

研究論文

## 고 Cr 주철계 육성용접부의 연삭(abrasion)마모 특성에 대한 연구

이 형 근\*

### Abrasive wear characteristics of high Cr cast iron hardfacing

H. K. Lee\*

**Key Words** : high Cr cast iron(고 Cr 주철), Hardfacing(육성용접), Flux cored wire(플럭스 코아드 와이어), Abrasive wear(연삭마모), Response surface method(반응표면분석), Chromium carbide(크롬카바이드)

#### Abstract

Abrasive wear characteristics of high Cr white cast iron-based hardfacing were investigated using the rubber wheel abrasion wear test method according with the ASTM G65-85. Mild steel was also tested for comparison with high Cr cast iron hardfacing. Wear experiments, where the applied force, wheel revolution rate and abrasive powder feed rate were selected as test valuables, were planned and analyzed by response surface method to evaluate wear statistically and quantitatively. Weight loss of high Cr cast iron hardfacing was mostly affected by the applied force and wheel revolution rate, and little by the powder feed rate. Weight loss of mild steel was greatly affected by the wheel revolution rate and powder feed rate, and slowly and steadily increased with the applied force. Abrasive wear mechanism of high Cr cast iron and mild steel was discussed in the light of the wear test results.

#### 1. 서 론

마모에 의한 경제적 손실은 정량적으로 분석하기 어려우나, 미국과 독일에서 분석한 결과를 참고

하면 마모손상에 의한 경제적손실은 GNP의 2.5% (ASME Report, 1977), 마모, 부식에 의한 경제적 손실을 GNP의 4.5% (BMFT Report, 1984) 정도로 각각 분석하고 있다<sup>1)</sup>. 1997년으로 감안하면 천문학적인 숫자에 해당할 것으로 보인다. 이처럼 마

\* 1997년 5월 19일 접수

\* 정회원, 한국기계연구원 용접기술연구부

모손상에 대한 연구는 전 산업분야에서 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 마모기구는 단순하지 않고 여러 형태로 복잡하게 일어난다. 마모손상 기구를 크게 분류하면 응착마모(adhesive wear), 연삭마모(abrasive wear), 분체마모(crosive wear), 피로마모(fatigue wear), 부식마모(corrosive wear)로 나눌 수가 있다. 이러한 여러 마모기구들 중에서 특히 연삭마모는 공업적 마모의 50% 이상을 차지하는 매우 중요한 마모현상이다. 시멘트, 제철, 광업, 요업등의 분야에서 사용되는 철판들은 광물이나 clinker 등과 같은 고 경도의 마모성이 강한 물질들을 대규모로 처리하기 때문에 매우 심한 연삭마모가 일어난다. 이러한 산업분야에서 사용되고 있는 내마모 판재나 분쇄용 roll들은 주로 고 Cr 주철계 합금을 육성용접하여 사용하고 있다. 고 Cr 주철계는 경도가 높고 다량의 크롬 카바이드 ((Cr, Fe)<sub>3</sub>C<sub>6</sub>)를 함유하고 있어 극심한 연삭마모 환경에 매우 적합한 소재이다. 고 Cr 주철계 합금을 육성용접부의 연삭마모에 대한 연구는 주로 합금 조성의 변화, 미세조직, 크롬 카바이드의 분포, 크기, 방향성 등의 영향에 대해 주로 연구되어 왔다<sup>2, 3)</sup>. 실제 고 Cr 주철계 육성용접부는 사용되는 장소에 따라 마모환경은 매우 다양하게 변화한다. 그러나 이러한 마모환경의 변화에 따른 고 Cr 주철계 육성용접부의 마모특성에 대한 체계적인 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 통계적인 실험 기법을 사용하여 고 Cr 주철계 육성용접부의 마모 조건의 변화에 따른 마모량의 변화를 체계적으로 분석 평가하고자 하였다.

## 2. 육성용접 및 마모시험 방법

### 2.1 용접재료 및 육성용접

본 연구에서 용접재료로는 2.8mm<sup>φ</sup>의 self-shielded 방식의 국산 고 Cr 주철계 flux cored wire를 사용하였다. 모재로는 두께 9 mm의 SS41 연강판재를 사용하였다. 육성용접은 정전압 특성을 가지는 FCAW용 용접기를 사용하였으며, 극성 DCEP, 전압 30V, 전류 420 ~ 460A, weaving 폭 32mm의 조건으로 용접하였다. 용접된 시험편은 약 20%의 희석율을 가졌다. 고 Cr 주철계의 육성

용접부의 우수한 내 연삭마모성은 미세구조에 상당히 의존하는 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>. 따라서 육성용접부의 기본적인 특성을 분석하기 위하여 spark emission spectrometer에 의한 화학성분 분석, Rockwell 경도 측정, 주사형 전자현미경에 의한 미세조직 관찰을 수행하였다.

### 2.2 마모시험방법

고 Cr 주철계 육성용접부의 연삭마모 특성을 분석하기 위하여 ASTM G65-85의 규정에 따르는 마모시험을 수행하였다<sup>5)</sup>. 연삭마모시험의 원리는 Fig. 1에서 도식적으로 설명한다. 회전하는 wheel과 하중이 가해진 시험편 사이에 마모매질을 일정하게 공급함으로써 3 body 연삭마모가 일어나도록 하였다. wheel 표면에는 chlorobutyl rubber를 피복하여, 순수 연삭마모가 일어나도록 하였다. 마모정도는 마모 전·후의 시험편의 무게를 측정하여 감소량을 마모량으로 삼았다. 마모시험편은 2 종류를 사용하였다. 하나는 9 mm 연강 판재 위에 고 Cr 주철을 육성용접하여 총 두께 약 13 mm를 가지는 내마모 판재이며, 두번째는 마모경향의 비교를 위하여 연강 판재(SS41)를 사용하였다.

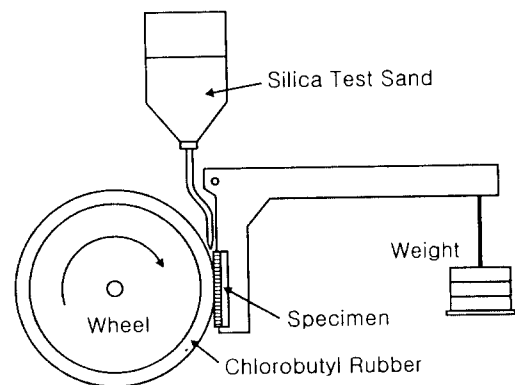


Fig. 1 Schematic drawing explaining the rubber wheel abrasion test.

