

오일샌드 플랜트용 금속소재의 마모 특성에 대한 실험적 연구

원성재[†] · 조승현 · 강대경 · 허종식

한국기계전기전자시험연구원

Experimental Study on Wear Characteristics of Metallic Materials used in Oil Sands Plants

Sung-Jae Won[†], Seung-Hyun Cho, Dae-Kyung Kang and Joong-Sik Heo

Korea Testing Certification

(Received November 20, 2016; Revised December 24, 2016; Accepted December 27, 2016)

Abstract – Recently, international attention has been focused on the development of non-traditional energy resources such as shale gas and oil sands, due to the steep increase in the demand for natural resources. The materials incorporated in an oil gas plant module experience extreme environments, and are prone to various problem such as fracture, corrosion and abrasion due to low-temperature brittleness. In order to improve the plant life, it is necessary to perform characteristics study and performance evaluation of the materials. In particular, this paper explains the main set of materials which are most frequently used in oil sands plant project. In order to investigate wear characteristics, the authors carried out abrasive wear tests of TP 316, stainless steel and SS 400, structural rolled steel. For the analysis of the abrasive wear resistance of an oil sands plant, the authors carried out the test according to ASTM G 105 “Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Test” standard guidelines. The authors have derived the results from the data associated with the loss of mass with respect to wear rate. During the test, for a given wear length for 10,000 revolutions, the rotational speed and applied force of the rubber wheel were varied.

Keywords – wet abrasive wear(습식 연삭 마모), material(소재), oil sands plant(오일샌드 플랜트)

1. 서 론

최근 천연자원의 수요가 크게 증가함에 따라서 오일 샌드, 셰일오일 및 셰일가스과 같은 비전통 에너지 개발에 대한 국제적인 관심이 높아지고 있다[1]. 특히, 오일샌드 플랜트 사업은 주로 캐나다 북부 낮은 기온지역에 위치하므로 극한지 자원-에너지 개발, 각종 파이프라인 지하시공 증가 등으로 고온 및 저온 경도와 내마모성이 우수한 재료의 사용이 요구되어 진다[2, 3]. 소재의 마모는 일반 산업에서 큰 비중을 차지하는 만큼 마찰로 인한 손상으로 인해 부품을 주기적으로 교체 할 필요가 있기 때문에 예비 부품 자체 및 부품 교체 시

활동을 중단하는 추가 비용으로 인해 운영 비용이 크게 증가하게 된다. 따라서, 이러한 어플리케이션에 적합한 재료를 선택하는 것이 매우 중요한 요소 중 하나이다[4, 5]. 또한, 국제적으로 자국의 산업 보호 및 품질 수준 확보를 위하여 플랜트 기자재 및 부품, 장치류에 대한 시험-인증을 실시하고 있으며, 이러한 추세는 지속적으로 강화되고 있다. 플랜트 모듈을 구성하는 소재가 극한환경에 노출되는 경우 저온 취성에 의한 파괴, 부식, 마모 등 다양한 문제점들이 발생될 수 있으며, 플랜트 내구수명 향상을 위해서는 소재에 대한 특성 연구 및 성능 평가가 이루어져야 한다. 그 중, 마모란 상대운동의 결과로 접촉면의 물질이 제거되는 현상으로 정의되는데, 주로 응착마모(adhesive wear), 연삭마모(abrasive wear), 부식마모(corrosive wear), 표면피로마모(surface fatigue wear)로 나뉘어진다. 이러한 여러

[†]Corresponding author : bluetjdwo@kctc.re.kr
Tel: +82-31-470-1604

마모 중 특히 연삭마모는 공업적 마모의 50% 이상을 차지하는 매우 중요한 마모현상이다. 마모에 의한 경제적 손실은 정량적으로 분석하기는 어려우나, 미국과 독일에서 분석한 결과를 참고하면 마모손상 및 마모 부식에 의한 경제적 손실은 각각 GNP의 2.5%(ASME Report, 1977), GNP의 4.5%(BMFT Report, 1984)정도로 분석하고 있다[6].

