

분말야금 신제조공정에 의한 AI계 항공재료 개발 동향

박원욱 · 류봉선 · 최철진

한국기계연구원 재료공정연구부

R & D Trend of Aluminum-Based Aircraft Materials via Advanced P/M Processes

Won-Wook Park, Bong-Sun You and Chul-Jin Choi

Korea Institute of Machinery and Metals, Materials Processing Dept.,
Changwon 641-010, Korea

1. 서 론

항공재료 및 부품제조산업은 첨단기술이 집약되는 고부가가치 산업으로서, 선진국에서는 항공재료개발에 대한 연구와 투자가 활발히 진행되고 있으며, 현재 차세대 항공기로서 초음속 여객기(SST), 극초음속 여객기(HTS), 수직이착륙기(VTOL) 및 단거리 이착륙기(STOL) 등에 적합한 신소재의 개발이 주목을 받고 있다. 이러한 차세대 항공기의 경우에는 빠른 비행속도에 따른 기체표면의 온도상승을 견딜 수 있고, 항공기 엔진의 무게를 줄일 수 있는 내열경량 재료가 요구되고 있다. 항공기용 경량구조재에 관한 연구는 지금까지 Al, Mg 및 Ti 합금에 관한 연구가 주종을 이루었는데, 최근들어 분말야금 신제조공정이 도입되면서부터 미세결정립을 가진 고강도 경량구조재료개발이 가능하게 되었다. 특히 항공기용 AI계 경량재료에 있어서는 급냉응고법, 분무적층법 및 기계적 합금화법이 활용되어 극한 상황에서 사용가능한 신소재의 개발 및 실용화 노력이 활발히 전개되고 있는 추세이다.

급냉응고기술은 용융상태에서 열전도도가 높은 매체를 통하여 높은 속도로 직접 냉각 및 응고시키는 방법으로서, AI합금에 있어 첨가원소의 과포화용량을 수백 배까지 증가시킬 수 있으며, 응고조직이 미세하고, 편석이 방지되므로 항공재료로서 우수한 기계적성질을 부여할 수 있다. 한편, 분무적층법은 지금까지 주로 철계 합금판재 및 부품개발에 초점이 맞추어져 왔으나, 최근에는 AI계 및 Mg계 경량합금,

superalloy, 자성재료 등의 제조에도 많이 응용되고 있는데, 이 방법을 이용하여 소재를 제조할 경우, 급냉응고효과를 얻을수 있는 장점 외에도 생산속도가 높고, 분말입자의 산화방지가 가능하며, 성형성이 우수한 특징이 있으므로 신소재개발에 주요 공정으로서 관심의 대상이 되고 있다. 기계적합금화법은 분산강화형 원소의 성분조절이 용이하고, 미세조직 제어가 타공정에 비해 비교적 쉬우므로, 현재 이 방법에 의해 Ni계 superalloy가 이미 실용화되고 있으며, 고온용 AI계 합금에 대해서도 전세계적으로 활발하게 연구가 진행되고 있다.

이러한 새로운 제조공정들은 산업화의 추진시에 설비투자 규모가 크고, 소재의 제조원가가 비싼 단점으로 인하여 아직은 용도가 제한되고 있으나, 항공재료분야에서는 경량소재로서의 이용이 기대되며, 특히 비강도 비강성이 높은 AI합금개발에 있어서도 그 수요가 점차 증대될 것으로 예측된다.

따라서, 본고에서는 급냉응고법, 분무적층법, 기계적합금화법의 최근 연구개발 현황을 파악함으로써, 첨단항공재료 개발을 위한 신제조공정의 활용가능성을 타진하고, 국내연구의 방향정립에 필요한 새로운 합금의 연구개발동향 및 기술추이를 분석해 보고자 하였다.

2. 급냉응고기술

(RAPID SOLIDIFICATION TECHNOLOGY)

2.1. 제조공정

급냉응고법에 의한 구형, flake 합금분말과 리본 제조 기술로는 gas atomization법, melt spinning법, rotating electrode법, splat quenching법 등이 있으며, 1차공정에서 직접 분말을 얻을 수 있는 공정과 1차공정 후 분쇄공정이 필요한 방법으로 나눌 수 있다.

Gas atomization법은 직접 구형의 분말을 얻을 수 있는 비교적 간단한 원리의 방법으로서 용해한 합금의 줄기가 음속에 상당하는 고압의 분사가스(Ar, N₂ 또는 He)와의 충돌에 의해 분산 및 비산하면서 응고되어 분말화되는 방법이다. Water atomization법과 더불어 twin-fluid atomization이라고도 하며 용해금속의 표면장력과 점도를 제어함으로써 분말의 특성이 조절된다. 그 외에도 분말특성에 영향을 미치는 인자는 분사압력, 분위기 등 여러가지가 있으나 중에서도 용탕의 분사압력이 높거나 분사가스의 유량 또는 유속이 커지면 분말의 미세해지는 경향을 띤다. Alcoa에서 채택한 gas atomization법은 다른 분말제조법에 비해 냉각속도가 10²~10⁴°C/s 정도로 느리지만 분당 수 kg의 생산능력이 있고 제조된 분말이 거의 진구에 가까다는 장점이 있다.

