

## 내경 플라즈마 용사법에 의한 과공정 Al-Si 합금의 실린더 블록 보어 개발을 위한 기초연구

김병희<sup>†</sup> · 이형근\* · 김혜성\*\*

충남대학교 재료공학과  
\*한밭대학교 생산가공공학과  
\*\*밀양대학교 재료공학과

### Basic Research for Development of Hypereutectic Al-Si Alloyed Cylinder Block Bore by Plasma Spraying System for Internal Diameters

Byoung Hee Kim<sup>†</sup>, Hyoung Keun Lee\* and Hye Sung Kim\*\*

Dept. of Materials Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-764

\*Dept. of Welding and Production Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 300-717

\*\*Dept. of Materials Engineering, Miryang National University, 1025-1, Naei-dong, Miryang, Kyungnam, 627-702

(2001년 9월 13일 받음, 2001년 10월 30일 최종수정본 받음)

**Abstract** The objective of this study is to investigate the characteristics - microstructure, hardness, adhesive strength and friction coefficient - of the coatings with aging-treatment after optimizing internal-plasma spraying parameters for Al-30wt%Si powder as a basic research to manufacture the cylinder block bore for Al engine composed of Al-30wt%Si alloy on Al alloy. The optimum internal-plasma spraying parameters of Al-30wt%Si alloy are summarized as follows: voltage: 37.5V, current: 160A, working distance: 25mm, gun traverse speed: 4.5mm/s, rotating speed: 518m/min. The primary Si particles grew aggressively with increasing heat-treating temperature. The hardness of the as-sprayed coating was about Hv=275 but this value was abruptly decreased with increasing heat-treating temperature. And average friction coefficient of the coating was below 0.08 after heat treatment for 48h at 175°C.

**Key words**: internal-plasma spraying, Al-30wt%Si powder, microstructure, hardness, friction coefficient

### 1. 서 론

자동차산업의 발달과 자동차의 수의 급격한 증가와 더불어 화석연료의 사용이 급격하게 증가로 인하여 오늘날 자동차 배기 가스에 의한 환경오염 문제가 그 어느 때 보다도 심각하게 대두되고 있다. 따라서 세계 각국의 자동차 산업에서는 이러한 환경오염을 줄이기 위한 연구가 여러 각도에서 진행되고 있으며, 그 중 한 분야는 기존 주철 엔진 블록을 알루미늄합금 재료로 대체하여 차체를 경량화 시키는 노력을 하고 있다.<sup>1)</sup> 현재 약 20% 정도가 알루미늄합금재료로 엔진을 대체하고 있으며, 앞으로 50% 이상 알루미늄합금 재료로 엔진을 대체될 것으로 전망하고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 알루미늄합금재료로 엔진을 대체하는 데는 몇 가지 문제점이 발생하는데 그 중에서 가장 큰 문제점은 실린더 블록 보어의 내마모성 약화를 들 수 있다. 따라서 알루미늄합금 엔진의 실린더 보어의 내마모성을 증가시키기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 알루미늄합금 엔진의 실린더 보어의 내마모성을 향상시키기 위해 실린더에 기존의 주철재 sleeve나 liner를 삽입하는 방식을 채택하여 왔다.<sup>2)</sup> 그러나 주철 sleeve나

liner의 삽입방식은 변형이나 가공성의 저하, 제조 단가 상승, 수명 감소 등의 많은 문제점을 갖고 있다. 따라서 최근 들어 알루미늄합금 엔진의 실린더 보어의 내마모성을 증가시키기 위해 thermal spray 기술을 적용하여 실린더 보어에 내마모성 재료를 코팅하는 연구가 급속히 빠른 속도로 진행되고 있다. thermal spray 기술은 이미 항공산업분야에 성공적으로 적용되어 온 잘 확립된 코팅기술으로써 자동차 산업분야에 적용되고 있는 추세이다. 현재 용사용 실린더 블록 보어용 재료로써 금속합금재료, 금속-금속 복합재료, 금속-고체 윤활 복합재료, 그리고 금속-세라믹 복합재료 등에 대해 연구가 진행되고 있으며, 구체적으로 연구의 대상이 되고 있는 재료로는 Al-Si, Ni-Al, Ni-Cr-Al, AISI 434, AISI 316, Ni-MoS<sub>2</sub>, Ni-BN, Fe-FeO-C, AISI 433-CaF<sub>2</sub> 등<sup>1-5)</sup>의 재료에 연구가 집중되고 있으며, Al-Si합금의 경우에 Al-(12-20%)Si 합금이 주요 연구 대상이 되고 있으며 일부 재료는 실용화 단계까지 이르러있다.<sup>4)</sup> 이들 용사 된 실린더 블록 보어는 피스톤 링 재료에 대해 낮은 마찰계수(0.12이하)와 낮은 마모속도, 우수한 열 충격 저항성, 높은 접합강도(30-60MPa), 우수한 기계적 가

