

## 반응표면분석에 의한 고 Cr 철계 오버레이 용접부의 분체침식마모 특성의 연구

\*이 형 근

\*한밭대학교 신소재공학부 생산가공공학과

### A Study on Solid Particle Erosion Wear Characteristics of High Cr White Iron Hardfacing by Response Surface Method

\*Hyoung Keun Lee

\*Dept. of Welding and Production Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

#### Abstract

Solid particle erosion wear characteristics of high Cr white iron hardfacing were investigated using the erosion wear test method according with the ASTM G76-95. Wear experiments, where the blast angle, blast distance and blast pressure were selected as test variables, were planned and analyzed by response surface method (RSM) to evaluate the wear loss statistically and quantitatively. The measured wear losses well coincided with the calculated ones by the experimental equation. The wear loss of high Cr cast iron hardfacing was increased with blasting pressure, but affected in a complicated way by the blasting angle and distance. Erosion wear of high Cr cast iron hardfacing could be well predicted by RSM analysis of wear variables.

(Received June 11, 2002)

Key Words : High Cr cast iron, Hardfacing, Flux cored wire, Solid particle erosion wear, Response surface method, Chromium carbide

#### 1. 서 론

흐르는 유체 내에서 고체입자가 재료의 표면과 충돌하여 발생하는 마모손상을 분체침식마모(solid particle erosion wear)라고 한다. 이러한 분체침식마모는 터빈 블레이드, 분체의 고속 수송로, 집진장치 등에서 주로 일어난다. 특히 시멘트나 광업 등의 산업분야에서 분진에 의한 공해가 심각한 문제가 되고 있어 대부분의 분체는 밀폐된 수송관을 통하여 수송한다. 이러한 부분에서 분체침식마모는 매우 심각하며, 이를 감소시키기 위한 재료의 개발이나 마모경향의 분석은 중요한 과제이다. 고 Cr 주철은 연삭마모(abrasive wear)와 분체침식마모에 우수한 저항성을 갖고 있어, 시멘트, 광업 등의 산업분야에서 널리 사용하고 있다. 주물로 제조된 고 Cr 주철은 원하는 형상으로의 가공이 곤란하며, 내마모성을 증가시키기 위한 합금성분의 증가가 어렵다.

따라서 주로 연강판재 표면에 고 Cr 철계 용접재료를 오버레이용접하여 사용하고 있다. 고 Cr 철계 오버레이 용접부의 연삭마모에 대해서는 상당한 연구가 이루어져 왔으나<sup>1-5)</sup>, 분체침식마모에 대해서는 연구가 상당히 부족한 실정이다<sup>6-7)</sup>. 특히 고 Cr 주철과 같은 취성재료의 분체침식 마모기구에 대한 이론적인 예측이 매우 어려우며, 마모경향의 분석은 대부분 유사한 마모환경 하에서의 마모시험 결과에 의존하고 있다. 본 연구에서는 플럭스코어드와이어(flux cored wire)를 사용하여 제작한 고 Cr 철계 오버레이용접부의 분체침식마모에 마모조건이 미치는 영향을 반응표면분석법을 사용하여 체계적으로 분석하고자 하였다.

#### 2. 실험재료 및 실험방법

##### 2.1 용접재료 및 오버레이용접

용접선재는 직경 2.8mm의 셀프실드(self-shielded)

방식의 국산 고 Cr 철계 플럭스코어드와이어를 사용하였다. 모재는 두께 9mm의 SS400 연강판재를 사용하였다. 용접은 정전압 특성을 가지는 FCAW용 용접기를 사용하였으며, 극성: DCEP, 전압: 30V, 전류: 420~460A, 위빙(weaving) 폭: 32mm의 조건으로 용접하였다. 용접된 시험편은 약 20%의 희석율을 가졌다. 용접부의 화학조성은 4.8%C, 1.6%Mn, 1.0%Si, 25%Cr, 1.0%Mo, Fe로 분석되었다. 용접부의 로크웰(Rockwell) 경도는 HRC 57 정도로 측정되었다.

