Journal of Korean Powder Metallurgy Institute
Vol. 9, No. 5, 2002

P M 리 뷰

알루미늄계 분말의 제조와 응용

김용진 · 홍성현 · 정형식*
한국기계연구원 재료연구부
*아주대학교 공과대학 분자과학기술학과

Fabrication and Application of Aluminum Powders

Yong-Jin Kim, Seong-Hyeon Hong and Hyungsik Chung*
Materials Technology Dept., Korea Institute of Machinery and Materials, 66 Sangnam-dong, Changwon, Kyungnam 641-831, Korea
**Dept. of Molecular Science and Technology, Ajou University, 5 Wonchon Dong, Suwon, Gyunggi 441-749, Korea*

(Received 12 July 2002 ; Accepted form 31 July 2002)

1. 서 론

알루미늄 분말 제조는 1900년 미국에서 처음으로 밀링공정을 이용한 기술개발이 추진되었지만 알루미늄의 폭발성과 낮은 회수율 등 제조공정 상의 문제점으로 인해 많은 어려움을 겪었다.[1] 1920년 Hall에 의해 현재와 같은 개념의 가스분사(gas atomization) 기술과 보다 안전한 밀링방법이 개발됨으로서 이를 이용하여 플레이크 형상의 분말을 우선적으로 제조하기 시작하였다.[2] 알루미늄 분말은 2차 세계대전을 계기로 분말자체의 폭발성을 이용해 화약용 등으로 대량 사용되기 시작하면서 본격적인 수요가 발생하였다. 이에 따라 대량제조기술이 개발되기 시작하였으며, 현재에도 폭발물, 로켓 추진체 등 각종 군사용 소재로서 다량 사용되고 있다. 한편 알루미늄 분말의 산업계 응용도 2차대전 후 대량 생산공정 및 수송과 보관 중의 안전한 분말 취급방법이 확립됨으로서 본격화되기 시작하였다. 현재 알루미늄 및 그 합금분말의 사용용도로서는 각종 도료, 코팅, 제강, 접합 및 구조용 부품 등 다양한 분야에 이르고 있다.

본 논문에서는 알루미늄 분말의 다양한 용도 중 산업의 발달과 함께 향후 크게 성장이 기대되고 있는 알루미늄 PM 부품제조 분야와 기능성 도료 등에 사용되고 있는 알루미늄 플레이크 분말에 대해 제조공정, 특성 및 그 응용현황을 기술하고자 한다.

현재 PM 부품용 알루미늄 분말은 자동차의 연비 향상과 배기가스 저감을 위해 기존의 철계 부품을 대체할 수 있는 고강도, 내마모용 알루미늄 핵심부품 제조에 필요한 원료로서 그 응용가능성이 매우 높아지고 있다.[3]

한편 플레이크 분말은 우수한 접착력과 특유의 은빛 색상을 띠는 특성을 가지기 때문에 지문채취용, 경량 콘크리트 제조용 발포제, 차량용 페인트용 및 각종 산업용 페인트용, 잉크의 원료용, 플라스틱 가전제품의 코팅용 및 폭발제용 등으로 광범위하게 응용되고 있다.[4-6] 알루미늄 플레이크 분말의 요구 특성은 용도에 따라 적절한 분말크기 및 비표면적을 가져야 하는데, 현재 약 20~45 μm의 평균크기와 3~6 m^2/g의 비표면적으로 제조되는 플레이크 분말이 주로 많이 사용되고 있다.

2. PM용 알루미늄계 분말제조 기술 및 응용

2.1. 기술적 배경

1960년 후반 미국의 알루미늄 회사인 ALCOA사와 US Bronze Powders사에서 PM 부품용 알루미늄 혼합분말(blended powder)이 최초로 개발되었다.[7] 그 후 에너지 및 환경문제가 심각하게 대두된 1980년대부터 알루미늄 분말을 PM 부품제조에 응용하려는 연구가 집중적으로 수행되었다.[8,9] 특히 자동차 등의 수

송기계가 지구 온난화 및 에너지 자원 고갈의 주원인으로 지목되어, 이에 대해 미국, 유럽 등에서 각종 환경 규제가 강화되면서 자동차의 배기가스를 감소시키고, 연비를 향상시키기 위한 기술개발 노력이 전 세계적으로 집중되고 있다. 이를 위해 국내외 자동차 관련 회사는 기존 가솔린엔진의 자동차를 무공해, 고연비의 자동차로 대체하기 위해 전기자동차, Hybrid 자동차 등을 적극적으로 개발하고 있으며, 2010년경에는 전체 자동차 중 약 10%가 이러한 종류의 자동차로 대체될 것이 예상된다.[10] 따라서 무공해, 고연비 자동차의 개발을 위해서는 기존의 주철 등 철계 자동차 부품이 알루미늄 등의 경량 부품으로 필연적으로 대체되어야 하고 소형화되어야 한다. 기존의 수송기계에 있어서도 진동 및 소음을 최소화하고, 고연비, 저공해화를 위해서는 알루미늄 부품의 적용이 점차적으로 요구된다. 한편 전자산업분야에 있어서도 각종 가전, 에어컨 제품 등에서 기존 사용 중인 철계 구동부품들은 단위시간 당의 전력소요량이 알루미늄 등의 경량 구동부품에 비해 20~30%이상 소요되고, 소음도 상대적으로 많이 발생되기 때문에 경량부품의 적용이 점차 확대되어지고 있다.

지금까지 자동차, 전자제품에 사용되는 경량 부품은 대부분이 알루미늄이며, 소량의 마그네슘합금이 사용되고 있다. 그러나 산업적으로 사용되고 있는 알루미늄 부품은 단순구조용 부품들이 대부분을 차지하고 있다. 이것은 알루미늄 자체가 가진 재료특성의 한계점으로 인해 고강도나 고내마모성을 요구하는 부품으로 사용할 수 없기 때문이다. 따라서 향후 분말야금공정을 이용한 알루미늄 부품제조에 대한 기술개발이 성공적으로 이루어진다면, 기술·경제적 측면에서 저가격에 정밀부품의 제조가 가능하고, 합금설계에 따라 고강도/내마모화가 가능하기 때문에 기존 알루미늄 부품이 가진 품질 및 특성의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 예상되며, 이에 따라 현재 사용되고 있는 주철부품 등을 상당부분 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

2.2. 알루미늄 및 합금 분말제조기술

알루미늄 분말을 제조하기 위한 방법은 가스분사, 회전분사, 볼밀링 등 매우 다양하게 개발되어 있다.[11,12] 그러나 경제적이면서 대량생산을 위해서는 가스분사공정(gas atomization process)이 현재까지 가장 적합한 분말 제조 방법으로 알려져 있으며, 산업체에서도 대부분 이 공정을 사용하여 분말을 제조하고 있다. 가스분사 공정은 알루미늄 용탕에 고압·고속의 가스제트를 분사시켜, 용탕을 미세한 용액으로 분리시킴과 동시에 응고시켜서 금속분말을 제조하는 방법이다. 가스분사공정은 용탕의 흐르는 방향에 따라 크게

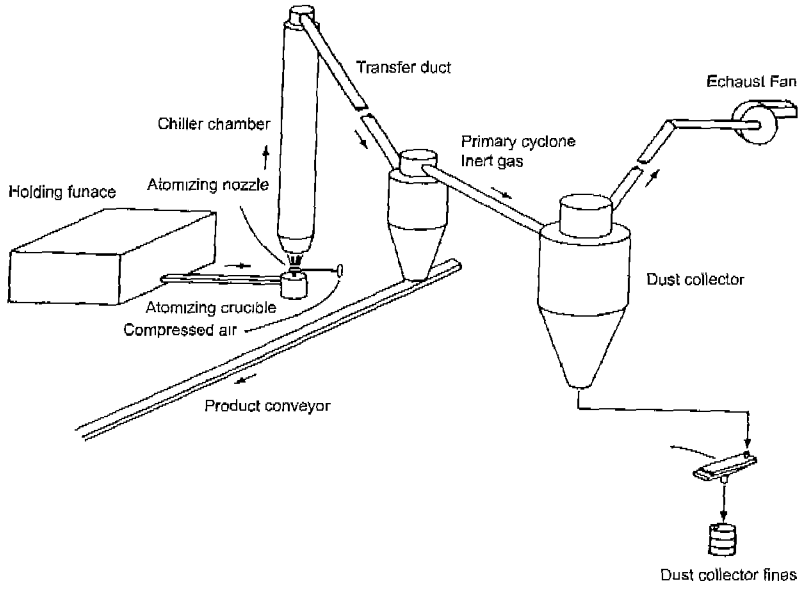


Fig. 1. Vertically upwards gas atomization of aluminum.