본 연구에서는 오일샌드 플랜트 사업에서 가장 많이 사용되어지고 있는 주요 6종 소재에 대해 설명하고 대표적으로 사용되는 TP316과 SS400 소재의 내마모 시험을 ASTM G 105 규격에 맞추어 특성 평가를 진행하였다. 또한, 연구 목적이 기자재의 수명 향상에 밀접한 관계가 있기 때문에 파이프라인에서 사용되어지는 소재에 대한 환경으로써 온수, 모래, 비투멘의 혼합물이 고온 상태로 통과 한다. 파이프의 부식 및 마모 진행속도가 매우 빠르다는 점을 적용하여 내마모 시험의 시험적인 요소 조건을 일부 변경하면서 각각의 시험을 진행하였다. 일반적으로 금속의 경도는 온도에 미치는 영향력이 크기 때문에 온도가 높을수록 경도는 낮아진다. 다른 영향력을 주는 요소가 없다면 마모율은 경도가 작을수록 증가하기 때문에 온도가 높을수록 마모율 또한 증가한다. 이러한 마모 거동은 경도 때문에 발생하게 되는데, 경도가 증가함에 따라 인성이 감소되고, 이는 파손의 위험이 더 높아지는 것을 의미한다[7]. Table 1에서 오일샌드 플랜트용 주요 6종 소재에 대한 각각의 Data Sheet상의 화학적 성분을 표시하였다. TP304, TP316 소재는 ASTM A312 규격으로 용접 및 냉간가공 오스테나이트 스테인레스 배관에 대한 규격으로 가장 일반적인 스테인레스강 재질로 널리 사용되어지고 있는 소재이다. SS400(Steel Structure)은 KS D 3503 규격으로 일반 구조용 압연강재에 사용되고 ASTM 규격의 A36과 호환 가능한 소재이다. SM490B

(Steel Marine)는 KS D 3515 규격으로 용접 구조용 강재에 사용되고 ASTM A709 gr36과 호환 가능한 소재이다. S31254는 ASTM A240 규격으로 고내식성을 가진 슈퍼 스테인레스강 소재로써 고온해수와 같은 가혹한 환경에서도 뛰어난 내식성을 가지며, 니켈함금강이나 티타늄에 필적하는 내식성을 갖는 경제성이 높은 소재로 알려져 있다. S31803은 ASTM A276 규격으로 오스테나이트계 특성인 내식성과 페라이트 조직이 갖는 강도를 가지는 스테인레스 소재로 열교환기, 담수화 설비, 석유화학 설비 등에 사용되는 소재이다.

시편 제작은 ASTM G105 표준 규격에서 제시하는 기준에 맞추어 제작되어진 금속소재 시험 시편으로써, 각 시편은 $(25.4 \pm 0.8) \text{mm} \times (57.2 \pm 0.8) \text{mm}$ 의 사각시편으로 두께는 9.5 mm이며 시편 표면 0.125 mm 이내로 편평도를 맞추었다. 또한, 시험결과에 영향을 미칠 수 있는 가공 표면 거칠음과 같은 표면 결함 등에 유의하여 시편을 선정하여 실험에 임하였다.

본 연구에서는 스테인레스강 소재와 압연 강재 소재의 마모 시험 평가를 통해 소재 간 마모 경향성을 파악하고 결과 분석을 통해 플랜트 주요 핵심 기자재의 마모환경에 적합한 소재의 선정에 활용하고자 한다.

