

## 분류에 의한 SLURRY 마멸

우창기\*, 조건식<sup>+</sup>

(논문접수일 2002. 2. 1, 심사완료일 2002. 9. 11)

### Slurry Wear Test on the Liquid Jet

C. K. Woo\*, G. S. Cho<sup>+</sup>

#### Abstract

This research is about slurry wear of SM45C and SUS304, which using standard sand and KUM river sand. The results are as follows ; 1. Mass loss rates of both standard sand and KUM river sand were linearly increased as increasement of time and velocity. 2. The average diameter of sand from relatively, less wear rate and portion of larger particles. 3. Wear resistance was linear with time and velocity of liquid jet regardless of type of sand. Also, it was able to evaluate with the formula,  $HV^2/E$  calibrated with  $n$ , the velocity index. 4. The wear surface in liquid jet experiment was smooth. The maximum wear depth was observed at the location, 2~4mm apart from the center in the condition of 90° of collision angle 6mm of nozzle diameter, and 20mm of collision distance. The sectional shape in radial appeared as 'W' shape.

**Key Words :** Mass Loss Rate(질량감소률), Max Depth Penetration(최대마모깊이), MDP(마멸속도), Wear Resistance(마모저항), Mass Loss(질량감소량)

## 1. 서론

기계의 수명을 결정하는 중요한 인자중의 하나가 접촉하는 물체의 상대운동과 마찰력의 결과로 생기는 마멸현상이다. 이러한 마멸현상은 상대운동을 하는 모든 기계장치에서 피할 수 없이 발생하는 것으로 여러 연구자들이 이 현상을 연구해 왔다<sup>(1-3)</sup>.

이와 같은 마멸이나 마찰은 실생활에서 많이 볼 수 있는 일반적인 현상이고 공학적으로도 매우 중요한 영역이지만 1960년대까지는 체계적으로 연구되어 오지 않았다. 그러나 에너지 문제, 초정밀도의 유지, 내구성 향상이라는 관점에서 최근에 많은 관심을 끌고 있는 연구분야인 동시에 공업적으로도 매우 중요한 영역으로 인식되고 있다<sup>(4-7)</sup>.

본 연구에서는 6호 표준모래와 금강유역의 모래가 어느

\* 주저자, 인천대 기계공학과 (woerwck@incheon.ac.kr)  
주소: 402-749 인천시 남구 도화동 177번지, Tel: 032-770-8413  
<sup>+</sup> 청학공고

정도의 slurry마멸을 일으키는지 SM45C와 SUS304를 사용하여 분류식 slurry마멸시험법으로 비교·검토하였다. 질량감소량, 질량감소율과 MDR, 마멸단면의 형상, slurry마멸 저항 등을 고찰하여 수차설계의 기본자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용한 시험편은 일반적으로 널리 이용되는 기계구조용 탄소강인 SM45C와 수력발전소 수차재료와 유사한 스테인레스강인 SUS304로, 질삭숫돌을 사용하여 직경 20mm, 높이 10mm의 원기둥 시험편으로 잘라 평면연삭기로 가공하고, 시험편 표면의 흠집 영향을 줄이고 관찰을 용이하게 하기 위하여, 시험편은 사포로 #600에서 #1200까지 연마한 후, 산화알루미늄 용액을 사용하여 폴리싱(polishing) 처리하였다. 시험재료의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 2에 나타내었다. 6호 표준모래는 조성과 형상이 규격화(입자평균크기 400 $\mu$ m) 되어있으나 금강모래는 불규칙적이 고(입자평균크기 250 $\mu$ m) 함유성분 또한 불균일하였다.