상향식, 하향식 및 수평식의 세 가지 방법으로 구분할 수 있다. 그림 1은 상향식의 대표적인 방법인 Alcoa공정을 나타낸다.[13] 그림 1에서와 같이 알루미늄 용탕은 분사용 도가니와 용탕의 흐름이 상향으로 설치된 용탕노즐 (melt nozzle)을 통과한 후, 고속의 압축공기에 의해 분말화되고, 분말 포집기(cyclone)와 분급기 등을 거쳐 제조된 분말이 수거된다. 이때 알루미늄 용탕이 상향식의 용탕노즐을 통과하여 분사되는 것은 고압의 가스가 용탕노즐 주위에서 고속으로 흐르기 때문에 용탕노즐의 끝부분에서 흡입효과 (aspiration effect)가 발생하여 용탕이 노즐관을 통해 올라오게 되고, 이어 고속의 가스와 부딪혀 미세한 용탕입자로 분리, 응고되어진다.[14]

한편 그림 2는 대표적인 하향식 분사장치를 나타낸 것이다.[15] 그림 1의 상향식 방법과는 반대로 용탕이 노즐을 따라 중력방향으로 흐르며, 이때 용탕노즐 주위에 배치된 가스노즐에서 고압의 가스가 분사되어, 분말을 제조한다. 그림 2와 같은 하향식 분사장치는 상향식 분사장치에 비해 장비의 설치높이가 매우 높고, 용해 및 관련작업을 높은 위치에서 해야 한다는 단점이 있지만, 철, 구리 등 비중이 높아 그

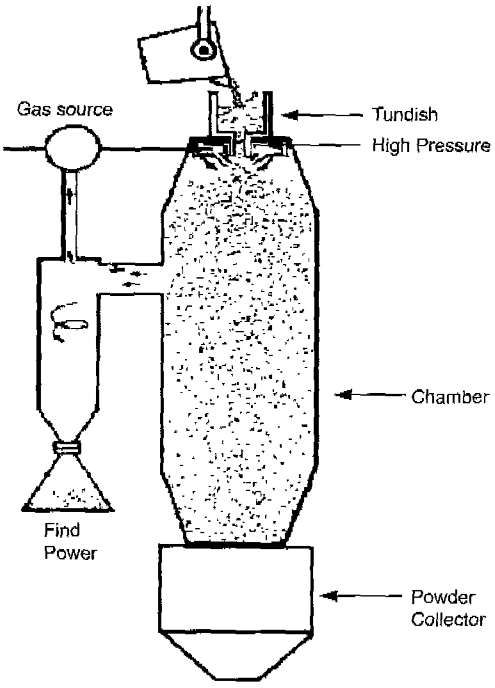


Fig. 2. Schematic of gas atomization.

림 1과 같은 상향식 분사공정으로 분말제조가 어려운 금속분말은 대부분 하향식 분사 공정을 이용하고 있다.

이 외에 러시아를 위주로 구 소비에트 연방에서는 대부분 수평식 분말제조 공정을 이용하고 있다. 수평식 분말제조공정은 용탕 및 가스의 분사방향이 지면과 수평인 방향으로 설계된 것으로 상향식이나 하향식에 비해 비교적 저렴한 설비비용과 대량의 분말을 제조할 수 있는 장점이 있다. 분말 제조원리는 상향식 분사장치와 같이 고속가스 흐름에 의한 흡입 효과에 의해 용탕이 노즐관을 통해 흐르며, 가스제트와의 충돌에 의해 분말화 되는 것이다.

가스분사공정은 용탕의 특성, 노즐의 크기, 분사가스 특성 등 매우 많은 공정변수들을 포함하고 있고 장비마다 설계특성이 다르기 때문에 제조되는 분말의 특성을 이론적으로 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 많은 연구자들이 각자의 모델을 적용하여 많은 실험식을 제안했는데, 이 중 Wigg가 제안한 식 1과 Labanska가 제안한 식 2가 분말크기를 예측하는데 비교적 많이 이용되고 있다.[16,17]

$$D_{m,0.5} = 20\nu_L^{0.5} m_L^{0.1} d_L^{0.1} \sigma^{0.2} \rho_g \text{-} 0.3 \Delta U^{-1.0} [1+m_L/m_g]^{0.5} \quad (1)$$

$$D_{m,0.5} = K\delta \left\{ \frac{\nu_L}{\nu_g} We_\delta^{-1} (1 + m_m/m_g) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

여기서 ν_L은 용탕의 동점도(m^2s^{-1}), m_L은 용탕유량, d_L은 용탕노즐구경, σ는 용탕표면장력(Nm^{-1}), ρ_g는 분사가스밀도, ΔU은 용탕과 분사가스의 상대속도 (ms^{-1}), m_g는 분사가스유량을 각각 나타낸다. 또한 K는 가스분사장치에 따른 상수로서 일반적으로 40~50사이이며, δ는 노즐크기, ν_g는 분사가스의 동점도, We_δ는 Weber수 $= (\rho_g u_g^2 \delta)/\sigma$를 나타내며, u_g는 가스속도를 각각 나타낸다.

식 1과 식 2를 살펴보면, 가스분사에 의해 제조되는 분말의 평균입도는 용탕의 점도, 용탕유량 및 표면장력 등에 비례하고 분사가스의 질량, 분사가스의 속도 및 분사가스 유량에 반비례함을 알 수 있다.

한편 Dunkley는 위와 같은 식을 단순화하기 위해 용탕의 단위 부피당 소모되는 가스량(specific gas consumption, SGC)과 분말의 평균입도 사이에 대한 지금까지의 관계자료를 정리하여 평균입도와 분사가

스 소모량과의 대략적인 관계를 식 3과 같이 나타냈다.[18]

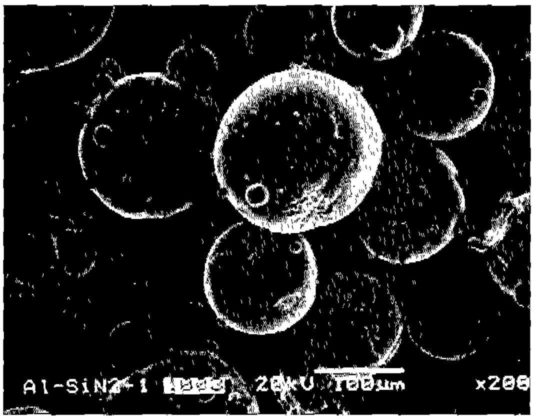
$$D_{m,0.5} \simeq 43/(SGC)^{\frac{1}{2}}, \sigma = \pm 10\mu m \quad (3)$$

여기서 σ는 표준편차를 나타낸다.

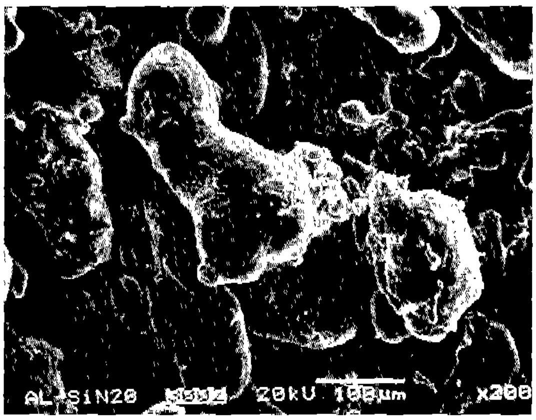
가스 분사법에 의해 제조된 알루미늄 분말의 형상은 분사가스에 함유된 산소의 함량에 따라 크게 변화된다. 그림 3은 분사가스압력 20 bar의 하향식 가스분사장치에서 제조된 분말의 분사가스 종류에 따른 형상을 나타낸 것이다. 그림 3a에서와 같이 순수 질소를 분사가스로 사용한 경우에는 제조된 분말이 구형의 형상을 나타낸 반면, 그림 3b와 같이 압축공기를 분사가스로 사용한 경우에는 불규칙 형상을 나타낸다. 이와 같이 분사가스에 산소가 포함될 경우 분말형상이 불규칙화되는 것은 가스분사 후 용액이 응고될 때 분사가스에 포함된 산소에 의해 용탕의 표면에 산화물이 생성되고 생성된 산화물이 분말의 구형화를 방해하기 때문이다.[13]

따라서 알루미늄계 분말제조 시 분말의 사용용도에 따라서 분사가스의 선택은 매우 중요하다. 예를 들면 성형 및 소결용으로 사용하기 위해서는 성형성 향상을 위해 구형의 분말보다는 불규칙 형상의 분말이 요구되므로 산소를 함유한 분사가스를 사용하여 분말을 제조하는 것이 바람직하다. 그러나 캔닝 후 압축 혹은 HIP공정에 사용될 분말은 충진율이 높은 구형의 분말이 요구되기 때문에 질소 혹은 아르곤등의 불활성 가스를 분사매체로 사용하여야 한다.

그림 4는 분사가스의 종류에 따라 제조된 분말에 함유된 산소함량을 나타낸다.[19] 일반적으로 알루미늄 분말의 평균입도가 작을수록 분말 내의 산소함량은 증가된다. 질소가스를 분사가스로 사용하여 제조된 평균입도가 10 μm인 알루미늄 분말은 약 2,000 ppm의 산소가 함유된 반면, 압축공기를 분사가스로 사용한 경우에는 약 5,800 ppm으로 질소를 사용한 경우보다 산소함량이 2배 이상 크게 증가됨을 알 수 있다. 한편 제조된 분말에 있어서 산화층의 두께도 질소분사인 경우 2~5 nm 범위인 반면, 압축공기를 사용한 경우에 4~10 nm범위로 그림 4에 나타난 산소함량의 증가와 함께 분말 표면의 산화층의 두께도 크게 증가함을 알 수 있다(그림 5).[19] 이와 같이 분말 제조 시 생성된 표면 산화층은 알루미늄 소결시 소결을 방해하는 가장 큰 원인을 제공하기 때문에 소



(a) Pure N_2



(b) Compressed Air

Fig. 3. SEM micrographs of Al-12wt% Si powder with atomizing gas (a) pure N_2, (b) compressed air.