표면에 대한 주사형 전자현미경에 의한 미세조직은 Fig. 1에서 보여준다. Fe 기지 내에 10~20 $\mu$ m 굵기의 육각형의 조대한 초정 (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>와 2 $\mu$ m 이하의 작은 공정 (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>가 다량으로 존재한다. 이러한 초정 (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>와 공정 (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>는 용접 후 대부분 모재로부터 표면으로 길게 성장하여 방향성이 매우 큰 미세조직을 가진다. 고 Cr 철계 용접부의 우수한 내연삭마모성은 이러한 크롬 카바이드의 다량 존재에 의해서 기인하며, 크롬 카바이드의 체적비, 성장방향 및 두께 등이 내마모성에 영향을 미친다고 알려져 있다<sup>3)</sup>.

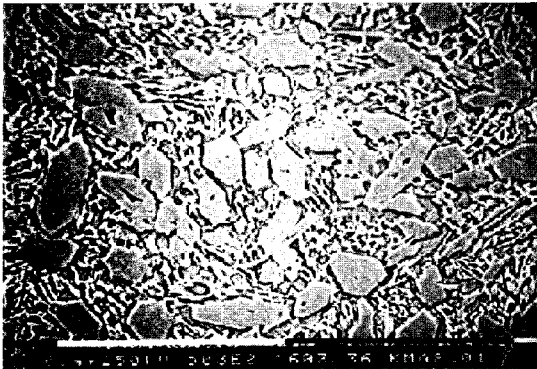
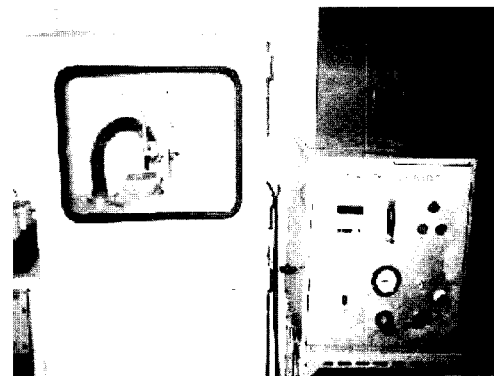


Fig. 1 Microstructure showing primary and eutectic chromium carbide distribution

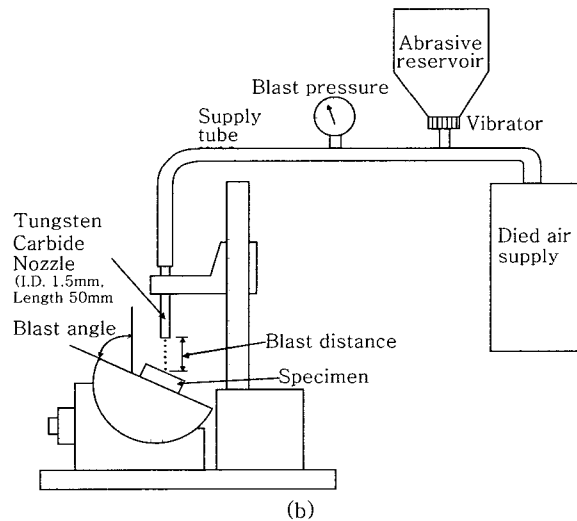
2.2 마모시험방법

분체침식마모시험은 ASTM G76-95의 규정에 따르는 마모시험기를 제작하여 사용하였다<sup>8)</sup>. Fig. 2에서는 분체침식마모시험기와 시험원리를 도식적으로 보여준다. 마모매질을 압축공기와 함께 노즐(nozzle)을 통하여 시험편의 표면에 강하게 분사시켜 침식마모가 일어나게 하며, 마모량을 측정하여 내마모도를 평가하였다. 마모매질은 50 $\mu$ m 입도의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말을 사용하였으며, 노즐은 내경 1.5mm, 길이 50mm의 텅스텐 카바이드 튜브를 사용하였다.

