

실리콘 및 세라믹 강화상이 첨가된 알루미늄 분말부품의 동향

글 _ 김용진, 양상선, 이재욱, 박용호*, 김지순**
한국기계연구원 부설 재료연구소, *부산대학교, **울산대학교

1. 서론

녹색소재산업에 부합되는 경량소재에 대한 관심이 증대되고 있는 시점에서 알루미늄 분말야금부품은 철계 분말부품에 비해 가볍고 알루미늄 주조부품에 비해 우수한 기계적 물성을 갖고 있어 주목을 받고 있다. 상대적으로 비싼 가격이 이 부품의 응용을 제약하는 장벽이었으나 최근의 환경과 에너지 문제에 대한 세계적인 관심은 이를 극복할 수 있는 계기를 제공하고 있다. 선진국은 이미 일본을 중심으로 1990년대부터 알루미늄 분말부품에 대한 기술개발을 진행하였고 현재는 다양한 상용 부품을 판매하고 있으며 조만간 그 판매량이 크게 증가할 것으로 예상된다. 이 글에서는 실리콘 및 세라믹강화상을 함유한 알루미늄 분말야금부품 관련 기술의 국내외 동향을 모두 소개하지만 현재까지 세라믹 강화상을 함유한 분말야금 부품의 국내 기술개발이 미약하므로 실리콘과 같은 제2상을 함유한 분말야금 부품의 국외 동향을 주로 소개한다. 각종 발표자료를 통해 알려진 국내외 산업체의 기술개발 동향과 상용화 사례를 소개하고 상용화의 가장 큰 걸림돌인 알루미늄 분말의 소결성과 원소재 동향에 대해 소개하고자 한다. 본 글은 필자가 최근에 한국분말야금학회지에 투고했던 내용을 기반으로 하여 발췌, 수정 및 보완한 것임을 밝혀둔다.

2. 기술개발 동향

2.1. 세계 기술개발 동향

1990년대 이후부터 세계적으로 환경오염과 에너지고갈에 대한 우려가 심각하게 대두되면서 경량금속에 대한 관심이 높아지게 되었고 이에 본격적으로 자동차를 비롯한 기계부품 산업에서 무거운 철강소재 대신 알루미늄 등의 경량금속을 사용하고자 하는 시도가 이루어 졌다. 자동차부품 중 알루미늄이 차지하는 비율(질량비)은 1990년대부터 급격히 증가하여 2000년대 초반 미국, 독일의 경우 7%, 일본의 경우 30%에 이르렀으며 국내 자동차의 경우 5% 정도를 나타내고 있다¹⁾.

분말야금 부품이 자동차용 부품에서 차지하는 영역은 마찰 또는 마모와 관련된 부분이다. 알루미늄이 자동차에 적용되기 시작한 초기에는 제조공정이 단순해서 원재료 가격이 높지 않은 압연재와 주조재 등이 주로 차체, 샤프트 등에 활용되었다²⁾. 하지만 정작 자동차에서 중량을 많이 차지하는 부분은 엔진, 트랜스미션, 브레이크 등과 같이 고속의 병진, 회전운동을 반복하는 구동부품들이다. 이들은 여타 부품들과 달리 높은 강도와 내마모성을 요구하고 형상이 복잡한 특징이 있는데, 압연재와 주조재는 철강에 비해 강도와 내마모성이 떨어지고 복잡한 형상으로 만들기 위해서는 다수의 가공(Machining)을 거쳐야 하므로 가격이 상승하는 문제점을 안고 있다. 따라서 원재료 가격은 높지만 다수의 가공 없이 복잡한 형상을 만들 수 있고 넓은 조성의 합금화와 복합화를 통해 높은 강도와 우수한 내마모성을 가질 수 있는 분말야금 소재가 철강을 대체할 소재로 거론되게 되었다. 알루미늄 분