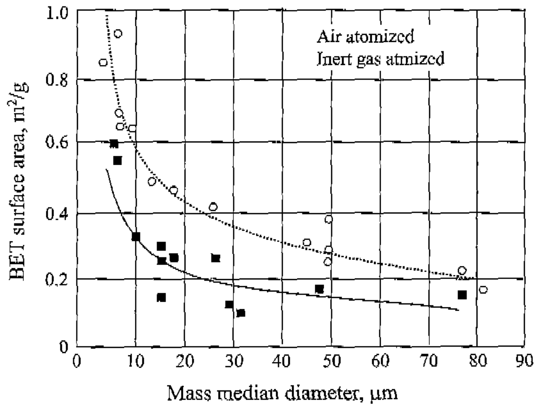


Fig. 4. Oxygen content for aluminium powder.

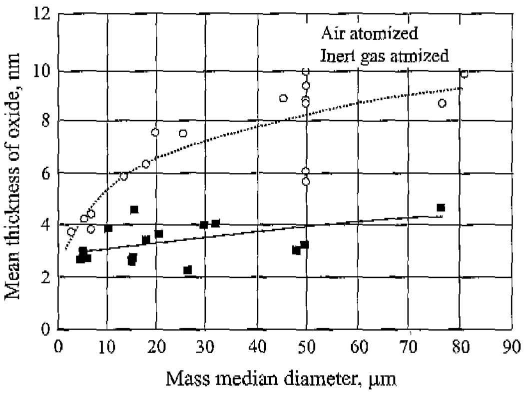


Fig. 5. Mean oxide thickness for aluminium powder.

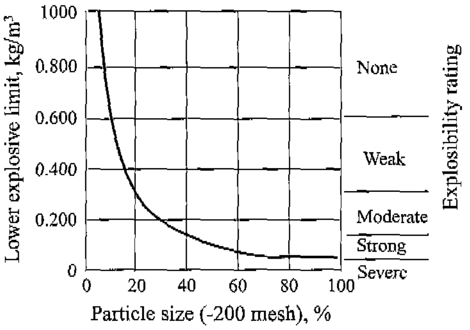


Fig. 6. Effect of aluminum powder particle size on explosibility.

결중 이를 제거하기 위한 새로운 소결공정의 도입이 요구된다.

알루미늄 분말은 마그네슘, 리튬과 함께 산소와 결합시 강한 폭발성을 지니고 있기 때문에 취급상 매우 주의를 요구한다. 그림 6은 알루미늄 분말의 크기가 폭발성에 미치는 영향을 나타낸 것이다.[19] 그림 6에서 분말크기가 200 mesh(75 μm)보다 미세한 분말이 10%이하로 포함된 경우에는 알루미늄 분말의 폭발 위험성이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 200 mesh이하가 40%이상 포함된 경우에 있어서는 매우 강한 폭발 위험성을 가지고 있다는 것을 나타낸다. 따라서 미세한 알루미늄 분말을 취급할 때에는 작업장 내에 분말에 의한 먼지의 발생을 최소화하여야 하며, 작업장 내를 항상 청결하게 유지하도록 하고 장비나 먼저 등에 의해서 발생되는 정전기, 미세한 전기합선과 같은 불꽃의 점화요인을 사전에 제거하여야 한다.

2.3. PM용 합금분말의 종류와 응용

지금까지 알루미늄 분말 부품은 항공기, 우주용 로켓부품 등 극히 제한된 범위에서 응용되어 왔지만, 분말제조기술이 향상되고 분말표면의 산화피막을 제거할 수 있는 새로운 소결공정이 개발됨에 따라 일반 산업용 부품으로서 응용도 점차 확대되고 있다.[3,8] 알루미늄 분말부품의 장점은 마그네슘 등 경량재료들에 비해 강도가 높고, 가스분사공정에 의해 원료분말을 제조할 수 있기 때문에 다른 경량금속분말 제조에 비해 분말제조공정이 비교적 단순하며, 철계분말에 비해 상대적으로 낮은 성형압력인 150 MPa 이하의 압력에서도 성형상대밀도 90% 이상을 얻을 수 있는 점이다. 또한 소결온도가 600°C 부근으로 철계의 소결온도인 1100°C 부근에 비해 소결온도가 매우 낮고, 소결 시 순수질소를 분위기 가스로 사용하며, 합금원소의 적절한 조합에 의해 알루미늄 주조부품보다 우수한 기계적 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다.[20] 반면에 이미 언급한 바와 같이 미세 분말이 일정 농도이상 대기에 부유할 경우 폭발위험성이 항상 존재하고, 분말제조 시 생성된 표면 산화층이 소결 중에 환원이 되지 않아 고밀도 성형이나 액상소결을 하여야 하며, 원료분말의 연성으로 인해 성형금형과의 융착이 쉽게 일어나는 문제점이 있다. 또한 알루미늄 분말부품은 냉간 단조, 정밀주조 등의 다른 공정에 의해 제조된 부품과 경쟁관계를 유지하기 때문에 제조원가 절감을 위한 공정개선이 꾸준히 요구된다.

알루미늄 분말부품용으로 사용되는 원료분말은 용도에 따라 크게 혼합분말(preblended powder)과 합금분말(prealloyed powder)로 구분할 수 있다. 혼합분말은 순수 알루미늄 분말에 구리, 마그네슘 등의 합금원소 분말을 혼합한 것으로 주로 소결부품 제조용으로 사용되고 있다. 반면에 합금분말은 분말자체가 합금화되어 제조되는 것으로 합금화에 의해 분말자체의 강도가 혼합분말에 비해 매우 높기 때문에 성형성이 낮아 주로 냉간 정수압 성형(cold isostatic press, CIP) 후 소결 혹은 압출에 의해 부품을 제조한다.

현재 소결용 혼합분말은 미국의 AMPAL사와 ALCOA사가 2000계열과 6000계열의 분말을 개발하

Table 1. Compositions and properties of preblended aluminum powders.

Alloy \ Company	ALCOA				AMPAL	
	201AB	202AB	601AB	602AB	AMB2712	AMB6711
Composition(wt%)	4.4 Cu 0.8 Si 0.5 Mg	4.0 Cu	0.25 Cu 0.6 Si 1.0 Mg	0.4 Si 0.6 Mg	3.8 Cu 0.75 Si 1.0 Mg	0.25 Cu 0.8 Si 1.0 Mg
UTS(MPa)- Sintered-	200	159	138	121	266	192
Heat Treated(T4)	249	193	172	121	262*	234*
YS(MPa)- Sintered-	166	76	90	59	201	117
Heat Treated(T4)	207	117	114	62		
Elongation(%)- Sintered-	3	10	5	9	2.5	5.1
Heat Treated(T4)	3.5	8	5	7	1.5*	2*

*Solutionized 30 min.at 518℃, aged at 177℃/20 hr

여 제품화하였으며, 개발된 분말의 주요성분 및 기계적 특성은 표 1과 같다.[8,19] 표 1의 혼합분말 중 알루미늄과 구리로 된 혼합분말은 소결시 Al-Cu의 공정온도에서 천이 액상이 생성되며, 생성된 천이 액상을 적절하게 조절함으로서 고밀도의 소결체를 제조할 수 있다.[20] 한편 알루미늄 분말의 표면에 존재하는 Al_2O_3피막은 매우 안정하기 때문에 소결 시 분위기 제어를 이용해 산화피막을 환원하여 제거하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 Mg등의 활성원소를 첨가하여 $MgAl_2O_3$과 같은 spinel상을 형성시켜 치밀한 Al_2O_3가 제거되게 하여 알루미늄의 확산경로를 확보하여주면 소결특성을 크게 향상시킬 수 있다.[21] 이 외 Cu, Si 등의 첨가는 열처리 시 Al 기지상에 미세한 석출상을 형성시켜 소결체의 강도를 향상시키는 역할을 한다.

한편 알루미늄 합금분말은 합금화된 용탕을 가스로 급냉시켜 제조하기 때문에 일반적인 혼합분말이나 주조재에 비해 합금원소의 고용한계를 크게 확대시킬 수 있는 장점이 있다. 표 2는 2원계 알루미늄 합금에서 급냉에 의해 확대되는 합금원소의 고용한계를 나타낸다.[22] 이 표에서 나타난 바와 같이, 특히 기지상을 강화시키는 Si, Fe, Cr, Mn, Ni 등과 같은 합금원소의 고용한도가 급냉에 의해 크게 증가하기 때문에 주조재나 혼합분말을 이용한 소결재에 비해 높은 강도를 얻을 수 있다. 또한 Si등 강화상의 크기 및 조직이 매우 미세하고, 합금 조성의 편차가 적은 장점이 있다.

합금분말은 용도에 따라 크게 내마모용 부품에 응용하기 위한 Al-Si계 합금 분말과 내열성 부품 응용을 위한 Al-Fe계 합금분말로 나눌 수 있지만, 현재 자동차 부품 등에 사용중인 알루미늄 주조품을 대체하기 위해서 Al-Si계 내마모 합금분말에 대한 연구가 집중적으로 수행되고 있다. Al-Si합금분말 소재인 경우 Si 함량을 10~50 wt%까지 합금화가 가능하고 Si 입자 크기도 일반 주조공정에 의해 제조된 경우에 비해 1/10수준인 10 μm 이하로 제어할 수 있기 때문에 내마모성 및 강도가 크게 증가된다. 그림 7은 합금분말을 이용한 공정과 주조 공정에 의해 제조된 Al-Si 합금의 Si함량에 따른 인장강도 및 연신율 변화를 나타낸다.[22] 그림 7에서 알 수 있듯이 인장강도는 Si 함량에 따라 약간의 차이가 있지만 주조재에 비해 최대 2배정도 증가됨을 알 수 있다.