분체침식마모에서 중요한 마모변수로 고려되는 분사각도(blast angle), 분사거리(blast distance), 분사압력(blast pressure)을 마모변수로 선택하였다. 분사



(a)



(b)

Fig. 2 Solid particle blast erosion tester, (a) photograph of the equipment and (b) schematic diagram showing the test principle

각도는 60°를 기준으로 하여 30°~90° 사이에서 5개의 수준으로 변화시켰다. 분사거리는 15mm를 기준으로 하여 7.5~22.5mm 범위에서 5개의 수준으로 변화시켰다. 분사압력은 역시 2.1Kgf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 하여 1.2~3.0Kgf/cm<sup>2</sup>의 범위에서 5개의 수준으로 변화시켰다. 마모매질 공급속도는 압축공기압력에 무관하게 22.4±2.4g/min으로 일정하게 유지하였다. 마모시험은 1000초 동안 수행하였다. 마모량은 마모시험 전, 후의 무게감소로 평가하였다. 기타 다른 마모시험조건은 ASTM G76-95의 규정에 준하여 시험하였다. 마모 변수들의 영향을 입체적이고 통계적으로 분석하기 위하여, 반응표면분석법(Response Surface Method)의 중심합성계획(central composite design)에 따라서 실험조건을 설정하였다. Table 1에서는 실험조건을 보여준다.

3. 마모시험결과 및 분석

분사각도, 분사거리, 분사압력에 따라서 마모손상 부

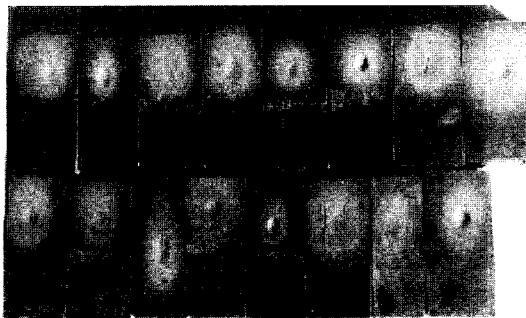
**Table 1** Blast erosion test conditions and results

No.	Blst angle (degree)	Blast distance (mm)	Blast pressure (Kg/cm <sup>2</sup> )	Wear loss (g)	
				Measured	Calculated
1	40	10	1.5	0.0056	0.0060
2	40	10	2.7	0.0092	0.0102
3	40	20	1.5	0.0066	0.0069
4	40	20	2.7	0.0170	0.0176
5	80	10	1.5	0.0038	0.0042
6	80	10	2.7	0.0118	0.0125
7	80	20	1.5	0.0026	0.0026
8	80	20	2.7	0.0167	0.0173
9	60	15	2.1	0.0073	0.0075
10	60	15	2.1	0.0063	0.0075
11	30	15	2.1	0.0106	0.0095
12	90	15	2.1	0.0087	0.0080
13	60	7.5	2.1	0.0088	0.0076
14	60	22.5	2.1	0.0126	0.0120
15	60	15	1.2	0.0019	0.0016
16	60	15	3.0	0.0173	0.0158

위의 형태가 서로 다르다. 마모시험 후의 실험조건에 따른 마모형상은 Fig. 3에서 보여준다.

마모시험결과는 Table 1에서 보여준다. 전체 시험편의 평균 마모량은 0.00918 g 정도이다. 마모량을 마모 변수들에 대해 2차 회귀분석에 의해 계산한 결과는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 WL = & 0.031473 - 0.00028232 \cdot X + \\
 & 1.461310^{-6} \cdot X^2 - 0.0017165 \cdot Y - \\
 & 6.375 \cdot 10^{-6} \cdot X \cdot Y + 0.000042048 \cdot Y^2 - \\
 & 0.011792 \cdot Z + 0.000084375 \cdot X \cdot Z + \\
 & 0.0005375 \cdot Y \cdot Z + 0.001562 \cdot Z^2 \quad (1)
 \end{aligned}$$