반면 melt spinning법은 고속으로 회전하는 Cu 동 열전달계수가 큰 wheel에 용융금속을 분사하는 방법으로서, 용해 crucible의 크기를 크게 하면 대량생산과정에서 gas atomization법에 상당하는 생산능력을 갖출 수 있다. 또한 crucible의 slot 모양을 변화시켜, 제조되는 리본의 두께나 폭을 변화시키고, 분사압, wheel과 slot의 간격, wheel의 회전속도 등을 제어함에 따라 10⁶°C/s 이상의 냉각속도를 얻을 수 있기 때문에, 기존에 고용한의 제한으로 인해 합금의 설계가 곤란했던 원소의 고용도 가능하다는 장점과 아울러 미세하고 균일한 조직을 얻을 수 있다는 잇점도 있다. Allied Signal사에서는 각종 비정질 및 미세결정립 리본 및 분말을 melt spinning법을 이용하여 생산하고 있으며, 최근에 리본제조, pulverization, 분말분급, consolidation 및 billet 제조를 연속공정에 의해 생산하는 방법이 실용화 단계에 와 있다.

Gas를 이용하는 다른 방법의 분말제조법으로 vacuum atomization법이 있는데, 이 방법은 고압하에서 다량의 가스를 과포화하고 있는 용탕을 진공분위기에 노출시켰을 때 용탕내 가스의 부피가 팽창

하면서 배출되는 현상을 제어하여 용탕의 분산이 일어나게 하는 원리로서 superalloy의 제조에 이용되고 있다. 항공기용 Ti 합금분말, 복사기 carrier용 합금분말 제조에 이용되는 rotating electrode법은 전극봉 형상의 재료를 초당 200~300회 정도로 회전시키면서 한쪽 끝을 plasma arc나 electron beam에 의해 소량씩 용해시키고, 용해된 액상을 회전 원심력에 의해 분산시킴으로써 분말화시키는 방법이다. 제조되는 분말의 형상이 진구에 가까우나 입도가 100 μm 이상으로 크고 냉각속도가 gas atomization법에 비해서 느리다는 특징이 있다. 이외에 회전체의 원심력에 의한 용탕분사방법으로 centrifugal atomization법이 있으며, 고강도의 충격 pulse에 의해 용탕을 분사시키는 ultrasonic gas atomization법 등 분말제조방법은 상당히 여러종류가 있다. 그러나, 이러한 방법들 중에서 centrifugal atomization이나 splat quenching법이라고 하는 소규모의 분말제조 방법보다는 위에서 언급한 gas atomization법이나 melt spinning법이 경제적이고 대량생산에 유리하므로 산업화에 주로 이용되고 있다.

한편, 이와 같이 제조된 급냉응고분말은 can에 장입되어 공간압축된 후, 350~400°C에서 1시간 정도 degassing한 상태에서 용접된 can을 압출하거나 degassing하면서 연속적으로 압출하여 성형하게 된다. 이 경우 압출온도는 일반적으로 400°C보다 낮은 온도로 유지되어야 급냉응고된 특성을 그대로 유지할 수 있으며, 분말입자간의 완전한 결합을 위해서는 약 20:1 이상의 압출비로 성형해야 한다. 그런데 최종제품의 형상이 봉재나 판재의 형태가 아니고 약간 복잡한 형태의 성형에 있어서는 hot pressing을 이용하여 형상을 제어하는 방법이 많이 쓰인다. 이외에 압연이나 단조, hot isostatic pressing, dynamic 또는 폭발성형 등이 연구되고 있는데 Al합금의 경우에는 표면산화층의 존재로 인하여 사용범위가 제한되는 경우가 대부분이다.

