

技術資料

高强度 알루미늄 합금제조

金完哲

Fabrication of High Strength Aluminium Alloys

W.C.Kim,

많은 비행기 제작자들은 우수한 알루미늄 합금을 높이 평가 하는데 그 이유는 복잡한 기체의 구조는 상온과 고온에서 높은 specific modulus (yong's modulus ÷ density)와 높은 강도 그리고 높은 피로저항부식과 응력 부식 저항을 가져야 하기 때문이다. 이러한 연구는 최근에 상온과 고온에서 우수한 성질을 갖는 합금을 개발하기 위해서 NASA와 AFML에 의해서 많은 연구가 진행되어 지고 있다. 더구나 초음속 순항기 연구 (SCAR)로부터 IM(ingot metallurgy) 보다는 PM 재료들이 중간온도 (135℃)에서 우수한 성질을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 PM에 대한 항공기 산업과 자동차 산업에 큰 관심을 보이고 있다. 반면 IM법에 의한 재료의 강화 개선은 1970 년대에 착수되어 지금도 계속되고 있다.

Staley 는 성분입자들과 불순물이 7XXX 합금의 기계적 성질에 미치는 영향을 연구하였다. 성분입자들이 부피 분율을 감소 시킴으로써 인성이 증가 된다는 것을 발견하였다. 이것은 base 합금의 순도를 증가 시킴으로써 쉽게 얻어진다.

Thompson 과 Kirman 은 큰 입자들이 7XXX IM 합금의 인성에 미치는 역효과를 알아냈다. Staley 는 또한 고용된 성분입자들의 크기는 TMT (thermo mechanical treatment) 처리에 의해 미세화 될 수 있다고 했으나 이러한 개선책들은 모두 합금의 단가를 높히는게 문제점이다. 그는 또한 인성을 개선하기 위하여 Mg 량을 감소시키고 Cu 량을 증가시킬 것을 제안해 7050 과 7475 합금을 개발했다. Hyatt 와 Quist 는 Boeing new airliners 에 사용하기 위한 7XXX 와 2XXX IM 합금의 성질을 개선하는 작업을 했다. 그들은 Zn/Mg 비를 3.5 까지 올리고 Cu 량을 1.7wt% ~ 2.3wt% 까지 올림으로써 7XXX 합금에서의 피

로-균열 성장에 대한 저항을 증가시켰다. 이들은 합금조성을 조정하고 base metal의 순도를 높이고 TMT 처리를 개선함으로써 새로운 IM 합금인 2324 T 39 와 7150 T 651 판재와 2224 T 3511 과 7150 T 6511 압출재 등을 개발하였다.

그러나 IM 합금의 발전은 감소추세에 있는데 그 이유는 향상된 순도와 부가적인 TMT 처리를 하는 것이 비용이 많이 들기 때문이다. 더구나 PM 합금보다 그 성질이 훨씬 못미치고 있기 때문에 PM이 IM을 대체하여 사용되어 지고 있다.

1. Atomization 분말제조

Atomization 은 알루미늄 분말을 만드는데 가장 널리 사용되는 방법이다. 액체금속이 nozzle 을 통해 분사 기체나 액체 매체에 의하여 금속의 미세한 방울이 급속히 냉각된다. 10³ ~ 10⁶ K/sec 인 급냉속도가 얻어지는데 이것은 미세한 방울 크기의 직접적인 결과이고 IM 재료에서 얻어지는 냉각속도 보다 확실히 크다. splat-cooling은 gas atomization에서 얻을 수 있는 냉각속도 보다 더 큰 냉각속도를 얻을 수 있는 방법이다. 액체 금속이 열전도도가 높은 찬 금속 표면에 떨어지거나 뿌려져 발사된다. 보통 grit-blasted 된 동판이나 wheel 이 사용된다. 10⁶ K/sec 의 냉각속도가 보통 얻어지고 있다.