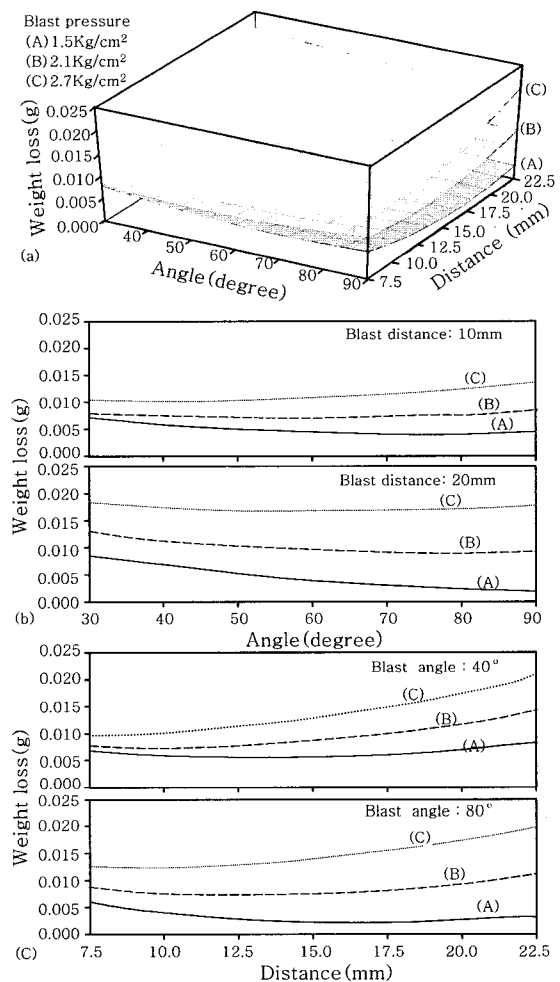
**Fig. 3** Wear appearance after solid particle blast erosion test

(WL : 마모량(g), X : 분사각도(°), Y : 분사거리 (mm), Z : 분사압력(Kgf/cm<sup>2</sup>)

Table 1에서는 실험에 의해 측정된 마모량과 또한 반응표면분석에 의해 얻어진 실험식(1)에 의해 예측된 마모량을 수록하였다. 측정치와 예측치 사이에 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 식(1)은 현재 사용된 마모조건 의 범위 내에서 마모조건에 따른 마모량을 정량적으로 잘 예측할 수 있다.

마모량에 각 마모변수들의 영향을 좀 더 자세히 분석 하기 위하여 Fig. 4~Fig. 6에서 그래프로 분석하였다.

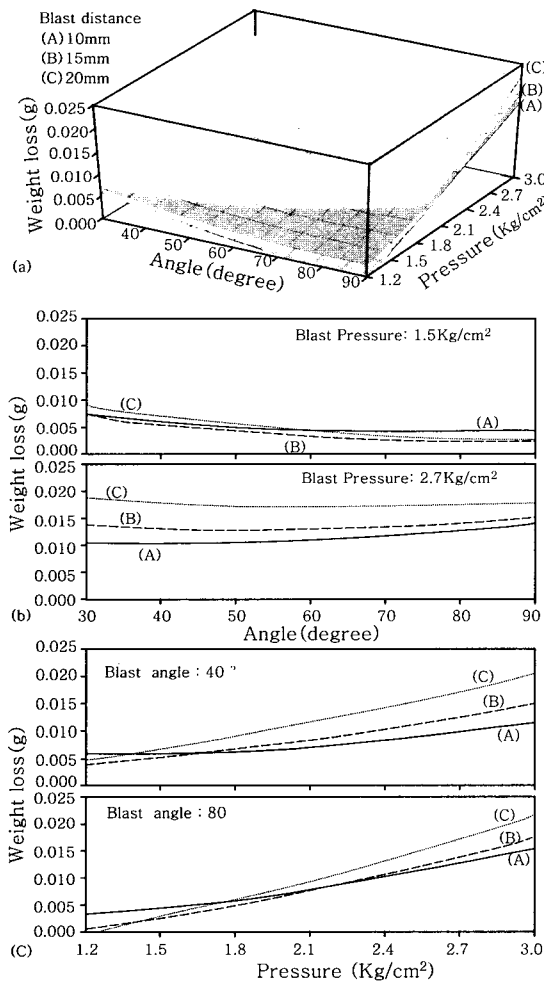
Fig. 4(a)에서는 분사압력을 1.5, 2.1, 2.7Kg/cm<sup>2</sup> 으로 고정하였을 때 분사각도와 분사거리의 변화에 따른 마모량의 변화를 3차원을 보여준다. 전 범위에 걸쳐서 분사압력이 높아지면 마모량이 증가한다. Fig. 4(b)에서는 분사거리를 10mm와 20mm로 고정하였을 때