2.2. 대표적 경량 구조재료

2.2.1. 고강도/내식합금

Al계 고강도 내식합금은 주로 상용화된 2xxx계와 7xxx계 합금의 성분을 약간 수정하여 급냉응고한 재료가 주로 개발되고 있으며, 그 중에서도 7xxx계

Table 1. Room temperature mechanical properties of high strength/corrosion resistant P/M aluminum alloys

Alloy	Temper	0.2% YS (MPa)	UTS (MPa)	% El.	K _{IC} (MPa√m)
IM 7075	T6	510	572	13	—
PM 7075(+1Ni+1Fe)	extruded	634	717	9	—
PM 7090	T7 extruded	586	627	10	26
PM 7091	T7 extruded	545	593	12	44
PM CW 67	T7 extruded	580	614	12	47

7075 : Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr
7090 : Al-8.0Zn-2.5Mg-1.0Cu-1.5Co
7091 : Al-6.5Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.4Co
CW67 : Al-9.0Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.14Zr-0.1Ni

합금에 대한 연구가 최근 연구의 대상이 되고 있다. 지금까지 약 1 wt% 정도의 천이금속원소를 첨가한 7090, 7091, CW67 등이 주로 생산되어 왔는데 합금별 조성 및 특성을 표 1에 나타내었다. 이들 합금은 분무법으로 분말을 제조한 후 공간성형, vacuum degassing, vacuum hot pressing, 압출/단조에 의한 열간가공에 의해 성형되는 공정을 거친다. 표 1의 상온에서의 기계적 성질을 주조재와 비교해 보면, 급냉응고법에 의해 연성의 감소없이 주조된 합금보다 약 20% 정도로 항복강도와 UTS값이 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 기계적 성질 향상은 미세조직, 용질의 과포화응용 및 석출물의 미세분산 등에 연유한 것으로서, 특히 높은 파괴인성과 부식저항성 및 응력부식파괴 저항은 landing gear와 landing edge flap 등으로의 응용에 적합하므로 연구개발에 관심을 끌고 있다.

이들 합금이 경량화를 기초로 가격경쟁력을 갖기 위해서는 기존의 7075합금에 비하여 더 우수해야 하는데, 개발된 합금 중 특히 CW67합금은 강도가 30% 더 높고, 인성이 40% 더 크며, 피로저항에 있어서도 더 월등하므로 유지보수에 문제가 있는 airframe용 7075합금의 대체재료로 적합한 것으로 평가되고 있다. 따라서 landing edge flap design (Vough), 압출된 forward longerons(Warner Robbins Air Logistics Center), landing gear door actuator(Boeing) 등은 이미 급냉응고재료로 제작되어 비행시철 중에 있다.

2.2.2. 저비중/고탄성합금

Al-Li계 합금의 특징은 Al계 타 합금보다 현저하게 낮은 밀도와 높은 탄성계수를 보인다는 점이다. 보

고된 바에 의하면, 일반적으로 Li을 1 wt% 첨가할 때 Al합금의 비중은 약 3% 감소하고, 강성률은 약 6% 정도 증가한다.

따라서 현존하는 항공기 디자인에 이 재료를 사용하면 약 8%의 중량감소효과가 예상되며, 새로운 디자인을 할 경우 15% 정도까지 중량감소효과가 기대되고 있다. 이러한 이유로 인하여 Al산업계에서는 Al-Li합금의 개발을 7075 Al합금개발(43년) 이래로 최대의 중요 개발사례로 간주하고 있다. 주조법으로 개발된 Al-Li계 합금 중에서 현재 구미에서 가장 중점을 두는 합금은 Al-Li-Cu계와 Al-Li-Cu-Mg계로서 2~3%의 Li을 포함하는데, 강도, 신율이 종래의 고력알루미늄합금(2024 또는 7075)과 동일한 정도이며, 비강도 및 비탄성율이 각각 10% 가량 증대되고 있다. Al-Li-Cu계와, Al-Li-Cu-Mg계는 8090 및 8091로써 등록되고 있으며 구미의 각 회사들은 2090, 8090 및 8091에 상당하는 자사제품을 개발하고 있는데, Alcoa사는 Alithalite A, B, C, Alcan사는 Lital A, B, C, Pechiney사는 CP 271, 274, 276의 명칭을 사용하고 있다. 그러나, Li은 Al에 4 번째로 큰 고용도를 가지면서도 주조할 경우 편석이 심하여 약 2.5 wt% 이상은 첨가할 수 없는 단점이 있으며, 그 이상 첨가할 경우 연성과 파괴인성이 현저히 저하된다.

따라서, 이러한 문제점들은 급냉응고법을 이용하면 쉽게 해결할 수가 있다. 예를들어 급냉응고법을 사용하면 기계적 성질에 악영향을 끼치는 조대한 intermetallic상을 형성하지 않고 5 wt%까지 Li을 첨가할 수 있다. 급냉응고의 또 다른 장점은 shear-resistant dispersoid를 형성하는 합금원소를 다량