Table 2. Extension of solid solubility in rapidly quenched binary aluminum alloys.

Element	EquilibriumSolubility (a/o)	ExtendedSolubility (a/o)
Cu	2.48	17-18
Mg	16.26	36-40
Zn	66.4	738
Si	1.59	10-16
Fe	0.025	4-6
Cr	0.40	5-6
Mn	0.90	6-9
Ni	0.023	1.2-7.7

표 3은 일본의 Sumitomo Electronic사에서 개발하여 상품화한 대표적인 합금분말의 종류 및 특성을 나타낸다. 합금의 설계기준은 1000 및 2000계열의 알루미늄 합금에 내열 혹은 내마모성을 향상시키기 위

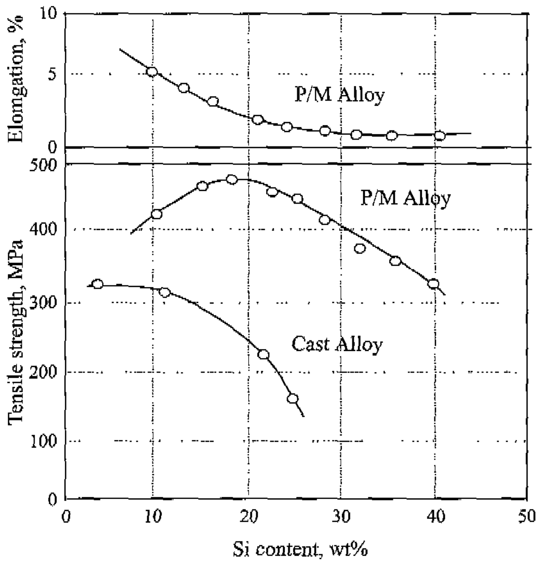


Fig. 7. Comparison of PM and cast Al-Si alloy properties.

해 Si, Fe, Ni 등의 원소를 첨가하였으며, 분말부품 제조공정은 가스 분사법에 의해 제조된 합금분말을 압출 혹은 단조 공정에 의해 소결과 고밀도화를 한다. 표 3에서의 Al-40 wt%Si합금(#140)은 기능재료인 전자 패키징용 heat sink 소재로 응용하기 위해서 최근에 개발된 소재이다.

알루미늄 혼합분말의 응용 대상은 이미 언급된 바와 같이 주로 자동차 부품용 원소재이다. 최근 미국의 GM사에서는 자동차 부품인 cam cap을 표 1의 혼합분말인 201AB 알루미늄 분말을 적용하여 처음으로 개발, 자동차에 적용하기 시작하였다. 그림 8은 GM사에서 개발하여 적용 중인 cam cap 알루미늄 분말부품을 나타낸다. 이외 소결부품으로 mirror mount, suspension 부품, sprocket 부품 등도 개발, 적용하기 위한 연구가 미국, 일본 등의 자동차 회사를 중심으로 연구가 수행되고 있다. 한편 합금분말의 응용은 Sumitomo Electronic사를 중심으로 일본에서

Table 3. Compositions and properties of prealloyed aluminum powders.

		#100Serics		#200Series			
Material		#102	#140	#203	#205	#209	#217
Process		extrusion/ forging	extrusion/ forging	extrusion/ forging	forging	extrusion/ forging	extrusion/ forging
Thermal treatment		T6	-	T6	-	-	T6
Chemical composition (mass%)	Si	25	40	20	10	17	17
	Fe	-	-	-	5	5	5
	Ni	-	-	7.5	6	-	-
	Cu	3	-	2.5	3.5	3.5	3.5
	Mg	1	-	1	1	1	1
	Mn	0.5	-	0.3	0.5	0.5	0.5
	Others	-	-	-	2Cr. 1Mo, 0.7Zr	Mixing3Al_2O_3 and 0.5Graphite	-
	Al	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.
Density(g/cm^3)		2.66	2.50	2.84	3.10	2.86	2.83
Elastic Modulus(GPa)		92	103	98	113	99	93
Thermal expansion coefficient (10^{-6}/℃)[R.T.~150℃]		16	14	16	16	16	16
Electric conductivity(%IACS)		22	30	21	15	-	21
Rockwell hardness(HRB)		85	68	95	100	77	90
Tensile strength (MPa) [Elongation](%)	R. T.	490[1.8]	274[0.6]	480[1.0]	519[1.0]	402[1.5]	451[1.5]
	100℃	451	235	431	-	-	441
	150℃	402	216	402	519[1.0]	343[2.0]	412
	200℃	255	196	255	-	245	255
	300℃	108	98	127	-	137	137

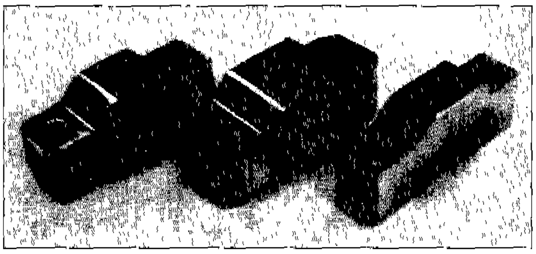


Fig. 8. Aluminum cam caps in production for the GM northstar engine.

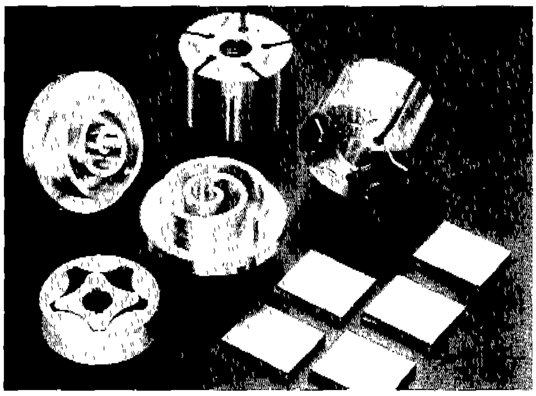


Fig. 9. Aluminum PM parts for automotive application.

활발하게 개발하여 적용되고 있으며 Al-Si계 합금분말을 이용하여 내마모와 고강도가 동시에 요구되는 로타, 베인 등의 콤프레샤 부품, 오일펌프 부품, 열특성의 제어가 요구되는 전자분야의 heat sink소재 등에 적용하고 있다(그림 9).

3. 알루미늄 플레이크 분말의 제조 및 응용

3.1. 알루미늄 플레이크 분말/페이스트의 종류 및 특성

일반적으로 알루미늄 안료는 특성에 따라 leafing형과 non-leafing형으로 구분되며, 안료의 형태에 따라 leafing형 분말, leafing형 페이스트, non-leafing형 분말, non-leafing형 페이스트로 세분할 수 있다. 또한, 알루미늄 플레이크의 입도에 따라 크기별로도 구분할 수 있다.[5] 알루미늄 플레이크분말/페이스트 제조업체는 용도에 따라서 세분하여 수십 내지 수백 가지의 분말을 생산하고 있어서 표준화된 분류를 하기가 어렵다. 대략적으로 분류된 알루미늄 플레이크 분말과 페이스트의 ASTM D962 규격이 표 4에 제시되어 있다. 안료로 사용되는 분말은 대개 325 mesh 채를 통과한 것을 많이 사용되고 있다.

가) leafing형 알루미늄 플레이크

그림 10에 leafing형과 non-leafing형 알루미늄 분말이 페인팅 후 분포 상태를 제시하였다. leafing type의 분말은 알루미늄 플레이크 분말에 stearic acid(고급 포화지방산)가 코팅된 것으로 페인팅시 용매와의 표면장력이 커서 표면으로 알루미늄 플레이크 분말들이 떠올라서 일렬로 정렬되는 분말이다.

Table 4. Aluminum pigment specifications(ASTM D962).

Spec. \ Type	Leafing		Nonleafing	
	Type 1(powder)	Type 2(Paste)	Type 3(Powder)	Type 3(Paste)
Nonvolatile matter at 105-110°C, minimum percentage	99	65	99	65
Easily extracted fatty and oily matter (polishing lubricant), maximum percentage	4.0	3.0	4.0	3.0
Total impurities other than fatty and oily matter, maximum percentage	1.0	0.7	1.0	1.25
Coarse particles, maximum percentage				
Class A-total residue retained on a 325(44μm) sieve	0.1	0.1	1.5	0.1
Class B-total residue retained on a 325(44μm) sieve	1.5	1.0	6.0	1.0
Class C-total residue retained on a 100(149μm)sieve	0.5	0.5	0.5	0.5
325(44μm) sieve	20.0	15.0	20.0	11.0
Leafing, minimum percentage				
Class A	50	55	Absent	Absent
Class B	50	50	Absent	Absent
Class C	50	50	Absent	Absent

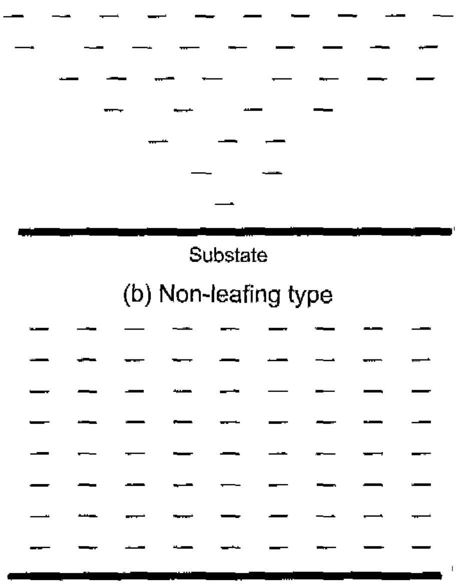


Fig. 10. Types of aluminum flake for pigment application.