말야금 부품이 처음으로 자동차에 적용된 것은, 미국의 Metal Powder Product(MPP) 社가 제조한 Camshaft Bearing Cap이 GM의 Northstar 엔진에 탑재된 1993년이다⁴⁾. 이후 디젤엔진 피스톤 (Toyota), 실린더 라이너 (Honda), 구동축 (GM 트럭), 브레이크 부품 (GM, Chrysler) 등이 알루미늄 분말야금 소재로 제작되었다⁵⁾. MPP 社는 2006년 길이 17cm의 알루미늄 분말소재 Cam Cap을 상용화 하였다. 이러한 부품들은 높은 강도와 우수한 내마모성을 필요로 하는데 알루미늄 분말소재들은 합금화와 복합화를 통해 이를 해결하고 있다. 대표적인 예를 들면, 합금화를 통해 강도와 내마모성을 극대화한 과공정 알루미늄-실리콘(Al-Si) 합금분말소재, 복합화를 통해 내마모성을 극대화한 알루미늄-탄화실리콘(Al-SiC) 복합분말소재가 있다⁶⁾. 두 소재 모두 1990년대부터 본격적으로 연구되기 시작하였고 분말야금공정을 통해서만 제조될 수 있다는 특징을 갖는다.

과공정 Al-Si 합금은 주조공정으로 제조될 경우 고용한계를 넘어 석출된 실리콘 입자들이 느린 냉각속도로 인해 조대해져 강도를 낮추고 파괴를 일으키는 문제점을 갖는다. 1990년대 초 일본의 Sumitomo Electric 社は 이를 극복하기 위해 냉각속도가 빠른 가스분무공정(Gas Atomizing)으로 이 합금의 분말을 제조하여 이로부터 부품을 제작하는 기술을 개발하였다⁷⁾. 이 기술은 이후 각종 합금원소의 첨가와 소결, 압출 공정의 개선을 통해 상

용화되었으며 최근 일본의 GKN 社와 독일의 ZF Getriebe 社は 이 소재로 오일펌프 기어를 공동 개발하였고 독일의 SHW 社は 이 소재의 Chain Sprocket을 개발하여 BMW 社에 엔진부품(Fig. 1)으로 납품하고 있다⁸⁾.

금속기지 복합재료(Metal Matrix Composite, MMC)의 대표적인 재료에는 Al-SiC 복합분말소재가 있다. Al-SiC와 같이 금속기지에 세라믹입자가 분산된 형태의 복합재료는 분말공정뿐 아니라 주조공정을 통해 쉽게 제조될 수 있다. 실제로 미국의 Lotus 社와 Chrysler 社は Alcan 社가 제조한 Al-SiC 주조재의 브레이크 디스크를 채택하고 있다⁹⁾. 하지만 앞서 설명했듯이 주조재는 치수보정을 위해 가공공정을 거쳐야 하는데, 복합재료는 상대적으로 무른 금속기지와 단단한 세라믹입자가 혼합되어 있어 절단이 쉽지 않고 내마모성이 우수해 연마도 어려운 문제점을 갖는다. 따라서 치수보정이 필요 없는 분말야금공정은 복합재료부품을 제조하기에 매우 적합한 공정이며 아울러 주조공정에 비해 미세조직 제어도 용이한 장점(세라믹입자의 균일한 분포, 세라믹입자의 조대화 방지, 금속기지-세라믹입자의 반응 방지 등)을 가진다. 현재까지 분말야금으로 제조된 Al-SiC 복합분말소재는 자동차보다 주로 항공기에 적용되고 있다⁶⁾.

최근의 알루미늄 분말소재의 기술개발 방향은, 위의 합금화와 복합화를 통합하는 방식이다. 즉, 과공정 Al-Si 합금분말과 SiC, TiC, AlN 등의 세라믹입자를 복합화하여 강도와 내마모성을 극대화시키려는 노력이 기울여지고 있다. 이러한 시도는 주로 일본에서 진행되고 있는데 한 예로, 2000년 Sumitomo Electric 社は 과공정 Al-Si 합금분말의 일부표면을 AlN 층으로 질화시켜 높은 내마모성의 부품을 제조하였다¹⁰⁾. 여기서 주목할 점은 과공정 Al-Si 합금분말을 복합화하고자 하는 시도는 아직 초기 단계이며 그 방법도 기존 복합화와 같이 단순히 합금분말과 세라믹입자를 혼합하는 방식이라는 점이다.

