

研 究 論 文

大韓熔接學會誌  
第5卷, 第2號, 1987年 6月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.5, No. 2, Jun., 1987

## Arc Sprayed 부의 Erosion 특성평가

배 강 열\* · 김 희 진\*

### An Evaluation of Arc Sprayed Layer on the Erosion Property

K. Y. BAE\* , H. J. KIM\*

**Key Words:** Arc Spray(아크 스프레이), Sprayed Layer(스프레이 층), Erosion(충격마모)  
Steel Ball Blasting Test(강구충격실험), Weight Loss(무게감량)

#### Abstract

The characteristics of arc sprayed layer were studied with hardness test and microstructural observation. The erosion resistance of arc sprayed layer was also evaluated using a method of steel ball blasting test which was proposed in this study as a test method for measuring the erosion properties in the impact wear condition. By an impact of the molten droplets on the predeposited substrate, lamellar structure was formed which contains laminated oxide layers, fissures, and porosities. As a result of mechanical tests, it was shown that the sprayed specimen showed higher hardness than the substrate, but it resulted in higher erosion rate than the substrate. The poor erosion property obtained with a sprayed coating was considered to be attributable to easy flaking off the the layers laminated with brittle oxide layers.

#### 1. 서 론

주변의 산업설비, 장치, 기기류 등은 작업 조건이나 환경에 의해 마모되거나 부식되어 수명이 단축되는 경우가 많기 때문에 구조재를 선정할 때 이러한 분위기를 간과해서는 안된다. 그러나 안전도나 경제성을 무시한 채 분위기만을 고려하여 구조재 전체를 선정할 수는 없기 때문에 일반적으로는 구하기 용이하고 경제적이면서 제반 기계적 성질이 적합한 소재를 선정하고, 이에 표면 처리등을 행하여 작업환경에 효과적으로 대처하도록 한다. 표면처리 방법에는

많은 방법들이 알려져 있으나, 제품이나 구조물의 형상, 작업성, 경제성, 효율성 면에서 적절한 방법을 이용할 수가 있다.

Photo 1은 고체연료를 사용하는 Fluidized Bed Combustion (FBC) 보일러에서 석탄과 같이 투입된 모래의 유동에 의해 발생된 tube 외벽의 erosion현상을 보여 주는 것으로서, 작업조건에 의해 구조물의 수명이 감소되는 한 예를 보인다. 이와같은 표면 마모현상을 적절한 표면처리 방법을 적용하여 감소시키고자 본 연구에서는 근래 표면처리 방법으로 각광을 받고 있는 arc spray방법을 적용하여 그 타당성

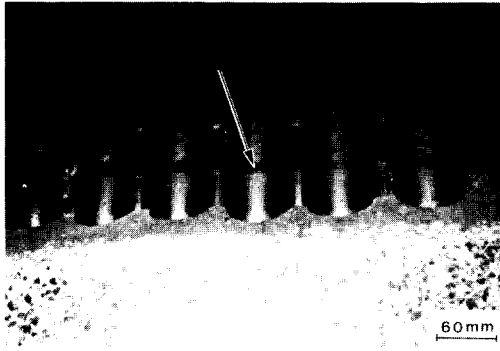


Photo 1. Boiler tubes eroded by sand blasting in the FBC Boiler.

을 조사하여 보고자 하였다.

Fig. 1에서는 arc spray방법의 개략도를 나타내고 있는데, thermal spray방법중의 하나인 arc spray방법은 부재(spraying material)로 사용되는 두 wire사이에 아크를 발생시켜 부재를 녹이고 동시에 고압의 공기르써 용융부를 불어내 모재에 원하는 특성의 sprayed layer를 얻는 표면처리법으로 작업성이나 효율성면에서 다른 thermal spray방법에 비해 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 그런데 이 방법에서 wire가 arc 구역에서 용융되어 입자형태로 공기중을 비행하므로 입자 표면의 산화에 예상되고, 또 모재에 충돌시 입자간 냉각속도차에 의한 완전한 결합이 불가능하기 때문에 wire와는 다른 성질이 sprayed layer에 나타날 것이고, 무엇보다 중요한 모재와의 결합 정도는 예측이 불가능하다고 할 수 있어 이 방법을 적용하기 위해서는 적용성 평가가 선행되어야 한다고 판

단되었다.