leafing형 알루미늄 플레이크 분말은 밀링시 stearic acid와 같은 장사슬 포화지방산을 첨가제로 하여 제조된다. 첨가된 지방산의 카복실 그룹(carboxyl group)이 알루미늄 입자 표면을 향하여 방향성을 가지면서 흡착하게 된다. 이와 같은 배열 때문에 알루미늄 플레이크 표면은 소유성(疏油性, oleophobic) 및 소수성(疏水性, hydrophobic)을 갖게 되어 안료의 성분인 탄화수소계 용매에 젖지(wetting)않으며, 따라서 알루미늄 플레이크 분말을 코팅하고 있는 스테아린산의 단분자층과 용매사이에 계면 장력이 높아서 알루미늄 플레이크 분말은 용매 표면에 뜨게 된다.

leafing 안료는 수지(oleoresinous, alkyd, epoxy, easter 등)와 배합하여 페인팅하면 페인팅 내부에서 용매가 증발하면서 와동(渦動, vortex) 작용을 일으킨다. 용매 휘발로 야기된 수직 대류 운동으로 인하여 플레이크 분말은 페인팅층 표면까지 이동하며, 이때 수지와 플레이크 분말사이의 계면장력이 높으므로 페인팅층 상부 표면에 플레이크 분말이 떠 있게 된다. 용매가 계속 휘발함에 따라 페인팅 층의 점성이 증가하면 필림 표면에 도달하지 못한 알루미늄 플레이크는 움직일 수 없게 된다. 이로 인하여 그림 10(a)와 같은 형태로 페인팅 층내에 알루미늄 플레이크가 분포하게 된다.

이러한 leafing 형 알루미늄 안료를 코팅함으로서 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다. 코팅층 표면의 알루미늄 플레이크 분말들이 수분이나 부식성 가스의 침투의 보호막 역할을 하며 모재까지 침투가스가 도달하는데 시간이 걸리게 된다. 자외선은 화학적으로 코팅 수지를 손상시키고, 적외선 및 가시광선은 코팅 층의 팽창 및 수축을 반복시키므로 인하여 물리적 특성을 손상시킨다.[23] 그러나 유기 안료와 달리 알루미늄 안료는 가시광선뿐만 아니라 적외선, 자외선의 60% 이상을 반사시키기 때문에 코팅 층뿐만 아니라 모재의 내구성을 향상시키게 된다. 또한, 알루미늄 플레이크 표면의 산화물과 지방산 층이 절연체 역할을 하므로 알루미늄 안료로 코팅된 모재의 열 및 전기전도도가 낮아지게 된다. 이러한 특성 때문에 다리난간, 탱크로리, 라디에이터 등에 사용되는 페인트의 원료로 사용되고 있으며 톤당 가격은 약 500~900만원 정도이다. 이러함 leafing형 알루미늄 분말과 페이스트는 상당히 국산화가 되어 있으나 일부 수입되어 사용되고 있다.

나) Non-leafing형 알루미늄 플레이크

Non-leafing의 알루미늄 분말은 플레이크 분말에 oleic acid(장사슬 불포화 지방산)가 코팅된 것으로 페인팅시 용매와의 계면장력이 작아서 페인팅시 내부까지 균일하게 분산되는 형태이다. Non-leafing형 알루미늄 플레이크 분말은 밀링시 oleic acid와 같은 장사슬 불포화지방산을 첨가하여 제조된다. 용매와 접한 플레이크 분말표면의 oleic acid의 탄화수소 사슬에 의하여 탄화 수소계 용매와 쉽게 젖게 되어 표면에 방향성을 갖는 배열이 일어나지 않는다.

Non-leafing형 안료와 색깔을 발현하는 첨가제와 같이 혼합하여 페인트를 만들어도 색상이 잘 발현되면서 적절한 외관도 나타나므로 자동차용 상도 도료로 많이 사용되고 있다. 제조된 알루미늄 안료는 대기 중에 노출되면 페이스트에서 용매가 증발하여 조성이 변하고 장기간 공기와 접촉하면 플레이크 표면의 첨가제가 떨어져 나와 non-leafing성이 감소하여 특성을 저하시킨다. 또한, 보관중인 용기중 수분 함량이 0.15% 이상이면 수소가스가 발생하여 팽창 압력이 생겨 심한 경우 용기가 파손되기도 한다. 따라서 알루미늄 플레이크 분말이나 페이스트내의 수분 함량을 0.1% 이하로 엄격히 제한하고 있다.

Non-leafing의 알루미늄 분말/페이스트는 차량용 페인트, 선박하저 페인팅용의 원료로 주로 사용되고 있으며 grade에 따라서 톤당 1,700만원 내지 4000만원 이상으로 고가이며 대부분 수입에 의존하고 있다.

3.2. 알루미늄 플레이크 분말/페이스트의 제조 공정

알루미늄 플레이크 분말의 제조 방법으로는 수분사나 가스 분사된 알루미늄 분말을 스템프 밀링에 의한 건식 분쇄방법, 건식 볼밀링, 습식 볼밀링, 습식 attrition 밀링법, 습식 진동밀링법 등이 있다.[4,5] 스템프밀링에 의한 건식 분쇄방법은 고전적인 방법으로 해머에 의하여 분쇄하면서 풍력으로 미분체를 연속적으로 반송시키면서 분급에 의하여 원하는 입도의 분말을 얻어내는 방법으로, 대기 중에서 작업하므로 발화 및 폭파위험이 높아서 많이 사용하지 않는다.[5] 수평식 볼밀링법에서는 attrition 밀링법, 습식 진동밀링법에 비하여 볼의 충돌에너지가 작은 관계로 밀링시간이 장시간 소요되는 단점이 있지만, 제조 분말의 균일성이 우수하고 대량생산에 적합한 장점을 가지고 있기 때문에 현재 상용 공정으로 널리 활용되고 있다. 그 중 건식 볼밀링법은 불활성 반송 가스를 흘려주면서 회전 용기내의 볼에 의하여 분쇄된 분말을 용기 밖으로 배출한 후 분말을 분급하여 얻는 방식으로, 산소관리를 적절히 하면 폭파 위험성이 적다. 그러나, 실제 알루미늄 플레이크 제조공장에서 대형 화재가 종종 발생하여 공장이 전소되는 경우가 많이 발생한다.

습식 볼밀링법은 주로 알루미늄 안료업체에서 주로 행하여지며 원료, 강구, 분쇄조제, 유기용제를 장입하여 분쇄후 분쇄물에서 고액 분리를 하여 금속 분말이 60~85%인 페이스트를 얻는다. 얻어진 페이스트에서 유기용매를 완전히 제거하면 건조된 분말을 얻을 수도 있다. 습식 볼밀링법은 유기용매속에서 분쇄하고 지방산이 분말 표면에 피복 흡착되어 산화를 방지하므로 도료용 분말 제조업체에서 많이 사용되고 있다. 그림 11에 습식 밀링에 의한 알루미늄 플레이크분말 및 페이스트 생산 공정도를 제시하였다.[23]

1) 사용원료(알루미늄, 첨가제, 용매)

볼밀링의 장입원료로는 용융상태에서 노즐을 통하여 분사된 알루미늄 분말을 주로 사용하고 있다. 분사된 분말은 구형이므로 비표면적이 매우 낮아서 안료용으로 직접 사용할 수 없고 볼밀링에 의하여 비표면적이 큰 플레이크 형상으로 가공되어야 적은 양으로 많은 면적을 도포할 수 있게 된다. 분사된 분말은 보통 순도가 99% 이상을 갖고 있으며 플레이크 분말이 적용되는 분야에 따라서 다른 순도를 사용할 수 있다. 최근에는 자원 재활용 관점에서 알루미늄 박판 압연시 발생하는 호일 스크랩을 원료로 플레이

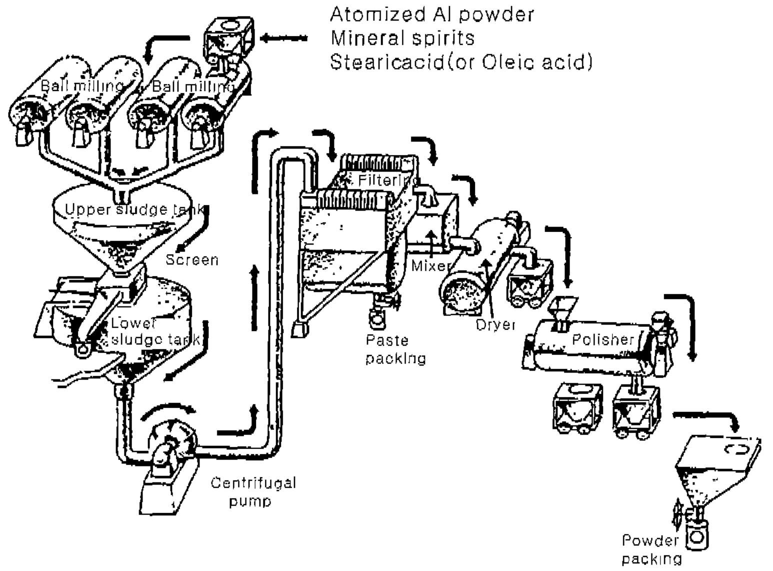


Fig. 11. Manufacturing process for Al flake powder and paste.