알루미늄 분말소재가 자동차부품에서 차지하는 비중은 철강소재나 알루미늄 주조재에 비해 현저히 떨어진다. 2006년 북미 자동차산업 생산액을 기준으로 알루미늄과 아연 주조재의 생산액은 70억불에 이르지만 알루미늄 분말소재의 생산액은 2천만불에 불과한 것으로 나타났다¹¹⁾.



Fig. 1. 과공정 Al-Si 합금분말소재의 Chain Sprocket이 내장된 BMW 社の Camphaser System⁸⁾.

하지만 앞서 언급한 과공정 Al-Si 합금분말소재 및 Al-SiC 복합분말소재의 예에서 알 수 있듯이 그동안의 지속적인 기술개발로 인해 알루미늄 분말소재의 성능이 꾸준히 향상되었으며 가격도 철강소재의 200% 수준에서 130% 수준으로 낮아져 향후 다양한 부품에서 철강소재 및 알루미늄 주조재를 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

2.2. 국내 기술개발 동향

해외 선진국의 기술과 약간을 격차를 가지고 있는 국내 자동차업체에서 알루미늄 분말소재 부품을 생산용 자동차에 탑재한 사례는 아직 보고되고 있지 않다²⁾. 따라서 알루미늄분말 제조나 부품화에 대한 연구개발도 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있는데 국내 특허동향을 살펴보면 한국기계연구원(KIMM)과 현대자동차에서 연구가 진행 중임을 확인할 수 있다. 두 경우 모두 앞서 언급한 과공정 Al-Si 합금분말의 제조에 관한 연구로서 가스분무공정을 이용한 분말의 제조와 합금조성의 개선, 세라믹입자(SiC, TiC)와의 분말혼합 등을 다루고 있다. 특히, 국내 자동차업체의 특허가 다수 확인되는 것은 향후 국내 자동차에도 알루미늄 분말소재 부품이 적용될 가능성을 보여준다.

2.3. 알루미늄 분말 소결기술

알루미늄은 녹는점(660°C)이 낮아 대부분 주조공정으로 제품화되고 일부 특별한 목적을 위해서만 분말공정으로 제조된다. 분말공정으로 제조되는 대표적인 합금계는 Al-Cu와 Al-Si계이다. 특히, 최근 활발히 연구되고 있는 과공정(Hypereutectic) Al-Si 합금은 공정조성(12.6wt%) 이상의 Si를 첨가하여 냉각 중 높은 경도의 초정(Primary) Si 결정이 석출되도록 설계한 합금이다^{6,12)}. 이 때 초정 Si 결정이 수십 μm 이상으로 성장하면 재료의 경도는 높아지지만 Si 결정의 숫자가 줄어 석출강화 효과가 낮아지고 파괴가 쉽게 일어나는 문제점을 일으킨다. 따라서 과공정 Al-Si 합금은 냉각속도가 빨라 초정 Si 결정의 크기가 10 μm 내외로 유지될 수 있는 가스 아토마이징 등의 분말공정으로 주로 제조되고 제조된 분말은 압출이나 소

결을 통해 부품으로 제작된다⁶⁾. 일반 열처리 로(Furnace)를 사용하는 통상적인 소결공정은 높은 압력을 요구하는 Hot Press, Hot Isostatic Press, Spark Plasma Sintering, 분말압출 등에 비해 공정비용이 낮고 3차원 형상 제작을 위한 후가공이 필요하지 않은 장점을 지닌다. 하지만, 알루미늄 분말부품은 대부분 일반 소결 대신 분말압출 공정으로 제조되는데, 이것은 알루미늄 분말의 경우 소결공정에서 입계확산이나 액상형성을 통한 치밀화가 어렵기 때문이다. 이렇게 저조한 치밀화는 분말표면에 형성되는 알루미늄(Al_2O_3) 산화층 때문인 것으로 알려져 있는데, 이 산화층은 매우 안정하여 철 분말의 산화층과는 달리 통상적인 환원 분위기에서 제거되지 않는다. 따라서 알루미늄 분말의 치밀화는 분말표면에서의 원자 확산(고상소결) 대신 분말표면을 깨고 배출된 소량의 액상(액상소결)에 의존하게 된다. 하지만 분말 산화층과 액상 사이의 젖음성이 좋지 않고 산화층이나 액상의 성질이 합금원소의 종류, 소결온도, 소결분위기 등에 따라 크게 달라지는 경향이 있어 액상에 의한 치밀화 역시 실험적으로 쉽게 얻어지지 않는다. 비교적 최근인 1990년대부터 알루미늄 분말의 치밀화 거동과 문제점을 분석한 다수의 연구결과가 보고되었으나 아직 다양한 조성의 합금에 대해 일반적으로 적용할 수 있는 해결책은 보고되지 않았다¹³⁻¹⁵⁾.