Spray방법에 대해서는 접합부의 결합력 향상방법과 그 측정방법을 제시하는 연구가 꾸준히 되고 있으며, 특히 sprayed layer의 평가방법으로 접합강도를 중요시하고 있는 경향을 보이고 있다.<sup>3,4)</sup> 따라서 지금까지의 연구를 보면 sprayed layer가 수행해야 할 기능의 평가와 그 방법이 병행되어 연구되고 있다. Sprayed layer의 기능 평가에 있어서 마모 저항 평가는 접촉에 의한 마모방법을 주로 이용하고 있는데, M. P. Overs, et al.<sup>5)</sup>은 molybdenum의 flame sprayed layer가 300°C에서의 fretting 마모에 우수한 저항성을 보였다고 밝혔고, Axel sandt, et al.<sup>6)</sup>은 flame과 plasma sprayed layer에 대해 block-roller 장치를 써서 sliding 마모실험을, emery paper방법을 써서 abrasive마모실험을 행하여 thermal sprayed layer의 기본적인 마모현상을 설명했으며, Johnson, et al.<sup>7)</sup>은 liquid sodium 분위기에 적용되는 반응로의 부품에 적용된 plasma sprayed layer의 abrasive마모 실험에서 chromium carbide layer는 200-625°C sodium 분위기에서 우수한 마모저항특성을 가진다고 보고했다. 그런데 erosion 등과 같은 충격력을 동반한 마모가 있는 경우, 즉 표면피로와 abrasive마모가 동시에 작용하는 경우에, ceramic sprayed layer의 평가에 대하여는 Arata, et al.<sup>8)</sup>의 보고가 있었으나, arc sprayed layer에 대한 평가가 이루어진 보고는 찾아볼 수 없었다.

본 연구에서는 erosion현상의 한 model로서 충격에 의한 마모를 고려한 steel ball blasting test를 제안하고, 그 방법을 이용해 arc sprayed layer의 충격 마모에 대한 저항성을 고찰해 보고자 했고, 미세조

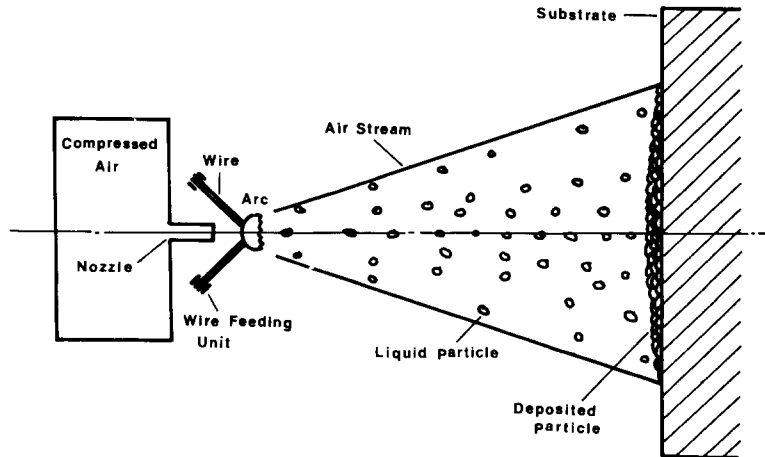


Fig. 1. Schematic diagram of arc spray process.

직의 관찰과 경도실험을 통해 그 결과를 보완했다.

## 2. 시험편 제작 및 실험 방법

### 2.1 시험편 제작

#### 2.1.1 모재 및 spraying wire

실험에 이용된 모재는 외경 51mm, 두께 4mm, 길이 60mm인 boiler용 tube STB35E였고, 모재 표면에 내마모 특성을 위한 spraying wire는 carbon을 1.1% 함유한 carbon steel을 사용하였고 (Dia.: 1.6 $\phi$ ), sprayed부와 모재와의 결합력 향상을 위해 사용한 bond coat wire는 Aluminide (Dia.: 3 $\phi$ )이었다. 이들 모재와 wires 각각의 화학 조성은 Table 1에서 보여 주고 있다.

#### 2.1.2 모재의 전처리

일반적으로, 모재 표면의 산화피막을 제거하고 표면을 거칠게 하여 sprayed부와의 결합력을 향상시킬 목적으로 spray를 하기 전에 모재표면에 grit blasting을 하고, 또 grit blasting을 한 후 4시간 이내에 spray를 해야한다고 알려져 있다.<sup>9)</sup>

본 실험에서 grit는 고경도의 cut wire를 사용하였고, blasting은 blaster의 공기압을 7Kg/cm<sup>2</sup>로 하고 모재와 직각을 유지하면서 약 10초간 행하였다. Grit blasting 후 grit blasting의 효과를 [감소시키지 않고 분진의 흡착을 최소로 하기 위해 spray를 곧바로 실시했으며, 예열은 실시하지 않았다.