크 분말을 제조하는 연구가 진행되었다. 알루미늄 호일은 두께가 6 μm 내지 15 μm으로 얇고 알루미늄의 연성이 있으므로 볼밀링에 의하여 쉽게 플레이크 분말화가 가능하다.

볼밀링시 첨가제에 따라 leafing성과 non-leafing성이 결정되며 첨가제는 기계적 충격으로 인한 알루미늄 분말간의 열적 접착(heat welding)을 방지하며 알루미늄 표면에 밝은 금속 광택을 부여하는 역할을 하게 된다. leafing성이 요구되는 플레이크 분말이나 페이스트를 제조할 때는 stearic acid와 같은 장사슬 포화 지방산을 사용하며 non-leafing성이 요구되는 경우에는 oleic acid와 같은 장사슬불포화 지방산을 사용하며 첨가량은 플레이크 분말을 충분히 코팅시킬 정도의 양이면 충분하다.

건식 밀링시는 용매를 사용하지 않지만, 습식 밀링의 경우에 용매는 첨가제를 용해시키거나 분산시키고 분말의 산화를 방지하며 슬러리의 점도를 조절하는 역할을 한다. 볼밀링시 사용하는 용매는 또한 페인트의 구성성분이 되므로 선정이 중요하다. 일반적으로 페인트 산업에서 널리 사용되는 용매는 탄화수소계, 알코올, 에스테르, 케톤, 글리콜 에테르, 니트로파라핀 등이 있다. 알코올, 에스테르, 케톤과 같은 극성 유기 용매는 알루미늄 표면에 형성된 첨가 코팅제와 반응하여 deleafing 현상을 일으키므로 특히 leafing 페이스트 제조시 높은 표면장력(25 dyne/cm 이상)을 갖는 비극성 용매(미네랄 스피리츠, 크실렌, 톨루엔, 나프타 등과 같은 탄화수소계)를 사용하여야 한다. 이 중 미네랄 스피리츠가 화학적으로 중성이고 방향족과 지방족 탄화수소계이며 높은 표면장력을 가지므로 많이 사용되고 있다.

2) 밀링 공정

용해/분사된 알루미늄을 볼밀링에 의하여 미세하고 비표면적이 높은 금속 광택이 있는 플레이크 분말을 얻기 위한 필수적인 과정이고 가장 중요한 공정이다. 볼사이에 있는 분말이 있는 경우, 볼과 볼사이의 충돌에 의한 분말의 미세 단조에 의한 효과와 볼에 의한 압축과 전단 응력이 분말에 전달되어 분말이 변형되면서 플레이크 분말이 생성되게 된다.[24,25] 볼밀링시 밀링 효율에 미치는 인자로는 밀링자의 회전속도, 볼의 밀도/크기/형상/장입량, 알루미늄 분말 원료의 양, 용매량, 첨가제의 종류 및 양, 밀링자의 재질 및 구조 등이다. 알루미늄 플레이크 분말이 제조되어 산업화된 지 70여년 이상 되었지만 알루미늄 분말의 볼밀링에 의한 플레이크 분말의 제조에 관한 발표 논문은 매우 적다. 대부분의 제조업체에서 기술적 공개를 꺼려하고 또한, 연구자의 연구 결과보다는 생산현장에서 대용량의 밀링장치를 이용하여 많은 실험에 의하여 조건을 정해져 생산되기 때문이며 단순한 기술로 치부되어 체계적인 연구가 어렵다는 데 있는 것 같다.

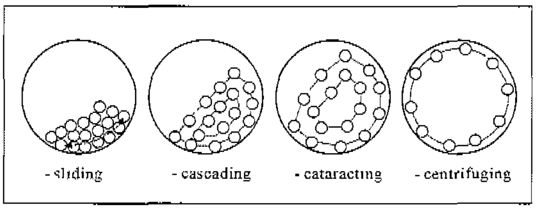


Fig. 12. Modes of ball motions with rotational speed of jar in tumbler ball mill.

그림 12에 제시된 바와 같이 볼 밀링용기의 회전속도가 너무 낮으면 볼들이 밀링 용기의 내벽을 따라 상승하다가 도중에 원심력이 부족하여 도중에 슬라이딩이 일어나 미끄러지고, 적당한 회전 속도에서는 cascading 형태로 운동하게 된다. 조금 더 밀링용기의 회전 속도가 증가하면 cataracting 형태로 운동을 하게 된다. 밀링자의 회전 속도가 더욱 증가하면 원심력이 매우 커져 centrifuging형 운동을 하게 된다. 볼이 슬라이딩이나 centrifuging형 운동을 하면 알루미늄의 분쇄가 거의 발생하지 않으므로 cascading 형이나 cataracting 형태로 운동을 하는 조건에서 볼밀링을 하여야 양호한 플레이크 분말을 얻을 수 있다. 일반적으로 lift bar가 없는 원통형 용기를 사용할 때, 볼이 원심력과 중력의 평형으로 적절히 낙하하도록 하는 밀링자의 임계 속도(rpm)는 $423/D^{0.5}$(D는 밀링자의 내경으로 cm 단위임)으로 계산된다.

그림 13은 본 연구팀이 볼밀링시 lift bar의 수에 따른 볼의 운동을 관찰하여 정리한 결과이다. 내경 157 mm인 내용적 3657 cc인 밀링자내에 lift bar(rib)의 설치수를 달리한 밀링 용기를 제작하였고 직경 16 mm인 스테인레스 볼을 겉보기로 용기의 절반을 채워서 여러 밀링 속도에서 볼의 움직임을 관찰한 결과이다. Lift bar가 없는 경우, 계산된 임계회전속도는 107 rpm이였다. Lift bar의 설치수가 증가할수록

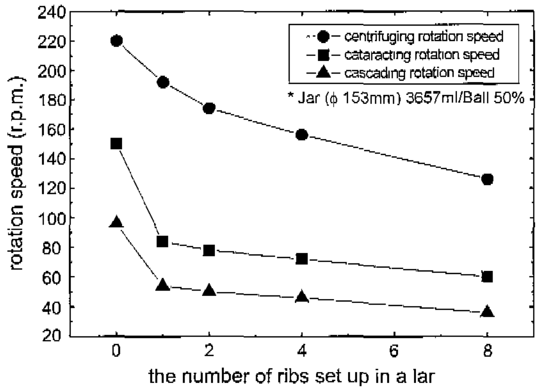


Fig. 13. The behaviours of ball motions with number of lifter bar under the different rotation speeds of jars.

적은 회전속도에서 cascading 형태로 운동하는 것을 알 수 있다. Lift bar가 볼의 슬라이딩 운동을 억제하고 볼을 들어올리는 역할을 하므로 lift bar가 없는 경우보다 적은 밀링의 회전 속도가 적어도 cascading 형태의 운동이 잘 일어난다.

알루미늄 밀링시, 강구가 많이 사용되고 있으며 가격이 저렴하고 밀링후 혼입된 불순물을 자력선별에 의하여 제거할 수 있는 장점이 있다. 장입된 알루미늄 시료의 양이 작을수록 미세한 분말이 얻어지며 장입량이 많으면 조대한 분말이 얻어진다. 한편, 밀링시 온도가 50°C 이상으로 온도가 올라가면 알루미늄 플레이크 분말표면에 코팅된 윤활피막이 파괴되어 알루미늄 페이스트의 특성(leafing성 또는 non-leafing성)을 상실하므로 주의하여야 한다. 또한, 밀링시 산소가 혼입되면 발화 위험성이 있고 첨가제와 반응하므로 안료로서의 특성이 저하하게 된다.

3) 후공정

밀링후 대개 325 메쉬의 체로 채질하여 일정크기 이하의 플레이크가 함유된 용매를 회수한다. 이어서, 여과공정에 의하여 용매량을 줄인 케이크 상태의 페이스트를 얻고, 건조후 알루미늄 페이스트 분말을 얻게 된다.

3.3. 알루미늄 플레이크 분말/페이스트의 응용

알루미늄 플레이크 및 페이스트의 국내 시장규모에 대한 공식적인 자료가 보고된 적은 없다. 국내 관련 업계의 비공식적 자료에 의하면 현재, 년간 경량기포콘크리트용이 약 50억원, 자동차용이 약 15억원, 플라스틱, 가정제품 코팅용, 지붕 코팅용, 다리난간 코팅에 쓰이는 leafing형이 약 400억원, 잉크용이 약 20억원 등으로 추산되고 있다.

한편, 1997년도 기준으로 수입된 양은 약 36억원(약 949톤)의 leafing형 알루미늄 분말, 약 59억원(약 2,179톤)의 non-leafing형 알루미늄 분말, 약 130억원(약 1,089톤)의 알루미늄 페이스트(leafing형+non-leafing형)가 수입되어 총 225억원(4,217톤)이다.

1) 일반 도료용

일반적으로 leafing형 알루미늄 페이스트를 원료로 제조된 페인트를 광택 발현, 방습 등에 필요한 속칭 실버 페인트에 많이 사용되고 있다.[26] 가장 많이 사용되는 분야는 지붕용 코팅(Roof coating)용이다.[5] 비석면계 코팅제에는 조대한 알루미늄 페이스트(ASTM D962 type 2 class C)가 사용되며 페인팅 후 연속적인 금속성 필름을 형성한다. 미세한 알루미늄 플레이크를 사용하면 반점이 출현하므로 좋지 않다. 5%의 석면이 함유된 석면계 코팅제에서는 미세한 알루미늄 플레이크 분말이 들어 있는 페이스트를 사용한다. 지붕에 알루미늄 페이스트가 함유된 페인트를 코팅하면 열을 반사하여 지붕의 수명을 증가시키고 여름철에 건물의 온도를 낮추는 역할을 한다. 철강 표면에 알루미늄이 함유된 페인트를 코팅하면 습기에 대한 저항성이 증가하며 금속성 광택이 발현되므로 외관이 미려해지므로 다리 난간, 가이드 레일, 철탑 등에 널리 사용되고 있다.