알루미늄 분말의 치밀화를 방해하는 것은 분말표면의 알루미늄 산화층과 산화층-액상 사이의 좋지 못한 젖음성으로 요약된다. 알루미늄 산화층은 분말내부에서 형성된 액상이 입계로 나가는 것을 막고, 분말 산화층과 액상 사이의 저조한 젖음성 즉, 높은 젖음각은 입계로 나온 액상이 기공 채널을 통해 시편 전체로 퍼지는 것을 방해한다. 이 중 전자는 합금 내 Mg의 첨가를 통해 해결할 수 있는 것으로 알려졌다. Lumley 등¹⁴⁾은 Mg이 알루미늄 산화층과 반응하여 MgAl_2O_4 spinel 상을 형성하면서 산화층을 깨뜨려 분말 내부의 액상이 입계로 나올 수 있다고 보고하였고, 이 해석은 이후 알루미늄 합금조성에 Mg이 빠지지 않는 근거가 되었다.

알루미늄 산화층과 알루미늄 액상 사이의 좋지 못한 젖음성 문제는 해결되지 않았는데, 이 젖음성 문제는 실

제 소결체에서 두 가지 현상을 일으킨다. Fig. 2과 같이, 첫째는 소결체 표면부가 치밀화되지 않고 다공질로 남는 것이고 둘째는 알루미늄 액상이 시편 외부로 빠져나오는 현상이다. 표면부가 치밀화되지 않는 것은 소결 초기 중앙으로 모인 액상이 표면부로 다시 퍼지지 못했기 때문인데, 액상이 시편 중심부로 모이는 것(Liquid Coagulation)은 액상-기상 계면의 면적을 낮추기 위해 모든 액상 소결체에서 발견되는 현상이다⁷⁾. 문제는 다른 재료에서는 시편 중심부로 모였던 액상이 시간이 흐름에 따라 다시 시편 전체로 퍼지는데 알루미늄 분말의 경우는 그렇지 않다는 것이다. 액상이 시편 표면 부근으로 나오지 못하는 것은 분말 산화층과 액상 사이의 젖음각이 너무 크기 때문으로 추정해 볼 수 있다. 즉, 액상-산화층의 계면을 만들기보다는 액상-기상, 산화층-기상의 계면을 유지하는 것이 열역학적으로 선호되는 것이다. 이러한 경향은 액상량이 많을 경우 액상이 시편 전체로 퍼지는 것이 아니라 아예 시편 밖으로 빠져버리는 현상(Liquid

Exudation)을 일으키기도 한다 (Fig. 2).

알루미늄 분말과 액상 사이의 젖음각을 줄이기 위해서는 소결분위기의 수분을 낮추고 질소 가스를 사용해야 한다고 알려져 있다⁸⁾. 우선, 소결분위기의 수분을 낮추는 것은 Mg으로 인해 산화층이 깨어진 부분에서 노출된 알루미늄 표면이 다시 산화되는 것을 막기 위함이고, 질소 가스를 사용하는 것은 노출된 알루미늄 표면을 액상과의 젖음각이 작은 AIN로 질화시키기 위함이다. Schaffer 등⁸⁾은 적절 수분의 양을 이슬점 -60°C 정도로 제시하였다. 두 방법 모두 분말 표면의 산화층을 환원시키는 것은 아니고 산화층이 이미 깨어지거나 사라진 표면을 처리하는 방법이다. 이 밖에 Mg 분말이나 덩어리를 소결로에서 시편 옆에 두어 산소압을 낮추는 방법도 제시되었는데, 이에 대한 정량적인 평가는 이루어지지 못했다⁸⁾.