<sup>†</sup> E-mail: bhkim@cucv.chungnam.ac.kr

Table 1. Nominal composition of metallic materials

Materials	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
substrate (Al alloy A319)	bal.	16	0.5	4.5	0.45	0.1	-	-	-
cylinder (Al alloy 6063)	bal.	0.2	0.35	0.1	0.8	0.1	0.04	0.1	0.1
coating	bal.	30	-	-	-	-	-	-	-

\*(unit : wt%)

Table 2. Spraying conditions

	Variable	Conditions
Spray gun	gun type	TYP SM-F2-VB
Plasma gas	Ar-H <sub>2</sub>	
	Pressure (psi) - primary :	70
	secondary :	50
Power	Flow rate (l/min) - primary :	34.9
	secondary :	1.98
Powder feed	Ampere(A) :	160
	Voltage(V) :	37.5
spray distance (mm)	feed rate (g/min)	25
	vibrator air pressure (psi)	50
	carrier gas flow rate (l/min)	1.39
gun traverse rate (mm/s)		25
rotating speed (m/min)		4.5
		518

공성, 낮은 표면조도 ( $Ra=0.3$ 이하), 그리고 낮은 기공율 (2%이하) 등이 요구되고 있다.<sup>2~5)</sup>

본 연구에서는 과공정 Al-30wt%Si 합금 재료를 용사용 재료로 선택하여 내경 플라즈마 장비를 이용하여 Al-30wt%Si 합금을 실린더 블록 보어에 적용하기 위한 기초 연구로써 과공정 Al-30wt%Si 합금의 용사변수 최적화와 코팅층의 열처리에 따른 미세조직, 경도, 접합강도, 마찰계수를 평가하고, 또한 Al-30wt%Si 실린더 블록 보어를 제작하는데 목적이 있다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 용사재료 및 용사

Al-30wt%Si합금의 용사분말에 대한 내경 플라즈마 용사조건을 최적화하기 위한 실험으로 사용된 모재는 Al-3.5Cu-6Si 조성을 갖는 A319 Al 합금을 20mm×50mm×5mm로 가공하여 사용하였으며, 최종 제작한 실린더 보어는 wrought Al 합금 6063으로 치수는 외경 88mm, 내경 76mm, 길이 150mm로 기계 가공하여 제작하였다. 사용된 금속재료의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 용사 전 모재의 전처리로 200℃에서 1시간 탈지 후 아세톤으로 초음파 세척하여 모재 표면의 불순물을 제거하였다. 이렇게 준비된 시편은 30mesh의 알루미늄으로 브라스팅하여 모재

표면에 요철을 만든 후 용사를 하였다. 용사장비는 ValuPlaz(Sulzer Metco)와 TYP SM-F2-VB(Plasma Tech.) 내경 건을 사용하였다. 본 연구에 사용된 과공정 Al-30wt%Si합금 용사용 분말은 독일 아헨공대 재료공학 연구소로부터 제공받아 사용하였다. 내경 플라즈마 용사조건 최적화는 L18 직교배열에 의한 실험계획법으로 수행하였으며<sup>6)</sup> Table 2에 최적용사조건을 나타내었다. 내경 플라즈마 용사변수 최적화의 내용은 참고문헌 (6)에 자세히 설명되어있다.