Table 2. Results of tension test each material

Grade	Tensile Test		
	Y.P(MPa)	T.S(MPa)	E.L(%)
TP304	235.2	635.9	61
TP316	228.7	568.9	65.6
SS400	306	452	31
SM490B	349	520	27
S31254	338	681	70
S31803	554	741	31

Table 1. Chemical analysis of substrate material

Grade	Chemical composition, %										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Co	Cu
TP304	0.046	0.97	0.031	0.002	0.45	18.11	8.08	0.20	0.040	0.18	0.30
TP316	0.021	0.96	0.035	0.002	0.51	16.67	10.06	2.07	0.037	0.21	0.32
SS400	0.1631	0.546	0.0108	0.0051	0.226	-	-	-	-	-	-
SM490B	0.1543	1.303	0.0163	0.0031	0.390	-	-	-	-	-	-
S31254	0.010	0.75	0.023	0.0004	0.24	19.81	18.09	6.05	0.21	-	0.70
S31803	0.013	1.844	0.024	0.0009	0.224	22.146	4.932	2.549	-	-	-

2. 내마모 시험법

위에서 설명한 오일샌드 플랜트용 소재의 내마모 특성을 분석하기 위하여 ASTM G 105의 “Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Test”의 표준 지침에 따라 마모 시험을 수행하였다[8]. ASTM 표준에 설명하는 절차에 따라 마모 시험이 수행되어야 한다. Fig. 1에서는 내마모 시험의 원리를 개략적으로 도식화하여 설명하였다. 회전하는 wheel과 시험편 사이에 작용하는 하중으로 연마 슬러리(모래)가 표면이 마찰함으로써 마모가 일어나는 원리이다. 시험에 사용되는 연마슬러리는 0.940 kg의 탈이온수와 ASTM에서 규정하고 있는 AFS 50/70 SILICA 시험 모래로써 Table 3에 구성을 나타내었으며, 1.5 kg의 비율로 혼합하여 시험을 진행하였다. wheel 표면에는 고무재질을 피복함으로써 마모시험을 진행하였다. 각 시험 조건들으로써는 마모시험에서 중요한 변수로 작용하는 하중, 고무바퀴 wheel의 회전속도(rpm)를 변화하였으며, Table 5에 설정된 마모 시험 조건을 나타내었다. 조건 하중변수는 2, 4, 6 kg을 주어 3등급으로 변화를 시켰으며, 실제로 소재 시험편에 걸리는 하중은 시험장치의 길이비로 인하여 4, 8, 12 kg

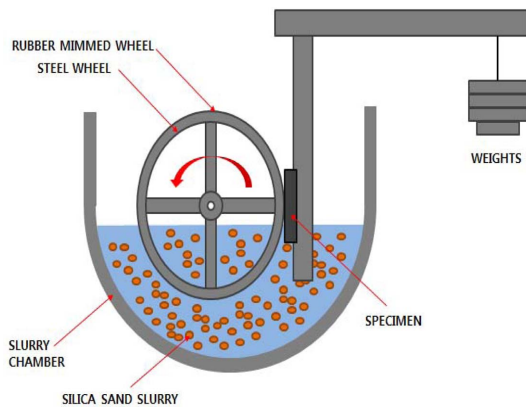


Fig. 1. Schematic diagram of the wear test apparatus.

Table 3. Mixed composition of sand

US Sieve size	Sieve Opening	%Retained on Sieve
40	425 μm	None
50	300 μm	5 max
70	212 μm	95 min
100	150 μm	None Passing

이다. wheel의 회전속도는 90, 180, 270 rpm으로 원형 표면 회전속도로 변환하였을 때 90 rpm 기준으로 0.837 m/s의 속도로 회전을 하게 된다. 이외에 마모매질의 경도와 입도가 있으나 마모매질의 경도와 입도는 다양하게 수치화하여 변경하기 곤란하여 위에서 언급하였던 ASTM에 규정하고 있는 AFS 50/70 silica test sand를 사용하였다. 각 마모 시험 조건에서 마모시험 시간은 총 마모길이를 일정하게 하기 위하여 마모시험 조건에 관계없이 총 회전수가 10,000회전으로 고정하였다. 각 10,000회전은 고무바퀴의 직경을 약 177.8 mm로 가정하였을 때 5.586 km의 선형 연마 길이를 나타낸다. 또한, 다른 기타 마모 시험조건은 ASTM G105의 규정에 따라 시험하였으며, 마모 전-후의 소재 시험편의 무게를 측정하여 마모량을 파악하였다. 이때, 시험에서 사용되는 각각의 소재 시험편을 깨끗하게 세척과 건조를 통해 저울(METTLER TOLEDO-ME204)의 분해능을 0.0001 g 까지 무게를 측정하였다.

