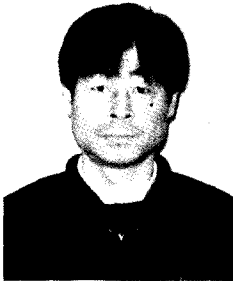


분무적층법으로 제조된 알루미늄 합금의 현황과 전망



강 석 봉

(내식재료실 책임연구원)

- '72. 2 서울대학교 공과대학 금속공학과 졸업
- '74-'79 동국제강, 삼미종합특수강, 한국중공업 근무
- '81. 2 한국과학기술원 재료공학과 (석사)
- '86. 8 한국과학기술원 재료공학과 (박사)
- '80-현재 한국기계연구소 책임연구원



임 차 용

(내식재료실 선임연구원)

- '82. 3-'86. 2 연세대학교 공과대학 금속공학과 졸업
- '86. 3-'88. 2 한국과학기술원 재료공학과 (석사)
- '88. 3-'91. 2 한국과학기술원 재료공학과 (박사)
- '91. 6-현재 한국기계연구소 선임연구원

1. 서 론

최근 급속 응고(rapid solidification)기술의 급격한 발전에 따라 종래의 주조법으로는 얻기 어려운 우수한 장점들때문에 탁월한 기계적 성질의 향상을 기대할 수 있게 되었다. 즉, 응고 조직의 개선, 용질 원자의 고용한도 증가, 편석의 억제, 비평형상의 생성, 석출물의 미세 분포 등의 특성으로 인해 선진국에서는 초내열 합금, 우주 항공 재료, 전자 재료 등의 전략적 첨단 소재개발에 급속 응고 기술을 적용하고자 상당한 투자가 진행되고 있다. 그러나 반응성이 강한 금속이나 희토류 원소를 함유하는 재료를 급속 응고로 제조할 때 미립자의 표면에 산화물이나 석출물이 생성되기 쉽고, 이러한 표면생성물은 연성과 인성을 저하시키고 내식성 및 자기적 특성에 나쁜 영향을 주기 때문에 산화물의 생성을 억제할 수 있는 새로운 급속 응고법이 강구되어 왔다. 그리고 용융급속으로부터 중간공정을 단축하여 최종 형상에 가까운 제품을 생산하는 이른바 NNSF(Near-Net Shape Forming) 공정이 주목을 받고 있다. 이 두가지 특성을 만족시키는 급속 응고법으로 분무적층법(spray deposition process)이 등장하게 되었다[1~3].

분무적층법은 1970년대 영국의 A. Singer에 의해 개발된 기술로서[4], 용융상태의 금속 또는 합금을 고압의 불활성 가스를 이용하여 액체 또는 반고체 상태의 액적(liquid droplet)으로 분무시키고 이를 기판에 고속으로 충돌, 급속 응고시켜 원하는 제품 형태의 예비성형체(preform)를 만드는 기술이다. 이 방법은 급속 응고의 장점을 충분히 이용하면서,

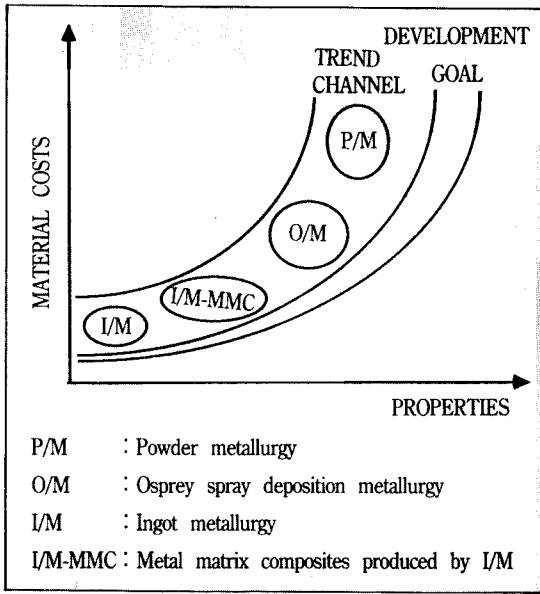


그림 1) 알루미늄 합금의 제조 공정별 비용-특성 관계

불활성 가스에 의한 산화물의 생성을 억제하고, 최종 제품에 가까운 형태로 제조하여 중간공정을 단축함으로써 탁월한 공업적 잇점을 지닌 급속 응고 기술로 주목을 받고 있다.

분무적층기술은 알루미늄 합금을 비롯하여 철계 합금[5], 자성 재료, 복합 재료등 많은 분야의 고급 소재 생산 공정에 적용되고 있으며, 상당한 성과를 거두고 있다[6]. 본고에서는 자동차 경량화 소재로 크게 주목을 받고 있는 알루미늄 합금에 대하여 분무적층기술의 적용 현황을 조사하고, 분무적층된 알루미늄 합금의 자동차 부품으로의 응용 가능성을 알아보고자 한다.