### 2.2 열처리 및 분석

본 연구에서는 엔진의 가동온도부근에서 장시간 노출되었을 때의 Al-Si 용사 코팅층에 미치는 영향과 비정상적인 엔진 작동에 따른 단시간 더 높은 온도에 노출되었을 때의 영향 및 인위적으로 열처리를 함으로서 용사층의 접합강도, 미세조직, 경도 및 마찰마모 특성의 변화를 관찰하기 위해 열처리온도는 175℃, 275℃, 375℃로 8시간 aging 열처리하였다. aging 온도 175℃는 Al-Si 합금의 T6 aging 처리 온도에 가까우며, 엔진의 정상가동 온도보다 약간 높기 때문에, 이 온도를 기준으로 하여 좀 더 높은 온도인 275℃, 375℃를 aging 처리 온도로 선정하였다. 375℃는 용체화 열처리 온도보다 약 100℃ 낮은 온도로서 단시간 높은 온도에 노출되었을 때 발생할 수 있는 코팅층의 열화

Table 3. Wear test conditions

Parameter/type		Condition
Tribometer	block-on-ring	Block : Al30Si coating Ring : SKD 11 steel
Environment	temperature(°C)	26
	humidity(%)	85
Lubricant	liquid lubricant	engine oil (SAE-10W30)
Normal load	N	38.24
Rotational speed	(rev./min)	1024
Running time	sec	1800

현상을 분석하기 위하여 선정하였다. 그리고 275°C는 중간 정도의 온도로서 단시간 열처리에 의해 미세조직의 안정화 처리 가능성과 초정 Si 입자의 분포와 크기의 조절을 기대하였다. 또한 175°C에서는 96시간까지 aging 처리하여 시간경과에 따른 코팅층의 특성변화를 관찰하였다. 미세조직은 전자현미경(SEM)으로 분석하였다. 경도는 용사층의 단면을 미세경도기(Digital Micro Hardness Tester MXT-a7; MATSUZAWA)를 이용하여 100g 하중으로 10초간 유지하여 10회 측정된 값을 평균하여 경도 값을 구하였다. 또한 용사층의 접합강도는 ASTM C 633-79에 따른 인장시험법<sup>7)</sup>에 따라 측정하였으며, strain rate는 0.3mm/min으로 하였다. 여기서 사용한 접착제는 3M사의 weld 2214를 사용하였다. 마찰계수측정은 용사층의 표면을 #1200 연마지로 연마한 후 block-on-ring 형의 자체 제작된 마모시험기를 이용하였으며, 마찰계수측정 실험조건은 Table 3과 같다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Al-30wt%Si 용사분말특성

본 연구에서 내경 플라즈마 용사에 사용한 분말은 Al-30wt%Si의 조성을 가지며, 통상 상용화된 Al-Si 합금의 Si 함량은 최대 25 wt%Si 까지로, 대부분 20 wt%Si 이

하의 범위에서 사용되고 있다. 따라서 현재 제조된 Al-30wt%Si 조성은 현재 주조용 합금으로 제조되는 조성의 범위를 넘어서고 있으며, 이 용사분말은 현재 독일에서 아직 실제 적용은 되지 않고 연구 중에 있는 용사분말이다. Al-30wt%Si 분말은 atomizing에 의해 제작된 분말로써, 분말의 형상 및 입도 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 분말은 구형이며, 평균 입경은 약 30 $\mu$ m로 비교적 작으며, 입도분포는 비교적 넓은 편이다. 특히 10 $\mu$ m 이하의 작은 분말들이 상당히 관찰되고 있다.

