

신제조공정에 의한 AI계 항공재료 개발 현황(II)



박 원 옥

(KIMM 급냉응고그룹장)

- '74-'78 서울대학교 금속공학과 학사
- '79-'81 서울대학교 대학원 금속공학 석사
- '81-'85 서울대학교 대학원 금속공학 박사
- '89-'90 The University of Sheffield 연구원
- '85-현재 한국기계연구원 책임연구원



최 철 진

(KIMM 급냉응고그룹)

- '84. 2 서울대학교 금속공학과 학사
- '86. 2 한국과학기술원 재료공학과 석사
- '86. 3-현재 한국기계연구원 선임연구원



류 봉 선

(KIMM 급냉응고그룹)

- '89. 2 경북대학교 금속공학과 학사
- '91. 2 경북대학교 금속공학과 석사
- '91. 1-현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 론

분말야금 신제조공정에 의해 개발중인 AI계 항공재료는 기존 공정 및 재료에 비해 생산성증대 측면과 항공기의 경량화 및 고성능화 측면에서 제조공정상 유리한 잇점을 갖고 있다.

본고의 Part(I)에서 소개한 급냉응고법에 의한 AI합금개발은 우수한 소재특성으로 인하여 가장 실용화에 근접해 있는 기술로 평가되고 있지만, 제조공정이 복잡하고, 합금조성의 자유로운 선택이 제한되며, 분말입자의 표면에 산화물이 형성되는 문제점이 있으므로, 이를 보완할 수 있는 공정으로서 분무적층법(Spray Deposition)과 기계적합금화법(Mechanical Alloying : MA)이 연구되고 있다.

분무적층법은 지금까지 주로 철계합금판재 및 부품개발에 초점이 맞추어져 왔으나, 최근에는 AI계 및 Mg계 경량합금, Superalloy, 자성재료 등의 제조에도 많이 응용하고 있는데, 이 방법을 이용하여 소재를 제조할 경우, 급냉응고효과를 거둘 수 있는 장점외에도 생산속도가 높고, 분말입자의 산화방지가 가능하며, 성형성이 우수한 특징이 있으므로 신소재개발에 주요 공정으로서 관심의 대상이 되고 있다.

기계적합금화법은 분산강화형 합금의 성분조절이 용이하고, 미세조직체어가 타공정에 비해 비교적 쉬우므로, 현재 이 방법에 의해 Ni계 Superalloy가 이미 실용화되고 있으며, 고온용 AI계 합금에 대해서도 전세계적으로 활발하게 연구가 진행되고 있다.

이러한 분무적층법과 기계적합금화법은 산업화의 추진시에 설비투자 규모가 크고, 소재의 제조

원가가 비싼 단점으로 인하여 아직은 용도가 제한되고 있으나, 항공기용 재료분야에서는 경량소재로서의 이용이 기대되며, 특히 비강도·비강성이 높은 Al합금개발에 있어서는 그 수요가 점차 증대될 것으로 예측된다.

따라서, 본고의 Part(II)에서는 분무적층법과 기계적합금화법의 이론적배경과 연구개발현황을 파악함으로써, 첨단항공재료개발을 위한 신제조공정의 활용가능성을 타진하고, 국내연구의 방향정립에 필요한 선진 외국의 기술추이를 분석해 보고자 하였다.

2. 분무적층법(Spray Deposition)

2.1 원리 및 특징

산화피막 또는 표면석출물이 형성되기 쉬운 Al, Mg, Li, Si, Cr, Ti, Zr, Hf, 희토류원소, B, V 등의 원소는 용융상태에서 분무시켜 저온의 금형에 고속으로 충돌, 적층응고시키는 분무적층법을 이용하여 무편석의 미세조직을 가진 신합금을 제조할 수 있다. 이 분무적층법은 급냉응고와 성형을 동시에 수행하는 방법으로서, 이론밀도의 90% 되는 성형체를 제조할 수 있으며, 액적의 연속적 적층에 의하여 두꺼운 소재나 부품을 Near Net Shape Forming할 수 있는 특징이 있다. 분무적층법은 용탕으로부터 단일공정에 의하여 균일한 성형체를 제조할 수 있으며, 용사법과 달리 적층응고간 경계가 존재하지 않고, 등축성이 균일하게 분포되며, 합금원소의 거시적편석이 존재하지 않는 특성이 있음은 물론, 분말야금과정의 여러공정을 생략할 수 있는 장점이 있다. 또한 최근에는 다층(multi-layer) 재료나 복합재료(Composites)의 생산에도 그 가능성이 크게 주목되고 있는데, 다층재료의 분무적층은 서로 다른 성분의 용탕을 가진 두 개 이상의 노즐을 적절히 교대함으로써 효과적인 제조가 가능하며, 복합재료의 생산은 액적의 분사와 동시에 제2상의 미세한 고상입자(1~50 μ m)를 분사하여 줌에 의하여 연속적으로 입자강화형 금속기지복합재료를 제조할 수 있다.