2. 기계적 합금 (mechanical Alloy)

超微粒子 製造法으로는 breaking-down process 와 building-up process 로 大別된다. building up 방법인 化學反應法은 원료금속 화합물의 정제가 용이하며 高

純度 생성물을 얻기가 쉽다. 생성입자의 응집이 적고 분산성이 좋으며 반응조건을 조절하여 입도 분포가 좁은 초미립자를 얻을 수 있으며 분위기 조절이 용이하여 산화질화 등의 반응제어가 용이하다. 이러한 방법은 기상화학 반응으로 전자재료 세라믹스, plastic 등의 분야에 널리 사용되고 있는 이산화 티탄 초미립자를 증기압이 높고 반응성도 비교적 높은 사염화 티탄을 기상 증발시켜 초미립자를 제조하고 있다. 그림 1에 실험장치를 나타냈다. breakig down process 로 기계적 합금화 방법은 종래의 ball mill을 크게 개선한 attritor을 이용해 초미세 분말을 제조해 합금화 하는 방법이다. 이러한 합금화법은 통상적인 용해 방법으로서 만들기 힘든 액상이나 고상에서 편석이 심한 합금이나 고용점 비반응성 금속등과 같은 많은 합금계에 적용될 수가 있다. 보통 ball mill에서는 회전 낙하하는 ball이 한정된 energy를 갖고 있기 때문에 이러한 ball mill로 composite를 만드는 데는 상당히 오랜 시간이 걸린다. 그림 2에 나타낸 high energy ball mill은 금속 분말입자를 반복적으로 평편하게 파쇄하고 재압접을 되풀이 한다. 2개의 강구 (steel ball)가 충돌할 때마다 그 사이에 분말입자가 위치하게 되면 충돌력이 입자를 변형시켜 깨끗한