Table 2. Room temperature tensile properties of RS Al-Li alloys

Alloy	Temper (°C/hr)	0.2% YS (MPa)	UTS (MPa)	% El.
Atomized alloys				
Al-3Li-1Mg-1.5Cu-0.2Zr	190/8	509	596	3.1
Al-3Li-0.2Zr	160/32	454	492	10.5
Al-4Li-0.2Zr	160/32	449	509	6.0
Al-4Li-1Cu-0.2Zr	160/32	473	510	3.8
Al-4Li-1Mg-0.2Zr	160/32	408	514	4.9
Jet-cast ribbon alloys				
Al-3.2Li	—	462	600	8.0
Al-3.1Li-2.1Cu-1.0Mg-0.45Zr	170/4+190/16	531	607	6.1
Al-3Li-2.1Cu-1.5Mg-0.51Zr	160/4+180/16	554	632	5.5
Al-2.8Li-1Cu-0.5Mg-0.5Zr	—	442	534	5.2

Table 3. Mechanical properties of high-temperature RS aluminum alloys

Alloy	Temper	0.2% YS (MPa)	UTS (MPa)	% El.	K _{IC} (MPa √m)
Al-7.1Fe-6.1Ce (extruded and rolled)	RT	524	567	5.7	26
	149	403	427	5.0	
	232	278	304	5.0	
	316	150	176	6.5	
Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si (FVS 0812)	RT	390	437	10	31
	150	340	372	7	
	204	312	341	8	
	280	280	308	9	
	315	244	261	9	
Al-12.4Fe-1.2V-2.3Si (FVS 1212)	RT	605	636	8.7	
	245	276	286	6.7	

첨가할 수 있다는 점이다. 표 2는 최근에 급냉응고 법으로 개발된 Al-Li계 합금의 상온인장시험 결과를 나타낸 것으로 주조된 2xxx계 합금보다 우수한 피로저항, 내식성, 응력부식피로저항 등을 보유하고 있음을 알 수 있다.

실용화 및 경제성 측면에 있어서는 Al-Li합금이 가지는 초소성(superplastic forming: S. P. F.)을 이용할 경우 경제적으로 항공기부품을 제조할 수 있으므로, 영국의 Alcan Aluminum사는 계열회사인 미국의 Superform USA Inc.와 공동으로 초소성을 갖는 Alcan의 8090 Al-Li 합금을 개발하여 양산체제를 준비중이다. 또한 미국의 General Dynamic사와 Fairchild Republic사에서 Al-Li 합금을 항공기 동체 및 항공기 부품으로 사용하기 위한 많은 가공 기술 개발연구가 완료된 상태에 있다.

2.2.3. 고온용 Al합금

천이금속은 Al에 대한 평형고용량이 매우 낮고 확산속도 또한 매우 느리기 때문에 Al계에 첨가되어 고온용합금을 개발하기에 필수적인 요소를 갖추고 있으므로, 급냉응고에 의해 과포화고용량의 증가가 현저한 Al-천이원소 합금계에 관하여 특히 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나, 2원계 Al합금에서는 최적의 고온특성을 얻을 수 없으므로 3원계 또는 4원계 Al합금이 기존의 Ti합금의 대체재료로 주된 관심의 대상이 되고 있다. 지금까지 개발된 대표적인 합금은 Alcoa의 Al-Fe-Ce합금, Allied Signal의 Al-Fe-V-Si합금, Pratt & Whitney의 Al-Fe-Mo합금, Alcan의 Al-Cr-Zn-Mn합금 등인데, 고온에서의 기계적 특성이 가장 우수한 것은 Allied Signal의 FVS 0812와 FVS 1212로서 표 3에 Al-Fe-Ce과 Al-Fe-

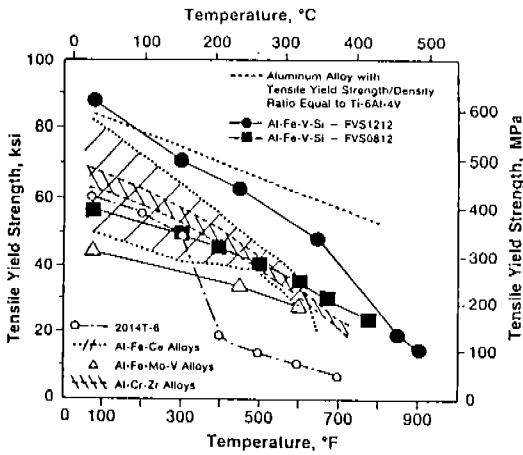


Fig. 1. Elevated temperature tensile yield strengths of various high-temperature aluminum alloys and standard aerospace aluminum alloys.

V-Si합금의 온도별 인장시험결과를 나타내었다. Al-Fe-V-Si합금 중 FVS 0812는 상온에서의 인장시험 값은 비교적 낮으나 고온에서는 Al-Fe-Ce보다 월등하며 FVS 1212는 상온과 고온 모두에서 높은 항복강도, UTS, 연신률을 나타내고 있다.

