과 비교하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 금속 볼의 마멸 특성

실험 결과, 5,000회의 개폐까지 누유는 발생하지 않았으며, 실험 후 볼의 마멸 특성 분석 결과는 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4(a)는 5,000회의 개폐실험 후 표면 분석을 위하여 절단한 금속 볼을 나타내는 사진이다. Fig. 1(b)에 제시한 실험 전 볼과 비교할 때, 표면에 접촉 미끄럼에 의한 파손이 발생한 것을 알 수 있다. 밸브 시스템 내에 고정되어 특정 부분만 접촉하는 금속 시트와 달리, 금속 볼의 표면은 접선방향을 따라 회전하며 접촉하기 때문에 볼 표면 전체에 걸쳐 마멸이 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)와 (c)는 볼의 표면을 공초점 현미경으로 관찰한 대표적 결과를 나타내며, Fig. 2(a)에 제시된 실험 전 이미지와 비교할 때, 가공에 의한 패턴들이 모두 제거되었음을 알 수 있으며, 응착 마멸(adhesive wear) 흔적과 연삭 마멸(abrasive wear)에 의한 파손을 함께 관찰할 수 있다. 특히, 응착 마멸은 볼 표면 전체에 걸쳐 연삭 마멸 흔적에 비해 빈번하게 관찰되었다. 본 실험에 사용된 볼과 시트의 소재는 모두 steel 기반 소재이므로 상대적으로 높은 compatibility를 가짐에 따라 응착마멸이 발생하는 것은 타당하다. 또한, 볼의 표면 경도가 시트의 표면 경도에 비하여 높음에도 불구하고, 연삭 마멸이 발생한 것을 알 수 있는데, 이는 국부적으로 표면의 경도 분포가 다를 수 있음을 의미하며, 상대적으로 표면 거칠기가 높은 금속 시트의 표면에 존재하는 돌출

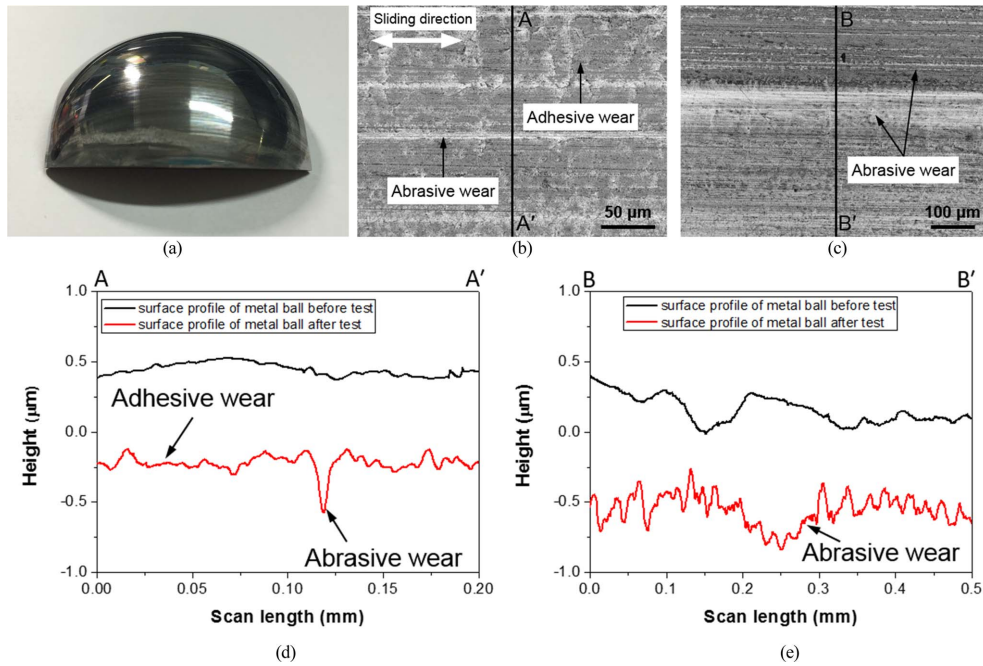


Fig. 4. (a) Photograph and (b), (c) confocal microscope images of metal ball after the test. Surface profiles of metal ball before and after the test are compared to each other in (d) and (e).