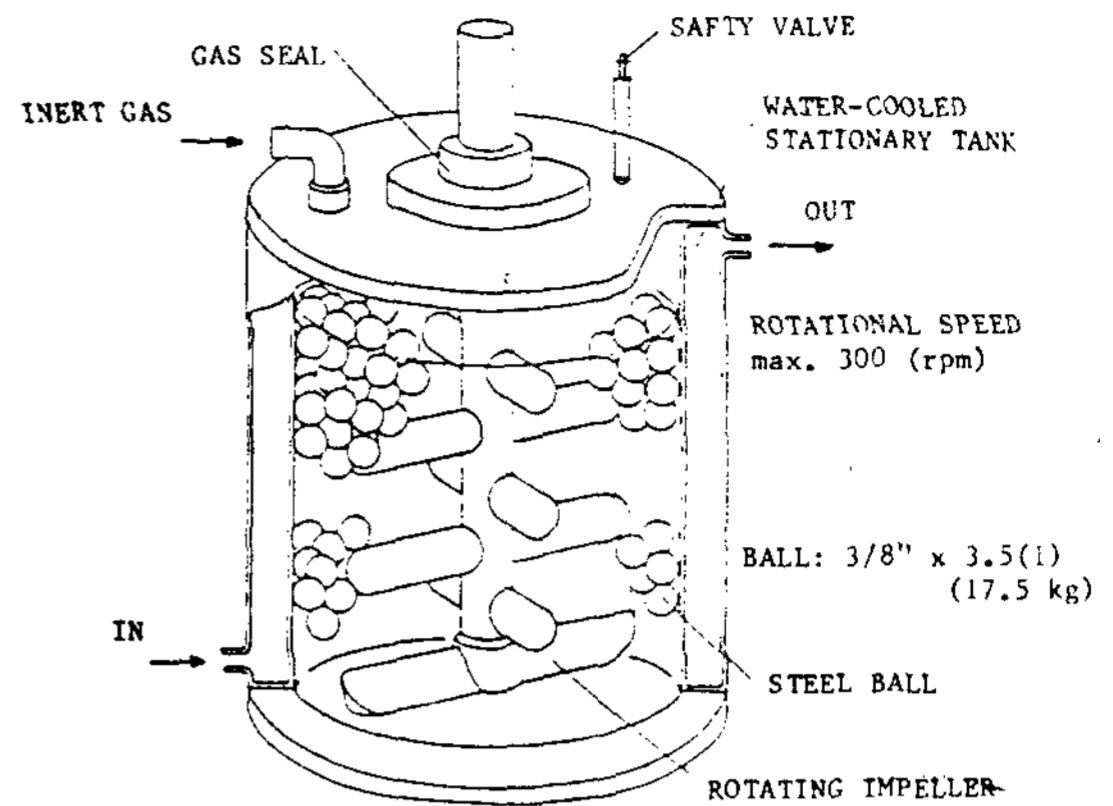


그림 2 . Schematic diagram of high enegh energy ball mill apparatus

표면끼리 서로 접촉할때 서로 압접되고 표면은 산화가 빨리 되기 때문에 산화를 방지하기 위해서는 분쇄공정은 질소나 불활성 가스하에서 보통 행하고 있다.

초기 공정 단계에서는 금속 분말은 연하여 그것들이 서로 압접되어 큰 입자로 되기 때문에 광범위한 입자 크기 분포를 갖게 될 것이다. 가공이 진행됨에 따라 가공정화에 의해 입자는 점점 단단해져 파괴되지 않고 변형을 유지할 수 있는 능력은 감소된다. 따라서 크고 단단한 입자 일수록 steel ball에 의해 가공을 받았을 때 균열이 일어난다. 그래서 압접과 파괴가 균형을 이루어 입자크기 분포는 좁은 범위로 일정하게 될 것이다.

이러한 새로운 기술로써 기계적 합금화는 1970년 J.S Benjamin에 의해 In-853의 니켈기초 초합금 (super alloy)의 고온강도 재료로써 r' 석출경화 및 점을 조합한 방법으로 개발되었다.

그림 3에 IM법과 PM법의 공정을 나타냈으며 그림 4에 분말성형과정을 나타냈다.

이와 같이 기계적 합금화의 큰 잇점은 다음과 같은 강화 기구들이 중첩된다는 것이다.

- 1) 산화물 분산강화
- 2) 탄화물 분산강화
- 3) 미세한 입도강화
- 4) 높은 전위밀도와 sub-structural strengthening
- 5) 고용강화

이것들은 IM 합금에서의 주된 강화기구인 석출에 의한 강화가 나타나 있지 않다. 이와 같이 제조된 재료는 석출물이 존재할때 나타나는 부식성이 없이도 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