고온용 Al합금은 항공기엔진의 compressor stator 등의 vane와 rotor등에 사용될 예정이므로 높은 온도에서의 항복강도가 무척 중요하다. 그림 1은 지금까지 개발된 합금들의 온도에 따른 항복강도의 변화를 보여주고 있는데, Allied Signal사에서 개발한 Al-Fe-V-Si이 가장 우수한 특성을 보유하고 있는 것으로 보고되어 있다.

일반적으로 고온용 Al합금의 요구목표중 항복강도는 350°C에서 300MPa의 값을 유지해야 하는데, 이 목표에 거의 부합되는 FVS 1212와 FVS 0812 합금은 현재 기존재료인 Ti을 완전히 대체하기 위해 부품으로 제작되어 비행시험중에 있다.

3. 분무적층법(SPRAY DEPOSITION)

3.1. 제조공정

산화피막 또는 표면석출물이 형성되기 쉬운 Al, Mg, Li, Si, Cr, Ti, Zr, Hf, 희토류원소, B, V 등의 원소는 용융상태에서 분무적층법을 이용하여 무편석의 미세조직을 가진 신합금을 제조할 수 있다. 이 분무적층법은 급냉응고와 성형을 동시에 수행하는

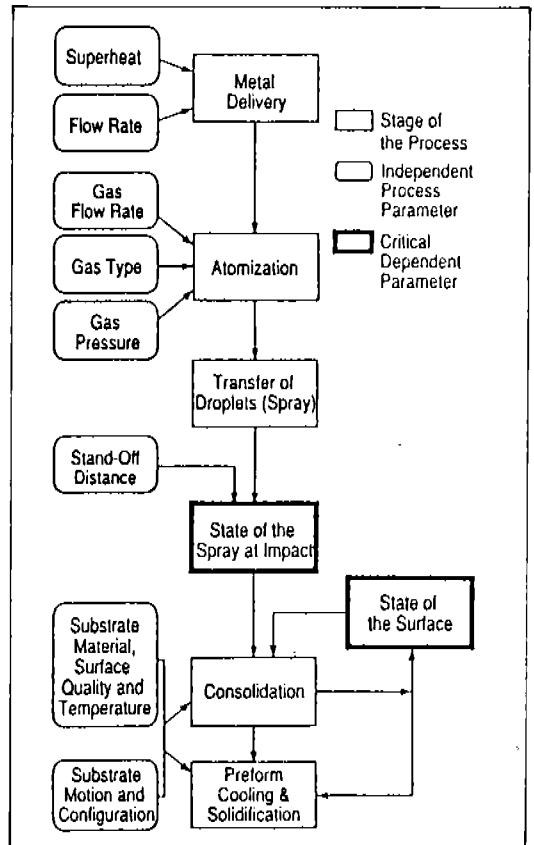


Fig. 2. Flow chart of process parameters for spray deposition.

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 적층응고 사이의 경계가 존재하지 않고, 등축성이 균일하게 분포되며, 합금원소의 거시적 편석이 존재하지 않는 특성이 있음은 물론, 분말야금 과정의 여러공정을 생략할 수 있는 장점이 있다. 또한 최근에는 다층재료(multilayer)나 복합재료(composites)의 생산에도 그 가능성이 크게 주목되고 있는데, 다층재료의 분무적층은 서로 다른 성분의 용탕을 가진 두 개 이상의 노즐을 적절히 교대함으로써 효과적 제조가 가능하며, 복합재료의 생산은 액적의 분사와 동시에 제 2상의 미세한 고상입자(1~50 μm)를 분사함으로써 연속적으로 입자강화형 금속기지

Table 4. Comparison of room temperature tensile properties according to various manufacturing processes

Al Alloy (wt%)	Condition	Yield strength (MPa (ksi))	Ultimate tensile strength (MPa (ksi))	Elongation (%)	NUTS/yield strength
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.

복합재료를 제조할 수 있다.

분무적층법에 의한 제조공정을 최적화하기 위해서는 최소한 그림 2에 나타난 공정변수를 독립적으로 적절히 제어해야 한다. 독립적변수는 용탕의 superheating 온도, 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 적층응고의 경우에는 성형체의 표면온도 및 표면액상층의 두께가 일정하게 유지되어야 한다. 이러한 Osprey 공정과는 달리 '70년대말 영국의 Aurora Steels Co.에서는 원심분무법(centrifugal atomization)을 이용하여 고탍금공구강과 고속도강을 일명 controlled spray deposition(CSD)법이라 부르는 분무적층법으로 제조하여 $10^3 \sim 10^4$ (K/s)의 냉각속도를 얻었으며, 적층성형체의 밀도도 이론밀도의 96~98% 정도의 고밀도인 것으로 보고한 바 있다. 한편, '80년대에 들어와서는 미국 MIT를 중심으로 LDC(liquid dyna-

mic compaction)법이라는 공법으로 활발한 연구가 수행되었는데, 이 공정은 Osprey법과 비슷하나, 용융금속의 분무에 고속도(Mach 2.5 이상)와 고주파(105 Hz)의 shock wave를 발진시키는 USGA(ultra-sonic gas atomizer) 장치를 이용하여 기존방법보다 $10^4 \sim 10^5$ (K/s)의 더 높은 냉각속도를 얻는 것이 특징이다.