부(asperity)에 의해서 금속 볼 표면의 일부가 긁혀 제거된 것으로 보인다. 또한, Fig. 4(d)와 (e)는 응착 및 연삭 마멸 발생 영역의 표면 프로파일을 실험 전 표면 프로파일과 서로 비교한 것이다. 실험 전후의 표면 측정치는 모두 절단된 볼과 시트가 사용되었으므로, 측정부위가 동일하지는 않으며, 표면 프로파일을 효과적으로 비교하기 위해, 평탄화를 통하여 볼의 형상을 제거한 프로파일들을 나타낸다. Fig. 4(d)와 (e)로부터, 응착 및 연삭 마멸 발생이 국부적으로 다름에 따라, 표면의 국부적인 거칠기도 다름을 알 수 있다. 또한, 응착마멸에 의해서 표면 거칠기가 증가하였으며, 연삭 마멸에 의해서 표면에 groove가 형성되었음을 알 수 있다. 공초점 현미경 데이터로부터 얻은 실험 후 볼 표면의 거칠기는 0.75 μm로 나타났다. 이와 같은 마멸에 의해서 마멸입자가 생성되었을 것으로 여겨지나, 실험 중 유체의 지속적인 흐름에 의해서 접촉 계면으로부터 제거되었을 것으로 생각된다. 그러나, 마멸입자는 많은 경우 마찰 및 마멸 증가에 크게 기여할 뿐만 아니라[16], 유체의 오염을 유발할 수 있다. 그러므로, 마멸입자에 의한 볼과 시트의 극심한 마멸 진전뿐만 아니라, 유체의 오염을 저감시키기 위해서는 마멸입자를 효과적으로 제거하는 것이 요구된다. 특히, 이를 위

해서는 표면 텍스처(surface texture)를 적용할 수 있을 것으로 예상되며[17], 표면 텍스처는 상대적으로 경도가 높고 접촉 영역이 큰 볼의 표면에 형성시키는 것이 타당하며, 궁극적으로 금속 볼의 성능 및 내구성을 증가시키는 데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

3-2. 금속 시트의 마멸 특성

5,000회의 개폐 후 발생한 시트의 마멸 특성도 함께 분석하여 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 5(a)는 실험 후 관찰을 위하여 절단된 시트를 나타낸다. Fig. 5(b)에 제시된 실험 후 공초점 현미경 이미지와 Fig. 2(b)에 제시된 실험 전 시트의 이미지를 비교할 때, 실험 후 시트에서는 접촉 영역의 폭이 뚜렷하게 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 한 방향으로 일정하게 마멸 흔적이 발생한 볼과는 달리, 시트의 경우에는 다양한 방향으로 마멸 흔적이 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에 제시된 공초점 현미경 사진으로부터 연삭 마멸이 주로 발생하였음을 알 수 있으며, 이는 금속 시트의 경도가 상대적으로 금속 볼의 경도보다 낮기 때문이다. 실험 전후 시트의 표면 프로파일은 Fig. 6에 제시하였으며, 연삭 마멸에 의해서 groove가 형성되었으며, 이에 따라 표면 거칠기가 증가하였음을 예측할