#### 2.1.3 Spraying

모재에 균일한 sprayed 부를 얻기 위해, 선반을 사용하여 모재를 회전시키고, spray gun을 선반의 왕복대에 설치하여 일정한 속도로 이송이 가능하게 하였다. 모재를 선반의 척에 물리고, spray gun을 모재와 수직되게 왕복대에 설치한 후, 선반의 회전수가 60rpm, 왕복대의 이송속도를 11cm/min가 되게 유지하였고, spray는 bond coat와 build-up spray(주

spray)를 행하였다. Spraying은 최적 조건에 대한 기준이 규정되어 있지 않기 때문에 spray업체에서 기준에 사용되고 있는 조건을 본 연구에 이용된 시편 형태에 준해 선정했다.

#### (a) Bond coat

Bond coat는 모재와 부분적 금속결합을 얻고, 주 spray를 하기전에 주 spray에 거친면을 주어 spray부와 모재와의 결합력향상을 목적으로 주 spray를 하기전에 50 $\mu$ m정도의 두께로 미리 모재에 coating하는 것으로, 본 실험에서는 rod type flame spray를 사용하였다. 이 system은 산소와 아세틸렌을 반응시켜 열원을 얻고 열원사이로 bond coat용 wire를 이송시키고 동시에 열원주위에 고압의 공기를 불어 넣어 녹은 wire를 모재에 분사시키게 되는 것으로서 본 실험에 사용된 산소와 아세틸렌의 유량비는 1.4:1이었고, 공기의 압력은 5Kg/cm<sup>2</sup>이었다.

#### (b) Build-up spray(주 spray)

Bond coat를 한 후에 곧바로 선반의 공구대에 설치한 flame spray gun을 arc spray gun으로 교체하여 설치해 arc spray를 실시하였다. 주 spray는 정전압 특성의 직류전원을 가진 TAFA 모델 8830 Arc spray장비를 사용하였고, spray 조건은 아아크 전압 27-29V, 전류 150A, 공기압 4Kg/cm<sup>2</sup>, spray거리 150mm, wire 이송속도 4.5Kg/hr/100Amp로 하였으며, pass간의 시간간격은 두지 않았다. 시편은 모재에 bond coat를 한 후 각각 1mm 및 2mm의 두께로 주 spray를 한 것과, bond coat를 하지 않고 각각 1mm와 2mm로 주 spray를 한 것으로 각각 나누어 제작했고, 별도의 후열처리나 기계가공 등은 하지 않았다. Photo 2는 spray를 행하기 전, 후의 tube를 절단하여 단면을 보여 주는 사진이다. Photo 2-b는 spray후의 tube 단면을 보여 주는 사진으로 tube외벽에 spray된 층(sprayed layer)을 볼 수 있는데 이 사진에서 보여 주는 시편은 2mm두께로 spray한 것이다.

Table 1. Chemical composition of substrate (tube) and coating wires.

Element (%)		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ti	Al	Ni	Fe
Material	Substrate	0.18	0.35	0.45	0.035	0.035	—	—	—	—	—	balance
Coating wire	Build-up	1.1	0.4	—	0.03	0.03	2	1.9	0.2	0.1	—	balance
	Bond	—	—	—	—	—	—	—	—	20	80	—

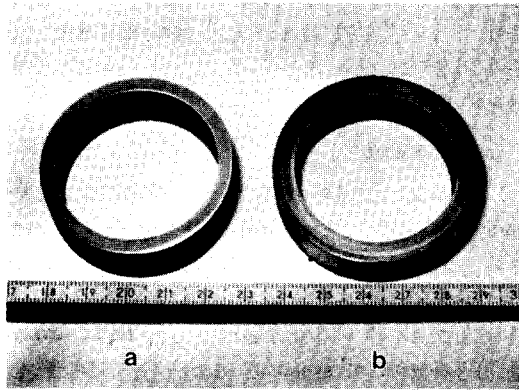


Photo 2. Macroscopic cross section of tubes (a) before and (b) after spraying.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 미세조직 및 경도 시험

sprayed 시편의 단면을 polishing하고 3% Nital 용액에 5초간 etching하여 광학현미경으로 미세조직을 관찰했다. 경도 시험은 sprayed표면에서는 Rockwell B 및 C scale로 측정하였고, 모재와 spray부의 단면에서는 Rockwell B scale로써 모재와 spray층 중앙부에서 각각 실시하여 측정했다.