3. 원재료 동향

3.1. 원재료의 국내외 수급현황

세계적으로 소비량을 보면 미국이 전 세계 알루미늄 분말의 1/3 이상을 소비하고 있는데 이는 알루미늄 분말이 현재까지 자동차나 전자제품의 부품용보다는 항공산업이나 폭발물 관련산업에서 집중적으로 이용되고 있기 때문이다. 미국 내 알루미늄 분말소재의 소비량은 Fig. 3과 같이 1990년 3천톤 규모에서 2000년 이후 4, 5천톤 규모로 서서히 증가하고 있으며 주요 응용분야는 폭발물, 고체연료, 철계 합금원료, 화학촉매 등이다. 1991년 이들 분야가 차지하는 비율은 79%로서⁹⁾, 우주왕복선이 한번 이륙하는데 소모되는 알루미늄 분말의 양만 무려 160 ton에 이른다고 한다. 반면, 자동차부품이 알루미늄 분말소재의 소비량에서 차지하는 비율은 아직 미미하다. 미국 자동차산업에서 알루미늄 분말소재 부품의 생산량은 2006년 2천만불에 불과한 것으로 나타났는데⁹⁾ 이는 전체 자동차부품에서 10% 이하를 차지하는 알루미늄 부품 중에서도 1%가 되지 않는 액수이다. 하지만, 자동차산업에서 알루미늄을 이용한 경량화가 시작된 것이 1990년 초로 아직 증가추세에 있으며 모든 기계부품 산업에서

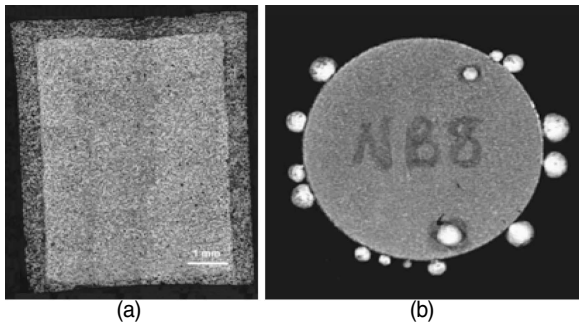


Fig. 2. 알루미늄 분말 소결체의 표면부 다공질화 현상(a)과 액상 유출 현상(b). 왼쪽 그림에서 시편 표면 부근의 어두운 부분이 치밀화가 덜 진행돼 기공이 많은 영역⁶⁾.

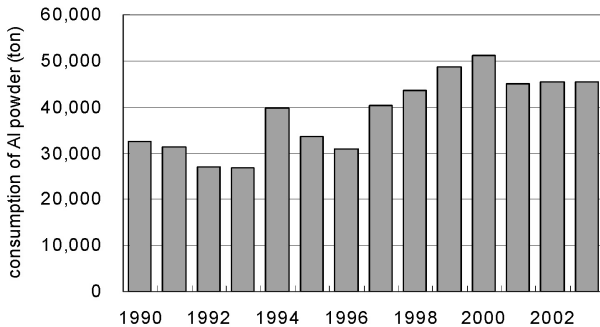


Fig. 3. 연도별 미국의 Al 분말 소비량⁹⁾.

초기에는 주조, 단조, 압연재가 쓰이다가 후기에 분말소재가 사용되게 됨을 고려하면 앞으로 그 소비량이 급격히 증가할 것으로 예상된다.

유럽 시장의 경우 시장 동향에 대한 데이터는 1990년대 초반 이후 보고되지 않았다. 1993년 당시 유럽의 가스분무 알루미늄분말 시장은 20,500ton 규모로 1991년의 24,500ton에 비해 오히려 감소하였고 그 응용분야는 아래 Table 1과 같다. 한편, Johnson 등에 의하면 2000년 일본의 알루미늄 분말시장은 2,000ton 규모로 추정되고 있으며⁹⁾ 상당량이 자동차부품에 활용되고 있는 것으로 추정된다.

한편, 국내에서는 창성이 알루미늄 분말을 제조, 판매하고 있으나 아직 활발히 응용되고 있지는 않으며 현대자동차 등 소비업체는 주로 원료분말 대신 분말부품 완제품을 일본 등에서 수입하여 사용하고 있다.