#### 3.2 열처리에 따른 미세조직

열처리 온도에 따른 용사층의 미세조직의 변화를 관찰하기 위하여, 175°C, 275°C, 375°C에서 8시간 aging 처리하였으며, 각각에 대한 미세조직의 전자현미경 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 역시 용사된 그대로의 상태에서 미세조직은 Si 입자들과 기지 사이의 구분이 어려웠으며, 일반적인 과공정 Al-Si 합금의 주조조직에서 나타나는 Al-Si 공정조직과 초정 Si 입자들 사이의 구분 역시 할 수 없었다. 175°C에서 8시간 aging 처리한 경우 미세조직은 매우 미세한 Si 입자들이 기지와 구분되어 관찰되고 있으며, Si 입자들은 구상화된 것으로 보인다. 275°C에서 8시간 aging 처리한 경우에는 Si 입자들은 급격히 성장하였으며, 일부 과 성장한 큰 Si 입자들이 관찰되었다. 역시 입자들은 상당히 구상화되어 있음을 알 수 있다. 그리고 375°C에서 8시간 aging 처리한 경우에는 일부 작은 Si 입자들을 제외하고 대부분의 Si 입자들은 과대하게 성장하였으며, Si 입자들 사이에 병합되고 있다. 또한 선 형태의 상이 관찰되고 있으며, 이 상들에 대해서는 좀 더 상세한 분석이 요구된다. 그러나 저 배율에서 aging 열처리 온도에 따른 기공율이나 전반적인 splat의 형상에는 큰 변화가 없었다. 그리고 aging 시간에 따른 미세조직의 변화를 알아보기 위하여 175°C에서 24, 48, 72, 96시간 동안 aging 처리한 후, 미세 조직의 변화의 전자현미경사진을 Fig. 3에 나타내었다. 175°C에서 aging 처리 시간에 따라서는 미세 조직의 변화가 두드러지지 않는으나, 시간 경과와 함께 Si 입자들의 성장은 서서히 일어나고, splat들 사이의 병합이 되고 있음이 관찰된다.

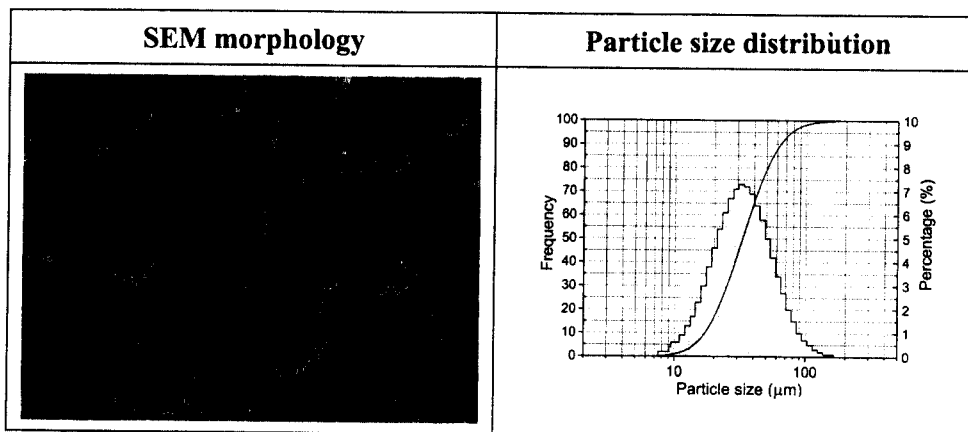


Fig. 1. Morphology and particle size distribution of Al-30wt%Si powder.

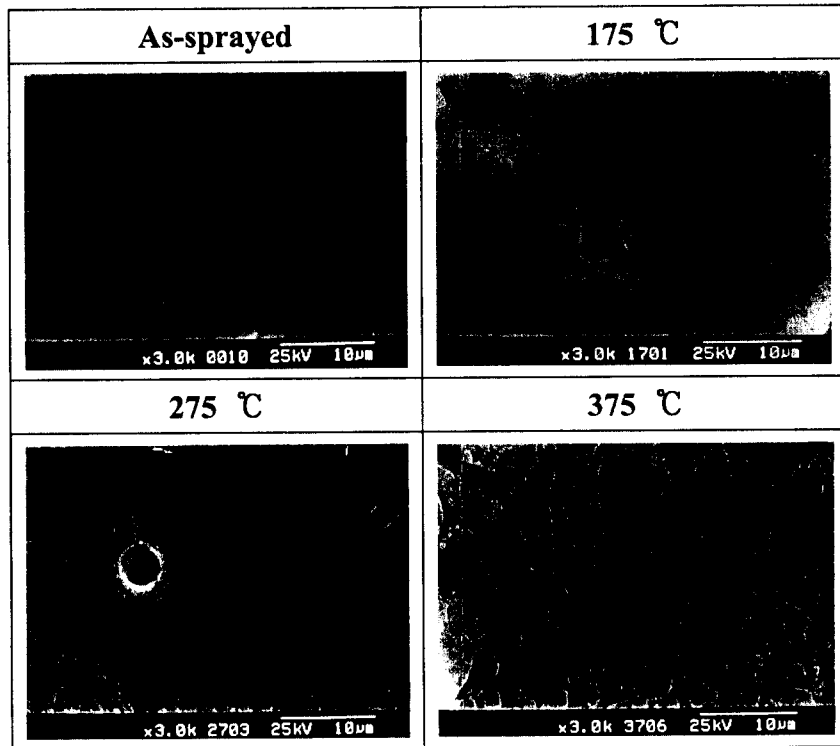


Fig. 2. SEM microstructure of the coatings depending on aging-temperature.