3. 마모시험 결과 및 분석

Fig. 2에서는 시험 시편 소재 중에서 TP 316의 내마모 시험 후 마모 형상을 보여준다. 이때에 시험편은 마모 시험 후 깨끗이 씻고 물기를 제거하여 건조한 시험편으로써 질량 측정시의 오차를 최대한 줄이고자 하였다. 또한, Table 4에서는 마모율 분석에 앞서서 경도와 마모와의 관계를 알아보기 위하여 두 시험편에 대한 브

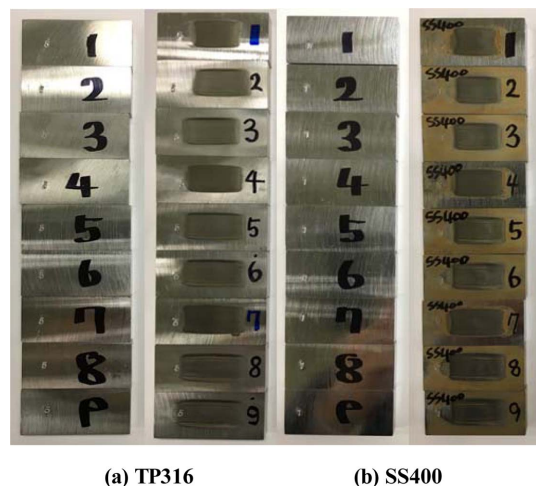


Fig. 2. Test specimens for the rubber wheel abrasion test.

Table 4. Results of brinell hardness test

	Test Diameter (mm)	HBW 10/3 000
TP 316	5.2008	130.9
SS 400	5.4770	116.9

리넬 경도 시험(KS 0805)을 진행한 값을 표기하였다. TP 316 시편 표면층에 대한 브리넬 경도의 측정결과는 HBW 10/3 000, 130.9 정도를 가지며, SS400 시편 표면층에 대한 측정값은 HBW 10/3 000, 116.9 정도를 가지는 것을 알 수 있다.

Table 5에서는 각 마모 조건에 따른 마모 시험 결과를 보여준다. 2가지 금속 시험편에 대한 마모량을 나타내었으며 마모량을 통하여 소재에 대한 경향성을 파악하고자 하였다. wheel의 10,000회 회전(5.586 km)에 대한 내마모 환경에서 SS400 소재 시편이 TP316에 비해서 우수한 성질을 나타내는 것을 알 수 있다. TP 316과 SS400 두 시편에 대한 동일한 시험을 진행한 결과를 비교하면 TP 316 시편의 전체 시험의 평균 마모량은 0.6221 g으로 SS400 시편의 0.2680 g에 비해서 평균적으로 2.5배 가까이 마모가 진행된 것을 알 수 있다. 이 마모에 대한 결과값은 서론부분에서 설명한 일반적인 마모와 경도와의 관계와는 다른 결과인 것을 알 수 있는데, 경도값은 TP 316 소재 시편이 SS400 시편에 비해서 HBW 값이 15 가량 더 높게 나타났다. 이 결과를 보아 경도와 마모와의 관계에