고 Cr 주철계 육성용접부는 사용되는 장소에 따라서 응력상태, 마모매질의 종류, roll의 회전속도, 원료 처리량, 등 마모환경이 서로 다르다. 본 연구에서는 일부 중요한 연삭마모시험 조건의 변

화에 따른 마모경향을 분석하였다. 이러한 연구결과들은 앞으로 내마모 육성용접부가 응용되는 마모환경 하에서 마모손상을 예측하거나, 마모환경에 적합한 소재의 선정에 활용하고자 한다. 마모시험은 마모시험 조건들의 영향을 입체적이고 통계학적으로 분석하기 위하여 반응표면분석(response surface method) 기법을 도입하였다<sup>3)</sup>. 반응표면분석 기법은 독립변수가 2~4개일 때 종속변수와와의 관계를 2차다항식의 형태로 서로의 상관관계를 통계적으로 분석하는 방법이다. 마모시험 조건들로서는 연삭마모시험에서 중요한 변수로 고려되는 하중, wheel 회전속도, 마모매질의 송급량을 선택하였다. 마모시험 변수들은 실험량이 적 으면서도 수준을 5개로 할 수 있는 중심합성계획(central composite design)에 의해 배치하였으며, 설정된 마모시험 조건은 Table 1에 나타내었다. 시

험편에 걸리는 하중은 13.5 Kg를 기준으로 하여 8.3 ~ 18.7 Kg 사이에서 5등급으로 변화시켰다. wheel 회전속도는 200 rpm을 기준으로 하여 90 ~ 310 rpm 범위에서 5등급으로 변화시켰다. 마모매질 송급량(분말 송급량) 역시 300g/min. 을 기준으로 하여 152 ~ 448 g/min. 의 범위에서 5등급 변화시켰다. 이외에 마모매질의 경도와 입도가 있으나 마모매질의 경도와 입도는 다양하게 수치화하여 변경하기 곤란하여 ASTM에서 규정하고 있는 AFS 50-70 silica test sand를 사용하였다. sand는 마모시험 전에 100°C에서 1시간 정도 건조한 다음 사용하였다. 각 마모시험 조건에서 마모시험 시간은 총 마모길이를 일정하게 하기 위하여 마모시험 조건에 관계없이 총 회전수가 6000 회전이 되면 자동으로 멈추도록 설정하였다. 이것은 8.67 km의 마모거리에 해당한다. 기타 다른 마모시험조건은

**Table 1.** Rubber wheel abrasion test conditions and results. (total wear length : 6000 revolutions)

No.	applied force (Kgf)	wheel revolution rate (r. p. m.)	abrasive powder feel rate (g/min)	weight loss (g)			
				high Cr cast iron		mild steel	
				measured	calculated	measured	calculated
1	10.7	140	220	0.1380	0.1271	1.0809	1.5969
2	10.7	140	380	0.1172	0.1311	1.9408	2.2230
3	10.7	260	220	0.0860	0.0935	1.2164	1.3584
4	10.7	260	380	0.1050	0.1131	0.9317	1.067
5	16.3	140	220	0.1856	0.1832	1.9802	2.2052
6	16.3	140	380	0.2014	0.1995	2.4584	2.678
7	16.3	260	220	0.1323	0.1242	1.7794	1.8583
8	16.3	260	380	0.1395	0.1561	1.5673	1.4136
9	13.5	200	300	0.1337	0.1372	1.9586	1.6343
10	13.5	200	300	0.1425	0.1372	1.4674	1.6343
11	8.3	200	300	0.1050	0.0983	1.6660	1.2656
12	18.7	200	300	0.1893	0.1904	2.1686	2.1522
13	13.5	90	300	0.1852	0.1895	3.1697	2.6774
14	13.5	310	300	0.1290	0.1189	1.2270	1.2998
15	13.5	200	152	0.0984	0.1091	2.0164	1.6828
16	13.5	200	448	0.1586	0.1423	1.9289	1.8506

ASTM G65-85 Procedure A의 규정에 따라 시험하였다. 마모량은 마모시험 전·후의 무게감소로 평가하였다.

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 육성용접부 미세구조의 분석

고 Cr 주철계 육성용접부의 마모특성에는 용접 표면의 화학성분, 경도, 미세조직 등이 큰 영향을 미친다. 육성용접부의 표면에 대한 화학성분 분석 결과를 보면 4.2 wt% C, 16.6 wt% Cr을 함유하고 있었다. 이러한 조성의 범위는 Fig. 2의 C-Cr-Fe 평형상태도에서 보면 과공정 (hyper-eutectic) 합금 영역에 속한다<sup>6)</sup>. 따라서 초정 (primary)  $(Cr, Fe)_7C_3$ 가 먼저 정출하고 이어서 공정 (eutectic)  $(Cr, Fe)_7C_3$ 가 생성할 것으로 보인다. 표면층에 대한 Rockwell 경도의 측정결과는 HRC 57 정도를 가졌다. Photo. 1에서는 육성용접부의 표면 미세조직을 보여준다. 미세조직은 Fe 기지내에 10~20  $\mu m$  굵기의 육각형의 조대한 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 와 2  $\mu m$  이하의 작은 공정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 가 다량으로 존재한다<sup>7)</sup>. 이러한 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 와 공정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 는 용접 후 대부분 모재로부터 표면으로 길게 성장하여 방향성이 매우 큰 미세조직을 가진다<sup>8)</sup>. 고 Cr 주철계의 우수한 내 연삭마모 저항성은 이러한 크

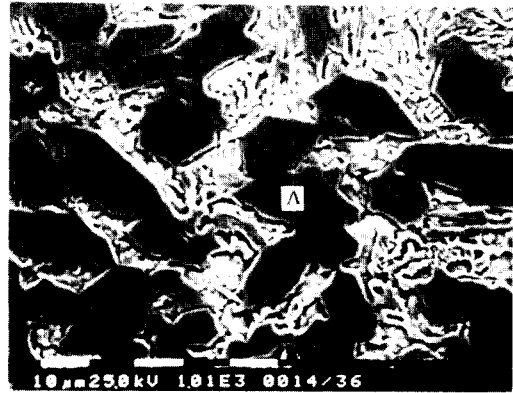


Photo 1. SEM microstructure of high Cr cast iron hardfacing. (A : primary  $(Cr, Fe)_7C_3$ , B : eutectic structure)

롬 카바이드의 다량 존재에 의해서 기인하며, 크롬 카바이드의 체적비와 성장방향 및 두께 등이 내마모성에 영향을 미친다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 그러나 성장방향과 내마모성 사이의 관계에 대한 연구결과들은 연구자들에 따라 서로 다르게 나타난다.

#### 3.2 마모시험 결과 및 분석

고 Cr 주철을 육성용접한 내마모 판재의 연삭마모 시험 후 마모형상은 Photo. 2(a)에서 보여준다.