### 2.2 실험장치 및 방법

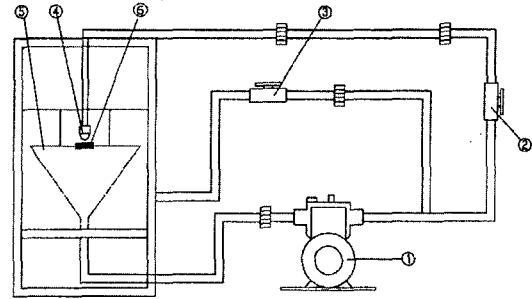
Slurry마멸 시험장치의 간략도를 Fig. 2에 나타내었다. 5~13%의 유속을 낼 수 있는 펌프와 시험편 받침대가 고정되어 있는 외각통 그리고 혼합액을 만드는 사각뿔 형태의 20L 용량의 수조 및 시험편에 혼합액을 분류하는 노즐로 되어있다. 또한 되먹임밸브(bypass valve)로 펌프의 과부하를 방지하였고, 제어밸브(control valve)는 노즐 쪽의 유량을 단속할 수 있도록 자체 설계 제작하였다.

Table 1 Chemical compositions(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SM45C	0.43	0.18	0.09	0.016	0.008	-	-
SUS304	0.08	0.60	1.58	0.039	0.020	8.68	18.30

Table 2 Mechanical properties

	$\sigma_B$ (MPa)	E (GPa)	HV (0.49N, 30S)
SM45C	660	204	185
SUS304	596	193	256



No	Item
①	Pump
②	Control valve
③	By pass valve
④	Nozzle
⑤	Water tank
⑥	Specimen

Fig. 2 Wear testing apparatus

Slurry마멸시험은 시험조 내에 고정된 시험대에 시험편을 아세톤으로 세척한 후 장착하고, 20mm 떨어져 대향시켜 부착한 직경 6mm의 노즐로부터 혼합액을 수직으로 분출시켜 시험편에 충돌시켰다. 유량은 유량조절밸브의 개폐에 의하여 조절하였다. 최대분류속도는 13%이고, 연속적으로 가변시킬 수 있다. 시험액은 자동 교반이 되는 저수조(사각뿔형)에서 물과 모래를 혼합하여 펌프로 순환시켜 사용하였다. 그리고 시험편마다 새로운 모래로 대체하였다.

마멸량은 소정시간 시험한 후, 시험편을 고정대로부터 떼어내어 초음파 세척기로 세척하고 건조기를 이용하여 충분히 건조한 다음, Chyo Balance Corp. Japan 제품(Chyo JL-180)인 정밀저울(감도 0.1mg)로 측정하였다. 또한 동시에 마멸면의 형상변화를 Mitutoyo Corp. Japan제품(Surfest Sv-600)과 프로그램 (Surfpak ver3.0)을 이용하여 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 질량감소곡선

Fig. 3 (a), (b)는 6호 표준모래에 대하여 유속을 달리하여 실험한 결과이다. Fig. 3 (a)은 SUS304의 결과이고 Fig. 3 (b)는 SM45C의 질량감소속률 곡선이다. 질량감소량은 SUS304와 SM45C 모두 시험개시 후로부터 시험시간에 비례하여 직선적으로 증가하고 있다. 또한 분류 속도의 증

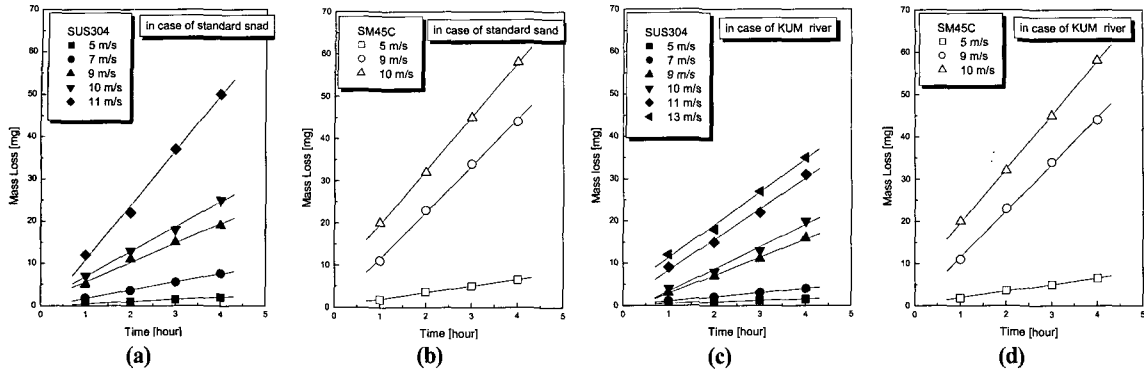


Fig. 3 Mass loss of slurry wear

가에 따라 질량 감소량이 증가하였다.