2.2 역사적 배경

분무적층법의 원리는 1970년대에 영국 Swansea 대학의 A.R.E. Singer 교수에 의해 연구된 용융 금속의 직접판재성형공정에서 비롯되었다. 그의 연구의 대부분은 용융온도가 낮고 용융시의 점성 또한 낮은 Al합금으로부터 진행되었는데, 그림 1과 같이 100~150 μ m 정도 크기의 분말을 용융금속 분사점으로부터 약 45cm 정도의 거리에 놓여 있는 회전압연 roll에 분사·응고시켜 연속적으로 압연 판재를 만들어 내는 방법을 이용하였다. 그러나, 이 방법은 비교적 짧은 거리에서 분말이 응고함으로써 생기는 작업상의 문제점과 폭 방향으로 조적이 균일하지 못한 공정상 미비점으로 인하여 사용범위가 제한되어 왔다.

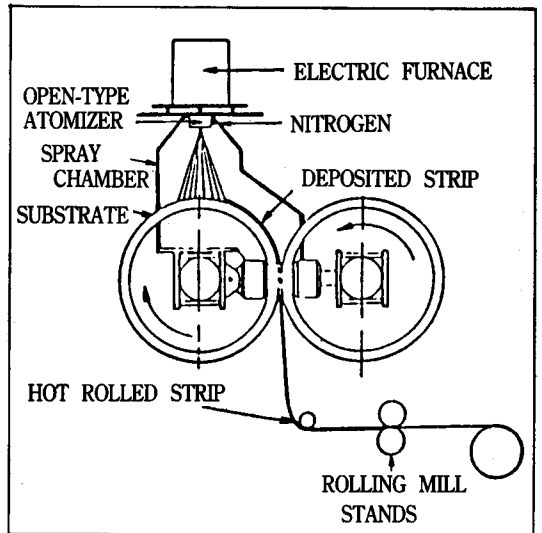


그림 1. Singer에 의해 고안된 설비 개략도

그로부터 수년 후 Singer교수의 기술 및 개념은 South Wales의 Osprey Metals Ltd.에서 단조예비 성형체 생산에 응용함으로써 실제 제품생산에 적용되기 시작하였다. Osprey 공정은 당시 판재의 압연에만 적용되었던 기존방법에 단조공정을 이용하여 최종부품의 형상을 다양화시키는 점이 특징으로서, 고속의 Ar 혹은 N₂가스를 사용해 용융금속을 분무시켜, 분말형상의 용융금속이 완전히 응고되지 않은 상태에서 열전도율이 높은 금속판재나 특정모양을 가진 금형에 분사되어 일정한 형상의 적층재료를 얻는 방법이다(그림 2).

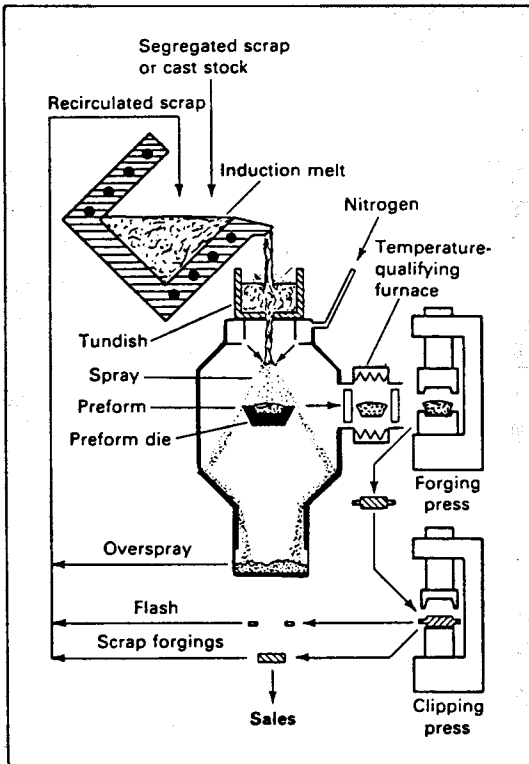


그림 2. Osprey 공정의 개략도

이러한 Osprey 공정과는 달리 '70년대말 영국의 Aurora Steels Co.에서는 원심분무법(Centrifugal atomization)을 이용하여 고합금공구강과 고속도강을 일명 Controlled Spray Deposition(CSD)법이라 부르는 분무적층법으로 제조하여 $10^3 \sim 10^4$ (K/s)의 냉각속도를 얻었으며, 적층성형체의 밀도도 이론 밀도의 96~98% 정도의 고밀도인 것으로 보고한 바 있다.

한편, '80년대에 들어와서는 미국 MIT를 중심으로 LDC(Liquid Dynamic Compaction)법이라는 공법으로 활발한 연구가 수행되었는데, 이 공정은 Osprey법과 비슷하나, 용융금속의 분무에 고속도(Mach 2.5이상)와 고주파(10^5 Hz)의 Shock wave를 발전시키는 USGA(Ultra-sonic Gas Atomizer) 장치를 이용하여 기존방법보다 $10^4 \sim 10^5$ (K/s)의 더 높은 냉각속도를 얻는 것이 특징이다. 상업적으로는 1980년 Sweden AB Sandvik Steel에서 처음으로 Osprey사에서 사용허가를 받아 고급튜브나 소형 부품제조에 이용한 이래 현재까지 세계각국 21개의

기관에서 사용허가를 받아 본격 생산 및 연구수행 중에 있다. 표 1에는 대표적인 주요생산개발품목과 Osprey 공정을 도입한 회사에 대하여 정리하여 예시하였다.