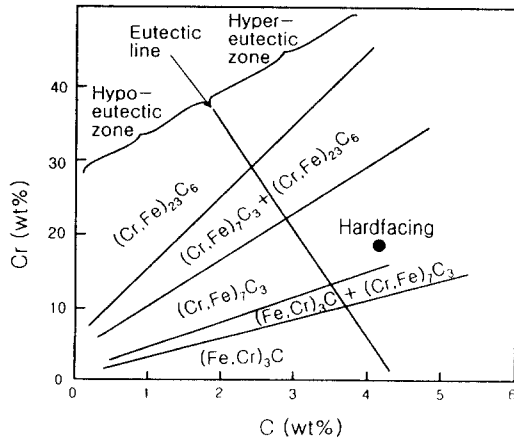


Fig. 2 Phase diagram of C-Cr-Fe system.

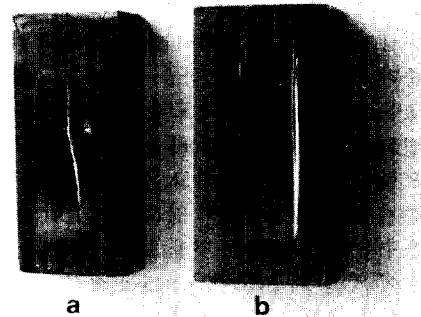


Photo 2. Test specimens after the rubber wheel abrasion test. (a) high Cr cast iron hardfacing, (b) mild steel

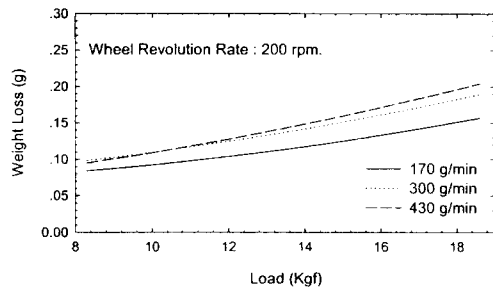
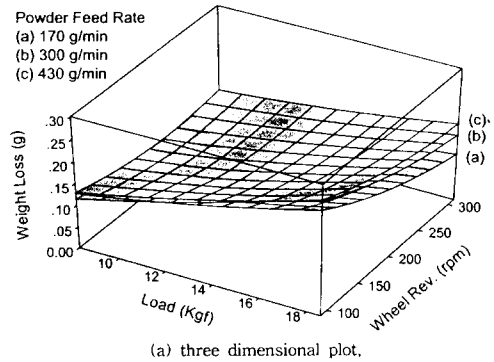
마모조건에 따른 마모시험 결과는 역시 Table 1에서 보여준다. 전체 시험편의 평균 마모량은 0.1404 g 정도를 보여 주었다. 마모량을 각 마모변수들에 대해 반응표면분석한 결과는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$WL = 0.10869 + 0.005084 * X + 0.0002659 * X^2 - 0.0006204 * Y - 0.00003768 * X * Y + 1.411 * 10^{-6} * Y^2 + 0.00007823 * Z + 0.00001374 * X * Z + 8.125 * 10^{-7} * Y * Z - 5.236 * 10^{-7} * Z^2 \dots \dots \dots (1)$$

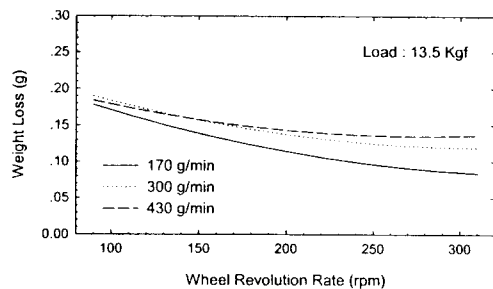
(WL : 마모량 g, X : 하중 Kg, Y : wheel 회전 속도 rpm, Z : 분말 송급량 g/min.)

식 (1)을 사용하면 본 마모시험조건 범위 내에서 어떠한 마모조건이 주어졌을 때 마모량을 정량적으로 예측할 수 있다. Fig. 3(a)에서는 분말 송급량이 각각 170, 300, 430 g/min으로 일정할 때 하중과 wheel 회전속도의 변화에 따라서 마모량의 변화를 3차원으로 보여준다. 거의 평행한 3개의 반응면으로 존재한다. 전반적으로 하중이 증가할수록 wheel 회전속도가 감소할수록 마모량은 완만하게 증가한다. 좀 더 비교를 쉽게 하기 위하여 Fig. 3(a) 그래프를 하중이나 wheel 회전속도의 중간값으로 절단하였을 때 각각의 단면을 Fig. 3(b), (c)에서 2차원적으로 나타내었다. Fig. 3(b)에서는 wheel 회전속도 축을 200 rpm으로 절단하였을 때 하중의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 하중이 증가함에 따라 마모량이 직선적으로 증가하고 있음을 보여준다. 이러한 경향은 분말 송급량의 차이에 따라서는 큰 차이가 없음을 보여준다. Fig. 3(c)에서 하중 축을 13.5 Kg로 절단하였을 때 wheel 회전속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. wheel 회전속도가 증가하면 마모량은 서서히 감소하고 있다. wheel 회전속도의 증가에 따른 마모량의 감소율은 분말 송급량이 적을수록 약간 크다는 것을 보여 준다. 즉 분말 송급량이 적을 때 마모량은 wheel 회전속도에 더욱 민감하게 변한다는 것을 의미한다.

Fig. 4(a)에서는 하중과 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 변화를 3차원적으로 보여준다. wheel 회전속도에 따라 명확한 3개의 반응면으로 나뉘어져 있다. 모든 반응면은 하중 축을 따라 완