Fig. 3 (c), (d)에 금강모래에 의한 slurry마멸량을 나타내었다. 금강모래에 의한 질량감소량도 6호 표준모래의 양상과 비슷하나 그 마멸량은 6호 표준모래에 비하여 적음을 확인하였다. 따라서 동일한 중량비에서도 포함된 입자의 크기 혹은 그 분포, 형상에 따라 마멸량이 달라지는 것으로 판단된다. 또한 SUS304보다 SM45C의 마멸량이 큰 것은 표면경도의 차이에 의해 발생한 것으로, 마멸이 표면경도의 영향을 크게 받는 것으로 사료된다.

### 3.2 질량감소율(Mass loss rate)

질량감소율은 질량감소곡선으로부터 단위시간당 마멸되는 질량비를 나타낸 것이다. 그래프는 유속과 질량감소율을 양대수 그래프로 나타내었다. Fig. 4 (a)는 표준모래에 의한 질량감소율을 나타낸 것이고, (b)는 금강모래에 의한 질량

감소율을 나타낸 것이다. 질량감소율은 분류의 유속 증가와 함께 증가하고, 그 관계는 양대수 좌표에서 직선관계가 된다.

동종의 모래를 사용한 slurry마멸에서는 시험편의 표면경도에 영향으로 SUS304의 감소율이 작게 나타났으며 SM45C가 비교적 높게 나타났다. 또한 표준모래보다는 금강모래 쪽이 작게 되는 것은 함유하고 있는 모래의 크기나 모래의 형상에 의존하고 있기 때문이라고 사료된다.

Fig. 4 (c), (d)에 모래의 종류에 따른 마멸율의 차이를 나타내었다. 재료의 표면경도에 따라 마멸율이 차이를 보이고 있으며 금강 모래쪽이 시간이 흐름에 따라 마멸율이 둔화되는 것이 확인되었다.

### 3.3 마멸면의 형상과 최대마멸속도

Fig. 5, Fig. 6에 slurry마멸에 의한 시험편의 표면형상을 나타내었다. 분류에 의한 slurry마멸은 중심에서 반경방향

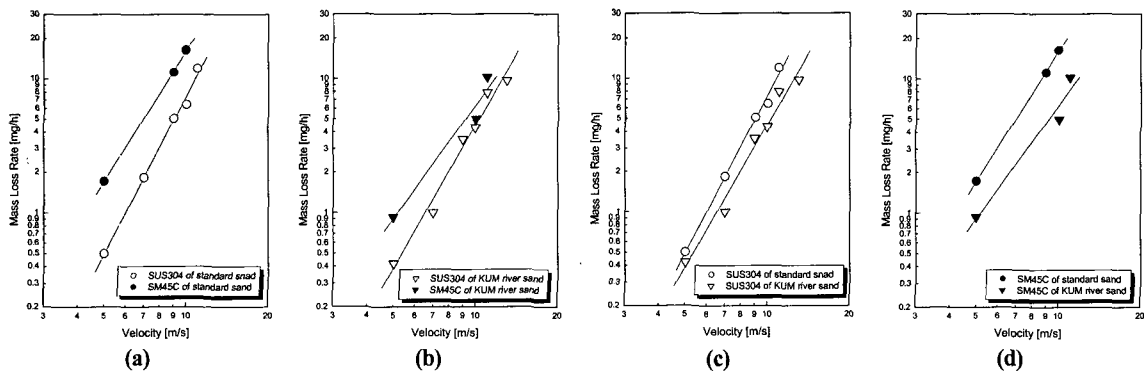
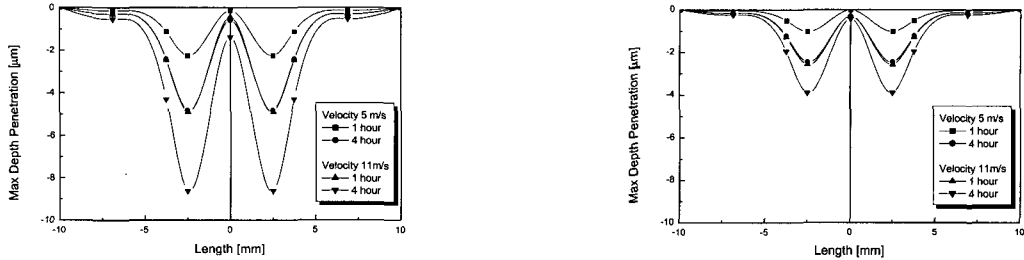