2) 차량용 알루미늄 플레이크 분말/페이스트

승용차의 생산시 신차 도장공정은 하도 도장(양이온 또는 음이온 전착도장, 도막 두께 20~30 μm), 중도 도장(아미노 알키드 수지도료), 상도 도장(솔리드 색상 도료인 경우에는 아미노 알키드 수지도료사용, 은분칠의 경우에는 알루미늄 분말이 함유된 열경화성 아크릴 수지 도료 사용, 도막 두께 30~40 μm)의 3단계로 이루어지며 그 위에 의장도장(도막 두께 20~30 μm)을 하고 왁스코팅(도막 두께 약 5 μm 이상)을 하게 된다.[27]

상도층에 알루미늄 분말 페이스트가 함유된 소위 메탈릭 안료를 함유한 실버 페인트로 도장을 하게 된다. 진노란색차, 진검정색차 등과 같은 솔리드색상의 경우에는 보통 알루미늄 플레이크 분말이 들어 있지 않고 그 외의 대부분의 승용차에는 대부분 알루미늄 플레이크 분말이 함유된 페인트로 상도 처리가 되어

Table 5. Properties of aluminum paste for car body.

특성 / Grade	평균입도 (μm)	수면확산면적(cm^2/g)	분말 형상 (SEM)
D사 grade 1	17.2	14,742	flake
S사 grade 2	16.2	4,784	flake
(미지회사) grade 3	20.5	4,926	원판상의 flake
A사 gcade 4	23.8	11,467	flake
E사 grade 5	22.1	10,365	-

(*분류는 페인트 회사의 보안상 임의 표기함)

있다. 상도층의 도장 두께가 보통 30~40 μm이므로 알루미늄 플레이크 분말이 30~40 μm보다 크면 도장층 외부로 일부 플레이크 분말이 튀어 나와 있으면 외관이 좋지 않다. 따라서 일반적으로 차량용 알루미늄 페이스트중 플레이크 분말의 평균 크기는 표 5에 제시된 것과 같이 16 내지 24 μm 사이이며 가급적 입도 분포가 좁은 것이 좋으며 40 μm 보다 큰 플레이크 분말이 잔류하면 페인팅후 외관이 좋지 않다. 한편, 플레이크 분말이 너무 미세하면 페인팅후 광택도가 저하되는 경향이 있다.

표 5에 제시된 바와 같이. 수입되는 차량용 non-leafing형 Al 페이스트중의 함유되어 있는 Al 플레이크의 수면확산면적은 제조 회사별 grade에 따라서 4900~15,000 cm^2/g의 범위 내에서 큰 차이가 있었다. 페인팅 후 광택도는 각 회사에 따라서 큰 차이는 발생하지 않았다. 수입되는 차량용 알루미늄 플레이크 분말의 SEM 조직 사진을 그림 14에 나타내었으며 일반적인 플레이크 형상 또는 원판상의 플레이크 형태를 가지고 있었다.

차량용 알루미늄 플레이크 분말의 크기와 수면확산면적이 어느 수치를 가져야 제일 좋다고 말할 수 없다. 왜냐하면, 각각의 크기에 따라 외관 및 다른 착색원료를 혼합한 후 페인팅하였을 때 차의 색상 및 외관이 달라지므로 설계자의 요구에 따라서, 알루미늄 페이스트의 선정이 달라진다. 실제로 차량용 페인트 회사에서는 여러 회사에서 나온 알루미늄 페이스트를 혼합하기도 하며 어떤 경우는 단독으로 써서 차량 설계자의 요구에 맞는 설계를 하게 된다. 이에 많은 실험에 의하여 원료선정이 되기 때문에 다양한 품종의 알루미늄 페이스트가 제공될수록 차량용 페인트 제조업체는 다양한 페인트를 제조할 수 있다.

3) 경량기포 콘크리트용 발포제[28]

Fig. 14. SEM micrographs of imported aluminum flake powders with different shape: (a)general flake type(D company, grade1), (b)rounded flake type(unknown company, grade3)

A.L.C(Autoclaved Light Weight Concrete)는 Autoclave 안에서 수증기로 수열 반응으로 경화시켜 만들어진 경량 콘크리트이다. A.L.C는 생석회, 시멘트, 규사질 분말을 교반기안에서 플레이크형상을 갖는 알루미늄 플레이크 발포제를 함께 장입하고 교반하여 슬러리 상태로 한 다음, 일정 크기의 형틀에 부어 넣으면 생석회와 시멘트는 알칼리성이므로 알루미늄 플레이크 분말과 반응하여 수소기포를 발생시킴으로 형틀속의 슬러리 부피가 약 2배 정도로 커진다. 내부에는 무수한 미세 공극이 발생하여 발포제의 종류에 따라 약 수십분사이에 수소 기포가 발생하며 이 형틀 속의 슬러리를 그대로 autoclave 내부에 장입하고 수백도의 수증기로 수십 시간 수열반응을 시키면 비중이 약 0.65 정도인 경량 콘크리트가 얻어

Table 6. Properties of aluminum paste for A.L.C.

항목 \ Grade	8N(D사)	25N(D사)	20N(D사)	P1(러시아)	PA1(러시아)	P2(러시아)
1. 외관	flake	flake	flake	flake	flake	flake
2. 입도 분포						
+100 Mesh(%)	TR	TR	TR	평균	평균	평균
-100+170 Mesh(%)	0 ~ 1.0	0 ~ 5.0	0 ~ 10.0	입도	입도	입도
-170+350 Mesh(%)	20.0 ~ 35.0	25.0 ~ 40.0	25.0 ~ 55.0	(143 μm)	(51 μm)	(28 μm)
-350 Mesh(%)	65.0 ~ 80.0	55.0 ~ 75.0	35.0 ~ 65.0			
3. 비표면적(m^2/g)	3.6 ~ 4.2	3.1 ~ 3.7	1.6 ~ 2.0	0.354	3.902	5.528
4.수면확산면적(cm^2/g)	9,000 ~ 10,000	8,000 ~ 9,200	4,500 ~ 5,100	-	-	-

(*분류는 A.L.C 제조사의 보안상 임의 표기함)

진다.

이러한 용도로 사용하려면 알루미늄 플레이크 분말은 가급적 입도 범위가 적어야하며, 경량 기포 콘크리트 제조업자의 요구에 맞는 시간대내에서 발포돼야 하는 특성을 만족해야만 한다. 현재 A.L.C 공장은 국내의 경우 약 5개의 업체가 있으며 일본의 경우는 약 100여개의 업체가 있다. A.L.C는 내부에 무수한 공극이 있어 경량이고 단열, 흡음, 내화성 등이 우수하여 최신의 현대적 건축자재로써 다량 사용되고 있다. 일본 D사 및 러시아에서 생산되는 A.L.C용 알루미늄 분말 규격의 예를 표 6에 제시하였는데 비표면적이 1.6~4.2 m^2/g, 입경 90 μm 이하의 알루미늄 분말이 A.L.C.용으로 사용됨을 알 수 있으며 A.L.C 제조시 수소 방출시간의 조절이 잘 되는 분말의 제조가 필요하다.

4) 지문채취용[28,29)]

범죄자의 지문을 채취하는 용도로 알루미늄 플레이크 분말이 개발되어 알루미늄 플레이크 분말 및 부러쉬 등이 지문채취 케이스에 담겨져 국내에서도 경찰서마다 비치되어 범죄자 색출에 사용되고 있다. 범죄자의 지문이 평편한 표면위에 있을 때 다람쥐 털이나 유리섬유로 된 붓으로 알루미늄 플레이크 분말을 지문 자국 위에 바른 후, 다시 새로운 붓으로 가볍게 쓸면, 플레이크 분말이 지문 자국에 붙어서 지문의 형상을 보여주게 된다. 이를 사진을 촬영하거나 채취된 형태를 보관을 하기 위하여 깨끗한 아세테이트 판을 그 위에 대고 마운팅하여 지문이 보관되게 된다. 실험실에서 유리판 위에 지문을 찍고 그 위에 붓으로 플레이크 분말을 칠한 후 깨끗한 붓으로 살며시 쓸어 내리면 플레이크 분말이 지문 위에 묻어서 선명한 지문 형태를 보여 주게 되고, 광학현미경으로 촬영하면 지문의 형상을 고배율로 자세히 볼 수 있다.

수분사나 가스분사로 제조된 알루미늄 분말을 첨가제인 스테아린산과 같이 볼밀링하여 지문채취용 플레이크 분말을 제조하게 된다. 플레이크 분말의 평균 크기가 50 μm 정도이면 지문 채취된 자국이 밝게 보이고 선명하나, 지문의 각 선들 사이에 플레이크 분말이 겹쳐서 놓이는 경우도 발생한다. 평균입도가 약 3 μm 정도로 작으면 지문이 어두운 회색으로 보인다. 따라서, 평균분말 입자 크기가 약 10 μm이고 스테아린산이 10%일 때 지문이 제일 선명한 것으로

Fig. 15. Fingerprint detection by aluminum flake powder.