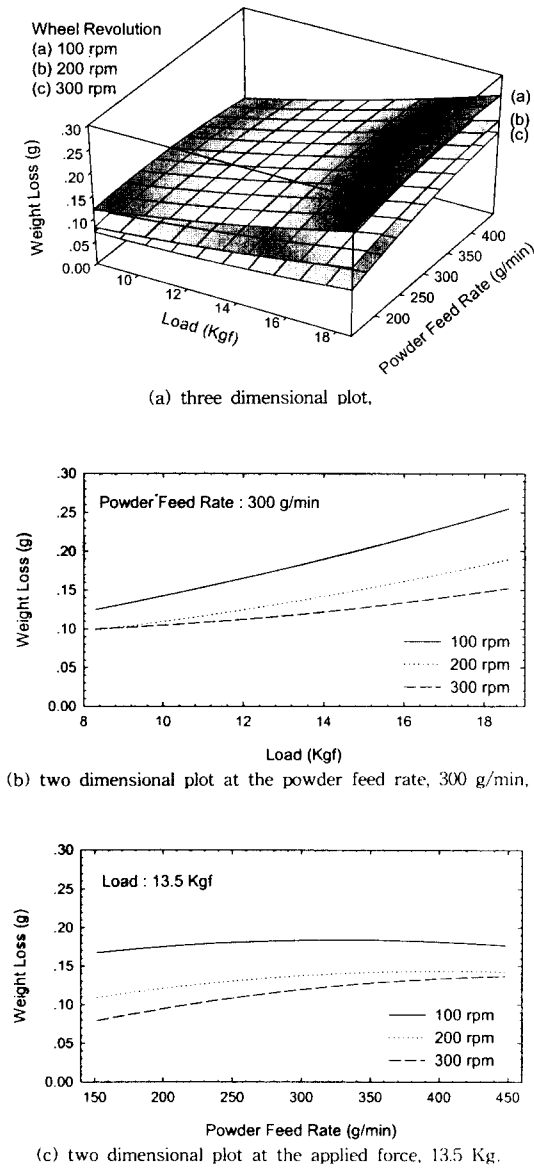
(b) two dimensional plot at the wheel revolution rate, 200 rpm.



(c) two dimensional plot at the applied force, 13.5 Kg.

**Fig. 3** Response surfaces showing the effects of the applied force and wheel revolution rate on the weight loss after abrasive wear test of high Cr cast iron hardfacing.

만한 경사면을 이루고 있어, 전반적으로 하중의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. wheel 회전속도가 100 rpm으로 느릴 때의 반응면(반응면(a))을 보면 분말 송급량에는 거의 무관하게 마모량은 일정한 경향을 나타내나, 하중의 증가에 따라서는 마모량이 증가하는 경향을 보인다. wheel 회전속도가 300



**Fig. 4** Response surfaces showing the effects of the applied force and powder feed rate on the weight loss after abrasive wear test of high Cr cast iron hardfacing.

rpm으로 빠를 때 반응면(반응면(c))을 보면 하중이 18.7 Kg으로 클 때 분말 송급량이 증가함과 함께 마모량은 다소 증가하는 반면, 분말송급량이

152 g/min으로 적을 때 마모량은 하중에 거의 무관함을 보여준다. Fig. 4(b)에서는 300 g/min의 분말 송급량을 가지는 단면에서 하중에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 모든 wheel 회전속도 범위에서 하중이 증가함에 따라 마모량이 증가함을 보여준다. 그러나 wheel 회전속도가 느릴수록 하중 증가에 따른 마모량의 증가율은 더 크게 나타났다. 즉 마모량은 wheel 회전속도가 느린 경우 하중에 더 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. Fig. 4(c)에서는 13.5 Kg의 하중면에서의 분말 송급량과 마모량의 관계를 좀 더 상세히 보여준다. wheel 회전속도가 100 rpm으로 느릴 때는 분말 송급량에 전혀 관계없이 마모량이 일정하나, wheel 회전속도가 300 rpm으로 빠를 때는 분말 송급량이 증가하면 마모량이 약간 증가하는 것을 보여준다. 그러나 Fig. 4(a)에서 하중이 8.7 Kg로 작은 경우에는 wheel 회전속도가 빠르더라도 분말 송급량에는 거의 무관하였다.

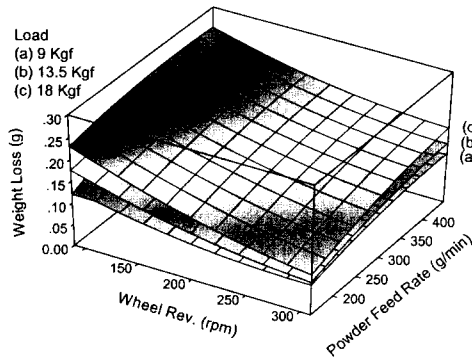
Fig. 5(a)에서는 각각 9, 13.5, 18 Kg의 하중조건 하에서 wheel 회전속도와 분말 송급량의 변화가 마모량에 미치는 영향을 3차원적으로 보여준다. 각각의 반응면은 뚜렷이 구분되며, 급격한 경사면을 이루고 있다. wheel 회전속도가 빠르고 분말송급이 적은 경우에는 3개의 반응면이 서로 만나면서 마모량이 감소하는 반면, wheel 회전속도가 느리고 분말 송급량이 많은 경우에는 3개의 반응면이 서로 멀어지며 마모량이 증가하고 있다. Fig. 5(b)에서는 분말 송급량이 300 g/min인 단면에서 wheel 회전속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 모든 하중조건 하에서 wheel 회전속도가 증가하면 마모량은 감소하는 것을 보여준다. 하중이 큰 경우에 wheel 회전속도에 따른 마모량의 변화량은 다소 크다. Fig. 5(c)에서는 wheel 회전속도가 200 rpm인 조건 하에서 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 하중조건에 관계없이 분말 송급량의 변화는 마모량에 큰 영향을 미치지 않음을 보여준다. Fig. 5(a)에서 보면 wheel 회전속도가 90 rpm으로 느릴 때는 마모량은 분말 송급량에 거의 영향이 없으나, wheel 회전속도가 310 rpm으로 빠를 때는 약간의 영향을 받는 것을 보여준다.

고 Cr 주철계 육성용접부와 마모시험 결과를 비교하기 위하여 연강(SS41)에 대해서도 같은 마모

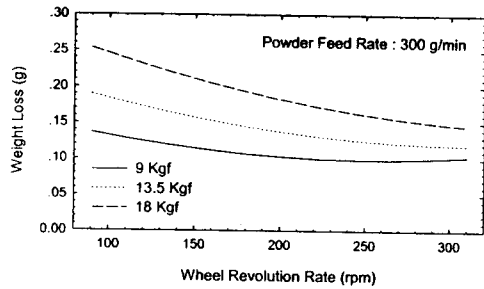
시험조건으로 마모시험을 수행하였다. 마모시험 후 시험편들은 Photo. 2(b)에서 보여준다. Table 1에 연강 시험편들의 마모시험결과를 수록하였다. 전 시험편의 평균 마모량은 1.7849g으로 고 Cr 주철 육성용접부에 비해 평균적으로 10배 이상 마모되기 쉬웠다. 마모량을 마모변수들에 대해 반응표면분석한 결과는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$WL = - 0.2116 + 0.09432 * X + 0.002762 * X^2 - 0.00146 * Y - 0.0001613 * X * Y + 0.00002928 * Y^2 + 0.008808 * Z - 0.0001713 * X * Z - 0.00004778 * Y * Z - 6.0465 * 10^{-6} * Z^2 \dots \dots \dots (2)$$