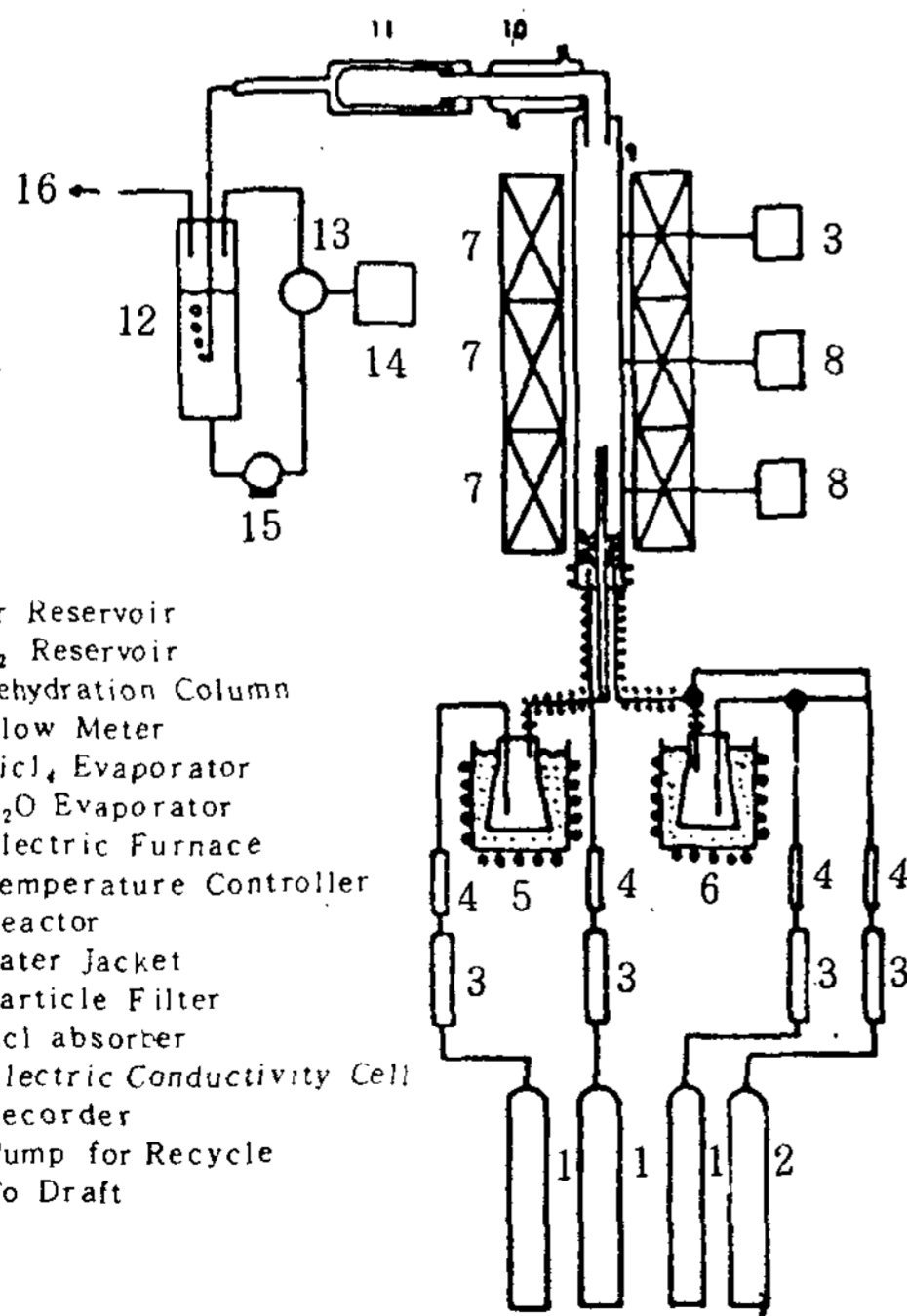