서 경도가 큰 것이 반드시 마모성이 좋다고 판단하기는 어렵다고 보아진다. 일반적으로 단단한 물체는 마모가 잘 일어나지 않을 거라 생각되지만, 경도가 더 낮은 소재가 마모성이 뛰어난 경우가 있다는 것을 알 수 있다. 한편, 박성길 외 2인의 강도에 미치는 마모 영향에 따르면, 마모는 표면에 균열을 생성시킬 수 있기 때문에 강도에 큰 영향을 미칠 수 있지만, 강도에 미치는 마모의 영향은 밝혀지지 않았다고 한다[9]. 또한, 고무재료와 연마슬러리, 탈 이온수와 금속시편 소재 간의 마모 거동측정에서 연속적인 마모가 일어나는 경우에는 재료의 성질, 표면의 형태와 하중의 영향 등이 고려될 수 있는데, 연속적인 마모가 일어날 시에는 마찰하면서 생기는 온도의 증가가 주된 원인이고, 하중 역시 마찰력이 증가로써 온도가 증가하게 되는 것이다. 이렇듯, 마모현상에서는 물리적, 화학적, 기계적인 성질과 같은 복합적인 요소가 작용하여 재료의 경도가 내마모성과 비례하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 TP 316 시편 소재 같은 경우에는 마모시험 진행 후 부식현상을 전혀 발견할 수 없었지만, SS400 시편소재의 경우에는 마모시험을 진행하면서 부식이 발생하기 시작하였다.

Fig. 3에서는 TP 316에 대한 rpm과 하중을 변화하였을 때 마모량에 대해서 그래프화 하였다. wheel의 회전속도가 90 rpm으로 느릴 때의 시편소재의 마모 감소량을 보게 될 때에는 하중과 무관하게 마모량은 거의 비슷한 경향을 보여주었으나, 하중과 rpm이 증가할수록 마모량이 직선적으로 비례하여 증가함을 알 수

Table 5, Rubber wheel abrasion test conditions and results (total wear length : 10000 revolutions – 5.586 km)

No.	Applied Force (kgf)	Wheel Revolution Rate (rpm)	Weight Loss (g)			
			TP 316		SS400	
			loss(g)	loss rate(%)	loss(g)	loss rate(%)
1	2.00	90 (0.837 m/s)	0.0281	0.026	0.0353	0.033
2	2.00	180 (1.674 m/s)	0.7084	0.644	0.3803	0.352
3	2.00	270 (2.512 m/s)	0.8798	0.801	0.5300	0.490
4	4.00	90 (0.837 m/s)	0.0496	0.045	0.0039	0.004
5	4.00	180 (1.674 m/s)	0.8303	0.756	0.3226	0.297
6	4.00	270 (2.512 m/s)	0.9250	0.841	0.3571	0.329
7	6.00	90 (0.837 m/s)	0.0347	0.031	0.0036	0.003
8	6.00	180 (1.674 m/s)	0.9527	0.868	0.3291	0.304
9	6.00	270 (2.512 m/s)	1.1907	1.085	0.4500	0.415
Average Weight Loss			0.6221 (0.566%)		0.2680 (0.247%)	

있다. TP 316 소재에 대하여 하중과 rpm을 각각 4 kg, 180 rpm으로 고정하고 rpm과 하중의 변화에 따른 마모 변화율의 영향을 분석해 보았다. 하중이 4 kg일 때 rpm을 90 rpm에서 270 rpm으로 3배 증가한 경우 마모 변화율은 0.796% 증가하였다. 반면 rpm이 180일 때 하중을 2 kg에서 6 kg으로 3배 증가한 경우 마모 변화율은 0.244% 증가하였다. 이를 분석해 보면 마모 변화율에 대하여 소재에 작용하는 하중보다 rpm의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 하중에 걸리는 조건하에 rpm 속도가 증가하면 마모량은 증가하는 것을 알 수 있다. 상대적으로 하중이 클수록 rpm에 따른 마모 변화량 또한 더 높게 나타난다. SS400에 대한 rpm과 하중을 변화하였을 때 마모량에 대한 변화 그래프에서도 마찬가지로 wheel의 회전속도가 90 rpm 일 때 하중에 관계 없이 마모가 거의 일어나지 않았다. 그러나 TP 316소재와는 다른 경향성을 나타내는데, 180 rpm과 270 rpm에서의 결과값을 보게 되면 오히려 하중이 2 kg으로 적을 때 마모율이 더 큰 것으로 확인되었다. 회전속도가 높아질수록 비례하여 마모율도 커지기는 하지만, 하중에는 영향력을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 플랜트 기자재에서 가장 널리 사용되는 주요 6종 금속 소재에 대해서 설명하고 특히, TP316 소재와 SS400소재의 내마모 시험에서 일정한 마모길이에 대한 하중 변화, 고무바퀴 wheel의 rpm의 변화에 대해서 비교 분석하고 경향성을 파악하고자 하였다.