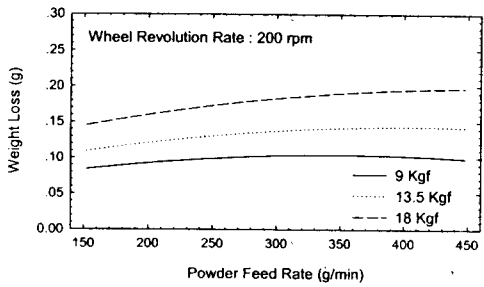
(WL : 마모량 g, X : 하중 Kg, Y : wheel 회전



(a) three dimensional plot,

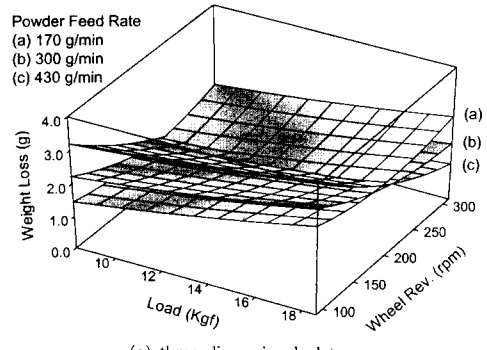


(b) two dimensional plot at the powder feed rate, 300 g/min,

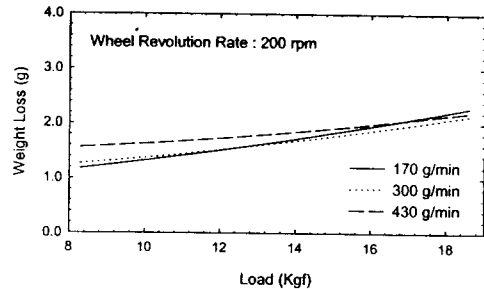


(c) two dimensional plot at the wheel revolution rate, 200 rpm.

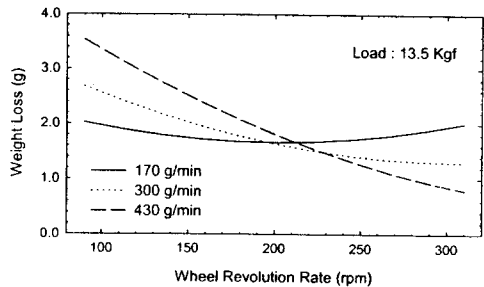
**Fig. 5** Response surfaces showing the effects of the wheel revolution rate and powder feed rate on the weight loss after abrasive wear test of high Cr cast iron hardfacing.



(a) three dimensional plot,



(b) two dimensional plot at the wheel revolution rate, 200 rpm,



(c) two dimensional plot at the applied force, 13.5 Kg.

**Fig. 6** Response surfaces showing the effects of the applied force and wheel revolution rate on the weight loss after abrasive wear test of mild steel.

속도 rpm, Z : 분말 송급량 g/min.)

역시 식 (2)를 사용하면 연강의 rubber wheel abrasion 마모시험에서 하중, wheel 회전속도, 분말 송급량을 알면 마모량을 계산할 수 있다. Fig. 6(a)에서 분말 송급량이 각각 170, 300, 430 g/min일 때 하중과 wheel 회전속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 3차원을 보여준다. 3개의 반응면들이 하중 축을 따라서는 완만한 경사면을 이루고 있으며, wheel 회전속도 축을 따라서는 기울기가 서로 상당히 다르며 200 rpm 근처에서 서로 교차하고 있다. Fig. 6(b)에서는 200 rpm의 wheel 회전속도에서 하중에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 역시 하중의 증가에 따라 마모량은 거의 직선적으로 증가한다. 그러나 기울기는 분말 송급량이 적은 경우 약간 크게 나타났으나, 거의 차이가 없다. 마모량의 절대값에 있어서는 차이가 크나, 경향은 Fig. 3(b)에서의 고 Cr 주철 육성용접부와 거의 일치한다. Fig. 6(c)에서는 하중이 13.5 Kg인 단면에서 wheel 회전속도의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 분말 송급량이 170 g/min으로 적을 때는 wheel 회전속도에 거의 영향이 없으나, 분말 송급량이 430 g/min으로 많을 때는 wheel 회전속도의 증가에 따라 마모량이 급격히 감소한다. 3개의 곡선들은 wheel 회전속도가 약 200 rpm 근처에서 만나고 있다. 따라서 wheel 회전속도를 200 rpm을 전·후로 분말 송급량에 따라서 마모량이 서로 반대로 된다. 이러한 경향은 Fig. 3(c)에서의 고 Cr 주철 육성용접부의 경우와 크게 다르다.

Fig. 7(a)에서 역시 wheel 회전속도를 100, 200, 300 rpm으로 각각 고정하였을 때 하중과 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 변화를 3차원적으로 보여준다. 반응면들은 하중축을 따라서는 모두 완만하게 경사를 이루고 있으나, 분말 송급량 축을 따라서는 wheel 회전속도에 따라서 기울기가 급격히 변하고 있다. 3개의 반응면들은 분말 송급량이 150 ~ 200 g/min에서 서로 만난다. Fig. 7(b)에서는 분말 송급량이 300 g/min인 단면에서 하중에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 하중의 증가에 따라 마모량은 거의 평행하게 직선적으로 증가하고 있음을 보여준다. wheel 회전속도에 따라 마모량은 상당한 차이가 있음을 보여준다. 그러나 Fig. 7(a)에서 보면 분말 송급량이 200 g/min 정도로 적