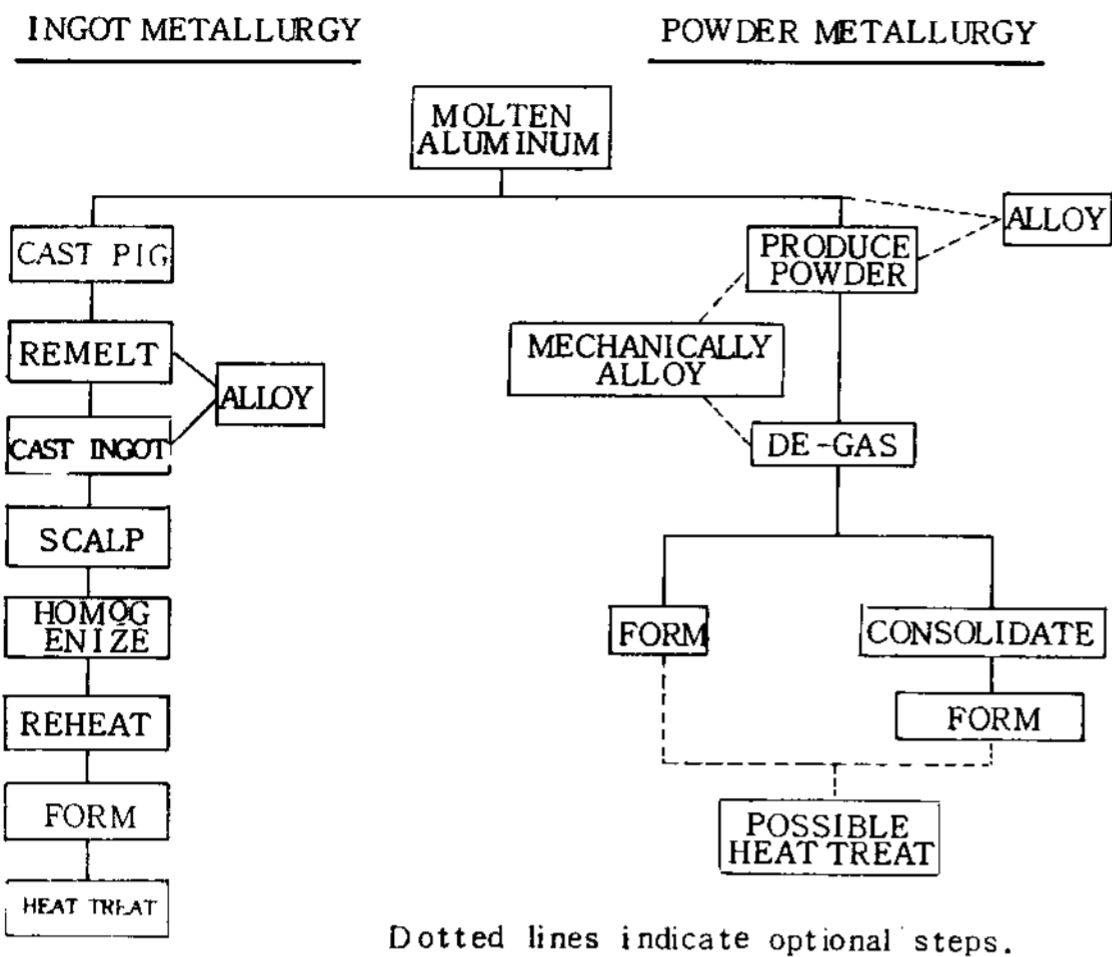