2. 알루미늄 합금의 분무적층

2.1. 분무적층법

고성능의 알루미늄 소재를 얻기 위한 많은 노력에도 불구하고 종래의 주조법으로 이룩할 수 있는 성능에는 한계가 있었다. 급속 응고를 이용하는 분말야금학적 방법으로 고성능 알루미늄 소재의 개발에 대한 새로운 가능성이 보였으나 값비싼 비용과 산화물 및 가스 함유에 의한 품질상의 문제로 인하여 대량 생산에는 아직 해결

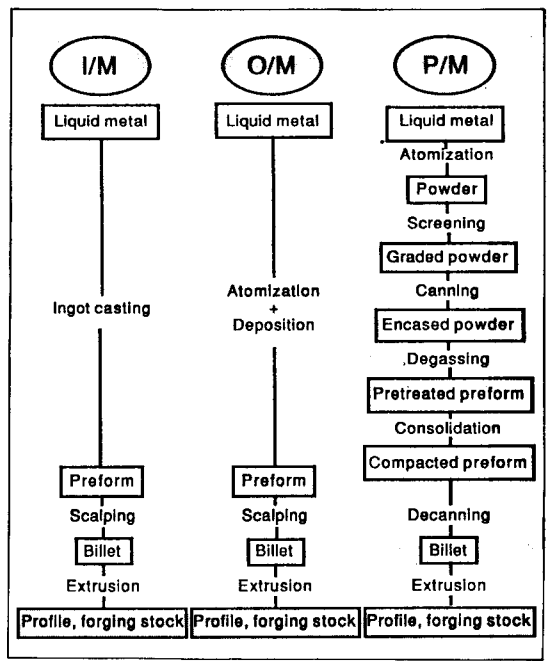


그림 2) Round Billet 제조공정 비교

해야할 많은 과제가 남아 있다. 그러나 급속 응고의 장점을 이용하면서 분말야금 공정에서 요하는 많은 시간과 비용을 최소화 줄일 수 있는 분무적층법이 고성능의 알루미늄 소재 개발에 응용되고 있다[7]. 그림1은 알루미늄 합금의 제조 비용과 성능 관계를 나타낸 그림인데, 종래의 주조제(I/M)는 낮은 비용과 저성능의 위치에 있다. 그리고 이와 반대 위치 즉, 고성능의 알루미늄은 높은 제조 비용으로 분말야금학적으로 제조되고 있다. 이러한 종래 주조와 분말야금의 두 극단사이에 저비용으로 고성능의 소재를 개발하기 위한 공정으로 분무적층기술이 있다. 분무적층법은 간단한 공정으로 큰 덩어리의 금속 재료를 급속 응고(10²~10³ K/sec)로 생산할 수 있는 유일한 공정으로[8] 높은 성능을 얻는데 필요로 하는 단계가 다른 공정에 비하여 비교적 간단하다. 그림2는 종래의 일반 주조법(I/M), 분무적층법(O/M), 그리고 분말야금법(P/M)으로 각각 원형 빌렛을 제조할때의 필요로 하는 제조 단계를 비교하였다.