표 1. Osprey 공정에 의한 대표적 개발제품 및 제조회사

개발제품	기 관
Seamless Stainless Steel Tubing (100-440mm)	Sandvik Steel(Sweden)
Rod Mill Roll제조	Sumitomo Heavy Ind.(Japan)
Billets/disks ($\phi 100-250$ mm)	Alcan(U.K) Pechiney(France)
Aluminum Alloys	Alusuisse(Swiss) PEAK(Germany)
Ni-base Superalloy	G.E.(USA) Howmet(USA) ANO(Europe)
Steel Strip	Mannesmann-Demag Huettentechnik(Germany)
Copper Alloy	Olin(USA) Boillat(Swiss) Wieland Werke(Germany)

2.3 제조공정

분무적층법에 의한 제조공정을 최적화하기 위해서는 최소한 그림 3에 나타난 공정변수를 독립적으로 잘 제어해야 한다. 독립적변수는 용탕의 Superheating온도, 용탕분사속도, 가스분사속도, 가스의 종류, 분사가스압, 분사거리, 기관재료 및 상태, 기관이동상태 및 기관형상의 8가지로서 이들을 적절히 조절함으로써 조업공정을 확립할 수 있다. 판재제조공정의 주된 목표는 일반적으로 적층재 두께의 균일화와 표면까지 연결된 기공의 최소화인데, 이 경우에는 분무형상과 기관의 운동 및 온도가 중요한 변수가 된다. 그러나, 두께가 두꺼운 성형체의 적층용공의 경우에는 성형체의 표면온도 및 표면액상층의 두께가 일정하게 유지되어야 한다. 왜냐하면, 분무된 입자에 너무 많은

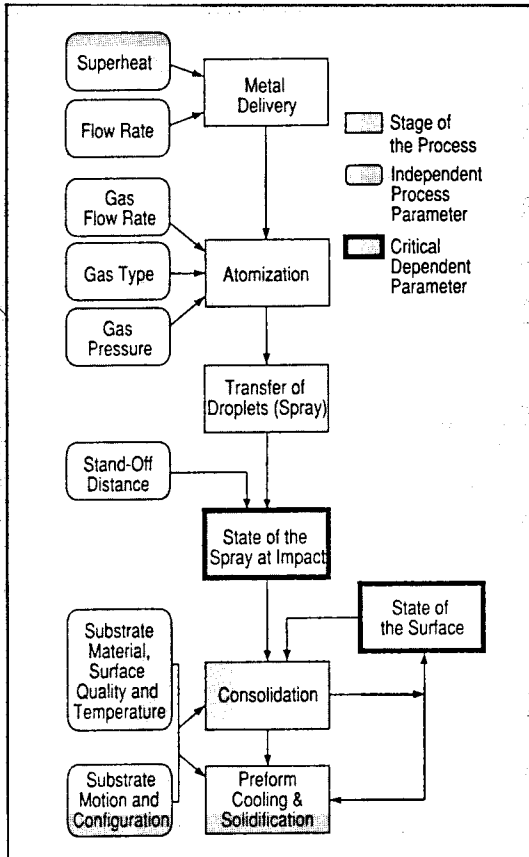


그림 3. 분무적층공정별 독립변수의 Flow Chart

고상이 함유되어 있다면 성형체 형성이 원활하지 못할 것이며, 반면에 입자에 너무 많은 액상이 포함되어 있으면 일반 주조공정과 동일해 질 것이다. 따라서, 가장 이상적인 액상량은 먼저 용고된 성형체의 공간을 충분히 채워 줄 수 있도록 성형체에 적층되기 직전 평균적으로 15~30% 내외로 조절하는 것이 가장 바람직하다.

성형체의 형상은 기판을 이동하는 방법에 따라 크게 달라지는데 주로 ① 분사축에 수직인 봉상의 회전 ② 분사축에 수직인 방향으로 왕복운동 ③ 기판을 경사지게 하는 방법 등을 단독 또는 조합하여 원하는 형상의 소재를 얻을 수 있다.

2.4 대표적 분무적층 Si합금

급냉용고법으로 제조된 알루미늄합금은 매우 작은 결정입도(1~10 μ m)와 미세한 석출상의 분산, 파포화고용체형성 등의 특성으로 인하여 많은 관심의 대상이 되고 있다. 그러나, 급냉용고법의 원천적 단점인 다량의 산화물함유라는 부정적영향을 배제하기 위해서는 분무적층법을 도입하는 것이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 표 2에는 각 합금 및 제조공정별 산화물함유량(wt.%)을

표 2. 제조공정별 각 합금의 산화물함유량

Alloy (wt.%)	Process	Oxide content (wt.%)
Al alloy 7075	H ₂ O atomization	0.457
Al alloy 7075	Inert gas atomization	0.209
Al alloy 7075	Rotating-cup process	0.0066
Al alloy 7075+Ni+Zr	LDC+extrusion	0.011
X2020-B	LDC+extrusion	0.010
Al-3.6Cu-3.0Li-0.5Mn	LDC+hot isostatic pressing	0.0080
Fe-Nd-B	LDC+extrusion	0.050
Al-3Li-1.5Cu-1Mg-0.2Zr	PM+extrusion	0.051
Al-3Li-1.5Cu-1Mg-0.2Zr	IM	0.005
Al-3.2Li-2.1Cu-0.83C	Mechanically alloying+extrusion	0.65
Al alloy 7090	PM+extrusion	0.2-0.5
Al-3.7Ni-1.5Fe	Air atomization	0.386
Al-3.7Ni-1.5Fe	Splat flakes	0.139
Al-3.7Ni-1.5Fe	Centrifugal atomization	0.020