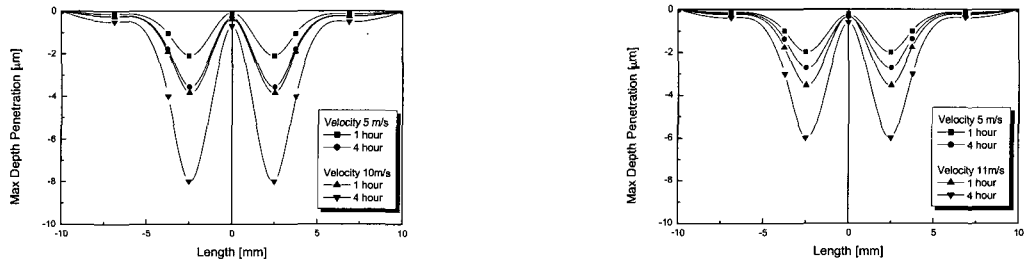
Fig. 4 Mass loss rate of slurry wear



(a) Wear surface with SUS304 in standard sand

(b) Wear surface with SUS304 in kum river sand

Fig. 5 Wear surface with SUS304



(a) Wear surface with SM45C in standard sand

(b) Wear surface with SM45C in kum river sand

Fig. 6 Wear surface with SM45C

으로 2~4mm 떨어진 주위에 가장 크게 일어난다. 최대 마멸깊이는 중심에서 2.5mm 떨어진 곳에서 측정되었다. 반경방향으로 측정한 단면형상은 W자와 같은 형상을 하고 있다. 이것은 중심부로부터 멀어짐에 따라서 분류의 입자밀도가 감소하는 이상으로 입자의 충돌각도의 영향이 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 7에 분류속도에 의한 피마멸재료의 마멸속도를 나타

내었다. 마멸속도는 표준모래가 금강모래보다 비교적 높게 나타났다. 또한 SUS304보다 SM45C가 마멸속도는 크게 나타났는데 이는 금속의 표면경도에 의한 차이로 생각된다. 특징적인 결과는 6호 표준모래에서 분류의 속도가 증가할수록 SUS304의 마멸속도가 SM45C의 마멸속도와 근접하는 경향을 보였다.

### 3.4 마멸저항(wear resistance)

Slurry마멸저항(질량감소를 또는 MDPR의 역수)과 피마멸재료의 재료특성과의 상관성은, 분류의 충돌각도가 90°인 경우, 고체입자가 직접 재료표면을 절삭하는 작용보다도 충돌에 의한 변형과 그후 변형부를 미소 절삭하는 작용의 쪽이 주가 된다고 생각할 수 있기 때문에, 재료의 충격 압축력에 대한 변형저항과의 연관성으로부터 고찰하였다. 예를 들면, cavitation erosion에서는 미소면적에 반복 작용하는 기포붕괴압의 충격압축력에 의하여 침식이 진행하기 때문에, 경도와 같은 단일의 기계적 성질보다도 재료의 흡수에너지에 상당하는  $\sigma_B^2/E$ ,  $H_B^2/E$ ,  $HV^2/E$  ( $\sigma_B$ : 인장강도,  $H_B$ : 브리넬강도,  $HV$ : 비커스강도,  $E$ : 종탄성계수)등의 재료특성값의 쪽이 비교적 좋은 상관성이 얻어진다고 연구되고 있