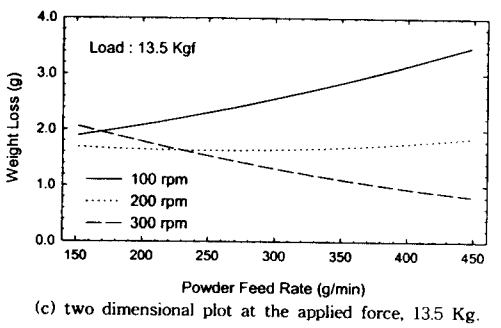
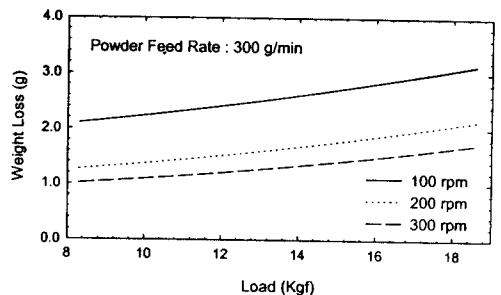
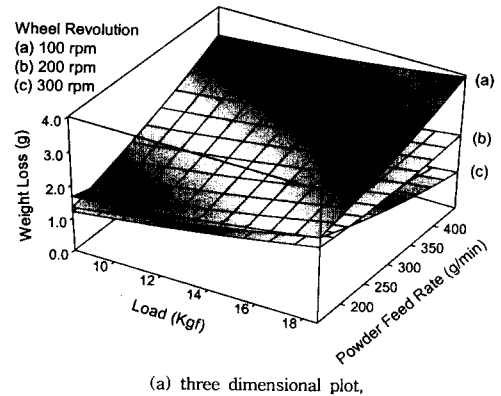
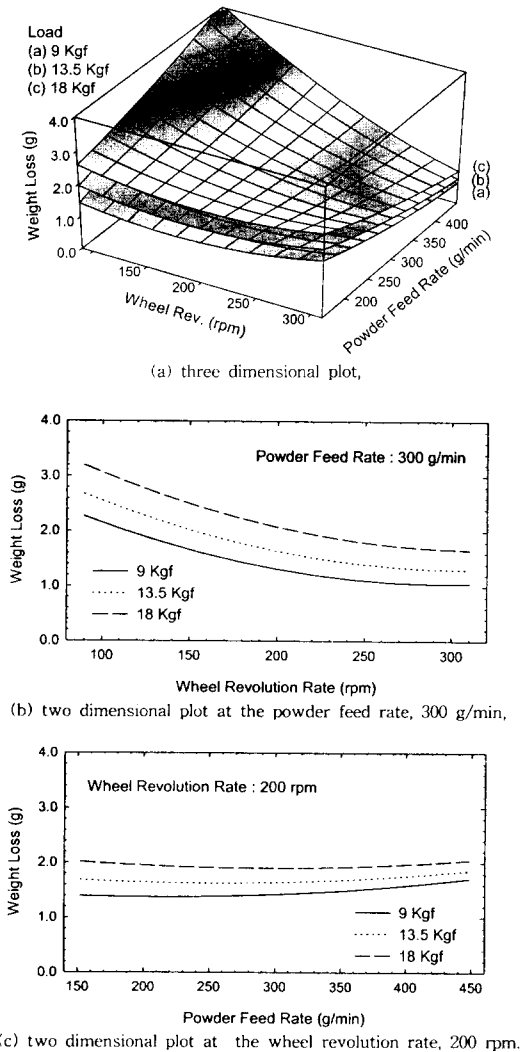


Fig. 7 Response surfaces showing the effects of the applied force and powder feel rate on the weight loss after abrasive wear test of mild steel.

을 때는 wheel 회전속도에 따라 마모량의 차이가 크게 없음을 보여준다. 반면 분말 송급량이 400 g/min으로 많을 때는 wheel 회전속도에 따른 마모량의 차이는 더욱 커진다. Fig. 7(c)에서는 하중이 13.5 Kg인 단면에서 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. wheel 회전속도가 200





**Fig. 8** Response surfaces showing the effects of the wheel revolution rate and powder feel rate on the weight loss after abrasive wear test of mild steel.

rpm에서는 분말 송급량은 마모량에 거의 영향이 없다. wheel 회전속도가 300 rpm으로 빠른 경우에는 분말 송급량이 증가하면 마모량은 감소하는 반면, wheel 회전속도가 100 rpm으로 느린 경우에는 오히려 분말 송급량이 증가하면 마모량이 증가한다. 이러한 경향 역시 고 Cr 주철 육성용접부에서의 마모시험에서는 분말 송급량이 마모량에는 크

게 영향을 미치지 않은 점과는 매우 다르다.

Fig. 8(a)에서 하중이 각각 9, 13.5, 18 Kg일 때 wheel 회전속도와 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 반응면들은 상당히 급격히 변화하는 경사면을 가지는 반면, 서로 거의 평행하게 존재한다. Fig. 8(b)에서는 분말 송급량이 300 g/min인 단면에서 wheel 회전속도에 따른 마모량의 변화를 보여준다. wheel 회전속도가 느릴 때는 마모량의 감소가 크지만, wheel 회전속도가 빠른 때는 마모량의 감소가 거의 없다. 그러나 마모량 곡선의 기울기는 하중의 차이에 영향을 받지 않는다. Fig. 8(a)에서 보면 분말 송급량이 152 g/min 정도로 적을 때는 마모량은 wheel 회전속도에 거의 영향을 받지 않는 반면, 분말 송급량이 448 g/min으로 많을 때는 wheel 회전속도에 크게 영향을 받는다. Fig. 8(c)에서는 wheel 회전속도를 200 rpm으로 하였을 때 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 변화를 보여준다. 200 rpm의 wheel 회전속도에서는 분말 송급량의 변화에 따라 마모량은 거의 변화하지 않음을 확인해 준다. 그러나 Fig. 8(a)에서 wheel 회전속도가 90 rpm으로 느릴 때는 분말 송급량이 증가하면 마모량도 증가하나, wheel 회전속도가 310 rpm으로 빠를 때는 분말 송급량이 증가하면 마모량은 오히려 감소한다.

#### 4. 검 토

본 연구에서는 고 Cr 주철 육성용접부의 연삭마모특성을 입체적이고 정량적으로 분석하고자 하였다. 또한 고 Cr 주철 육성용접부의 연삭마모 특성을 연강과 비교 분석하였다. 연삭마모 시험조건에 따라 마모손상을 정량적으로 분석하기 위하여 반응표면분석 기법을 도입하였다. 반응표면 분석에 의해 도출되는 반응식을 이용하면 시험조건 범위 내에서 어떠한 마모조건이 주어졌을 때 마모량을 예측할 수 있다. 이러한 결과가 실제 마모환경에 직접적으로 적용될 수는 없으나, 앞으로 실제 마모환경 하에서의 결과들을 반영하여 수정계수 형태를 도입한다면 마모손상 정도를 예측 가능할 것으로 보인다. 이러한 실제 마모환경을 예측하기 위해서는 다른 영향 즉 다른 마모기구에 의한 마모손상, 마모매질, 충격정도, 열 부식환경 등 다른

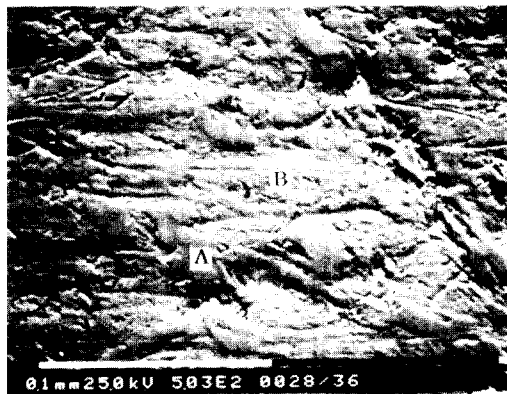
많은 인자들이 추가로 반영되어야 하기 때문에 많은 연구가 요구된다.