3.2. 대표적 분무적층합금

급냉응고법으로 제조된 알루미늄합금은 매우 작은 결정입도($1 \sim 10 \mu\text{m}$)와 미세한 석출상의 분산, 과포화용체 형성 등의 특성으로 인하여 많은 관심의 대상이 되고 있다. 그러나, 급냉응고법의 원천적 단점인 다량의 산화물함유라는 부정적영향을 배제하기 위해서는 분무적층법을 도입하는 것이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.

표 4에는 상용 2024 알루미늄주조재와 급냉응고재, 분무적층된 소재의 인장시험 결과를 예시하였는데, LDC법으로 제조된 알루미늄소재가 항복강도와 인장강도면에서 급냉응고법이나 주조법에 비하여 월등한 것을 보여주고 있다.

최근에 연구된 7075계 알루미늄합금(7075+1 wt%

Ni+0.8 wt% Zr)은 급냉응고에 의해 형성된 미세한 Al_3Ni 와 Al_3Zr 석출물의 분산에 의하여 향상된 기계적 성질을 나타낸다. 열간압출된 LDC 소재는 인장강도 816 MPa, 항복강도 740 MPa, 연신률 9%의 특성을 보유하고 있는 것으로 보고되었는데, 이는 직경이 2~7 μm 인 미세한 결정립과 입내에 균일하게 석출하는 미세한 석출물의 분산에 연유한다.

한편 LDC법은 Li를 함유하는 알루미늄에 대해서도 많은 연구가 진행되었는데, LDC법의 경우가 주조법이나 급냉응고법보다 우수한 기계적 성질을 보유하고 있다. 2024알루미늄합금에 약 1wt%의 Li를 첨가하여 LDC법으로 성형체를 제조한 경우, 강도와 연신률 및 notched strength가 향상된 우수한 기계적 성질의 조합을 얻을 수 있다.

그러나, 고온용 알루미늄의 경우는 분무적층법으로 제조한 합금이 급냉응고법으로 제조한 합금보다 고온성질이 아직 낮은 상태인데, 이는 높은 냉각속도를 요구하는 고온재료의 특성상 분무적층의 낮은 냉각속도에 기인하는 것으로 풀이된다. 이외에도 알루미늄의 분무적층시 산화물(Al_2O_3) 또는 탄화물(SiC) 입자를 동시에 분무시켜 금속기지 복합재료를 제조하려는 연구도 활발히 수행되고 있다.

4. 기계적합금화법(MECHANICAL ALLOYING)

4.1. 제조공정

기계적합금화법은 고상상태에서 기계적 에너지에 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 금속간 화합물, 산화물, 탄화물 등을 분산시키기에 유리하며, 볼밀링시에 발생하는 높은 전위밀도에 의한 가공경화, 고용체형성에 따른 고용강화 등 모든 재료강화기구의 중첩으로 우수한 기계적특성을 기대할 수 있다.

4.2. 실용화 현황

Benjamin에 의해 시작된 기계적 합금화법은 ODS (oxide dispersion strengthened alloys: 산화물분산강화형 합금) 합금의 항공분야에의 적용면에서 성공적인 것으로 평가되고 있다. 1977년 GE F404-400 엔진의 터어빈 정익에 MA 754(Ni-20Cr-0.3Al-0.5Ti-0.6Y₂O₃)가 채용된 이래 일본에서도 F16용 F110 엔진 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-1.1₂O₃)의 적용이 연구되고 있는데, 1000°C 이상의 고온에서 MA6000은 일방향응고 합금이나 단결정합금보다 우수한 크리프특성을 나타낸다. Fe기 ODS합금인 MA965(Fe-20Cr-4.5Al-0.5Y₂O₃)는 Ni기 ODS합금에 비교해서 판상으로의 성형이 용이하고 가공품이 가스터어빈의 연소통 또는 케이싱부품으로 개발되어 있다.

Al기 ODS합금의 경우는 INCO사에서 개발한 Al-905XL(Al-4Mg-1.3Li-0.4O)이 항공기의 격벽에 적용되며, Al_2O_3 와 Al_4O_3 의 미세분산으로 우수한 강도를 열처리 없이 얻을 수 있고, 특히 단조품의 이방성이 적으며, 내식성이 용제 Al합금보다 우수한 특징으로 인하여 용도확대가 기대되고 있다. 또한 고온강도를 개선한 Al합금으로서 Al-Ti합금, Al-Mn합금, Al-Fe-Si합금 등이 연구개발되고 있다.