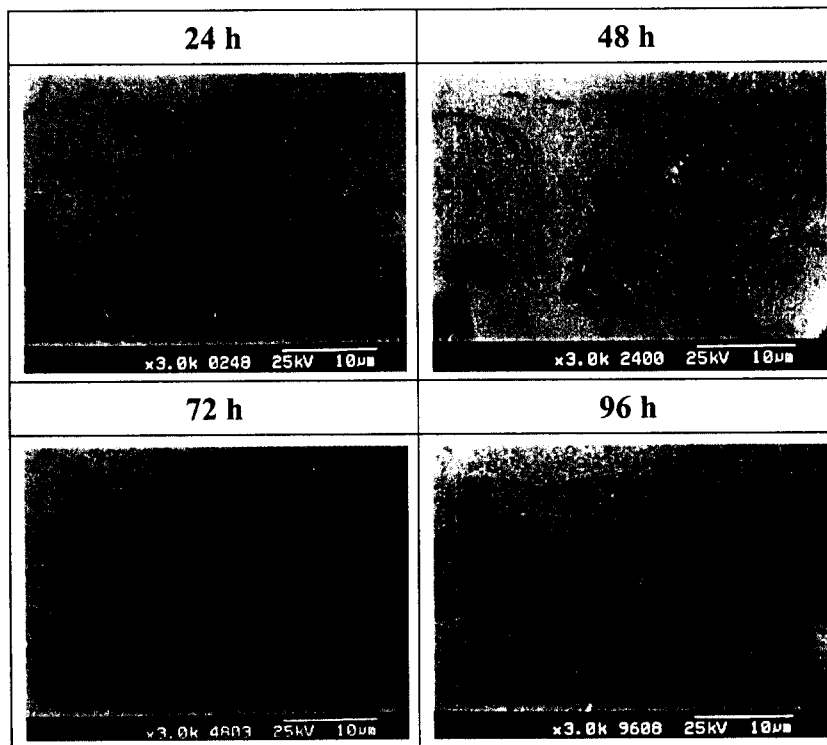


Fig. 3. SEM microstructure of the coatings depending on aging-time at 175 °C

3.3 경도 및 접합강도

Al-30wt%Si 용사층을 온도에 따라 aging 처리 후 경도변화를 Fig. 4에 나타내었다. Al-30wt%Si 용사된 상태에서 코팅 층의 미소 Vickers 경도는 약 Hv 275 정도로서 매우 높은 편이다. 그러나 Al-30wt%Si 코팅층을 175 °C

에서 8시간 aging 처리한 경우 미소경도는 약 Hv 170 정도로 급격히 감소하였다. 이것은 미세조직의 변화 경향과 일치하고 있다. 이러한 경향은 Al-30wt%Si 합금의 플라즈마 용사 코팅층을 실린더 보어에 적용할 경우에 175 °C에서도 시간과 함께 상당한 특성 변화가 일어날 수 있음을 의미

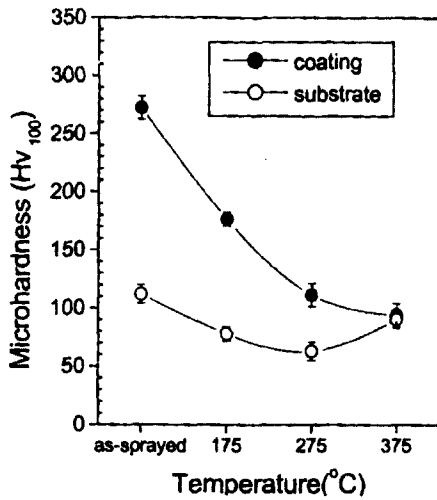


Fig. 4. Microhardness of the coatings depending on aging-temperature.