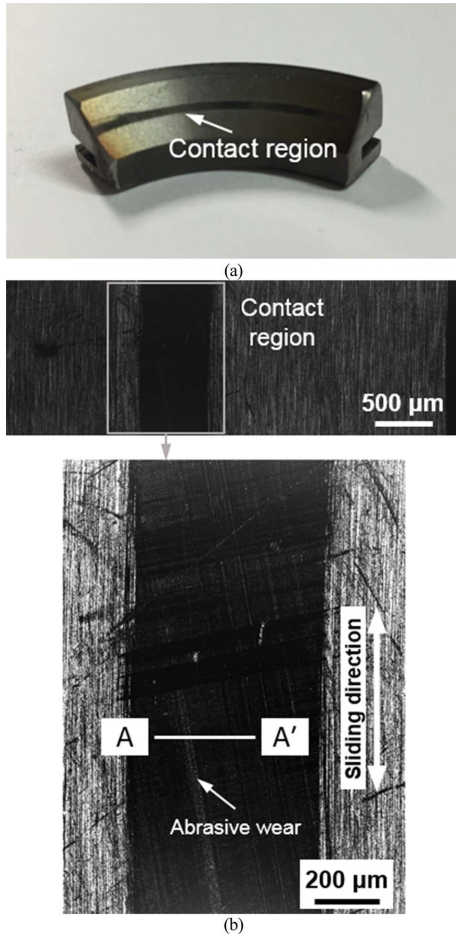


Fig. 5. (a) Photograph and (b) confocal microscope images of metal seat after the test.

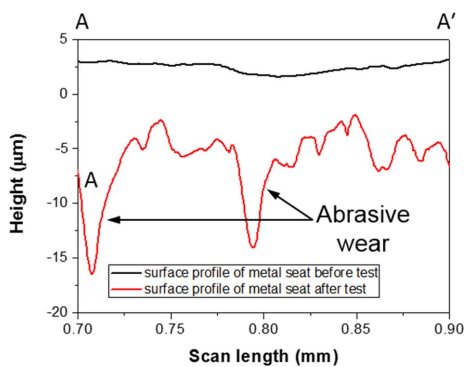


Fig. 6. Surface profiles of metal seat before and after the test are compared to each other.

수 있다. 공초점 현미경 데이터 분석 결과 실험 후 시트의 표면 거칠기는 $0.8 \mu\text{m}$ 로 실험 전에 비하여 크게

증가하였음을 알 수 있었다. 특히, 금속 시트는 Fig. 2(b)와 5(b)에 나타난 접촉영역처럼, 특정 부분에서 지속적인 마멸이 발생하나, 금속 볼은 원주방향으로 회전하여 마멸영역이 분산되기 때문에 시트의 마멸이 볼의 마멸에 비하여 더욱 크게 발생할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 금속 볼 밸브 개폐 시 볼과 시트 사이의 접촉 미끄럼 운동에 의해 발생하는 볼과 시트의 마멸 특성을 평가하였다. 이를 위하여 볼 밸브를 제작하였으며, 실제 작동 조건을 구현하기 위한 실험 장치를 구성하였다. Steel 소재로 제작된 볼과 시트의 접촉 미끄럼 운동에 의하여 발생하는 볼의 주된 마멸 기구는 응착 및 연삭 마멸로 나타났으며, 시트에서는 연삭 마멸이 주로 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 마멸에 의하여 볼과 시트의 표면 거칠기는 증가하는 것으로 나타났으며, 실험에 사용된 볼과 시트의 경우, 상대적으로 경도가 낮고 미끄럼 거리가 큰 시트의 마멸이 더 큰 것으로 나타났다. 5,000 회의 개폐 후 누유는 발생하지 않는 것으로 나타났으나, 표면 거칠기가 크게 증가하였음을 고려할 때, 개폐 회수가 증가할수록 누유가 발생할 가능성이 클 것으로 예상된다. 이러한 볼과 시트의 마멸은 표면 텍스처를 통하여 마멸입자를 접촉 계면으로부터 제거함으로써 저감시킬 수 있을 것으로 기대되며, 일반적으로 볼 밸브의 효과적인 유지 보수를 위하여 시트의 경도를 낮게 설계함으로써, 표면 텍스처는 볼의 표면에 형성시키는 것이 타당하다. 이러한 기술은 향후 실제 텍스처가 형성된 볼을 제작하여 연구를 수행함으로써 검증해야 할 것으로 여겨지며, 이러한 트라이볼로지적 설계는 향후 금속 볼 밸브의 내구성 및 성능을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 중소기업청의 산학협력기술개발의 일환으로 수행하였음[과제번호: C0249813].