우선 마모결과를 종합하면 고 Cr 주철 육성용접부의 마모량은 시험조건에 따라 다소 다르나, 전반적으로 하중, wheel 회전속도에 가장 영향을 받으며, 분말 송급량이 가장 적게 영향을 받는 것으로 분석되었다. 하중이 증가할수록 wheel 회전속도가 느릴수록 마모량은 증가하였다. 연강의 마모량은 마모시험조건에 따라 상당히 급격하게 변하였다. 연강의 마모량은 wheel 회전속도와 분말 송급량의 영향이 매우 컸다. 반면 하중의 증가에 따라서는 다른 마모시험조건에 관계없이 마모량이

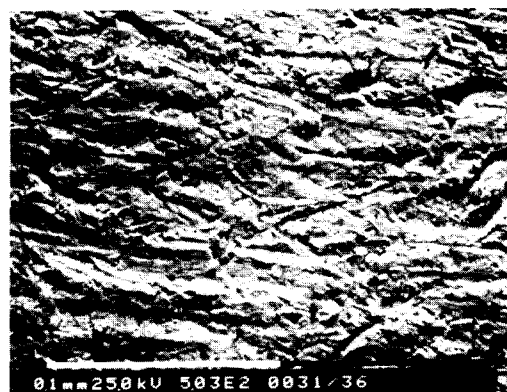
서서히 증가함을 보여 주었다. wheel 회전속도가 느릴 때는 분말 송급량을 증가시킬수록 마모량이 증가하였으나, wheel 회전속도가 빠를 때는 오히려 분말 송급량을 증가시키면 마모량은 감소하였다. 역시 분말 송급량이 적을 때는 wheel 회전속도에 관계없이 마모량이 일정하였으나, 분말 송급량이 많을 때는 wheel 회전속도가 증가하면 마모량이 크게 감소하였다. 육성용접부나 연강 모두 하중이 크고, wheel 회전속도가 느리고, 분말 송급량이 많을 때 마모가 가장 심하게 일어났으며, 반대의 경우 마모가 적게 일어났다.

Photo. 3(a)에서는 고 Cr 주철 육성용접부의 마모시험 후 마모흔적을 보여준다. 공정반응에 의해 형성된 기지조직에서는 마모흔적이 잘 나타나고 있으나, 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 에서 마모 흔적이 잘 나타나지 않는다. 대부분의 마모흔적은 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 에 의해 멈추어진 것을 볼 수 있다. 공정 기지조직의 마모 홈(groove) 주변으로 부스러기들이 거의 없이 매끈함을 보여준다. 또한 많은 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 가 파손되어 있음을 보여준다. 연강의 마모 손상된 표면은 Photo. 3(b)에서 보여준다. 마모 흔적들은 서로 중첩되어 나타나며, 압점에 의한 마모 흔적들도 많이 관찰된다. 또한 패임(ploughing)이나, 절삭(cutting) 과정에서 큰 소성변형을 동반하여 홈 주변으로는 많은 부스러기들이 관찰된다.

고 Cr 주철 육성용접부의 연삭마모 현상은 Fig. 9(a)에서 도식적으로 설명한다. 연구자에 의하면 HRC 54~58을 가지는 고 Cr 주철계 육성용접부에 대해서 micro-Vickers 경도를 측정 후 Rockwell 경도로 환산한 결과 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 는 HRC 75 (HV 1500)으로 매우 높았으며, 기지조직은 HRC 52 (HV 550) 정도로 macro-Rockwell C 정도 측정결과와 비슷하다고 보고하였다<sup>8)</sup>. 마모매질로 사용된 silica sand의 경우 주성분이 되는 quartz의 경도가 HV 900~1280으로 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 보다 낮게 보고되었다<sup>9)</sup>. 따라서 초정  $(Cr, Fe)_7C_3$ 의 경우에는 경도가 sand보다 더 높기 때문에 마모가 일어나기 어렵다. 기지조직 역시 경도가 상당히 높기 때문에 큰 소성변형을 동반하지 않는 취성 절삭에 의해 주로 마모가 일어나게 되며, 기지의 마모가 진행됨에 따라  $(Cr, Fe)_7C_3$  주상정은 점차 돌출하게 되어 하중이 많이 걸리면  $(Cr, Fe)_7C_3$ 의 절삭이나 균열(cracking) 등에 의해 마모가 일어난다고 본다. 이



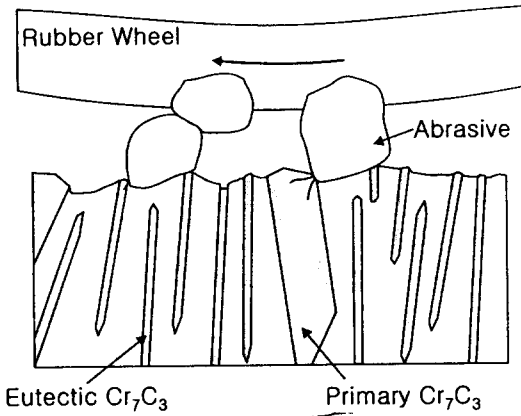
(a) high Cr cast iron hardfacing  
( A : primary  $(Cr, Fe)_7C_3$ , B : eutectic structure )



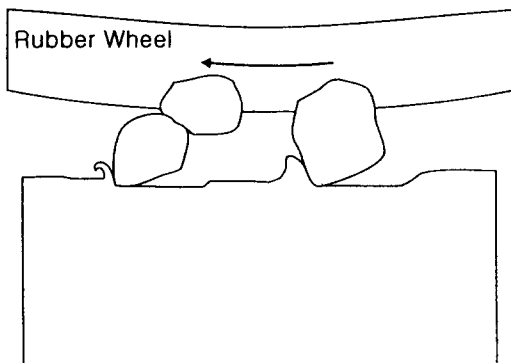
(b) mild steel

Photo 3. Details of wear scars after the rubber wheel abrasion test.

와 유사한 마모기구는 H. Fujimura 등에 의해 주장된 바 있다<sup>6)</sup>. 따라서 고 Cr 주철 육성용접부의 마모는 초정 (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>의 마모속도에 상당히 의존하며, 마모매질의 양보다는 하중이나 wheel 회전속도에 더욱 의존하는 것으로 생각된다. 동일한 마모거리에 대해서 wheel 회전속도가 증가할 때 마모량이 감소하는 것은 마모 효율성이 떨어지기 때문으로 해석할 수 있다. 연강의 연삭마모 현상은 Fig. 9(b)에서 도식적으로 설명한다. 연강은 연성이 크기 때문에 마모는 큰 소성변형을 동반한 패임이나, 절삭작용에 의해 일어나며, 마모 홈 주변으로는 부스러기들을 남긴다. 연강의 연삭마모는 패



(a) high Cr cast iron hardfacing



(b) mild steel

Fig. 9 Schematic drawing explaining the differences of the wear mechanism between the high Cr cast iron hardfacing and mild steel.