**Fig. 4** Response surfaces showing the effects of the blast angle and blast distance on the particle erosion wear. (a) 3-dimensional plot, (b) the effect of blast angle, (c) the effect of blast distance

분사각도에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분사거리가 짧고 분사각도가 작은 경우에는 분사압력의 영향은 작으나, 분사거리가 길고 분사각도가 큰 경우에는 분사압력의 영향이 크다. 전반적으로 분사각도의 영향은 크지 않으나, 분사거리가 길고 분사압력이 낮은 경우에는 분사각도가 작을수록 마모량은 증가한다. Fig. 4(c)에서는 분사각도를 40°와 80°로 고정하였을 때 분사거리에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분사각도가 크고 분사압력이 낮은 경우에는 분사거리의 변화에 따른 마모량의 변화는 거의 없다. 반면 분사각도가 작고 분사압력이 높은 경우에는 분사거리가 길어질수록 마모량이 증가한다.

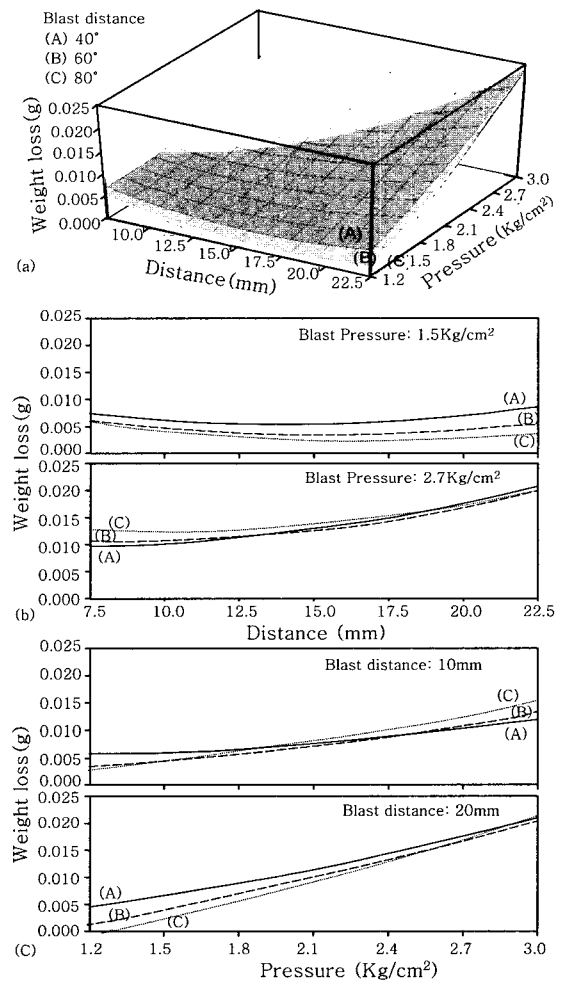
Fig. 5(a)에서는 분사거리를 10, 15, 20mm로 고정하였을 때 분사각도와 분사압력의 변화에 따른 마모량의 변화를 3차원을 보여준다. 분사거리에 따른 전반적인 마모량의 변화 경향은 분사각도와 분사압력의



**Fig. 5** Response surfaces showing the effects of the blast angle and blast pressure on the particle erosion wear. (a) 3-dimensional plot, (b) the effect of blast angle, (c) the effect of blast pressure

범위에 따라 달라진다. Fig. 5(b)에서는 분사압력을 1.5Kg/cm<sup>2</sup>과 2.7Kg/cm<sup>2</sup>으로 고정하였을 때 분사각도에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분사압력이 낮은 경우에는 분사거리에 무관하게 전반적인 마모량은 비슷하다. 분사압력이 낮고 분사거리가 긴 경우에는 분사각도가 작아질수록 마모량이 약간 증가한다. 분사압력이 높고 분사거리가 짧은 경우 분사각도가 커질수록 마모량이 약간 증가하는 경향이 있다. Fig. 5(c)에서는 분사각도를 40°와 80°로 고정하였을 때 분사압력에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분사각도와 분사거리의 전 범위에서 분사압력이 높아질수록 마모량은 증가한다. 분사압력의 영향은 분사거리가 길수록 증가한다.