그림 1 . Schmatic Representation of Experimental Apparatus .



Dotted lines indicate optional steps.

그림 3. Comparison of ingot and powder metallurgy

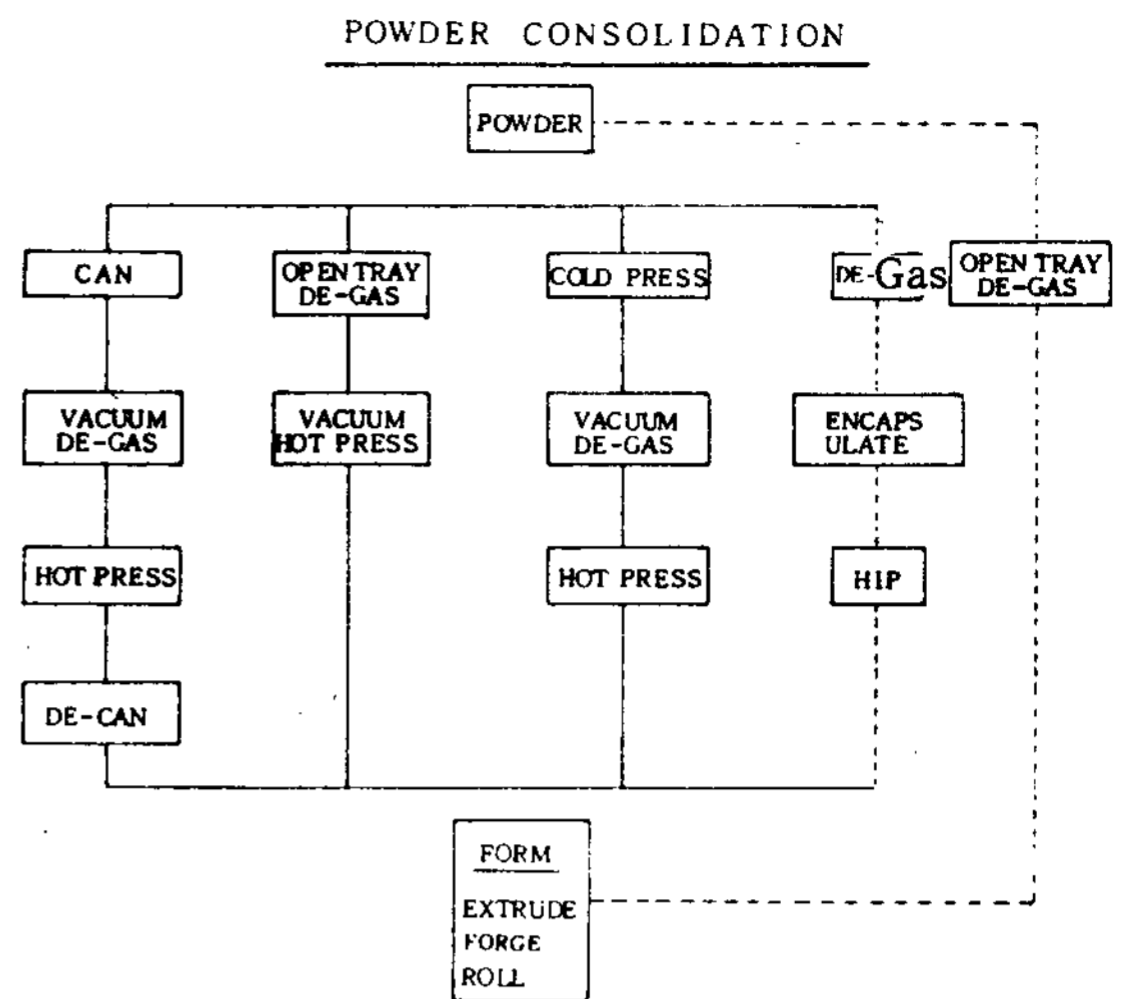


그림 4. Powder Consolidation.

3. PM 합금과 IM 합금의 기계적 성질비교

여러 연구자들이 종래 사용되어져 왔던 IM 합금을 PM 법에 의하여 만들었다. 표 1에 상업용 재료에 대해 나타냈다.

Voss는 2024와 7075 합금을 PM과 IM으로 만들어 PM 공정이 피로한계 조건에서 이합금을 사용할때 미치는 영향을 평가한 결과 한 order의 크기 만큼 PM 방법이 입도를 감소시키며 또한 재결정을 억제하고 PM

으로 제조된 7075 합금이 strength-isotropy를 증가시킨다고 하였다.

notch로 인한 파괴에서 PM 2024 T 3510 합금은 IM 2024 합금과 비교하여 50% 확률 파괴에 대하여 stress가 46% 증가하고 10% 확률 파괴에 대하여 stress가 23% 증가한다.

PM 7075 T 6510 합금을 IM 7075 합금에 비하여 50% 확률의 파괴에서 stress가 20% 증가하고 10% 확률 파괴에 대하여는 52% 증가한다. 표.2는

표 1. Comparison of tensile properties of IM and PM extrusions of commercial composition

Alloy	Method of formation	Atomized(A) or splat-cooled(S)	Condition	Ultimate tensile strength, UTS (MPa)	Yield stress, YS (MPa)	Elongation (%)
3003	PM	(A)	As-extruded	207	145	24
3003	IM		As-extruded	131	83	32
5083	PM	(A)	As-extruded	400	262	14
5083	IM		As-extruded	303	138	28
2024	PM	(A)	T-4	558	393	16
2024	IM		T-4	558	393	16
7075	PM	(A)	T-6	662	614	15
7075	IM		T-6	648	593	11
2024	PM	(S)	T-4	543	326	24
2024	IM		T-4	464	277	22
3003	PM	(A)	Cold-drawn 80%	NA*	255	NA*
3003	IM		Cold-drawn 80%	NA*	255	NA*
7075	PM	(A)	T-6510	671	622	14.0
7075	IM		T-6510	679	672	12.6

* Not available

표 2. Fatigue life to Strength ratio

Alloy	Method of formation	SN* /UTS	SN*/YS +
7075 T 6510	PM	0.212	0.230
	IM	0.156	0.169
2024 T 3510	PM	0.239	0.304
	IM	0.214	0.285

* SN = Stress for 10⁷ cycle life
+ 0.2 % off - set yield strength

voss 에 의해 연구와 PM 합금의 피로 data 를 IM 합금의 그것과 비교한 것이다.