분무적층장치는 크게 세부분으로 구성되어 있는데, 용융금속을 저장 공급하는 턴디쉬(tundish)와 용융금속을 불활성 가스를 이용하여 분무시

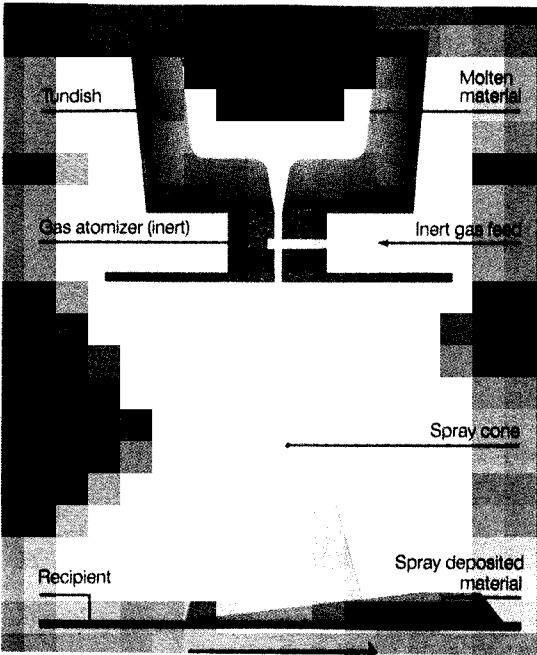


그림 3) 분무적층 장치의 개략도

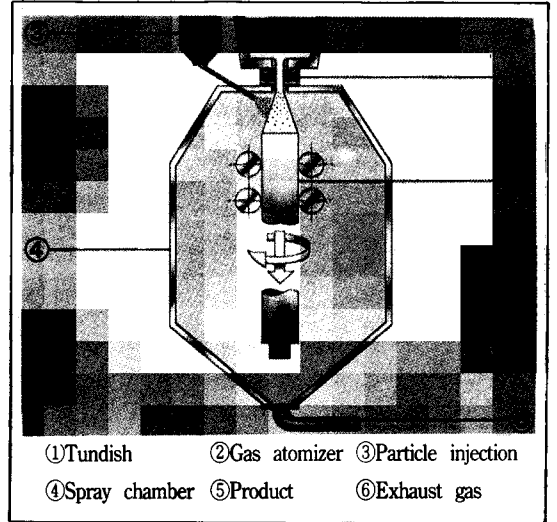


그림 5) 원형의 빌렛 제조를 위한 분무적층 장치

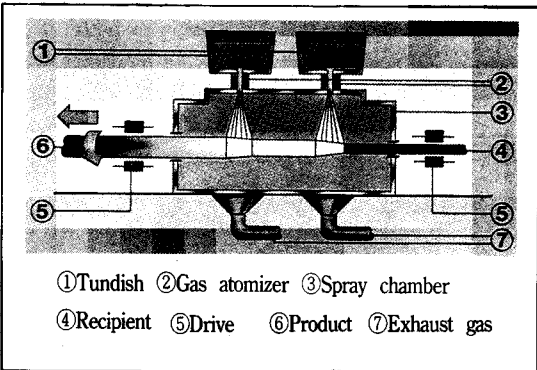


그림 4) 관상(管狀)의 예비성형체 제조를 위한 분무적층 장치

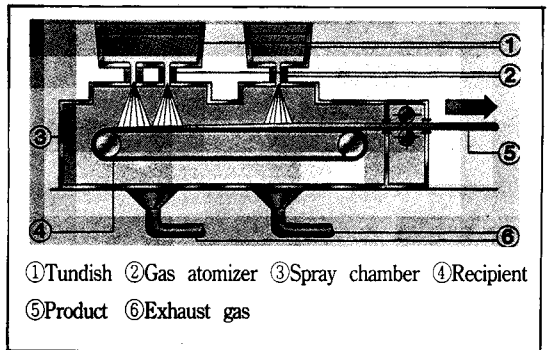


그림 6) 얇은 판이나 다층 제조를 위한 분무적층 장치

키는 분무장치(gas atomizer) 그리고 분무된 가스를 적층시키는 기관(recipient)으로 구성되어 있다. 그림3은 분무적층장치의 개략도를 나타내었다. 분무적층법으로 예비성형체를 제조할때 중요한 변수는 용융 금속의 온도 및 유출속도, 불활성 가스의 유출속도 및 압력, 분무거리, 기관의 움직임 및 회전속도 등인데, 이런 변수들의 조절이 중요하다. 특히 기관의 설계와 운동 모양을 변경함으로써 최종 제품에 가까운 형태의 예비 성형체를

제조할 수 있다. 그림4는 관상(管狀)의 예비 성형체를 제조하기 위한 공정이다. 원형 기관을 분무 방향의 수직 방향으로 위치시키고 회전중인 기관에 분무를 시키면서 한 방향으로 이송하면 관상의 성형체를 얻을 수 있다. 그림5는 원형 빌렛 또는 디스크를 제조하기 위한 공정으로 기관을 분무 방향과 평행하게 설치하고 기관을 회전시키면서 아래방향으로 이송하면 원형의 빌렛을 얻을 수 있다. 그림6은 판상(板狀)의 성형체 또는 다층(多層)의 소재를 생산하기 위한 공정으로 기관이 벨트로 되어 있고, 여러개의 분무구에서 각각 다른 종류의 용융금속을 분무시켜 다층 재료(multilayer materials)를 연속적으로 생산할 수 있다.