Fig. 6(a)에서는 분사각도를 40, 60, 80degree로 고정하였을 때 분사거리와 분사압력의 변화에 따른 마모량의 변화를 3차원을 보여준다. 분사각도에 따른 전반적인 마모량의 변화 경향은 분사압력과 분사각도의



**Fig. 6** Response surfaces showing the effects of the blast distance and blast pressure on the particle erosion wear. (a) 3-dimensional plot, (b) the effect of blast distance, (c) the effect of blast pressure

범위에 따라 다소 다르다. Fig. 6(b)에서는 분사압력을  $1.5\text{Kg/cm}^2$ 과  $2.7\text{Kg/cm}^2$ 으로 고정하였을 때 분사 거리에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분사압력이 낮은 경우에 마모량은 분사 거리에 큰 영향을 받지 않는다. 반면 분사압력이 높은 경우에는 분사각도에 무관하게 분사거리가 증가하면 마모량이 크게 증가한다. Fig. 6(c)에서는 분사거리를 10mm와 20mm로 고정하였을 때 분사압력에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분사거리나 분사각도의 전 범위에 걸쳐 분사압력이 높아질수록 마모량은 증가한다. 분사압력의 영향은 분사각도가 클수록 증가한다.

#### 4. 검 토

마모매질이 재료표면에 충돌할 때 다양한 마모기구에 의해 마모손상이 일어날 수 있다. 마모손상기구는 모재와 마모매질의 경도, 마모매질의 충돌시 운동에너지, 충돌각도 등 많은 요인에 의해 달라진다. 일반적으로 모재가 연성재질이고, 마모매질의 경도가 모재에 비해 높다면 절삭(cutting) 마모의 형태가 우선적으로 일어나며, 충돌각도(분사각도)가 작을수록 마모가 더 잘 일어난다. 반면 모재가 취성재질이며, 마모매질의 경도가 모재에 비해 낮다면 절삭보다는 원추형 파괴에 의한 마모가 우선적으로 일어나며, 충돌각도(분사각도)가 클수록 마모가 더 잘 일어난다고 알려져 있다<sup>6,7)</sup>.

고 Cr 철계 용접부는 마르텐사이트(혹은 오스테나이트) 기지(matrix)와 미세한 공정 크롬카바이드와 굵은 육각형의 초정 크롬카바이드로 이루어진 복합조직이다. 유사한 조성의 고 Cr 철계 용접부에 대한 미소비커스(micro-Vickers) 경도시험 결과는 기지와 공정 크롬카바이드 혼합조직은 HV 700 정도를 가지며, 초정 크롬카바이드는 HV 1600 정도를 가진다고 보고하였다<sup>9)</sup>. 마모매질인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹은 취성이 매우 강하며, 경도는 HV 2100 정도로 상당히 높은 것으로 보고되어 있다<sup>10)</sup>. 따라서 고 Cr 철계 육성용접부의 분체침식마모는 단상(single phase)재료에 비하여 매우 복잡한 형태로 일어날 것으로 예상된다.

Fig. 7에서는 적당한 충돌각도(분사각도)로 마모매질이 모재에 충돌될 때 마모현상을 도식적으로 나타내었다. 기지조직은 경도가 HV 700 이하로써, 마모매질에 비해 경도가 상당히 낮으며, 연성을 가지고 있기 때문에 절삭이나 피로(fatigue)에 의해 우선적으로 마모가 일어난다. 크롬카바이드(초정 및 공정)는 경도가 마모매질에 비해 낮으며, 연성이 없기 때문에 절삭이나 취성파괴에 의해 우선적으로 마모가 일어난다. 분사각도가 작을 때는 기지의 절삭마모가 일어나기 쉬우며, 크