4.3. 대표적 분산강화형 Al합금

종래의 Al-Mg계 합금은 내식성이 매우 우수하지만, 주로 냉간가공에 의해 강도를 목표치까지 올려야 하므로 사용이 제한되는 문제점이 있기 때문에 기계적합금화법에 의한 미세결정 및 분산강화형 합금 개발이 연구의 대상이 되고 있다. 표 5는 기계적합금화법으로 개발된 Al-Mg계 Al-9052합금의 특성을 나타낸 것인데, 기계적 성질은 7xxx계 Al합금보다 약간 낮으나, 해양성 분위기에서의 내식성은 월등한 것으로 나타나 있다.

또한, 저비중합금으로 쓰이는 Al-Li계 합금은 단조공정 및 용접에서 공정상 어려운 문제점이 있다. 따라서, INCO사에서는 앞에서 언급한 바와 같이 기계적합금화법으로 Al-905XL 합금을 개발하여 항공기격벽재료로서 실용화하였다. 이 합금의 특징은

Table 5. Characteristics of IncoMAP alloy Al-9052

Composition	
Al-4%Mg-0.4%O-1.1%C	
Density	
2.68 g/cm 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 ^a	0.01 mm/yr
Stress-corrosion cracking threshold ^a	>380 MPa
Melting point	
608°C	

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

(1) 비중을 낮출 수 있는 첨가원소만을 선택하고, (2) 첨가량을 용질이 완전히 고용되는 범위로 정하였으며, (3) 기계적합금화처리 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 고온용 합금의 경우에는 Al-Ti계 합금을 중심으로 연구되고 있는데, 현재까지 Allied Signal사의 FVS-0812 합금보다 고온성질이 떨어지지만 Alcoa사의 Al-Fe-Ce 합금보다는 약간 우수한 결과를 얻고 있다. 기계적 합금화된 Al-Ti계 합금은 비중이 낮고, 석출상인 Al₃Ti의 용융점(1350°C)이 매우 높으며, Al기지에의 Ti의 평형고용한과 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 100~300 nm의 결정입도, 20~250 nm의 Al₃Ti 입자, 30~250 nm 크기의 Al₂O₃ 및 Al₄C₃ 등 매우 미세한 조직으로 인하여, 성형한 후에도 우수한 기계적 성질을 나타내는 것으로 알려져 있다.

Table 6. Characteristics of forged IncoMAP alloy Al-905XL

Composition		
Al-4%Mg-0.4%O-1.1%C		
Density		
2.68 g/cm ³		
Mechanical properties	Longitudinal	Short
		transverse
Ultimate tensile strength	520 MPa	480 MPa
0.2% Offset yield strength	450 MPa	420 MPa
Elongation	9%	6%
Fracture toughness, K _{IC}	30 MPa√m	30 MPa√m
Elastic modulus	80 GPa	
Corrosion		
General		0.003 mm/yr
Stress-corrosion cracking threshold ^a		345 MPa
Melting point		
593°C		

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

5. 결 언

현대에 들어와 빠른 성장을 보이고 있는 항공우주 분야는 더욱 가혹한 분위기에서 사용가능한 신소재의 개발을 우선적으로 요구하고 있는데, 이러한 수요에 대응하기 위한 방법으로서 급냉응고법과 분무적층법 및 기계적합금화법은 그 제조공정상의 여러 유의한 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 thixoforging, fiber를 포함한 금속기복합재료(FRM) 성형기술 등 매우 다양하지만, 첨단기술의 실용화를 위해서는 제조공정의 경제성과 물성의 향상이 병행되어 개선되어야 하므

로 이러한 측면에서 분말야금 신제조공정에 의한 알루미늄계 항공재료개발은 가장 실현가능한 유망 분야의 하나로 분석된다.