제시하였는데, 분말야금법이나 급냉응고법에 비해 LDC를 이용한 분무적층법이 산화물을 매우 적게 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 제조공정별 피로특성을 그림 4에 나타내었는데, LDC법과 USGA법으로 제조하여 압출한 7000계 알루미늄 소재의 특성이 거의 유사한 것으로 분석되었다. 그러나, 분무적층법이 제조공정상 간편함을 고려할

때 제품의 형상에 따라 급냉응고법 보다 유리한 제조공정으로 생각된다. 표 3에는 상용 2024 알루미늄주조재와 급냉응고재, 분무적층된 소재의 인장시험 결과를 제시하였는데, LDC법으로 제조된 알루미늄소재가 항복강도와 인장강도면에서 급냉응고법이나 주조법에 비하여 월등한 것을 보여 주고 있다.

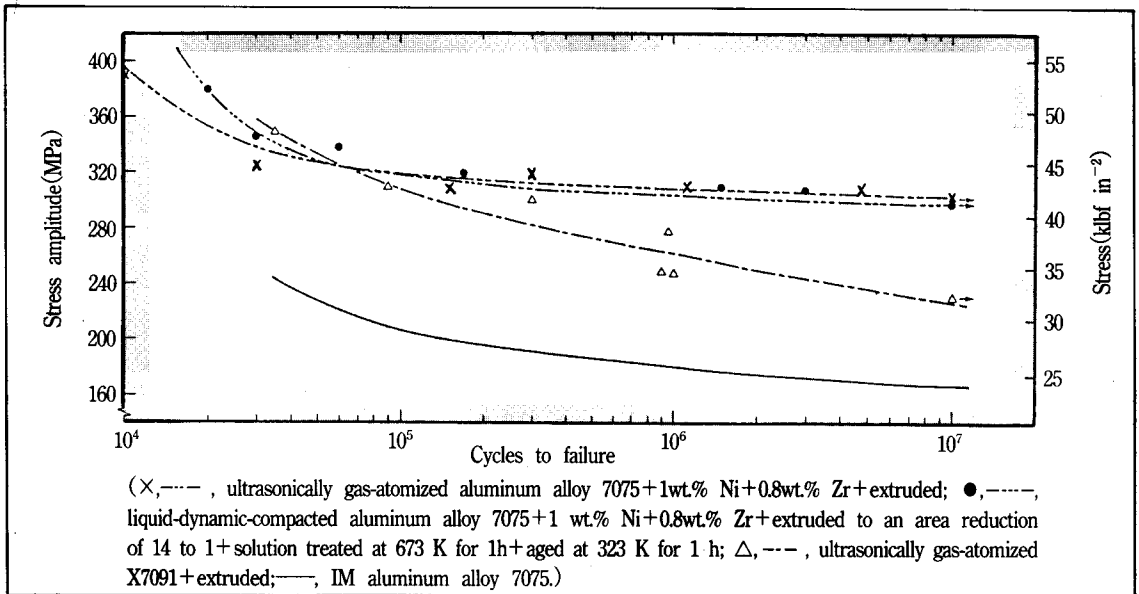


그림 4. 고강도 알루미늄합금의 제조공정별 피로특성

표 3. 알루미늄합금의 상온에서의 인장시험결과

Al Alloy(wt.%)	Condition	Yield strength (MPa(klbf in ⁻²))	Ultimate tensile	Elongation (%)	N _{UTS/yield} strength
			strength (MPa(klbf in ⁻²))		
2024-T4	Ingot product	287 (41)	441 (64)	20	-
2024-T4	Rapidly solidified splat	308 (44)	520 (75)	22	-
2024-T4	Liquid dynamic compacted	402 (58)	562 (81)	15	1.4
2024-T4	Liquid dynamic compacted	417 (60)	586 (85)	16	1.4
7075	Ingot material T-6 ^a	583 (78)	600 (87)	9	-
7075+1Ni+0.8Zr	IM T-6 ^b	750 (109)	762 (110)	2	1.03
7075+1Ni+0.8Zr	Rapidly solidified PM T-6 ^c	627 (91)	682 (99)	10	1.23
7075+1Ni+0.8Zr	^d	675 (98)	724 (105)	9	-
7075+1Ni+0.8Zr	^e	606 (88)	696 (101)	8	-
7075+1Ni+0.8Zr	Liquid dynamic compacted T-6	717 (104)	751 (109)	7	1.1
7075+1Ni+0.8Zr	Liquid dynamic compacted T4+T6	711 (107)	817 (118)	9	-

^aHot-extruded bar; aged for 24 h at 393 K.

^bHot-extruded bar, with an area reduction of 28 to 1; aged for 24 h at 393 K.

^cHot-extruded bar, with an area reduction of 30 to 1; aged for 24 h at 393 K.

^dHot-extruded bar, with an area reduction of 200 to 1; aged for 24 h at 393 K.

^eCold stretched 3.8% before aging at 393 K.