### 2.2.2 충격마모성 실험

Erosion test를 가상한 steel ball blasting 장치와 시

편을 Fig. 2에 나타냈는데, 이 실험의 원리는, 일정 방향으로 등속도 회전하는 conveyor roller 위의 plate에 모재와 sprayed 시편을 장착한 jig를 올려 놓아 시편이 등속도로 이동하게 하고, conveyor 좌우 고정된 위치에 설치된 blade fan에 steel ball을 채워 넣고 fan을 회전시키게 되면 steel ball이 비산하여, 이동하는 시편에 충격을 가하게 되는 것이다. 이 실험에서 fan의 회전수는 1750rpm으로 하였고, 시편의 이송속도는 3.2m/min로 하였다. 충격력을 가하기 위해 사용된 steel ball은 직경 1-1.2mm의 본포를 가진 0.9% C steel이었다.

실험의 진행은 fan과 conveyor를 가동한 후, 시편 준비에서 언급된 바와 같이 다른 조건으로 제작된 sprayed시편 4개와 모재를 포함해서 5개를 동시에 jig에 장착한 후 conveyor에 올려서 blasting fan 사이를 지나는데 충격력을 받게 하고, 시편이 blade fan의 위치를 완전히 벗어나게 되면 jig로부터 시편을 분리해 시편의 무게를 0.01g까지 측정하였다. 무게 측정후 다시 시편은 jig에 장착시키고 처음의 과정을 반복하여 10회 실시하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 미세조직 및 경도

Photo 3은 광학현미경에서 관찰된 sprayed부의 미세조직이다. 모재와 sprayed부의 결합형태를 보면

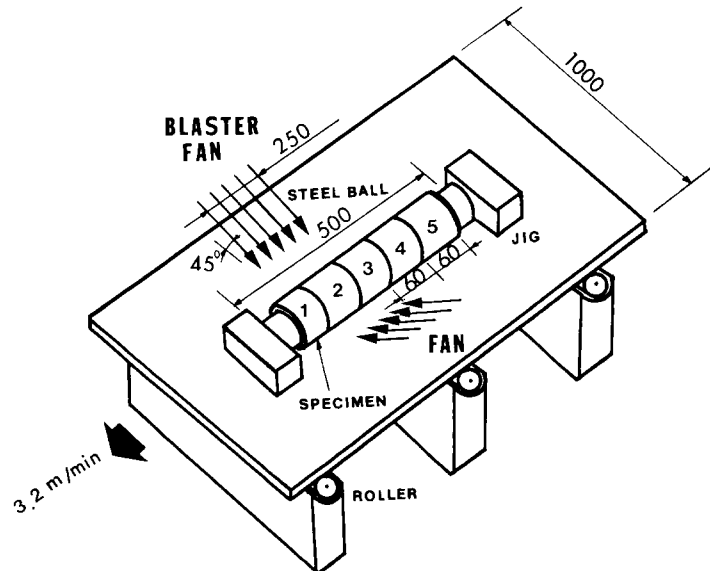


Fig. 2. Experimental set-up for steel ball blasting test.

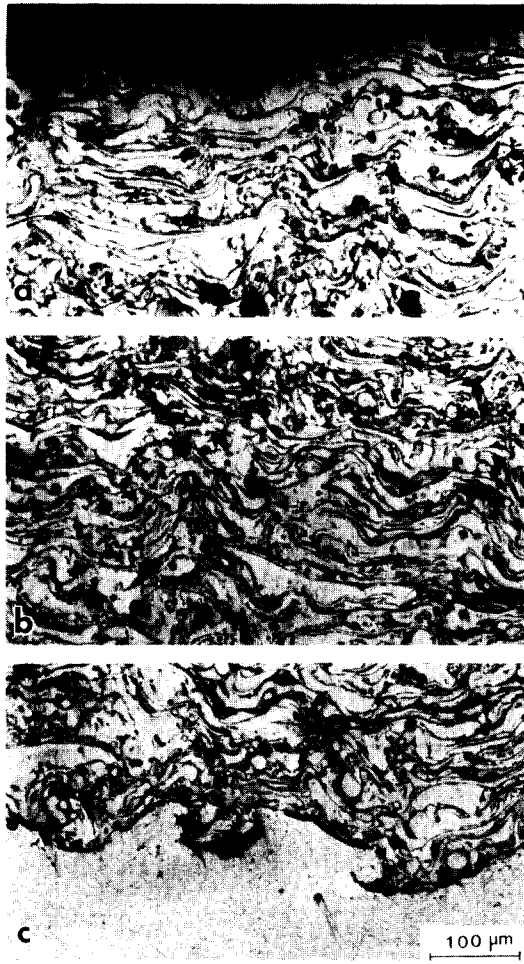


Photo 3. Microstructure of sprayed layer (a) surface (b) middle and (c) interface with substrate.