3.2. 원재료 관련 국내외 기술개발 현황

현재 상용화된 알루미늄 분말은 주로 가스분무법(Gas Atomization)으로 제조되고 있으며 특별한 경우 볼 밀링법(Ball Milling)으로 제조되고 있다. 세계 최대 알루미늄 분말 제조업체는 독일의 Ecka Granules로서 세계 알루

미늄 판매량의 절반 이상을 차지하고 있는 것으로 추정된다. 이 업체는 순수 알루미늄 뿐만 아니라 Alumix 시리즈로 알려진 알루미늄 합금분말을 대량 판매하고 있으며 기타 분말아금과 관련된 바인더, 첨가제 뿐 아니라 마그네슘, 구리, 아연 분말도 판매하고 있다. 주목할 점은, 예전에는 주로 Alumix13, Alumix123 등 알루미늄-구리 합금분말을 주로 판매하였으나 최근 Alumix231이라는 상품명으로 Table 2와 같이 실리콘이 14-16% 함유된 과공정 알루미늄-실리콘 합금분말을 판매하기 시작하였다는 점이다. 이 업체는 Alumix231을 판매하면서 Table 3과 같이 이를 이용한 소결방법도 제시하고 있는데 소결에 의한 치밀화가 어려운 것으로 알려진 과공정 알루미늄-실리콘 합금분말임을 고려하면 매우 이례적인 것이다. 업체에서 Table 4와 같이 예시하고 있는 소결체의 물성을 살펴보면 경도의 경우 HRB 100 이상의 값을 나타내지만 인장강도의 경우 300MPa 이하의 값을 나타내어 450MPa 이상인 압출재와 비교하면 충분한 치밀화가 이루어졌는지 의심을 갖게 한다. 따라서 현재까지 과공정 알루미늄-실리콘 합금분말의 소결이 완전히 해결된 것으로는 생각되지 않지만 이 Alumix 231 분말은 세계 최초로 대량생산과 판매가 이루어진 과공정 알루미늄-실리콘 합금분말이라는 점에서 주목할 만하다.

Table 1. 1991년 유럽시장에서의 알루미늄 분말 응용현황

응용 분야	소비량 (ton)	비율(%)
화학 산업	8,888	36
철계 합금 첨가제	5,143	21
발열반응 응용	2,425	10
타지역 판매	2,035	8
폭발물	912	4
기타	5,172	21
합계	24,500	100

Table 2. Ecka Granules 사의 Aumix 231 분말의 물리적 특성과 합금조성

Physical characteristics		Chemical compositions	
Apparent density	1.05-1.20 g/cm ³	Aluminium	Rest
Tap density	1.20-1.50 g/cm ³	Silicon	14-16 %
Sieve fraction < 45µm	25-40 %	Copper	2.4-2.8 %
		Magnesium	0.50-0.80 %
		Lubricant: 1.5 % Amidwax	

Table 3. Ecka Granules 사의 Aumix 231 분말의 제시된 소결 조건

Recommended compacting and sintering conditions		
Compacting	Compacting Pressure	620 MPa (Green density:2.56g/cm ³)
	Dewaxing	380-410° C
Sintering	Sintering temperature	550-560° C
	Sintering time	60 min
	Atmosphere	N ₂ Dew Point < -45° C

Table 4. Ecka Granules 사의 Aumix 231 분말 소결체의 물성

Typical material properties of ECKA ALUMIX 231 sintered parts						
Green density	Sintered density	Dimensional change	Post heat treatment	Tensile strength (MPa)	Hardness (HRB)	Elongation (%)
2.56 g/cm ³	2.67 g/cm ³	-2.0 %	T _{1a}	200	100	1
			T ₆	260	130	0.5