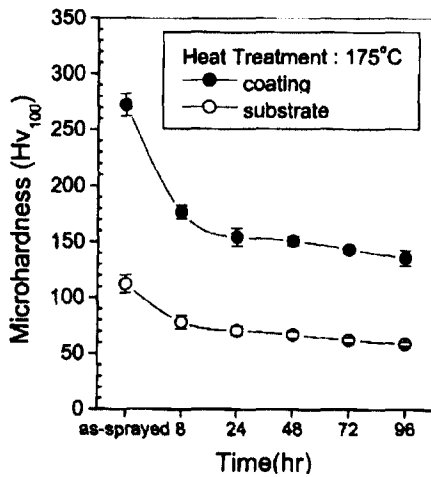


Fig. 5. Microhardness of the coatings depending on aging-time at 175°C.

하며, 또한 275°C에서 aging 처리한 경우에는 Hv 120 정도로 크게 감소하였다. 그리고 375°C에서 aging 처리한 경우에는 약 Hv 100 정도로 A 319 Al 합금 모재와 거의 유사한 정도까지 감소하였다. 용사 코팅층의 경도는 대개 초정 Si 입자의 경도보다는 기지의 경도에 더 크게 의존하는 경향이 있음을 고려할 때, 375°C에서 과도한 Si 입자의 성장이 코팅층의 경도를 감소시키고 있는 것으로 보인다. 그러나 이러한 원인에 대해서는 좀 더 정밀한 분석이 필요하다. Fig. 5의 175°C에서 aging 시간과 함께 경도 변화의 결과를 보면 8시간 aging 했을 때, 경도가 급격히 감소한 후 aging 시간 경과와 함께 거의 변화 없이 서서히 감소를 알 수 있다. 이러한 현상 역시 미세 조직의 Si 입자 성장 결과와 일치한다. 즉 175°C에서 8시간 aging 했을 때 Si 입자들이 기지와 확연히 구분되어지며, 그 후 aging 시간이 증가하면 Si 입자들의 크기가 서서히 증가하는 경향과 일치한다. 또한 175°C에서 96시간 경과한 후에도 Si 입자의 크기는 275°C 8시간 aging 처리한 경우보다 작다. 이것

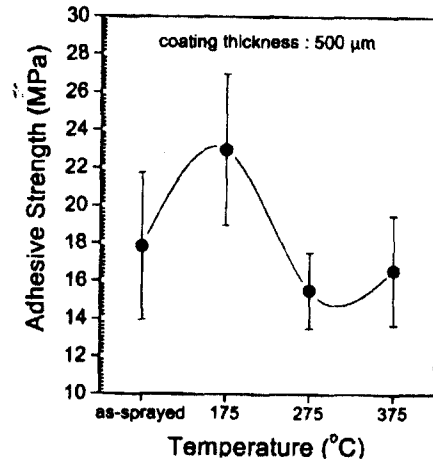


Fig. 6. Adhesive strength of the coatings depending on aging-temperature

은 175°C/96시간 aging 후의 경도가 275°C/8시간 aging 후의 경도 보다 더 높은 사실과 일치한다. 이것으로 보아 Al-30wt%Si 합금의 경우 경도는 Si 입자의 크기에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

인장시험결과는 Fig. 6에 나타내었다. 용사상태에서 평균 18 MPa 이었으며, 175°C에서 8시간 열처리 한 후, 22.5 MPa 로 증가하였으나 인장시험 결과 전반적으로 매우 낮은 값을 보였다. 또한 과단은 대부분 에폭시 층을 통하여 일어났다. aging 온도의 증가와 함께 인장강도의 상승을 기대했으나, 인장강도의 증가는 일어나지 않았으며 이것은 접착제의 시공의 부적절함에 기인하는 것으로 보인다.