표 4. 알루미늄 2000계 합금의 제조공정별 상온인장시험결과

Al Alloy(wt.%)	Condition	0.2% Yield strength (MPa(klbf in ⁻²))	Ultimate tensile strength (MPa(klbf in ⁻²))	Elongation (%)	N _{uts} /yield strength
2024-1Li-T4	Rapidly solidified twin-rolled	388 (56)	524 (76)	21	1.5
2024-3Li-T6	Rapidly solidified twin-rolled	571 (83)	583 (84)	5	-
2024-1.6Li-T4	Rapidly solidified PM	382 (55)	486 (70)	8	1.4
2024-1.6Li-T4	Liquid dynamic compacted*	363 (53)	513 (74)	16	1.4
X2020-T6	Ingot product	531 (77)	570 (83)	3	-
X2020-T6	Rapidly solidified PM ^a	622 (90)	649 (94)	5	0.8
X2020-T7	Rapidly solidified PM ^b	622 (90)	649 (94)	5	0.5
X2020-T6	Liquid dynamic compacted ^b	648 (94)	666 (97)	7	-
X2020-T7	Liquid dynamic compacted ^c	587 (85)	621 (90)	7	1.1

^aLithium content, 1.55 wt.%; T6, single age; T7, double age.

^bLithium content, 1.74 wt.%; extrusion ratio, 28 to 1(area).

^cLithium content, 1.74 wt.%; extrusion ratio, 14 to 1(area).

*Notched tensile bar test.

최근에 연구된 7075계 알루미늄합금(7075+1wt.% Ni+0.8wt.% Zr)은 급냉응고에 의해 형성된 미세한 Al₃Ni와 Al₃Zr 석출물의 분산에 의하여 향상된 기계적 성질을 나타낸다. 열간압출된 LDC 소재는 인장강도 816MPa, 항복강도 740MPa, 연신률 9%의 특성을 보유하고 있는 것으로 보고되었는데, 이는 직경이 2~7μm인 미세한 결정입도와 입내에 균일하게 석출하는 미세한 석출물의 분산에 연유한다.

한편 LDC 법은 Li을 함유하는 알루미늄합금에 대해서도 많은 연구가 진행되었는데, 표 4의 인장시험결과와 같이 LDC법의 경우가 주조법과 급냉응고법보다 우수한 기계적성질을 보유하고 있다. 결론적으로 2024 알루미늄합금에 약 1wt.%의 Li을 첨가하여 LDC법으로 성형체를 제조한 경우, 강도와 연신률 및 notched strength(인장강도 513 MPa, 항복강도 363MPa, 연신률 16.4%, N_{uts}/항복강도=1.4)의 우수한 기계적성질의 조합을 얻을 수 있다.

이러한 고강도·저비중 알루미늄합금 외에도 '90년대에 들어와서는 급냉응고법으로 제조된 Allied Singal사의 FVS0812와 FVS1212 보다 우수한 합금을 분무적층법으로 제조하기 위한 노력이 병행되고 있다. 그러나, 고온용 알루미늄의 경우는

분무적층법으로 제조한 합금이 급냉응고법으로 제조한 합금보다 고온성질이 아직 낮은 상태인데, 이는 높은 냉각속도를 요구하는 고온재료의 특성상 분무적층시의 낮은 냉각속도에 기인하는 것으로 풀이된다. 이외에도 알루미늄의 분무적층시 산화물(Al₂O₃) 또는 탄화물(SiC) 입자를 동시에 분무시켜 금속기지 복합재료를 만드는 연구도 활발히 수행되고 있다.

3. 기계적합금화법(Mechanical Alloying)

3.1 원리 및 특징

기계적합금화법은 고상상태에서 기계적에너지에 의해 미세하고 균일한 합금분말을 제조하는 공정으로서, 1960년말 미국 INCO사의 Benjamin group이 가스터어빈용 Ni계 초내열합금에서 산화물 분산효과를 얻기 위해 시작한 기술이다. 이 공정은 고에너지 볼밀을 사용하여 금속을 합금화시키는 방법인데, 볼 사이에서 성분원소분말들의 압접과 파괴를 반복시켜 균일하고 미세한 조직을 가진 복합분말을 제조하는 신기술이다. 이 방법은 액상의 존재없이 상온부근의 온도에서 고상반응만으로 합금화가 이루어지므로 금속기지내에 금

속간화합물, 산화물, 탄화물 등을 분산시키기에 유리하며, 볼밀링시에 발생하는 높은 전위밀도에 의한 가공경화, 고용체형성에 따른 고용강화 등 모든 재료강화기구의 증첩으로 우수한 기계적특성을 기대할 수 있다.

또한 이 공정에 의해 준안정상의 합금은 물론 비정질 및 상태도에 존재하지 않는 상들이 발견됨에 따라 활발한 연구가 전세계적으로 수행되고 있다.

3.2 실용화 현황

Benjamin에 의해 시작된 기계적 합금화법은 ODS (Oxide Dispersion Strengthened Alloys : 산화물분산강화형 합금) 합금의 항공분야에의 적용면에서 성공적인 것으로 평가되고 있다. 1977년 GE F404-400엔진의 터어빈 정익에 MA 754(Ni-20Cr-0.3Al-0.5Ti-0.6Y₂O₃)이 채용된 이래 일본에서도 F16용 F110엔진 등 여러기종에 채용하고 있다고 알려져 있다. 터어빈 동익에는 γ' 상인 Ni₃(Ti, Al)과 산화물로 강화된 MA 6000(Ni-15Cr-4.5Al-2.5Ti-2Mo-4W-1.1Y₂O₃)의 적용이 연구되고 있는데, 1000°C이상의 고온에서 MA6000은 일방향응고 합금이나 단결정합금보다 우수한 크리프특성을 나타낸다. Fe기 ODS 합금인 MA965(Fe-20Cr-4.5Al-0.5Y₂O₃)는 Ni기 ODS 합금에 비교해서 판상으로의 성형이 용이하고 가공품이 가스터어빈의 연소통 또는 케이싱부품으로 개발되어 있다.