References

- [1] Kang, B. S., Kim, K. S., Kim, J. K., "Reliability Prediction through Operating Characteristics Analysis of

- PE-Ball Valve for Gas”, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 11, pp. 1507-1511, 2009.
- [2] Kang, H. B., Lee, S. S., Park, I. S., Song, J. H., Lee, S. H., “A Numerical Analysis on the Flow Characteristics of Ball Valve”, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, pp. 921-922, 2012.
- [3] Chern, M. J., Wang, C. C., Ma, C. H., “Performance Test and Flow Visualization of Ball Valve”, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 31, No. 6, pp. 505-512, 2007.
- [4] Kalkat, K., “Experimentally Vibration and Noise Analysis of Two Types of Washing Machines with a Proposed Neural Network Predictor”, *Measurement*, Vol. 47, pp. 184-192, 2014.
- [5] Lee, J. H., “A Characteristic Analysis of High Pressure and High Temperature 3-way Ball Valve”, *J. Korean Soc. Manufacturing Process Eng.*, Vol. 11, No. 4, pp. 180-184, 2012.
- [6] Ha, S. H., Kim, S. J., Song, J. I., “Structure Analysis and Torque Reduction Design of Industrial Ball Valve”, *J. Korean Soc. Manufacturing Process Eng.*, Vol. 13, No. 6, pp. 37-45, 2014.
- [7] Tudor, A., Negriu, R., Radu, I., Dumitru, V., “A Wear Study Case of Ceramic Ball Seat Valve”, *Tribology in Industry*, Vol. 25, No. 3&4, pp. 83-89, 2003.
- [8] Shimizu, K., Noguchi, T., Seitoh, H., Okada, M., Matsubara, Y., “FEM Analysis of Erosive Wear”, *Wear*, Vol. 250, No. 1-12, pp. 779-784, 2001.
- [9] Kim, J. H., Chun, K. J., Hong, J. S., Kim, Y. S., Kim, D. Y., Im, J. K., “A Study on Valve and Seat Insert Wearing depending on Cycle Number”, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 5, pp. 103-104, 2006.
- [10] Rogula, J., “The Influence of Seat Fatigue Test on the Leakage in Ball Valve” *Procedia Eng.*, Vol. 39, pp. 91-97, 2012.
- [11] Preteepasen, A., Kaewwaewnoi, W., Kaewtrakulpong, P., “Smart Portable Noninvasive Instrument for Detection of Internal Air Leakage of a Valve Using Acoustic Emission Signals”, *Measurement*, Vol. 44, No. 2, pp. 378-384, 2011.
- [12] Bagherifard, S., Fernandez Pariente, I., Guagliano, M., “Failure Analysis of a Large Ball Valve for Pipe-Lines”, *Eng. Failure Anal.*, Vol. 32, pp. 167-177, 2013.
- [13] Mascarenhas, L., Gomes, J., Beal, V., Poortela, A., Ferreira, C., Barbosa, C., “Design and operation of a high temperature wear test apparatus for automotive valve materials”, *Wear*, Vol. 342-343, pp. 129-137, 2015.
- [14] Kim, S. G., Kim, K., Song, K. C., “Empirical Prediction Method of Engine Valve and Valve Seat”, *Journal of the KSTLE*, Vol. 28, No. 5, pp. 218-232, 2015.
- [15] Wu, Z., Zhou, F., Chen, K., Wang, Q., Zhou, Z., Yan, J., Li, L., K., Y., “Friction and Wear Properties of CrSiCN Coating with Low Carbon Content as Sliding against SiC and Steel Balls in Water”, *Tribol. Int.*, Vol. 94, pp. 176-186, 2016.
- [16] Hwang, D. H., Kim, D. E., Lee, S. J., “Influence of Wear Particle Interaction in the Sliding Interface on Friction of Metals”, *Wear*, Vol. 225-229, pp. 427-439, 1999.
- [17] Cha, K. H., Chung, K. H., Kim, D. E., “Effect of Slider Load on the Wear Debris Contamination Tendency of Head/Slider”, *IEEE T.Magn.*, Vol. 35, No. 5, pp. 2355-2357, 1999.