일부 보고되고 있으나, 각 제조사마다 적정 제조 공법에 따라, 첨가제의 종류나 양이 다를 수 있다. 그림 15는 현재 상용되는 알루미늄 플레이크 분말을 이용하여 채취된 지문의 형상을 보여준다. 사용된 알루미늄 플레이크 분말은 비표면적이 6.70 m^2/g으로 매우 높은 비면적을 보여주었고 플레이크화가 매우 잘 되어 있어서 지문채취가 용이하다.

5) 플라스틱 및 수지용 첨가제

알루미늄 플레이크 분말은 고무나 플라시틱 병에 첨가되어 방사(radiation)이나 기체확산을 방지하는데 사용되고 있다. 보턴이나 화장품 뚜껑용 플라스틱 성형품에 첨가되기도 하며 전기, 열전도도성이 필요한 분야에도 사용된다. 각종 가전 제품 등에 은빛 색상을 내기 위하여 프라스틱위에 코팅하는 경우도 있다. 메틸부탈레이트를 함유하는 알루미늄 페이스트가 PVC(Polyvinyl chloride)에 첨가되어 압출하면 빛이나 열을 반사시키는 알루미늄 플레이크 분말이 배열된 PVC를 제조할 수 있다. 염화비닐, 폴리에칠렌 성형용 수지에 알루미늄 플레이크가 첨가되면 수축방지효과 및 강도향상의 효과가 있어서 간이금형 등에도 이용할 수 있다. 폴리에테르로 된 파라볼릭 안테나의 제조시 알루미늄 안료페인트로 표면을 코팅하거나 내부를 코팅하면 빛을 반사하는 역할을 하게 된다. 알루미늄 플레이크 분말은 포장재에도 첨가되어 은빛 색상을 갖는 미려한 기능을 하기도 한다.

6) 기타[1)]

- 내열벽돌: 알루미늄 플레이크 분말이 첨가되면 마그네시아 벽돌의 강도는 증가한다. 벽돌을 소성하는 온도에서 알루미늄 입자들은 산화물로 변하고 벽돌 속에 산화알루미늄의 그리드(grid)를 형성하게 된다. 한편, 탄소 함유계 내화연에서 알루미늄 분말을 첨가하면 탄소보다 알루미늄 분말의 먼저 산화되므로 탄소의 산화방지 효과가 있고 Al_4C_3의 형성으로 강도향상의 효과가 있다.

- 주형이형제: 알루미늄 플레이크 분말은 알루미나/물유리등과 혼합하여 주형이형제로도 사용되고 있다.

- 화약 및 로케트 추진용: 알루미늄이 산화되기 쉬운 성질과 산화에너지가 큰 성질을 이용한 것으로 폭탄, 조명탄, 불꽃놀이의 원료 등에 사용된다. 최근에는 위력증강을 위하여 예감제, 연소제 등으로 이용되고 있으며 폭약도 첨가되고 있다. 로케트나 미사일의 고체 추진체용으로, 산화제 + 점결제 + 알루미늄 분말을 혼합하여 몰드에 주입하여 고화시킨다. 고체 추진제는 액체 추진체보다 추진력이 매우 높아, 위로 쏘아 올리는 제1단 로켓트나 보조 부스터로 사용된다. 스페이스 셔틀 의 출발시 약 190톤의 알루미늄 분말이 사용되고 있다.

- 촉매: 올레핀계 수지합성시 촉매로서 사용되며, 수소발생시 환원제로도 이용되고 있다.

- 잉크용: 잉크 속에 알루미늄 플레이크 분말이 들어가면 적은 양으로 인쇄후 은빛 색상을 발현할 수 있는 장점이 있다. 은빛 색상의 인쇄가 필요한 오프셋, 활자면 인쇄 등에 사용되며 잉크 내에 10내지 30%의 알루미늄 플레이크 분말이 함유된다. 알루미늄의 입자 크기가 크면 인쇄후 밝기는 증가하나 인쇄된 선이 가는 경우가 많으므로 잉크용으로 사용되는 알루미늄 플레이크의 평균입자 크기는 약 7 μm 정도이다.

최근 국내에서 아이디어 상품의 히트작으로, 알루미늄 플레이크 분말이 들어간 볼펜이 일본에서 수입되어 초등학생들이 많이 사용하고 있다. 이 볼펜에는 각종 색깔을 내는 안료와 알루미늄 플레이크 분말이 동시에 잉크 속에 함유되어 있고 필기후 알루미늄 플레이크 분말이 글자표면을 덮어서 은빛 글씨를 유지한다. 지우개로 글자를 지우면 알루미늄 플레이크 분말은 없어지고 밑에 원래의 잉크 색으로 된 글짜가 남는다.

5. 결 론

1900년대 초부터 개발되기 시작한 알루미늄 분말은 현재 민수 및 군수분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 특히 환경 및 에너지 문제로 경량부품에 대한 산업계의 수요가 증가되면서 1980년대부터 미국, 일본 등을 중심으로 알루미늄 분말 및 그 부품에 대한 연구가 집중적으로 수행되어 최근 일부 부품에 대한 실용화가 가시화 되고 있다. 알루미늄 분말로 제조된 부품은 분말야금고유의 장점인 저가격, 정밀부품의 제조가 가능하며, 혼합분말이나 합금분말을 사용하여 합금설계를 비교적 자유롭게 할 수 있기 때문에 고강도 및 내마모특성을 크게 향상 시킬 수 있다. 따라서 기존 주조공정에 의해 제조된 부품이 가진 품질 및 특성의 한계성을 극복할 수 있기 때문에 기존의 주철부품을 상당부분 대체할 수 있을 것으로

예상된다.

현재, 알루미늄 플레이크 및 페이스트 제조기술은 국내외적으로 기술이 완성되어 성숙된 시장을 형성하고 있다. 그러나, 플레이크 제조시 관련 인자의 영향 및 페이스트 제조기술이 체계적인 연구에 의하여 기술이 정립되어 있지 않고 있다. 학계에서 이러한 기술을 연구하여 정리하는 것이 필요하다. 그리고, 응용분야에 적합한 최적의 알루미늄 플레이크 분말 및 페이스트 제조 공정의 최적화 연구가 필요하며 경량기포 콘크리트용 발포제의 경우, 알루미늄 플레이크 분말의 첨가제 제어 및 첨가제 코팅제어 기술을 이용하여 발포시간을 조절하는 기술이 국내에서 개발되는 것이 필요하다. 한편, 알루미늄 플레이크 분말이나 페이스트를 이용한 아이디어 상품개발이 확대되어야 하며 특히, 전자파 차폐용 등 전자적 분야의 응용 제품 개발이 향후 전개될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 "차세대소재성형기술개발사업단"의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. K. L. Cashdollar : Flammability of Metals and Other Elemental Dust Clouds, Proc. Safety Progress, **13** (1994) 1139.
2. E. J. Hall : Process for Disintegrating Metal, U.S. Patent 1, 659, 291 (1928).
3. F. V. Beaumont : The Inter. J. Powder Metall., **36** (2000) 40.
4. T. Yoke, K. Fuqua, M. Miyanaga and T. Watuji: J. Jpn. Inst. Light Met. **45** (1995) 162.
5. B. V. Hoose: Metals Handbook, ASM, Metals Park, **7** (1984) 593.
6. M. I. Fauth: Metals Handbook, ASM, Metals Park, **7** (1984) 597.
7. K. Couchman and C. Cousino : SAE Paper No. 940428 (1994).
8. C. Lall and W. Heath : The Inter. J. Powder Metall., **36** (2000) 45.
9. P. D. Liddiard : Powder Metall., **27** (1984) 193.
10. Al Wrigleg; PM Aluminum & Light Alloy for Automotive Application Proc. Michigan (1998) 135.
11. A. J. Yule and J. J. Dunkley; Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition, Clarendon Press, Oxford (1994) 143.
12. A. Lawly : Atomization, MPIF, NJ (1992) 21.
13. J. E. Williams : Metals Handbook, ASM, Metals Park, **7** (1984) 125.
14. A. Unal : Met. Trans. A, **20** (1999) 833.
15. A. J. Yule and J. J. Dunkley : Atomization of Melts. for Powder Production and Spray Deposition, Clarendon press, Oxford (1994) 167.
16. L. D. Wigg : J. the Insitite of Fuel, **27** (1964) 500.
17. H. Lubanska : Journal of Metals, **22** (1970) 45.
18. J. J. Dunkley : Powder Metall., **32** (1989) 96.
19. P. W. Lee : Metals Handbook, ASM, Metals Park **7** (1990) 155.
20. 김대건, 민경호, 장시영, 김영도 : 분말야금학회지, **9** (2002) 116.
21. G. B. Schaffer, T. B. Sercombe and R. N. Lumley : Mater. Chem. Phys., **67** (2001) 85.
22. W. H. Hunt : The Inter. J. Powder. Metall., **36** (2002) 51.
23. Tonysmith: Polym. Paints Color J., **174** (1984) 678.
24. D. W. Lee, B. K. Kim, G. G. Lee and G. H. Ha: J. of Korea Powder Metall. Inst. **3** (1996) 159.
25. G. G. Lee, D. W. Lee, G. H. Ha and B. K. Kim: J. of the Jpn. Soc. of Powder and Powder Metall. **43** (1996) 1253.
26. D. King: Polymers Paints Colour Journal, **183** (1993) 1.
27. 한국 도장기술협회 편집부: 월간 도장기술, **10** (1997) 35.
28. J. D. James and B. Wilshire: Aluminum Industry **11** (1992) 32.
29. J. D. James, C. A. Pounds and B. Wilshire: Powder Metall. **34** (1991) 39.