AI기 ODS 합금의 경우는 INCO사에서 개발한 Al-905XL(Al-4Mg-1.3Li-0.4O)이 항공기의 격벽에 적용되며, Al₂O₃와 AlO₃의 미세분산으로 우수한 강도를 열처리 없이 얻을 수 있고, 특히 단조품의 이방성이 적으며, 내식성이 용제 AI 합금보다 우수한 특징으로 인하여 용도확대가 기대되고 있다. 또한 고온강도를 개선한 AI합금으로서 Al-Ti합금, Al-Mn합금, Al-Fe-Si합금 등이 연구개발되고 있다.

3.3 제조공정

기계적합금화법에는 attritor, planetary mill, vib-

ratory mill, 기존의 수평식 ball mill을 사용하는 등 여러가지 방법이 있다. 이들 mill은 각기 장단점을 가지고 있으며, 분말이 ball 사이에서 받는 충격의 형태도 각기 차이가 있게 된다. 예를 들면, vibratory mill에서는 충격력이 매우 중요하게 되나, attritor 사용시에는 마찰력이 중요한 요소가 된다. 그리고, 가장 균일한 시편을 얻기에는 기존의 ball mill이 가장 적당하나 조업시간이 오래 걸리며, planetary mill은 회트류자석 등 밀도차이의 문제가 없는 합금에 한하여 주로 사용된다. 이러한 방법 중에서 가장 많이 사용되는 attritor는 고에너지를 줄 수 있는 효율적 방법으로서 그림 5와 같이 제조공정을 나타낼 수 있다. 즉, 합금화 하고자 하는 원료분말과 효과적인 조업을 위한 PCA(Process Control Agent)를 혼합하여 고에너지 교반장치내에 장입하여 볼 사이에서 분말의 파괴와 압접을 반복시켜 복합 금속분말을 제조한다. 초기 단계에는 원료분말이 볼 사이에서 강한 압축응력을 받아 판상형태로 변형되어 많은 냉간압접이 일어나, 합금분말의 미세조직은 층상구조(lamella structure)를 나타낸다. 공정초기에 분말의 형태변화는 원재료의 특성에 따라 서로 달라지게 된다. 연질의 분말은 볼의 강한 압축응력으로 인하여 판상형태로 변형되며, 금속간화합물과 같은 취성이 강한 재료의 분말은 분쇄가 일어나게 된다. 이러한 분말의 초기 소성변화는 분말표면의 산화물 등을 제거하여 깨끗한 표면의 형성이 가능하게 하므로 분말간의 압접이 쉽게 이루어진다. 다음 단계에서는 압접과 파괴가 계속되면서 금속분말이 볼 사이에서의 전단응력으로 인해 파괴가 일어나서 층상구조는 무질서한 변형이 일어나고 첨가원소의 과포화고용이 일어난다. 그 다음에는 중간 냉각 압접단계로 층상구조의 두께가 1 μ m이하로 미세해지며, 마지막 단계에서는 층상구조가 더 이상 관찰되지 않으며, 분산상 사이의 평균거리가 같고, 또한 포화경도 값을 갖는 정상상태에 이르게 되는 것이 일반적인 현상이다. 이러한 과정을 거쳐 제조된 분말은 성형 및 thermomechanical 과정에서 재결정 및 결정립성장이 일부 일어나지만 최종 미세조직은 다른 공정에 의한 것보다 매우 미세해진다.

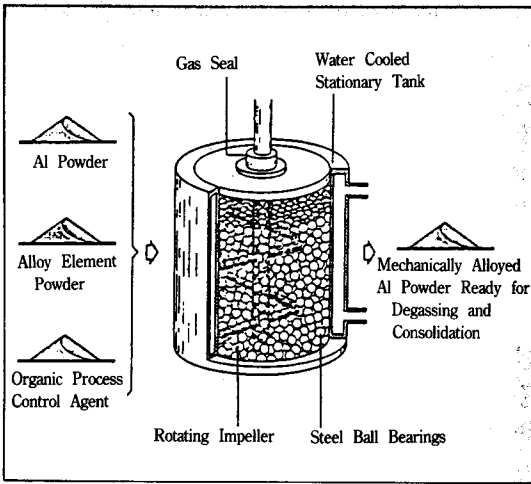


그림 5. Attritor에 의한 제조공정 개략도

3.4 대표적 분산강화형 Al합금

종래의 Al-Mg계 합금은 내식성이 매우 우수하지만, 주로 냉간가공에 의해 강도를 목표치까지 올려야 하므로 사용이 제한적인 문제점이 있기 때문에 기계적 합금화법에 의한 미세결정 및 분산강화형 합금개발이 연구의 대상이 되고 있다. 표 5는 기계적합금화법으로 개발된 Al-Mg계 Al-9052 합금의 특성을 나타낸 것인데, 기계적성질은 7000계열 Al 합금보다 약간 낮으나, 해양성 분위기에서의 내식성은 월등한 것을 알 수 있다.