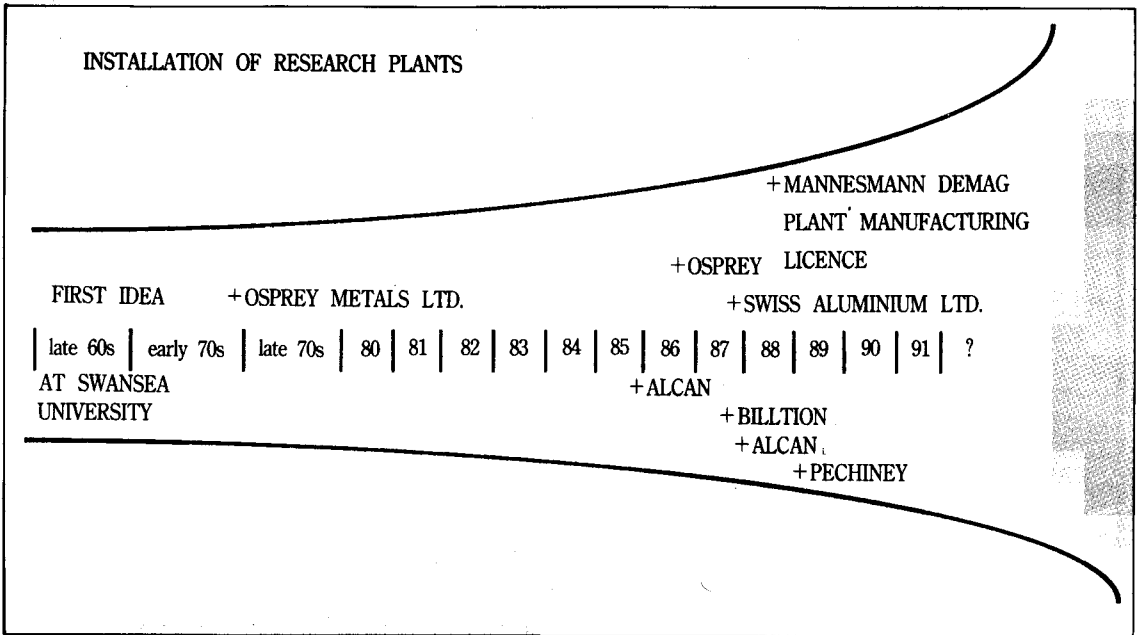


그림 7) 알루미늄 합금에 대한 분무적층 기술의 적용 추세

분무적층 기술은 그 첫 아이디어가 고안된 이래로 약 20년간 많은 발전을 이룩하여 지금은 공정 기술 자체에 대한 연구는 거의 확립된 단계이고, 새로운 합금 개발이나 기존 소재의 제조 공정에 적용하여 고성능의 소재를 생산하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 그림7은 알루미늄 합금에 대한 분무적층기술의 적용 추이로, 최근에 와서 크게 증가함을 보여주고 있다. 사진1에는 스위스의 Alusuisse-Lonza Services (주)의 연구개발 센터에 있는 분무적층 및 그 주변장치로 1987년 설치된 이래 지름 250mm까지의 원형 빌렛을 생산하고 있다.

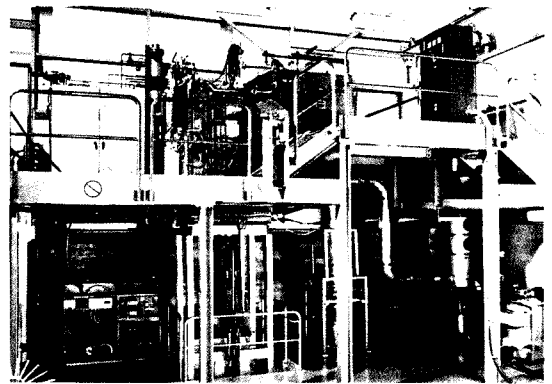


사진 1) Alusuisse-Lonza Services (주)에 있는 분무적층장치

2.2. 분무적층된 소재의 특성

분무적층법으로 제조된 알루미늄 합금은 급속 응고의 잇점과 공정간소화로 최종 제품에 가까운 형상 제조가 가능하므로 종래의 주조법이나 분말야금법에 비하여 다음과 같은 우수한 특성을 발휘한다[9].

- ① 급속 응고에 의하여 석출상들이 균일하게 분포하는 미세한 등축정 구조를 얻을 수 있다.

그리고 첨가 원소를 적절히 선택함으로써 (예를들어 Zr의 첨가) 후가공에서도 미세한 구조를 계속 유지할 수 있다. 분무 적층된 소재의 우수한 기계적 성질의 대부분은 이러한 미세한 입자 구조에서 얻어 진다.

- ② 재래식 주조법에서는 불가능한 많은 양의 합금원소 첨가가 가능하다. 재래 주조에서는 거시 편석이나 주조상의 문제 또는 나쁜 성형성등으로 인하여 합금원소의 다량첨가가

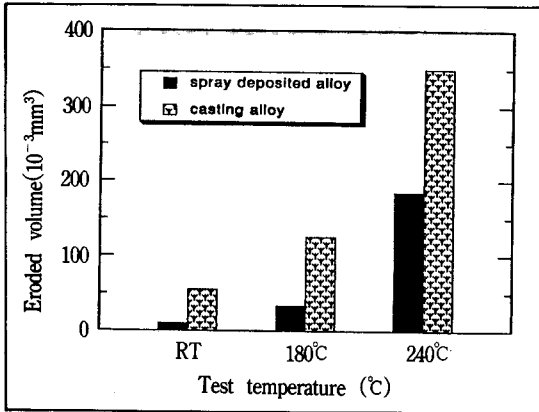


그림 8) 주조재와 분무적층된 소재의 내마모성 비교

불가능하였으나, 분무 적층법에서는 이러한 제약이 없다. 고용 한계를 훨씬 초과하는 합금원소 함량도 첨가 가능하며, 석출상도 천 모상에 걸쳐 미세하고 균일하게 분포하게 된다.

- ③ 고체 입자들을 분무 적층시 주입함으로써, 입자 강화된 금속기지 복합 재료를 만들 수 있다. 고체 입자와 액체 알루미늄간에 접촉 시간이 짧기 때문에 심각한 화학반응을 크게 줄일 수 있으며, 이러한 특성 때문에 첨가 입자의 모양, 크기, 화학 조성등에서 선택의 폭이 넓다. 분무적층법에서는 모상의 조성에 한계가 없기 때문에, 아주 특이한 재료의 조합도 가능하여 특수 용도에 적합한 소재도 이 방법으로 제조 가능하다.
- ④ 기존의 금속 응고 기술은 강력한 금속 응고는 가능하나, 미세한 분말이나 얇은 리본 형태의 제품 외에는 생산이 어려운 단점이 있으나 분무적층법으로는 금속 응고로 큰 덩어리의 제품을 생산할 수 있다. 그리고 불활성 분위기로 조업함으로써 산화물의 양을 최소화 줄일 수 있다.
- ⑤ 기판의 설계를 적절히 조절함으로써 최종 제품 형상에 가까운 소재를 생산할 수 있다.