임이나, 절삭의 효율성에 크게 의존할 것으로 보인다. 하중은 연삭마모에 일정한 효과를 발휘하는 반면, 마모의 효율성이 마모량에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 분말 송급량이 적을 때는 wheel 회전속도에 따라 마모 효율성이 큰 차이는 없으나, 분말 송급량이 많을 때는 wheel 회전속도의 변화에 따라 마모 효율성에 큰 차이가 발생한 것으로 보인다. wheel 회전속도가 빠를 때 분말량을 증가시키면 연강 표면에 분말이 쉽게 박히게 되고, 박힌 분말들 위로 분말들이 서로 겹쳐서 구르게 되고, 분말에 의한 패임이나 절삭에 의한 마모효과가 감소할 것으로 생각된다. 따라서 wheel 회전속도가 빠를 때 분말 송급량이 증가함에 따라 마모량이 감소하였다고 생각된다. 역시 분말 송급량이 많을 때 wheel 회전속도가 증가하면 마모량이 급속히 감소하는 것도 마찬가지로 생각할 수 있다. 반면 고 Cr 육성용접부의 경우 기지나 초정 (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 모두 소성변형이 거의 없는 취성 절삭이나 균열 등에 의해 마모가 일어나기 때문에 분말 송급량의 영향이 적은 것으로 판단된다. 이러한 분석은 Fig. 8에서 연강의 경우 깊이 패인 압흔 흔적이 많으나, 고 Cr 주철 육성용접부의 경우 깊이 패인 압흔 흔적이 거의 없다는 것으로 입증될 수 있다. 그러나 정확한 원인의 분석을 위해서는 좀 더 연구가 필요하다.

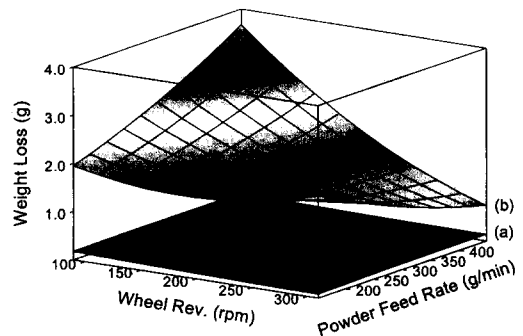


Fig. 10 response surfaces comparing the weight loss of high Cr cast iron with mild steel. (applied load : 13.5 Kg)  
 (a) high Cr cast iron hardfacing  
 (b) mild steel

Fig. 10에서는 하중이 13.5 Kg일 때 고 Cr 주철 육성용접부(Fig. 5(a) 반응면(b))와 연강(Fig. 8(a) 반응면(b))의 wheel 회전속도와 분말 송급량의 변화에 따른 마모량의 차이를 서로 비교하여 보여준다. 분말 송급량이 많고 wheel 회전속도가 느릴 때 마모량의 차이가 가장 크다. 반면 분말 송급량이 많고 wheel 회전속도가 빠를 때 마모량의 차이가 가장 작다. 즉 처리할 분말의 양이 많고 처리 과정이 느릴 때 일반 강재를 고 Cr 주철 육성용접부로 대체하면 내마모성의 향상 효과가 매우 크다. 반면 처리할 분말의 양이 많고 처리 과정이 빠를 때는 고 Cr 주철의 대체 효과가 상대적으로 작다는 것을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고 Cr 주철 육성용접부와 연강의 연삭마모시험에서 하중, wheel 회전속도, 분말 송급량의 영향을 관찰하였다. 마모시험에서는 반응 표면분석 기법을 도입하여 연삭마모 특성을 입체적이고 정량적으로 분석하였다.

마모시험 결과 고 Cr 주철 육성용접부의 마모량은 전반적으로 하중과 wheel 회전속도에 가장 큰 영향을 받았으며, 분말 송급량에 비교적 적게 영향을 받는 것으로 분석되었다. 연강의 마모량은 wheel 회전속도와 분말 송급량의 변화에 따라 상당히 급격하게 변화하였다. 반면 하중의 증가에 따라서는 다른 마모시험조건에 관계없이 마모량이 서서히 증가하였다. 육성용접부나 연강 모두 하중이 크고, wheel 회전속도가 느리고, 분말 송급량이 많을 때 마모가 가장 심하게 일어났으며, 반대의 경우 마모가 적게 일어났다.

고 Cr 주철 육성용접부의 마모는 초정 (Cr, Fe)<sub>2</sub>C<sub>3</sub>의 마모속도에 크게 의존하였으며, 마모는 주로 기지의 취성절삭과 초정 (Cr, Fe)<sub>2</sub>C<sub>3</sub>의 취성절삭, 균열, 파손 등에 의해 일어났다. 반면 연강은 연성이 크기 때문에 주로 큰 소성변형을 동반한 패임과 절삭작용에 의해 마모가 일어났으며, 마모 홈 주변으로는 부스러기들을 남겼다. 이러한 마모기구

의 차이로 인하여 마모시험 조건들이 고 Cr 주철 육성용접부와 연강의 마모량에 미치는 영향이 서로 다르게 나타난 것으로 보인다.

## 후 기

본 연구는 공기반과제의 수행결과이며, 고 Cr 주철계 flux cored wire 제조 및 육성용접에 도움을 준 덕원산업(주)에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Zum Gahr, Microstructure and wear of materials, Elsevier, Amsterdam, (1987), pp. 4.
2. O. N. Dogan, G. Laird II and J. A. Hawk, Abrasion resistance of the columnar zone in high Cr white cast irons, Wear, vol. 79, (1995), pp. 342-349.
3. ASTM G65-85, Conducting dry sand/rubber wheel abrasion tests.
4. D. J. Kotecki and J. S. Ogborn, Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys, Weld. J., vol. 74, (1995), pp. 269s-278s.
5. 박성현, 응용실험계획법, 영지문화사, (1990).
6. H. Fujimura, A. Notomi, Y. Kamito and M. Kimoshita, Development of hard overlay welding for high wear resistance, IIW Doc. XII-1071-88, 1988.
7. G. Laird II, R. R. Brown and R. L. Nielsen, Factors affecting eutectic solidification of Cr-Ni(-Si-Mn) white cast irons, Mater. Sci. Tech., vol. 7, (1991), pp. 631-642.
8. D. A. Ringney and W. A. Glaeser, Source book on wear control technology, ASM, (1978), pp. 305-311.
9. Weld surfacing and hardfacing, The Welding Institute, Cambridge, (1980).