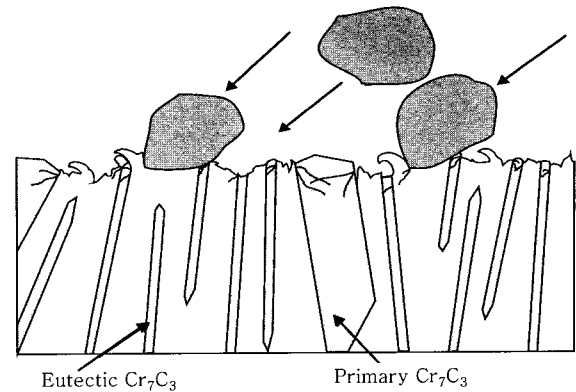


Fig. 7 Schematic diagram explaining the erosive wear mechanism of high Cr white cast iron hardfacing by alumina particles

롬카바이드는 절삭 혹은 취성파괴마모가 일어날 수 있다. 분사각도가 클 때는 기지의 절삭마모는 줄어들며, 상대적으로 크롬카바이드의 취성파괴마모가 증가할 것으로 예상된다. Fig. 8에서는 분사압력  $2.1\text{Kgf/cm}^2$ , 분사각도  $60^\circ$ , 분사거리 15mm의 마모조건에서 마모시킨 시료의 표면에 대한 주사형전자현미경(SEM) 사진을 보여준다. 실제 마모가 일어난 후에는 많은 마모기구들이 서로 혼합되어 마모기구를 구분하여 분석하기 매우 어렵다. 사진에서 기지와 크롬카바이드가 절삭마모된 흔적과 크롬카바이드의 취성파괴된 흔적이 혼재하고 있다.

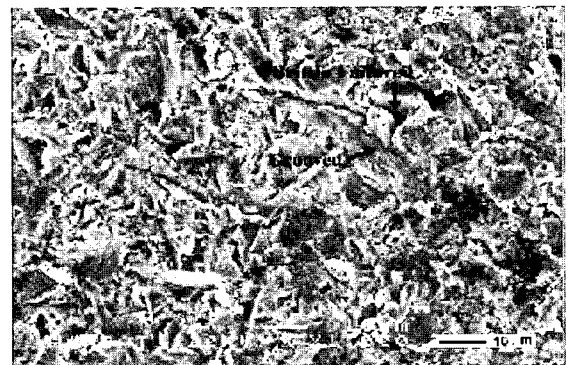


Fig. 8 SEM micrograph showing the wear surface after testing under the wear condition of blast pressure :  $2.1\text{Kgf/cm}^2$ , angle :  $60^\circ$  and distance : 15mm

본 연구결과 분사압력이 높아지면 전반적으로 마모량은 증가한다(Fig. 5(c), Fig. 6(c)). 분사압력의 증가는 마모매질의 운동량을 증가시키며, 피로, 절삭 및 취성파괴마모를 모두 증가시킨다. 따라서 분사각도나 마모 거리에 관계없이 마모량이 증가한 것으로 보인다.

분사각도의 영향은 분사압력의 영향에 비해 크지 않다(Fig. 5(b), Fig. 6(b)). 분사압력이 낮고 분사거리

가 긴 경우에는 분사각도가 작아질수록 마모량이 증가하는 경향을 가진다. 이것은 연성재료의 충돌각도(분사각도) 의존성과 유사하며, 이 마모조건 범위에서는 기지의 절삭작용이 우선적인 마모기구 때문인 것으로 보인다. 반면 분사압력이 높고 분사거리가 짧은 경우에는 분사각도가 클수록 마모량이 약간 증가하는 경향이 있다. 이것은 크롬카바이드의 취성파괴마모의 비중이 증가하기 때문으로 보인다.

분사거리의 영향은 분사압력에 따라 크게 달라진다 (Fig. 4(c), Fig. 6(b)). 분사압력이 낮은 경우에는 분사거리의 영향이 거의 없으나, 분사압력이 높은 경우에는 분사거리가 길어지면 마모량이 증가한다. 분사거리에 따른 마모매질의 운동량의 차이는 거의 없다. 분사압력이 낮은 경우에는 마모흔적의 깊이가 얇기 때문에 마모흔적의 형상이 마모에 영향을 미치지 않는다. 그러나 분사압력이 높고 분사거리가 짧은 경우에는 마모흔적이 좁고 깊어져서, 효과적인 마모를 방해한다 (Fig. 3 참조). 따라서 마모거리가 길어지면 마모량이 증가하는 것으로 보인다.