이러한 분무적층법의 특성에 의해 상온과 고온에서의 강도 증가, 연성 및 내마모성의 향상, 피로 특성 및 내식성이 좋은 소재를 얻을 수 있다.

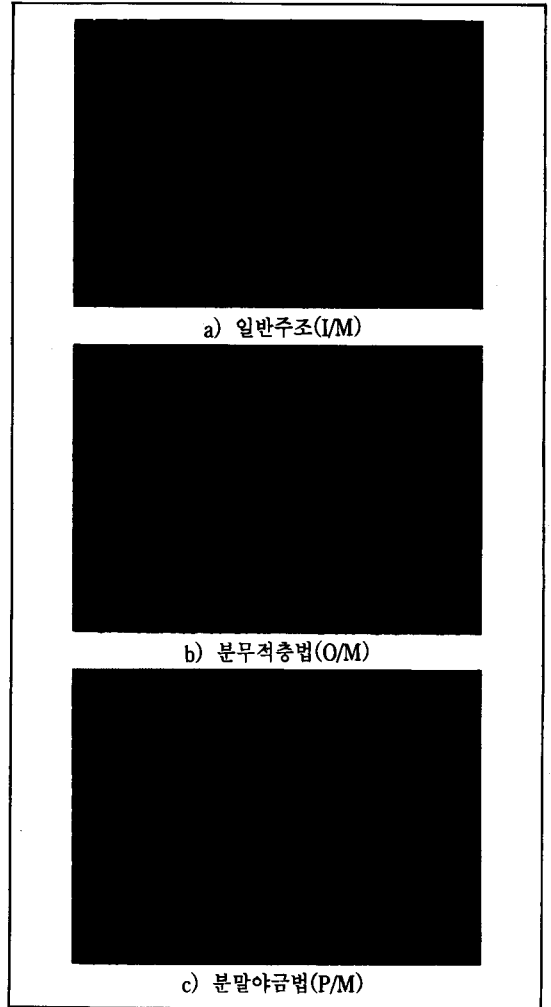


사진 2) 제조공정별 Al-20Si 합금의 미세조직 (x200)

또한, 탄성계수를 증가시킬 수 있고, 금속기지복합재료의 열팽창을 조절할 수 있으며, 아주 미세하고 안정화된 입자 구조에 의해 초소성도 얻을 수 있다. 심지어는 알루미늄 합금에서 자기적 특성도 기대할 수 있으며, 이러한 분무적층법의 특성에 의해서 앞으로 요구되는 특수 용도의 소재도 제조 가능하리라 예상된다.

2.3. 분무적층된 알루미늄 합금의 종류

2.3.1 Al-Si 합금

알루미늄에 실리콘이 공정조성(12.6wt.% Si) 이

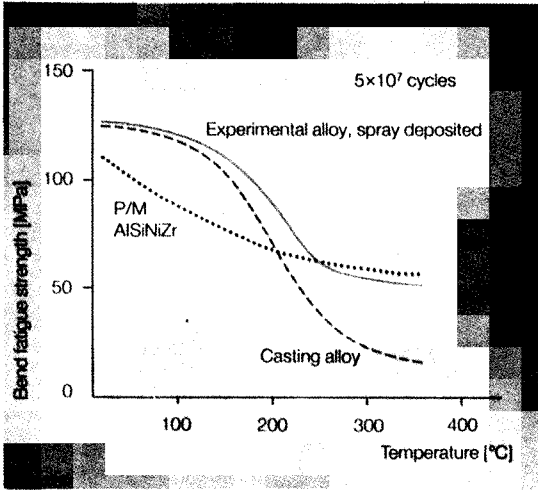


그림 9) 온도에 따른 제조공정별 피로강도 비교

상으로 첨가된 과공정 합금은 다량의 실리콘에 의해 내마모성이 좋고 열팽창이 적은 주조합금으로 잘 알려져 있다. 사진2에는 Al-20Si 합금에 대하여 제조공정별 미세구조를 나타내었다. 재래식 주조법(I/M)으로 제조시 늦은 응고 속도로 인하여 사진2(a)에서와 같은 조대한 실리콘 입자가 존재하게 된다. 그러나 분무적층공정(O/M)을 이용한 급속 응고로 제조할 때에는 사진2(b)에서처럼 미세한 실리콘 입자들이 균일하게 분포하는 조직을 얻을 수 있다. 이는 분말야금법(P/M)으로 제조된 조직 사진2(c)과 큰 차이가 없는 조직이다. 그림8에서는 분무적층에 의해서 상온과 고온에서 내마모성이 크게 향상된 결과를 보여주고 있는데, 이는 미세하고 균일하게 분포된 실리콘 입자 때문이다. 그림9는 온도에 따른 피로 강도를 세가지 제조 방법에 대하여 나타내었다. 200°C 이하의 낮은 온도 영역에서는 분무적층된 합금이 주조된 합금에 비하여 약간 높은 피로 강도를 보이고 있으나, 온도가 200°C 이상으로 높아질수록 분무적층된 소재의 피로 강도는 주조된 합금보다 훨씬 높고 분말야금법으로 제조된 합금과 비슷함을 알 수 있다.