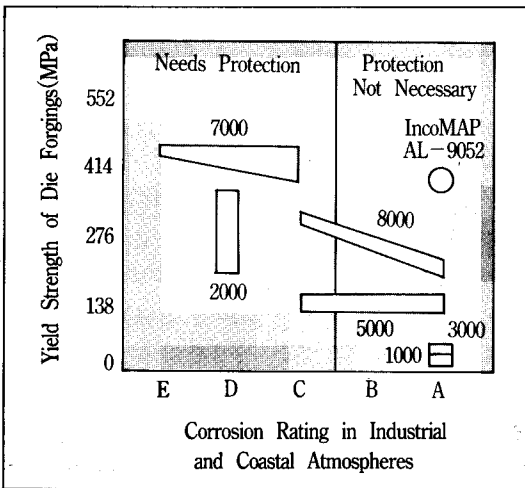


그림 6. Al-9052합금의 강도와 내식성 비교 (A : Best, E : Worst)

표 5. IncoMAP Alloy Al-9052의 특성

Composition	
Al-4% Mg-0.4% O-1.1% C	
Density	
2.68 Mg/m ³	
Mechanical properties	
	Longitudinal
Ultimate Tensile Strength	450 MPa
0.2% Offset Yield Strength	380 MPa
Elongation	13%
Fracture Toughness, K _{IC}	44 MPa√m
Elastic Modulus	76 GPa
Corrosion	
Marine Atmosphere, 398 Days	0.009 mm/yr.
Alternate Immersion*	0.01 mm/yr.
Stress-Corrosion Cracking	>380 MPa
Threshold*	
Melting Point	
608°C	

* Alternate immersion in 3.5% NaCl according to ASTM standards G44-75 and G38-75; 90-day exposure.

또한, 저비중합금으로 쓰이는 Al-Li계 합금은 단조공정 및 용접에서 공정상 어려운 문제점이 있다. 따라서, INCO사에서는 앞에서 언급한 바와 같이 기계적 합금화법으로 Al-905XL 합금을 개발하여 항공기격벽재료로서 실용화 하였다. 이 합금의 특징은 (1) 비중을 낮출 수 있는 첨가원 소만을 선택하고 (2) 첨가량을 용질이 완전히 고용되는 범위로 정하였으며 (3) 기계적합금화 처리 중 산화물 및 탄화물에 의한 분산강화효과를 얻도록 설계한 것이다. 표 6은 Al-905XL 합금의 특성을 나타낸 것으로, 7075-T73 합금에 비해 비중이 약 8% 낮으면서 강도는 거의 비슷한 값을 보이고 있다.

한편, 항공기동체 및 엔진재료로 쓰이는 고온 용합금의 경우에는 Al-Ti계 합금을 중심으로 연구되고 있는데, 현재까지 Allied Signal사의 FVS-0812 합금보다 고온성질이 떨어지지만 Alcoa사의 Al-Fe-Ce 합금 보다는 약간 우수한 결과를 얻고 있다. 기계적 합금화된 Al-Ti계 합금은 비중이 낮고, 석출상인 Al₃Ti의 용융점(1350°C)이 매우 높으며, Al기지에 Ti의 평형고용량과 확산속도가

매우 작아 고온에서 매우 안정할 뿐 아니라, 비평형반응에 의하여 과포화 고용한을 급냉응고법에 비해 훨씬 크게 증가시킬 수 있으므로 항공재료로서의 잠재력을 갖고 있는 것으로 풀이된다. Al-Ti 합금은 100~300nm의 결정입도, 20~250 nm의 Al₃Ti 입자, 30~250nm 크기의 Al₂O₃ 및 Al₄C₃ 등 매우 미세한 조직으로 인하여, 성형한 후에도 우수한 기계적 성질을 나타내는 것으로 알려져 있다. 표 7은 현재 개발 중인 Al-12Ti 합금의 기계적 성질을 나타낸 것이며, 그림 7은 타 합금과의 고온성질비교를 나타낸 것으로, 종래의 Al합금에 비해 탄성률은 약 50% 이상 증가하고, 비중은 낮으면서, 연성 및 고온 강도는 매우 우수함을 알 수 있다.

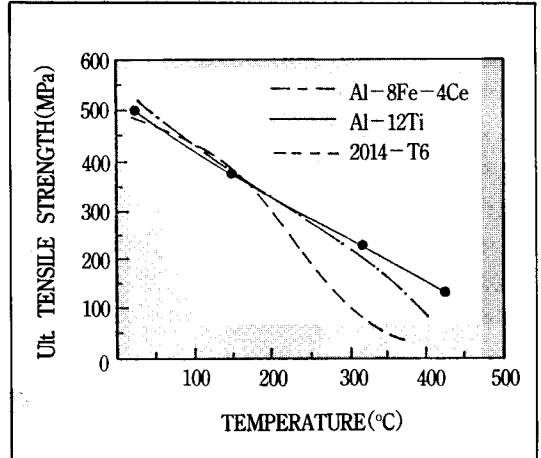


그림 7. MA Al-12Ti와 급냉응고된 Al-8Fe-4Ce 및 주조된 2014-T6의 고온 인장강 비교

표 6. IncoMAP Alloy Al-905XL 단조품의 특성

<u>Composition</u>		
Al-4% Mg-1.3% Li-0.4% O-1.1% C		
<u>Density</u>		
2.58 Mg/m ³		
<u>Mechanical Properties</u>		
	<u>Longitudinal</u>	<u>Short Transverse</u>
Ultimate Tensile Strength	520MPa	480 MPa
0.2% Offset Yield Strength	450 MPa	420 MPa
Elongation	9%	6%
Fracture Toughness, K _{1c}	30 MPa√m	30 MPa√m
Elastic Modulus	80 GPa	
<u>Corrosion</u>		
General		0.003 mm/yr.
Stress-Corrosion Cracking Threshold*		345 MPa
<u>Melting Point</u>		
593°C		

*Alternate immersion in 3.5% NaCl according to ASTM standards G44-75 and G38-75;90-day exposure.