참 고 문 헌

1. P. Duwez, R. H. Willens and W. Klement : J. Appl. Phys., **31** (1960) 1136
2. P. Duwez and R. H. Willens : Trans. Metall. Soc. AIME., **227** (1963) 362
3. R. Mehrabian : Int. Met. Rev., **27**, 4 (1982) 185
4. F. H. Froes, C. Suryanarayana and E. Lavernia : *Proceedings of RASELM '91*, Published by The Japan Institute of Light Metals, Tokyo, Oct. (1991) 43
5. C. Suryanarayana, F. H. Froes, S. Krishnamurthy and Y-W. Kim : The Int. J. Powd. Metall., (1990) 117.
6. Wolfgang G. J. Bunk : Mat. Sci. Eng., **A134** (1991) 1087
7. H. Jones : Rep. Prog. Phys., **36** (1973) 1425
8. C. M. Adam : *Rapidly Solidified Amorphous and Crystalline Alloys*, Proceedings of the Materials Research Society Annual Meeting, Boston, Nov. (1981) 411
9. H. Jones : Phil. Mag. B., **61** (1990) 487
10. S. J. Savage and F. H. Froes : J. of Metals, **4** (1984) 20
11. I. J. Polmear : *Light Alloys*, 2nd Ed. Published by Edward Arnold, (1989) 116
12. G. J. Hildeman, L. C. Labarre, A. Hafeez and L. Angers : *High Strength Powder Metallurgy Aluminum Alloys II*, TMS, Warrendale, PA. (1986) 25
13. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr. (eds) : *Aluminum-Lithium Alloys I, II*, TMS-AIME, Warrendale, PA (1981)
14. P. J. Meschter, R. J. Lederich and J. E. O'Neal : Scripta Metall., **18** (1984) 85
15. N. J. Kim, D. J. Skinner, K. Okazaki and C. M. Adam : *Aluminum Alloys and Their Physical and Mechanical Properties*, Engineering Materials Advisory Services Ltd., UK (1986)
16. 김낙준 : 신금속 **8** (1987) 2
17. 천성순, 김재곤 : 신금속 **6** (1988) 2
18. I. Pontikakos and H. Jones : Met. Sci., **16** (1982) 27
19. H. Warlimont and P. Furrer : Mat. Sci. Eng., **17** (1976) 101
20. S. K. Das and L. A. Davis : Mat. Sci. Eng. (1988) 1
21. D. J. Skinner, B. L. Bye, D. Raybould, A. M. Brown and M. S. Zedalis : *Proceedings of Structural Metals by Rapid Solidification*, ASM International, Metals Park, OH (1987) 291
22. Idem : Scripta Metall., **20** (1986) 867
23. M. S. Zedalis and M. E. Fine : *ibid.*, **17** (1983) 1247
24. D. A. Porter and K. E. Easterling, *Phase Transformation in Metals and Alloys*, Van Nostrand Reinhold Co., Berkshire, England (1981) p. 161
25. R. L. Ashbrook : *Rapid Solidification Technology, Source Book*, American Society for Metals, 1983.
26. S. J. Savage and F. H. Froes : J. of Metals, **4** (1984) 20
27. P. Mathur, S. Annavarapu, D. Apelian, and A. Lawley : *ibid.*, **10** (1989) 23
28. *Metal Handbook*, Vol. 7, p. 530
29. 김명호, 권병선 : 대한금속학회지, **4** (1991) 342
30. 철강기술정보, **1** (1993)
31. R. H. Bricknell : Metall. Trans., **17A**(4) (1986) 583
32. A. R. E. Singer and R. W. Evans : Met. Tech., **10** (1983) 61
33. K. K. Sankran and N. J. Grant : Mat. Sci. Eng., **44** (1980) 213
34. 김진천 : 한양대학교 재료공학과 석사학위논문, 1991.
35. J. S. Benjamin : *New Materials by Mechanical Techniques*, E. Arzt and L. Schultz (Eds.), DFG. Adenauerlee (1989) p. 3
36. J. S. Benjamin : Metall. Trans., **1** (1970) 2943
37. J. J. Fisher and R. M. Haeberie : Modern Developments in P/M, **21** (1988) 461
38. R. Sundaresan and F. H. Froes : J. of Metals, **39** (1987) 22
39. J. S. Benjamin and J. E. Volin : Metall. Trans., **5** (1974) 1929
40. P. S. Gilman and J. S. Benjamin : Ann. Rev. Mater. Sci., **13** (1983) 279
41. R. D. Schelleng and S. J. Donachie : Metal Powder Report, **10** (1983) 575
42. R. D. Schelleng : J. of Metals, **1** (1989) 32
43. F. H. Froes : Metal Powder Report, **1** (1989) 59
44. F. H. Froes : J. of Metals, **12** (1990) 24
45. M. Ruhr, I. Ucock, E. Lavemia and J. Baram : *Light-Weight Alloys for Aerospace Applications*, E. W. Lee, E. H. Chia & N. J. Kim (Eds.), TMS, P. A. (1989) p. 79

46. G. S. Murty, M. J. Koczak and W. E. Frazier :
Scripta Metall., **21** (1983) 141
47. R. Lerf and D. G. Morris : Mat. Sci. Eng., **128A**
(1990) 119
48. Olivier Beffort, P. J. Uggowitzer and Markus O.
Speidel : Proceedings of the 3rd International
Conference on Aluminum Alloys, Trondheim, No-
rway (1992) p. 46
49. 강석봉, 임차용 : 기계와 재료, **3(4)** (1991) 45