2.3.2. Al-Cu 합금

2XXX 계열의 시효경화형 Al-Cu 합금을 실제 응용하는데 큰 문제가 되는 것이 고온, 특히 150°C

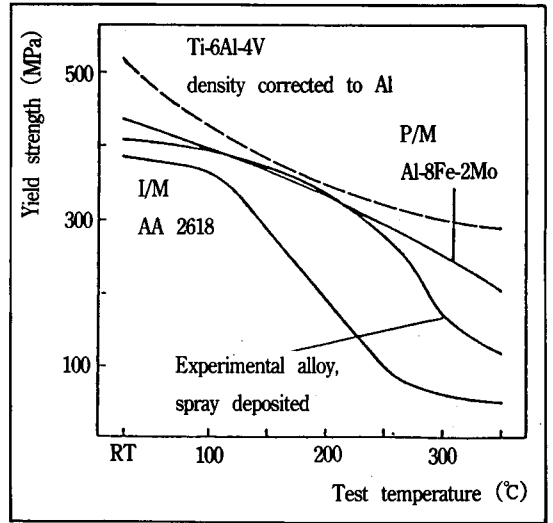


그림 10) 제조공정별 고온 항복강도 비교

이상에서의 강도저하이다. 분무적층으로 제조된 Al-Cu계 합금은 급냉에 의해 아주 미세하고 균일한 구조와 Zr, Ti, V등과 같은 천이 원소에 의한 금속간 화합물의 미세 석출에 의하여 210°C 까지도 우수한 강도를 유지한다. 그림10은 여러 합금의 제조 공정별 고온 항복강도를 비교한 그림으로, 분무적

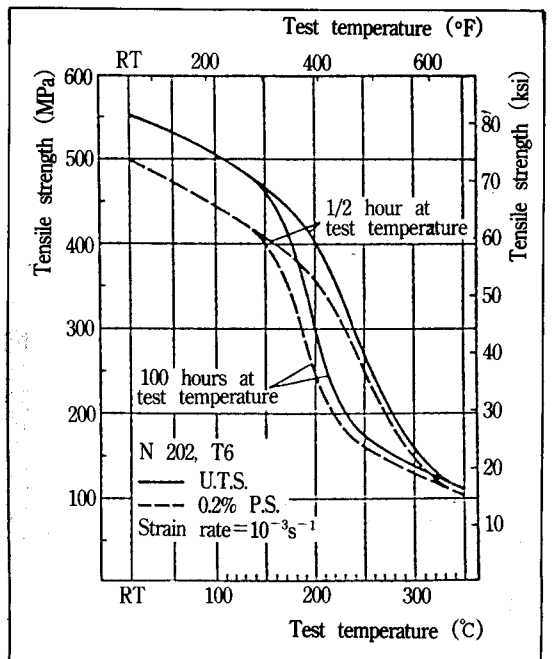


그림 11) 고온 시험온도에서 유지시간에 따른 강도 변화

표 1) 분무적층된 Al-Zn-Mg 합금의 화학조성

Elements	Zn	Mg	Cu	Zr	Si, Fe together
amount (wt.%)	10.8~11.4	2.2~2.5	1.0~1.2	0.25~0.32	1.0

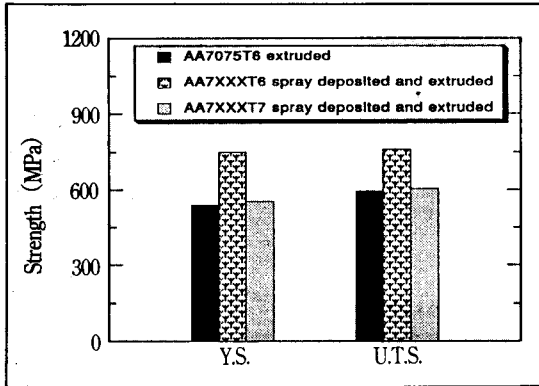


그림 12) 일반주조와 분무적층된 합금의 강도 비교

층된 합금의 강도가 210°C까지 높은 강도를 유지함을 알 수 있다. 그러나 고온인장시험시 시험온도에서 100시간 이상 오래동안 유지한후 고온항복강도를 측정하면 그림11에서와 같이 과시효의 영향으로 강도가 상당히 저하된다. 이러한 강도저하가 더욱 고온쪽에서 일어나도록 미세조직 제어분야에 아직도 많은 연구가 필요하다.