(Photo 3-c), 사진 grit blasting 처리된 표면의 요철 사이에 용융된 입자가 충돌하면서 스며들어 기계적인 결합의 형태를 나타내고 있고, sprayed층간의 결합 형태도 이미 쌓여진 sprayed 층위에 다음의 용융된 입자가 충돌한 후 납작하게 된 상태로 역시 기계적인 결합 형태를 나타내고 있다. 이러한 기계적인 결합이 모재와 sprayed부, sprayed부 layer간의 결합력을 갖게 한 것으로 보여진다. 이 사진에서는 layer 사이에 검고 길게 나타난 층을 볼 수 있는데 이것은 arc spray방법의 특성상 공기를 동반하고 또 공기중에서 spray한 결과로 입자가 비행하면서 공기와 접하여 표면이 산화되어 생긴 산화층임을 알 수 있다.<sup>10)</sup> 또 이 사진에서 검고 둥글게 보이는 부분은

모재나 sprayed부 위에서 용융입자가 잘 퍼지지 않았을 경우 layer간에 porosity가 발생한 것으로 생각된다. Layer사이에 존재하는 구형의 층은 molten 상태에서 충분한 운동에너지를 가지지 않고 기존의 sprayed층 위에 충돌된 경우나, 공기중을 비행하면서 이미 표면이 냉각이 된 채로 기존의 sprayed층 위에 충돌된 경우라 보여지며, sprayed부의 표면부근에 발생된 fissure도 용융입자가 충격전에 충분한 열이나 운동 energy를 가지지 못해 퍼짐성이 상실되어 발생된 결과로 생각된다. 이와 같이 layer 조직에 혼입되어 있는 porosity, 산화층, 구형의 층, fissure등으로 인하여 sprayed 층의 성질은 본래의 wire의 성질과는 전혀 다를 것이 예상되며, 이들로 인하여 sprayed 층의 기계적 성질이나 층간의 결합력에는 좋지 않은 결과를 유발할 것으로 생각된다.

Table 2는 모재와 sprayed부의 경도 시험 결과를 나타내는데, 이 Table에서는 sprayed부가 R<sub>B</sub>90-105, 모재가 R<sub>B</sub>70으로 sprayed부 경도가 모재보다 훨씬 크게 나타나, 일차적으로 내마모성을 경도치만으로 평가하는 경우는 sprayed부의 내마모성이 모재보다 우수하다고 할 수 있다.

Table 2. Hardness test result.

		Hardness	
		Rockwell B(R <sub>B</sub> )	Rockwell C(R <sub>C</sub> )
Material			
	Substrate	70	—
	Coating wire	—	38
Sprayed layer	Surface	90-105	20-25
	Cross section	90-105	cracked

그러나 본 실험에서 얻은 sprayed부의 경도치(R<sub>B</sub> 90-150)는 본래의 wire 경도치 R<sub>C</sub> 38보다 훨씬 낮게 나타나고 있는데, 이러한 결과는 위에서도 언급한 바와 같이 spray층에 존재하는 porosity등의 영향으로 sprayed부가 치밀하지 못함에 기인한다고 할 수 있다.

한편 sprayed부 단면에 다이아몬드 cone을 사용하는 Rockwell C 측정을 했을 때는 Photo 4에 나타난 바와 같이 cone주위로 crack이 번번이 발생되어 측정이 불가능했다. 이때 crack은 사진에서 나타난 바와 같이 layer간의 산화층을 따라 전파하였는데, 이는 결합력이 약한 산화층에서 소성변형을 일으키지 못하고 균열이 발생한 것으로 보여진다. 이러한 결과를 토대로, 외부에서 가해지는 충격력이 layer간의 결합력이상의 힘을 야기시킬 수 있는 경우, 전단에

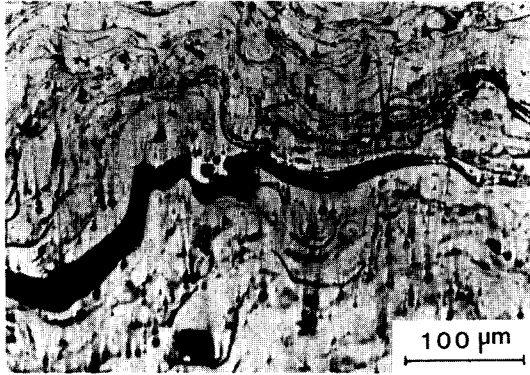


Photo 4. Microstructure showing a tail of the crack developed by Rockwell C hardness indentation on the section of sprayed layer.