### 3.4 코팅층의 마찰계수 측정

실린더 보어에 적용하기 위해서 마모·마찰 특성은 매우 중요한 성질들의 하나이다. 이미 Al-20Si 합금의 용사 코팅층은 실제 차의 실린더 보어의 코팅에 적용되고 있기 때문에, Al-30wt%Si 합금 또한 내마모·마찰 성능은 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.<sup>4)</sup> 용사 코팅층의 마찰계수 측정은 block-on-ring 방법으로 측정하였다. 그러나 실제 실린더 보어와 피스톤 링 사이에는 plane-on-plane 접촉이 일어나며, 고온에서 왕복운동에 의해서 마찰이 이루어지기 때문에 실린더 보어의 위치에 따라 마찰계수가 크게 달라진다. 따라서 본 연구에서 측정된 마찰계수는 hydrodynamic 영역에서의 마찰계수로 생각할 수 있으며, 측정된 마찰계수는 상대적인 값에 의미가 있으며, 절대값은 실제와 약간 다를 수 있다. 마모·마찰 특성은 재료상수가 아니며, 표면요철 상태에 크게 의존하기 때문에 용사 코팅층의 표면은 연마지 #1200까지 연마 후 마찰계수를 측정하였다. 용사상태에서는 Ra가 약 5.4µm이었으며, 연마된 상태에서는 Ra가 약 0.18µm이었다. Table 3의 마모조건으로 실험한 후 aging 온도와 aging 시간에 따라 열처리한 용사 코팅층의 마찰계수 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. 용사된 그대로의 상태와 175°C에서 8시간 aging 처리한 경우가 더 높은 온도에서 aging 처리된 경우에 비해서 마찰계수가 다

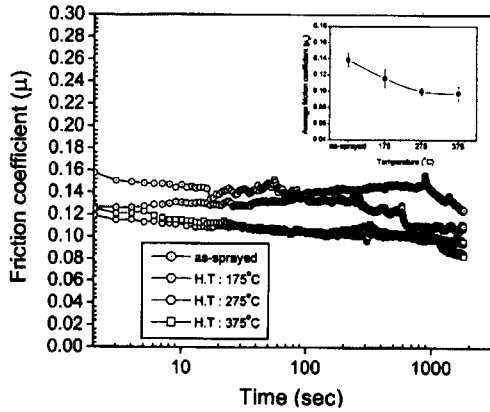


Fig. 7. Friction coefficient of the coatings depending on aging-temperature.

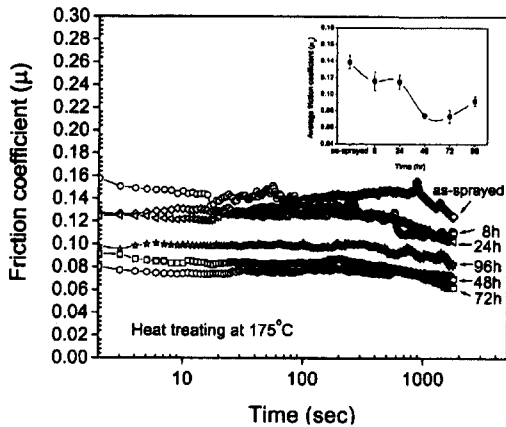


Fig. 8. Friction coefficient of the coatings depending on aging-time at 175°C

소 높으며, 마찰시간 경과에 따른 마찰계수의 변화가 큰 편이다. 또한 대부분의 경우에 초기 마찰계수에 비해 시간이 경과함에 따라 마찰계수가 감소하는 데 반해, 용사 상태에서는 시간이 경과함에 따라 마찰계수가 약간 증가하며, 순간적으로 마찰계수가 증가하는 경향을 보였다. aging처리 온도가 증가하면서 마찰계수는 점차 감소하며, 마찰시간이 경과함에 따라 순간적인 마찰계수의 변화 현상은 거의 없이 서서히 감소하는 안정된 경향을 보였다. 275°C와 375°C에서 8시간 열처리한 경우에는 마찰계수가 약 0.1 정도였으며, 시간 경과에 따라 거의 변화가 없는 안정된 마찰특성을 보였다. 문헌<sup>2)</sup>에 따르면 주철의 마찰계수가 0.2 정도이므로 마찰계수의 측면에서는 문제가 없는 것으로 판단되었다. 275°C와 375°C에서 미세조직은 Si 입자의 구상화와 성장 이 두드러졌다. 따라서 aging 온도의 증가에 따른 마찰계수의 감소와 안정된 마찰 특성은 Si 입자의 구상화 및 성장 혹은 splat들 사이의 병합 현상과 관계가 있는 것으로 판단된다. 또한 175°C에서 aging 시간에 따른 마찰계수 변화는 aging처리 시간이 증가하면 마찰계수가 낮아지며, 순간적인 마찰계수의 변화 없이 안정된 마찰특성을 보였다 (Fig. 8). 특히 175°C에서 48시간 aging처리한 경우에는