2.3.3. Al-Zn-Mg 합금

분무적층법으로 제조된 7XXX 계열의 Al-Zn-Mg 합금은 미세하고 균일한 내부 구조와 Zn, Mg, Cu나 Zr 등의 첨가에 의한 단단한 상의 석출로 기존의 같은 계열 합금에 비하여 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 표1에서는 분무적층으로 제조된 7XXX 계열의 화학조성으로 기존 같은 계열의 합금에 비하여 Zn과 Zr 함량이 상당히 많음을 알 수 있다. 그림12에는 가장 경화된 T6 상태에서의 기존 7075 소재와 분무적층된 소재의 강도 비교로, 분무적층된 소재의 항복강도, 인장강도가 각각 730 MPa, 750 MPa에 이르고 있다. 그림13은 기존의 7075 합금과 분무적층된 7075 소재의 열처리와 시편방위에 따른 파괴인성 결과로 분무적층된 소재가

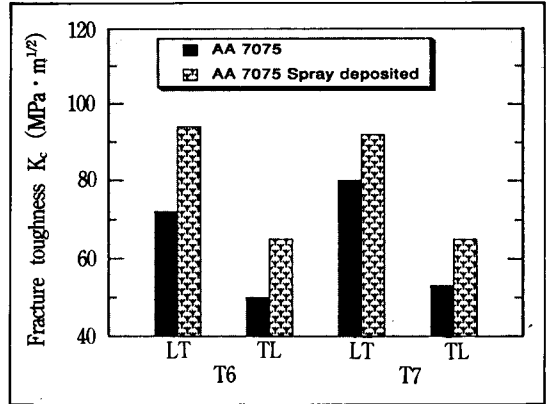


그림 13) 일반주조와 분무적층된 합금의 파괴인성 비교

표 2) 분무적층된 여러 금속기지 복합재료의 기계적 성질 (T6)

MMC	Temp. (°C)	Y.S. (MPa)	U.T.S. (MPa)	EL. (%)	E (GPa)
60XX+ 15% SiC	RT	335	380	5.5	91.8
	100	328	357	5.7	88.2
	150	297	324	6.3	85.8
	200	266	285	5.4	83.4
	250	178	189	5.7	80.9
60XX+ 10% Al ₂ O ₃	RT	315	349	6.8	84.1
20XX+ 13% SiC	RT	509	561	1.7	92.5
20XX+ 14% Al ₂ O ₃	RT	463	538	1.9	90.7
70XX+ 15% SiC	RT	700	735	0.5	94.5

내부구조의 미세화로 열처리조건과 시편방향에 관계없이 우수함을 알 수 있다. 분무적층된 소재의 이러한 우수한 기계적 성질외에 가공성도 좋기 때문에 기어휠과 같이 일반 기기에서 고속 회전하는 부분에 응용가능하며, 특히 경량 고강도가 요구되는 부분에 적합한 소재이다.

2.3.4. 금속기지 복합재료(MMC)

분무적층법에 의한 MMC 제조시에는 지지금속(알루미늄)의 분무와 동시에 강화입자들을 주입

함으로써 첨가량에 제한이 없고 또 급속 응고로 강화 입자와 기지금속인 액체의 알루미늄간에 반응이 거의 일어나지 않는다. 따라서 강도와 내마모성이 향상되고 열팽창이 적은 다양한 급속 기지 복합재료를 제조할 수 있다. 표2에는 여러 급속기지 복합재료의 특성을 요약하였다.

3. 분무적층된 알루미늄 합금의 응용

분무적층된 알루미늄 합금은 앞절에서 살펴본 바와같이 상온과 고온에서의 우수한 기계적 특성으로 많은 분야에 응용 가능한 고성능 소재이다. 생산원가는 기존의 소재에 비하여 높지만 최근 심각한 환경문제로 자동차의 배기가스 규제가 강화되면서 알루미늄 소재는 자동차 부품의 경량화 소재로서 앞으로 사용량이 꾸준히 증가하리라 예상된다. 특히 분무적층된 알루미늄 합금을 valve, connecting rod, piston, cylinder head, liner, spring retainer 등의 엔진부분의 용력을 많이받는 부품과 frame, wheel, rotor, brake, transmission 등의 구조재로 응용하기위한 많은 연구가 진행되고 있다. 여기서는 몇가지 자동차용 부품에 대하여 요구되는 특성과 이를 만족시킬수 있는 분무적층된 소재를 소개하고자 한다.

3.1. Connecting rod

Connecting rod 소재로는 단조강(鍛造鋼)이나 구상흑연주철이 많이 사용되고 있으며, 고급차종과 경주용 자동차에는 타이타늄 소재가 사용되고 있다. 다음과 같은 특성이 요구된다.

- 빠른 회전과 진동 질량을 줄이기 위해 가벼워야 한다.
- 고온항복강도가 높아야 한다.
- 탄성계수가 높아야 하고, 열팽창이 작아야 한다.
- 피로 특성이 좋아야 하고, 내마모성이 우수해야 한다.