의한 원자의 분리보다는 layer와 layer사이의 debonding이 우선할 것이라는 것이 예측된다.

한편 sprayed부 표면에서의 Rc 경도 측정에서는 crack이 발생됨이 없이 20-25정도의 경도치를 얻을 수 있었다. 이와 같이 표면부에서 crack이 발생하지 않은 것은 입자가 연속적으로 spray된 부위에 충돌하

여 다시 평편화되기 때문에, 수직하중을 받는 균일면이 커져 다이아몬드 cone의 하중을 소성변형과 함께 수용이 가능했던 것으로 생각할 수 있으며, 또한 표면, 즉 원주 방향으로 이루어진 면은 용융입자가 거의 동일한 시간에 쌓여 응고했기 때문에 얻어진 입자 상호간의 높은 결합력이 수직하중에 의한 입자간의 파손에 저항했을 것으로도 간주된다.

### 3.2 충격마모성

Steel ball blasting에 의한 충격마모성 실험은 blasting후 시편의 무게감량을 측정해서 그 무게 감량을 비교함으로써 마모성을 평가할 수 있도록 하였다. Fig. 3, Fig. 4, Fig.5는 blasting 회수와 누적되는 무게감량의 관계를 보여 주는 실험 결과로서, 초기(0-2회)의 blasting에서는 기울기가 약간 크게 나타나지만 나머지 회수에서는 blasting회수와 무게감량은 선형적인 관계가 있어 blasting회수의 증가에 따라 무게감량은 일정함을 알 수 있다. 이 결과에서 spraying이 완료되어, 계속적인 입자의 충돌이 없어 입자 사이가 치밀하게 결합되어 있지 못한 표면입자

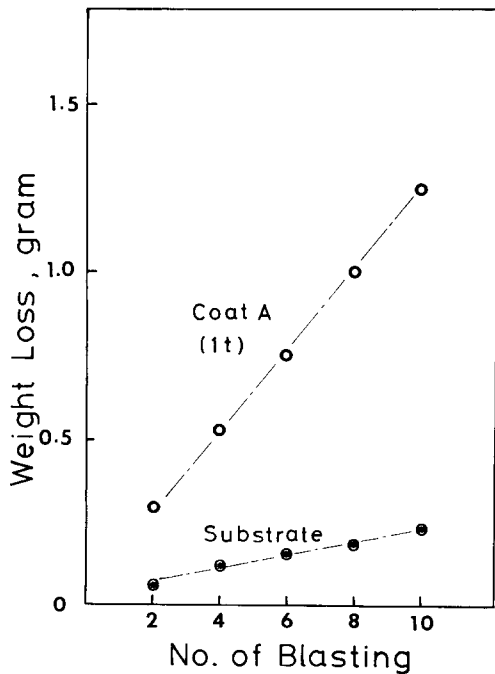


Fig. 3. Result of steel ball blasting tests done on the sprayed specimen(Coat A) and on the substrate.

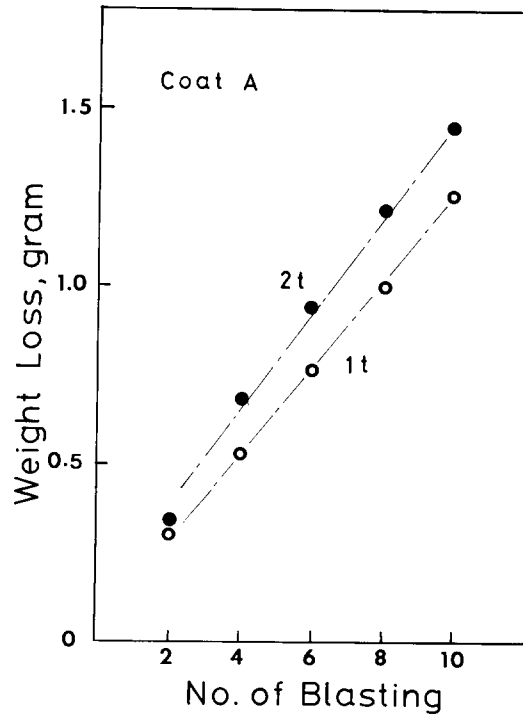


Fig. 4. Effect of sprayed thickness on the erosion resistance measured by steel ball blasting test(Coat A : Build-up spray).