Fig. 9. Cylinder bore samples plasma sprayed by internal-gun with Al-30wt%Si alloy

마찰계수가 0.08 이하였으며, 매우 안정된 마찰특성을 나타내었다. 그러나 72시간 이상 aging처리한 경우에는 마찰계수가 약간 상승하는 경향을 보였다. 이러한 현상 역시 Si 입자들의 형상, 크기 혹은 splat들 사이의 병합 현상과 관련이 있는 것으로 보인다. 그러나 이러한 원인들에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

### 3.5 내경 플라즈마 용사 코팅된 cylinder block bore 샘플 제작

이상의 연구결과를 바탕으로 하여 실린더 블록 내면에 Al-30wt%Si 플라즈마 용사 코팅한 샘플을 제작하였다. 샘플로 제작한 실린더 블록의 치수는 외경 88 mm, 내경 76 mm, 길이 150 mm로 제작하였다. 실린더 블록은 주물에 의해 제작할 수가 없어서 wrought Al 합금 6063을 기계 가공하여 제작하였으며, Al-30wt%Si 합금을 내경 플라즈마 용사 코팅법에 의해 제작된 실린더 블록 샘플은 Fig. 9에 나타내었다. 여러 물성 측정용 시험편의 내경 플라즈마 용사과정과는 약간의 차이는 있었으나, 몇 번의 시행착오를 거쳐서 만족스러운 샘플을 제작할 수 있었다.

## 4. 결 론

내경 플라즈마 용사법에 의한 과공정 Al-30wt%Si 실린더 블록 보어 개발을 목적으로 합금의 선택과 용사공정의 최적화를 위한 기초연구로써 Al-30wt%Si 용사층의 열처리 따른 미세조직, 경도, 마찰계수 측정을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 과공정 Al-30wt%Si로 구성된 실린더 보어 제작을 위한 내경 플라즈마 용사조건을 확립하였다. 이때 전압 37.5 V, 전류 160A, 용사거리: 25mm, 건 이송속도: 4.5mm/s, 시편회전속도: 518m/min이다.

2) Al-30wt%Si의 용사층은 열처리온도가 375°C 로 올라감에 따라 Si는 과도하게 성장이 일어났으며, 또한 splat들의 병합현상이 관찰되었다. 이와 같이 과도한 Si의 성장은 용사 층의 경도에 큰 영향을 미쳤다. 열처리 온도가 증가함에 따라 용사층의 경도는 급격히 감소하였다. 그러나 실제 실린더내부의 온도는 150°C 정도임을 감안할 때, 과공정 Al-30wt%Si의 실린더 보어 적용에는 문제가 없을

것으로 판단되었다.

3) 열처리 온도가 높아짐에 따라 평균 마찰계수는 낮아졌으며, 또한 마찰 거동이 시간 경과에 따라 거의 변화가 없는 안정된 마찰특성을 보였다. 또한 175℃에서 48시간 열처리 후의 마찰계수는 0.08 보다 더 낮은 결과를 보였으며, 시간이 길어짐에 따라 마찰계수는 약간 증가하는 경향을 보였다.

4) 이상의 연구결과를 토대로 하여 실린더블록 내면에 Al-30wt%Si 플라즈마 용사 코팅한 샘플을 제작하였다. 샘플로 제작한 실린더 bore의 치수는 외경 88 mm, 내경 76 mm, 길이 150 mm이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업(99-I-01-03-A-068)의 일부 연구비로 수행되었으며 이에

감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. G. Wuest, G. Barbezat and S. Keller, SAE Technical Paper Series 970016, pp.33 (1997).
2. V.D.N. Rao, D.M. Kabat, R. Rose and D.Y. Leong, Automotive Eng., pp. 57 (1997).
3. V.D.N. Rao, D.M. Kabat and G. Wuest, SAE Technical Paper Series 970023 (1997).
4. R.C. McCune, Welding. J. pp. 41 (1995).
5. G. Barbezat and G. Wuest, Surf. Eng., 13(2) pp113 (1998).
6. 이형근, 김병희, Report 99-I-01-03-A-068, 과학기술부 (2001).
7. ASTM C 633-79, ASTM (1980).