마모기구들에 대해서 정성적으로 추정해 보았으나, 고 Cr 철계 용접부의 분체침식마모는 마모변수들의 복합적인 영향을 받는다. 따라서 마모기구들에 대한 실험적인 관찰과 분석은 통계적인 방식에 의해 이루어져야 하며, 일단 마모가 일어나면 다양한 마모흔적들이 혼재하기 때문에 마모기구의 분석이 매우 어렵다. 또한 실제 마모현장에서 마모변수들은 매우 다양하기 때문에 마모량을 이론적으로 예측하기는 불가능하며, 실험적으로 예측할 수 밖에 없다. 본 연구에서 반응표면분석에 의해 얻어진 실험식은 마모변수들의 영향을 정량적으로 잘 예측하고 있다. 각각의 마모현장에 적합한 마모변수들을 선정한다면, 반응표면분석에 의해 효과적으로 실제 마모량을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

## 5. 결 론

고 Cr 철계 용접부의 분체침식마모시험에서 분사압력, 분사각도, 분사거리가 마모량에 미치는 영향을 반응표면분석에 의해 정량적으로 분석하였으며, 마모기구들에 대해 검토하였으며, 다음과 같이 결론지을 수 있다.

- 1) 반응표면분석에 의해 얻어진 실험식은 마모변수들이 마모량에 미치는 영향을 정량적으로 잘 예측하였다.
- 2) 분사압력이 높아지면 분사각도, 분사거리 전 범위에 걸쳐서 마모량이 증가하였다
- 3) 분사각도, 분사거리가 마모량에 미치는 영향은 분사압력에 따라서 달라지며, 마모변수들 서로간에 복합적인 방식으로 영향을 미쳤다.
- 4) 고 Cr 철계 용접부의 분체침식마모는 기지조직의 절삭, 피로마모와 크롬카바이드의 절삭 및 취성파괴마모의 복합적인 작용에 의해 일어났다.

## 참 고 문 헌

1. H. Fujimura, A. Notomi, Y. Kamito and M. Kinoshita : Development of Hard Overlay Welding for High Wear Resistance, IIW Doc. XII-1071-88, Jul. 1988
2. D. J. Kotecki and J. S. Ogborn : Abrasion Resistance of Iron-Based Hardfacing Alloys, Welding Journal, **74-8** (1995), 269s~278s
3. O. N. Dogan, G. Laird II and J. A. Hawk : Abrasion Resistance of the Columnar Zone in High Cr White Cast Irons, Wear, **181-183** (1995), 342~349
4. A. Tamura, S. Nitta and H. Ono : Control of Microstructure and Abrasion Resistance of 25 mass% Cr Cast Irons, Casting, **66-3** (1994), 187~192(in Japanese)
5. J. Liu, S. Li and Y. Man : Wear Resistance of Ni-hard 4 and High-chromium Iron Re-evaluated, Wear, **166** (1993), 37~40
6. S. Okazaki, K. Hasegawa, M. Takamori and M. Kiyoshige : Wear of Materials by Sand Erosion and Estimation of Wear Loss, Journal of JSME A, **56-527** (1990), 1668~1671(in Japanese)
7. D. A. Rigney and W. A. Glaeser : Source Book on Wear Control Technology ASM Engineering Bookshelf, Metals Park, Ohio 44073, 1978, 220~236
8. ASTM G76-95 : Standard Test Method for Conducting Erosion Testd by Solid Particle Impingement Using Gas Jets
9. H. K. Lee : Manufacturing Technology of Wear Plates Using Flux Cored Wire, Report of MICE, BSM.033-443.M, 1996(in Korean)
10. S. J. Schneider : Ceramics and Glasses, Engineered Materials Handbook, Vol. 4, ASM International, 1991