마모 시험에서 결과는 시험편의 시험 전·후의 질량차를 분석하여 도출하였고, SS400이 TP316소재에 비해 마모량이 적게 나타나서 마모성능이 보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 시험 전반적으로 하중과 고무바퀴의 rpm에 비례하지만, 적용 하중보다 rpm의 영향력이 더 큰 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시험 변수조건 rpm과 하중에서 마모율에 영향이 더 큰 인자는 rpm으로 판단된다.
- 2) 오일샌드 플랜트 사업에서 사용되어지는 소재의 내마모 특성 분석을 진행하였다. 시험 결과값의 절대적인 수치를 보면 SS400시험이 TP316 시험보다 마모율이 우수하다. 하지만, 본 시험에서 유체와 같이 실험이 진행되면서 부식 및 마모가 동시에 발생하기 때문

에 마모 및 부식에 대한 영향성을 병행하여 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3) 금속 소재 시험 마모환경에서 TP 316 시험 소재가 SS400 시험 소재에 비해 경도는 높은 반면 평균 마모율이 2배 이상 많은 것으로 나타나는 것을 보아 고무바퀴 wheel의 고무재료와 유체, 그리고 시험사이에서 발생하는 마모는 물리적, 화학적, 기계적인 성질이 복합적으로 작용하여 표면 경도가 높은 재료가 마모율에 비례하지 않는다는 것을 알 수 있다.

4) 향후 연구를 통하여 서론에서 언급하였던 소재 6종에 대한 전체 기계적인 메카니즘 및 내마모 거동을 파악할 예정입니다.

Acknowledgements

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비 지원(161FIP-B089065-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Ministry of Strategy and Finance, Prospects and Implications of Unconventional Energy Resources, 2012.
- [2] Song, C. H., Kwon, K. B., Shin, D. Y., Hwang, W. K., Lim, J. H., Jo, J. W., "Trend Analysis of Drilling Technology for Top-Hammer Drilling machine", Korea Tunnel Journal of Engineering Education, Vol. 23, No. 4, pp. 271-279.
- [3] Lee, W. S., "Study on the Recycling of Tungsten Carbide Hard Alloy Sludge", Kookmin University Master's thesis.
- [4] B. Bhushan, B. K. Gupta, Handbook of Tribology : Materials Coatings and Surface Treatments, Krieger Publishing Company, Florida, 1997.
- [5] E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, Wiley, Canada, 1995.
- [6] Zum Gahr, Microstructure and wear of materials, Elsevier, Amsterdam, (1987), pp. 4.
- [7] H. Sierra, C. A., Carcia, J. Morales, J. M. Velez, Relacion entre desgastey tenacidad para algunos aceros al carbono templados y revenidos a iguales niveles de dureza, EAFIT Enero-Marzo 117 (2000) 59-67.
- [8] ASTM G105-89, Standards test method for conducting wet sand/rubber wheel abrasion tests, ASTM Standards.
- [9] Park, S. G., Huh, Y. H., Cho, S. J., "Effect of wear on strength of alumina", Proceedings of the KSTLE Autumn Conference, pp. 36-40, 1990.