표 7. MA Al-12.5%Ti 합금의 특성

Condition	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elong. (%)	Elastic Modulus (GPa)	Density (Mg/m ³)
Extruded	448	371	10	103.6	2.90
Hot Rolled	495	445	8.4	104.0	2.90

4. 결 언

현대에 들어와 빠른 성장을 보이고 있는 항공 우주분야는 더욱 가혹한 분위기에서 사용가능한 신소재의 개발을 우선적으로 요구하고 있는데, 이러한 수요에 대응하기 위한 방법으로서 급냉 응고법과 분무적층법 및 기계적합금화법은 그 제조공정상의 여러 유익한 특성으로 인하여 연구개발의 주된 관심의 대상이 될 것으로 전망된다. 분무적층법은 급냉응고법을 일부 보완한 기술이지만 그 용도를 확대하기 위해서는 비교적 낮은 냉각속도를 높이는 방안이 연구되어야 할 것으로 보이며, 기계적 합금법은 산업화 및 실용화를 위해서 소재를 대량생산할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다. 본고에서 소개한 신제조공정은 분말야금법에 기초를 한 내용으로서 주된 기술이 단독으로 응용되고 있지만, 급냉응고분말을 다시 기계적합금화 하는 등 산업화 및 특성향상을 위해 복합적으로 활용될 가능성도 매우 큰 편이다.

분말야금법 이외에도 항공재료연구관련 신기술은 용탕단조, Rheocasting 및 Rheoforming, fiber를 포함한 금속기복합재료(FRM) 성형기술 등 매우 다양하지만, 첨단기술의 실용화를 위해서는 제조공정의 경제성과 물성의 향상이 같이 병행되어 개선되어야 하므로 이러한 측면에서 분말야금 신제조공정에 의한 알루미늄계 항공재료개발은 가장 실현가능한 유망분야의 하나로 분석된다.

참 고 문 헌

[1] R.L. Ashbrook : "Rapid Solidification Technology, Source Book", American Society for Metals, 1983.
 [2] S.J. Savage and F.H. Froes : Journal of Metals, 4, p.20, 1984.
 [3] P. Mathur, S. Annavarapu, D. Apelian and A. Lawley : Journal of Metals, 10, p.23, 1989.
 [4] Metal Handbook, Vol. 7, "Powder Metallurgy" p. 530,
 [5] 김명호 · 천병선 : 대한금속학회회보, Vol. 4, No. 4, p.342, 1991.

[6] 철강기술정보, 1, 통권 9호, 1993.
 [7] R.H. Bricknell : Metall. Trans., 17A(4), p.583, 1986.
 [8] A.R.E. Singer and R.W. Evans : Met. Tech., 10, p.61, 1983.
 [9] K.K. Sankran and N.J. Grant : Materials Science and Engineering, 44, p.213, 1980.
 [10] 김진천 : 한양대학교 재료공학과 석사학위논문, 1991.
 [11] J.S. Benjamin : "New Materials by Mechanical Techniques", (Eds. : E. Arzt and L. Schultz) DFG. Adenauerlee p.3, 1989.
 [12] J.S. Benjamin : Metall. Trans. 1, p.2943, 1970.
 [13] J.J. Fisher and R.M. Haebrie : "Modern Developments in P/M", 21, 461, 1988.
 [14] R. Sundaresan and F.H. Froes : J. Metals, 39, p.22, 1987.
 [15] J.S. Benjamin and J.E. Volin : Metall. Trans., 5, p.1929, 1974.
 [16] P.S. Gilman and J.S. Benjamin : Ann. Rev. Mater. Sci., 13, p.279, 1983.
 [17] R.D. Schelleng and S.J. Donachie : MPR, 10, 575, 1983.
 [18] R.D. Schelleng : Journal of Metals, 1, p.32, 1989.
 [19] F.H. Froes : MPR, 1, p.59, 1989.
 [20] F.H. Froes : Journal of Metal, 12, p.24, 1990.
 [21] M. Ruhr, I. Ucock, E. Lavemia and J. Baram : "Light-Weight Alloys for Aerospace Applications (Eds. : E.W. Lee, E.H. Chia & N.J. Kim) TMS P.A., p.79, 1989.
 [22] G.S. Murty, M.J. Koczak and W.E. Frazier : Scripta Metall., 21, p.141, 1983.
 [23] R. Lurf and D.G. Morris : Mat. Sci, and Eng, 128A, p.119, 1990.
 [24] Olivier Beffort, P.J. Uggowitz and Markus O. Speidel : Proceedings of the 3rd International Conference on Aluminum Alloys, Trondheim, Norway, p.46, 1992.
 [25] 강석봉, 임차용 : 기계와 재료, Vol. 3, No. 4, p.45, 1991.