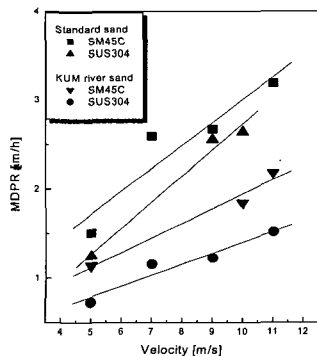


Fig. 7 MDPR with liquid jet velocity

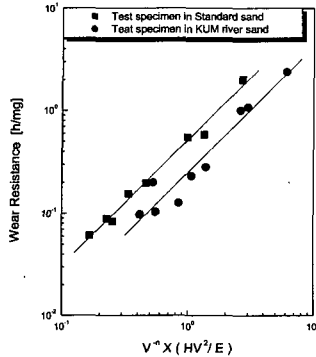


Fig. 8 Wear resistance

다. 본 논문에서는 피마멸재료의 재료 특성값으로써  $HV^2/E$ 를 사용하여 마멸저항을 Fig. 8에 나타내었다.

질량감소률이나 MDPR도 (속도)<sup>n</sup>에 비례하기 때문에,  $HV^2/E$ 에 (속도)<sup>n</sup>을 승으로 하여 유속의 영향을 보정하였다. 보정한 결과 표준모래에서는  $n \approx 3$ , 금강모래에서는  $n \approx 2.5$ 로 나타났다. 마멸저항과 (속도)<sup>n</sup> × ( $HV^2/E$ )의 관계는 액 중에 함유하는 모래의 종류에 의해 유속 5~11%의 범위에서 기울기 45°의 양호한 직선관계를 나타내고 있다. 이와 같은 유속의 차이는 액 중에서 발생하는 각종 재료의 slurry마멸저항은,  $HV^2/E$ 를 속도지수 n으로 보정한 피마멸재료의 재료특성값으로 평가하는 것이 가능하다는 것을 밝혔지만 더 많은 검토가 필요하다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 논문은 분류에 의한 slurry 마멸시험으로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 질량감소량은 모두 분류시간, 분류속도의 증가에 따라

선형적으로 증가한다.

- (2) 표준모래에 비하여 금강모래는 평균직경이 작을 뿐만 아니라 작은 입자의 분포가 많아 마멸의 양이 상대적으로 적다.
- (3) 마멸저항은 재질에 관계없이 분류시간과 분류속도로 선형화 됨을 보였다. 또한 재질에 관계없이  $HV^2/E$ 를 속도지수 n으로 보정한 피마멸재료의 재료특성값으로 평가 가능하고, 표준모래에서  $n \approx 3.0$ , 금강모래에서  $n \approx 2.5$ 가 된다.
- (4) 분류시험에서의 마멸면은 분류의 중심보다도 반경방향으로 2~4mm 떨어진 위치에서, 어떠한 시험재료에서도 'W'자와 같은 형상을 나타낸다

#### 감사의 글

본 연구는 2001년도 인천대학교 학술연구조성비 지원에 의해 수행되었음.

#### 참고 문헌

- (1) Finne, I., "some Reflections on the Past and Future of Erosion," *Wear* 3, pp. 87~103, 1960.
- (2) 前川紀英外, "분류에 의한 Slurry 마멸시험," 일본기계학회논문집(A편), 제59권, 제560호, pp. 1144~1149, 1993.
- (3) Tilly G. P., "A Two Stage Mechanisam of Ductile Erosion," *Wear* 23, pp. 87~96, 1973.
- (4) 小川善代, 일본금속학회 심포지움, p. 4, 1965.
- (5) 日本鐵鋼材料便覽, 九善, p. 444, 1967.
- (6) 佐田登志夫, 일본기계학회논문집, 제25권, 제152호, p. 227, 1959.
- (7) Hobbs J. M., *ASTM STP*, 408 p. 159, 1967.