이러한 요구를 만족시킬수 있는 분무적층된 소재로서 시효경화형 Al-Cu계 합금에 Mg과 천이 원소가 첨가된 소재가 있다. 이 소재의 탄성계수를

더욱 향상시키기 위해서는 약 15%의 SiC를 첨가할 수 있으며, 고온에서의 열팽창도 작다($17 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, at 200°C). 원소재의 가격은 비싸더라도 경량에 의한 연비향상, 고속회전에 의한 성능향상을 기할수 있어 긴 안목으로 봤을때 총비용이 절감된다고 하겠다.

3.2. Piston

기존의 피스톤 재료로는 Al-Si주조재가 많이 사용되고 있으나, 최근에는 디젤엔진 뿐만아니라 고급의 스포츠카나 경주용카에 고성능의 새로운 소재가 요구되고 있다. 피스톤 재료는 다음의 특성이 요구된다.

- 높은 rpm을 위한 경량소재
- 고온에서의 열안정성
- 넓은 온도영역에서의 내마모성
- 내열충격 및 내열피로 특성
- 우수한 열전도도, 가공성 및 용접성

이러한 요구에 적합한 분무적층된 소재로서 시효경화형의 Al-Si-Cu계 합금과 분산강화된 Al-Si-Fe 합금이 연구 개발되고 있다.

3.3. Valve spring retainers

이 부품은 아주 소형이지만 강한 용력을 받기 때문에 합금강이 많이 사용되고 있고 고급차나 경주용 자동차에는 타이타늄이 사용되고 있다. 아래의 특성들이 요구된다.

- 높은 rpm을 위한 경량소재
- 높은 비강도
- 높은 표면 경도치
- 내마모성 및 우수한 피로와 파괴인성

이러한 용도에는 분무적층된 고강도 Al-Zn-Mg-Cu 합금이 적합한데, 이 소재는 750 MPa 이상의 높은 강도와 coating에 의한 표면경도 향상으로 내마모성이 우수하다. 15~20%의 SiC나 Al_2O_3 를 첨가함으로써 표면coating없이 우수한 내마모성을 얻을수 있다.

위에서 언급한 세가지 자동차 부품 외에도 높은 비강도, 탄성계수, 내마모성 및 우수한 기계가공

성이 요구되는 구조재, 가어휠, 플라이휠등에도 응용하기위한 연구가 진행되고 있다.

저한 경량화와 병행하여 새로운 제조공정에 의한 경량 신소재의 개발에도 관심을 가져야 하겠다.

4. 결 론

분무적층법은 기존의 주조나 분말야금법과는 전혀 다른 새로운 급속응고기술로서 1970년대초 개발된 이래 꾸준히 발전하여, 공정 자체에 대한 연구는 거의 확립된 단계이고, 지금은 다양한 합금계에 대한 적용과 제조된 합금의 응용에 많은 연구가 진행되고 있다. 이 방법으로는 큰 덩어리의 급속재료를 급속응고로 최종제품에 가까운 형상으로 제조할 수 있고, 제조된 소재는 미세하고 균일한 내부구조로 우수한 기계적 특성을 지니기 때문에 가격은 조금 비싸더라도 고성능의 소재가 필요한 부분에 응용될 가능성이 크다.

분무적층법으로 제조된 알루미늄 합금은 우수한 특성때문에 고성능의 경량소재가 필요한 자동차 부품에 사용이 예상된다. 최근 환경오염 문제로 자동차의 배기가스 규제가 강화되면서 차량의 경량화에 의한 연비향상에 자동차업계 뿐만 아니라 사회적 요구가 집중되고 있다. 특히, 자동차의 핵심부품으로서 엔진내의 빨리 움직이는 부분인 connecting rod, piston 등을 경량 알루미늄 합금으로 제조함으로써 큰 연비향상을 기할수 있다. 자동차의 소재측면에서 "경량화"라는 과제를 안고있는 자동차 및 관련업계로서는 기존 소재에 대한 철

참 고 문 헌

- [1] E. J. Lavernia and N. J. Grant, Materials Science and Engineering, 98, 381~394, 1988.
- [2] P. Mathur, D. Apelian, and A. Lawley, Acta Met., Vol. 37, 429~443, 1989.
- [3] S. Annavarapu, D. Apelian, and A. Lawley, Metall. Trans. A, Vol. 19A, 3077~3086, 1988.
- [4] A. R. E. Singer, Powder Metallurgy, 25(4), 195~200, 1982.
- [5] R. H. Bricknell, Metall. Trans. A, Vol. 17A, 583~591, 1986.
- [6] T. S. Chin, Y. Hara, E. J. Lavernia, R. C. O'Handley, and N. J. Grant, J. Appl. Phys., 59(4), 1297~1300, 1986.
- [7] W. Kahl and J. Maier, The Potential of Spray Deposited Aluminium Alloys for High Tech Automotive Applications, Technical Report of Alusuisse-Lonza Services Ltd.
- [8] A. R. E. Singer, The International J. Powder Metall. and Powder Tech., 21, 219~224, 1985.
- [9] W. Kahl and J. Leupp, High Performance Aluminium Produced by Spray Deposition, Reprint from Metal Powder report, Vol. 45, 1990.