4. 맺음말

1990년대 이후로 독일과 미국 및 일본 주요 자동차 강국들은 자동차의 경량화를 위해 알루미늄 합금분말 부품의 응용기술을 활발히 개발해왔고 최근 들어 하나 둘씩 상업화를 진행하고 있다. 반면, 국내 자동차 관련 업체나 연구소, 대학 등은 이 분야의 기술개발을 거의 진행해오지 않아 조만간 국내 자동차업체는 자동차 경량화를 위해 상당량의 부품을 수입에 의존함으로써 이들에 대한 기술의존도를 더욱 높일 것으로 예상된다. 자동차 경량화 추세가 향후 전개될 전기자동차 등 미래자동차 추세와 연결되어 있는 점을 감안하면 장기적인 관점에서 더 이상의 기술격차 발생을 막기 위해서라도 알루미늄 분말 부품 등 자동차용 경량부품에 대한 연구개발이 훨씬 적극적으로 전개되어야 할 것으로 판단된다. 에너지 저감 및 녹색 소재산업에 대한 정부의 관심 역시 증대되고 있는 시점에서 산/학/연/정이 유기적인 관계를 구성하여 실리콘 및 세라믹 강화상을 함유한 알루미늄 부품의 연구 및 개발을 주도한다면 선진기술과 격차를 줄임은 물론이고 관련기술을 선도할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 진행중이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이재욱, 양상선, 김용진, 한국분말야금학회지, 14[6] 1-9 (2007).
2. 이원식, 자동차 경량화를 위한 비철금속 응용 동향,

KISTI 기술동향분석보고서, (2003).

3. 임중대(현대자동차 연구개발본부), 분말제품 응용기술 워크샵 발표자료 (2002).
4. P. Delarbre and M. Krehl, Int. Conf. on P/M Aluminum and Light Alloys for Automotive Applications (Detroit) 발표자료 (2000).
5. Aluminum Industry Roadmap for the Automotive Market, The Aluminum Association, Inc. (1999).
6. R. Bhagat, ASM Handbook Vol. 7, 840-858 (1998).
7. Y. Takeda et al, U. S. Patent No. 5,366,691, Nov (1994).
8. T. Schubert et al, Metal Powder Report, 32-37, Mar (2005), P. Angelika, ibid, 13-15, Feb (2006).
9. J. Kaczmar et al, *J. Mater. Process. Tech.*, **106** 58-67, (2000).
10. K. Kondoh et al, U. S. Patent No. 6,042,631, Mar (2000).
11. S. Huo et al, 2006 PM World Congress 초록집, 714-15 (2006).
12. J. U. Ejiofor, and R. G. Reddy, *JOM*, **49** [11] 31 (1997).
13. G. B. Schaffer, T. B. Sercombe, and R. N. Lumley, *Mater. Chem. Phys.*, **67** 85 (2001).
14. R. N. Lumley, T. B. Sercombe, and G. B. Schaffer, *Metall. Mater. Trans., A* **30** 457 (1999).
15. T. B. Sercombe, and G. B. Schaffer, *Acta Mater.*, **52** 3019 (2004).
16. G. B. Schaffer, and B. J. Hall, *Metall. Mater. Trans., A* **33** 3279 (2002).
17. O. J. Kwon, D. N. Yoon, "Sintering Processes" pp. 203, Edited by G.C.Kuczynski, Plenum Press, New York, 1980.
18. T. B. Schaffer, B. J. Hall, S. J. Bonner, S. H. Huo, T. B. Sercombe, *Acta Mater.*, **54** 131 (2006).
19. 김용진 외, 대한민국특허 등록번호 570,551, Apr. (2006); 정태호, 대한민국특허 공개번호 10-2007-0014314, Feb. (2007); 하석, 대한민국특허 공개번호 10-2006-0013733; 박현달, 대한민국특허 공개번호 1999-021227, Mar. (1999).

●● 김용진



- 2000년 한국과학기술원 재료공학과 박사
- 2005-2008 재료연구소 분말재료연구부 부장
- 1987-현재 재료연구소 책임연구원

●● 양상선



- 2005년 서울대학교 기계공학과 박사
- 2005년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 선임연구원
- 2006년-현재 재료연구소 선임연구원

●● 이재욱



- 2004년 서울대학교 재료공학과 박사
- 2004년-현재 재료연구소 선임연구원

●● 박용호



- 1989 일본 동북대 재료공학과 박사
- 2003 -현재 한국분말야금학회 사업이사
- 2006 -현재 부산경남 자동차 테크노센터 소장
- 2007 -현재 부산대학교 재료공학과 학부장

●● 김지순



- 1990 독일 슈트트가르트 대학 박사
- 1999-현재 국립기술품질원산업표준심의회 분말야금전문위원
- 2008-현재 한국공학한림원 정회원
- 1991-현재 울산대학교 교수