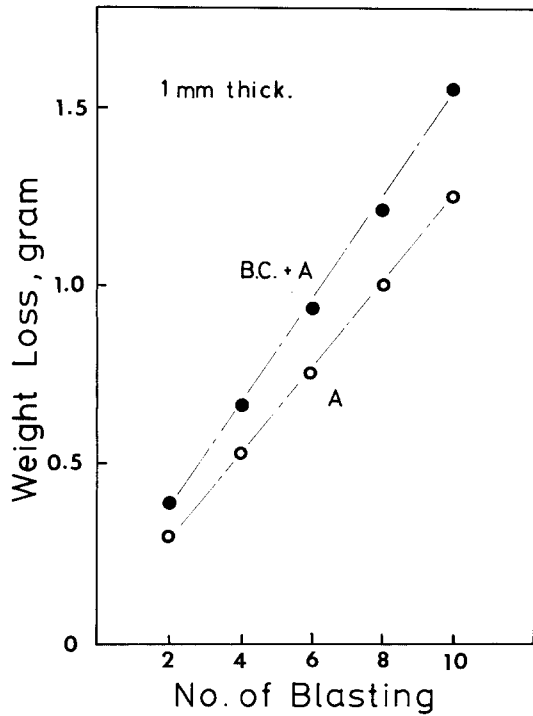


Fig. 5. Effect of bond coat on the erosion resistance measured by steel ball blasting test (B.C : Bond Coat).

층은 충격력에 의해 쉽게 떨어져 나왔음을 나타내고, 이러한 표면입자가 완전히 제거된 후에는 sprayed부가 어느 정도 균질성을 갖고 있어 계속적인 blasting에도 균일한 무게감량을 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 3의 결과에서 극히 중요한 사실은 sprayed시편의 기울기가 모재의 기울기보다 급하게 나타나고 있어 sprayed시편의 무게 감량율이 모재의 그것보다 크다는 것이다. 이는 sprayed시편의 충격마모의 대한 저항이 모재의 그것보다 낮다는 것을 나타내는 것으로, 이는 본 연구에서 처음 의도했던 방향과는 정반대의 결과로서 이에 대한 확실한 규명이 필요했다.

Photo 5는 이러한 결과의 원인을 규명하기 위한 blasting전, 후 sprayed시편의 표면 SEM사진으로, blasting전의 sprayed부에서 보여진 입자가 blasting후의 sprayed부에서는 짓눌려져 있기는 하나 입자 내부의 부분적 파손을 발견하기 어렵고 입자의 크기 변화가 뚜렷이 없는 점으로 미루어 충격하에서는 입자 내부의 전단에 의한 부분적 마모보다도 입자 자체가 떨어져 나간 형태를 보인다고 할 수 있고, 이로 인한 무게감량이 큰 것으로 생각된다. Photo 6은

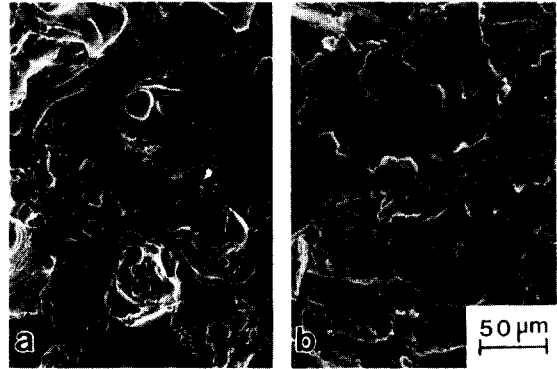


Photo 5. Surface morphologies of sprayed layer (a) before and (b) after steel ball blasting test.

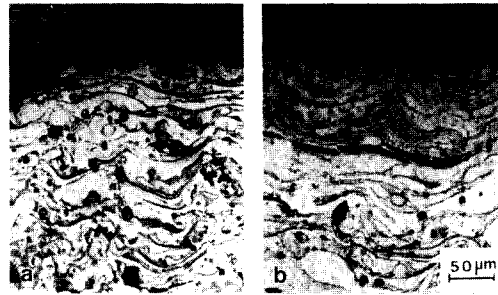


Photo 6. Cross section of sprayed layer (a) before and (b) after steel ball blasting test.

blasting 전, 후 sprayed부 단면의 광학현미경 사진인데, blasting후의 시편에서는 sprayed부에 layer를 따라서 crack이 존재하고 있음을 보여 주고 있다. 이는 sprayed부의 마모현상이 sprayed layer의 박리현상에 의해 일어나고 있음을 보충 설명하여 주고 있다. 부연해서 설명하면, sprayed부가 steel ball의 반복 충격력을 받아 layer사이에서 힘이 가해졌을 때, 취약한 산화층으로 싸인 layer사이에서는 반복하중에 의하여 crack이 발생하고 이러한 crack은 입자층(layer)의 박리로 발전되어 layer간의 박리현상이 일어난다는 것이다. 이러한 박리 현상으로 말미암아 sprayed시편의 무게 감량이 모재보다 크게 나타난다고 생각된다.

따라서 arc spray 방법을 충격마모성 향상을 위한 목적으로 사용하기 위해서는 산화층 발생을 억제할 수 있는 방법이 필요할 것으로 생각된다. 이를 위하여 carrier gas로 압축공기 대신 질소나 argon gas를 사용하는 방안을 검토해 볼 수 있으나 이 방안의 적

용성 여부에 관해서는 별도의 연구가 더 진행되어야 하겠다.

Fig. 4와 Fig. 5에서는 두께의 변화와 bond coat의 침가가 있는 경우에 대한 무게감량율을 보이고 있는데, 이 경우도 역시 앞선 그림 Fig. 3에서 보여준 바와 같이 spray층의 마모율이 모재보다 크게 나타나고 있으며, 특히 두께의 변화나 bond coat의 유무에 따라서도 무게감량율이 달라지고 있음을 나타내고 있다. 이것은 이들 변수에 의한 sprayed부의 내부력(잔류응력) 변화에 그 원인이 있을 것으로 생각되기는 하나, 이에 대해서는 조사가 더 필요할 것 같다.

#### 4. 결 론

충격마모가 동반되는 erosion현상의 model 실험으로서 steel ball blasting 실험을 이용하여 arc spray 부의 내마모 특성을 조사한 결과, sprayed부가 모재보다 충격마모에 대한 저항성이 낮았는데, 이는 sprayed부가 산화층을 내재하여 충격에 의한 박리현상이 쉽게 일어나기 때문이었다. 따라서 arc spray 방법을 충격마모에 대한 저항의 목적으로 이용하기 위해서는 layer간의 결합력을 향상시키는 방법을 모색해야 한다는 결론을 얻었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) M. Seki and K. Ishikawa, Application and problem of thermal spraying, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 82, No. 724(1979), pp. 270-275.
- 2) K. Akimoto, Investigation of arc sprayed coating, The Journal of the Thermal Spraying Society of Japan, Vol. 16, No. 1(1979), pp. 17-24.

- 3) R. Kawase, M. Kureishi and S. Minehisa, Relation between arc spraying condition and adhesive strength of sprayed coating, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 15, No. 2 (1984), pp. 27-33.
- 4) D. Bohme, Modification of a known and development of a new testing method for the determination of the adhesive strength of thermally sprayed coatings, Thermal Spraying Conference (1978), paper. 27.
- 5) M. P. Overs, S. J. Harris and R. B. Waterhouse, Composition, microstructure and mechanical properties of flame sprayed molybdenum coatings, Transactions of the Institute of Metal Finishing, Vol. 57(1979), pp. 81-85.
- 6) A. Sandt, Coatings applied by thermal spraying and their wearing behavior, Welding and Cutting, No. 4(1986), pp. 52-54.
- 7) R. N. Johnson, S. L. Schrock and G. A. Whitlow, Wear resistant coatings for reactor components in liquid sodium environments, J. Vac. Sci. Tech., Vol. 11, No. 4(1974), pp. 759-764.
- 8) Y. Arata and A. Ohmori, The present state of ceramic spraying in Japan, Proc. 7th ICM, 1982, Tokyo, pp. 313-322.
- 9) D. Kniewald and M. Sefara, Contributions to the problems of preliminary treatment of surfaces by means of blasting and its influence on the properties of metal spraying coatings, Thermal Spraying Conference(1976), pp. 482-491.
- 10) Thermal Spraying, American Welding Society, pp. 30-48.