Voss 는 두영역에서 PM 7075 합금이 IM 7075 합금보다 파괴 인성이 작은 이유는 PM 합금에서 성분 입자들의 부피분율이 증가되기 때문이라고 하며 fatigue crack growth rate(FCGR)가 응력확대 수준(ΔK) 이 $9 \text{ MNm}^{-3/2}$ 에서 작다고 한다.

Holloway 는 MA 87 합금에서 비슷한 거동을 찾아냈으며 작은 ΔK 수준에서 보여지는 이 FCGR이 증가되기 때문에 PM합금의 상업화에 신중해야 된다.

4. MA 67 과 MA 87 합금

Alcoa 에서 atomization process 의 급냉응고법에 의하여 제조한 MA 67 과 MA 87 합금은 7××× 합금에 Co 를 첨가한 것으로 주요합금 조성은 표 3 에 나타냈다. 다.

Co 는 응력 - 부식 저항을 유지하면서 입도를 미세화 시키고 고온과 상온 강도를 증가시킨다. 그러나 Co 이 너무 많으면 인성과 피로 저항을 저하시킨다. 두 합금중 MA 87 이 부식 저항이 크고 MA 67 이 강도가 크다. 상업적인 규모에서 Alcoa 합금은 IM 합금보다 우수한 성질을 나타내고 있다. 예를들면 450 MPa 이상의 같은 강도 수준에서 MA 67/87 합금은 7075 T 6 합금보다 더 우수한 SCC 저항이 있다.

MA 87 은 550 MPa 인장강도 수준에서 현존하는 IM 합금에 비하여 30 ~ 80 %의 우수한 notched fatigue Strength를 나타내고 표. 5 에 자세히 알 수 있다.

Otto 는 MA 87 이 개량된 IM합금 7075 보다 35 ~ 48MPa 의 고강도와 높은 연성을 갖는다고 보고하였다. Fig 6 에 MA 67 이 7075 보다 우수한 S-N 피로 거동을 나타낸다. 최근 자료에서 낮은 응력확대 수준에서 MA 87 이 7075 보다 높은 피로 균열 성장을 보여주고 있다. 그러나 실험한 합금은 같은 항복강도 수준에서 비교되지 않았으므로 계속 Alcoa 에서 연구중에 있다.

Army Manufacturing Technology(MAN-TECH)의 후원으로 Cebulak 는 " Plant-scale " (1545 kg)의 billet 로부터 단조재 · 압출재 그리고 판재가 만들어지는 공정을 그림 7. 에 나타냈다. 그림 7. 과 같은 방법으로서 약 80 kg 의 billet 를 실험용으로 만들어 압축재의 인장 강도를 plant scale billet 의 것과 비교해 작다는 것을 알았다. 그러한 결과로 melt-atomized 방법 한계가 드러났다. 즉 합금은 고강도를 얻기위해 열처리를 해야 하고 두꺼운 시편에 대해서는 분말의 급냉응고 속도에 의해 생겨난 강도 Potential 의 많은 양이 열처리하는

표 3. Composition (wt%) of high-strength PM and IM alloys

Alloy	IM or PM	Mg (wt%)	Zn (wt%)	Cu (wt%)	O (wt%)	C (wt%)	Co (wt%)	Fe (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	Cr (wt%)	Ti (wt%)	Zr (wt%)
IN 9051 (published)	PM	3.2-4.0			0.9-1.8	0.3-1.1		0.8 (max)	0.8 (max)				
IN 9051 (typical)	PM	4			1.4	0.7		0.05	0.1				
MA 87	PM	2.5	6.5	1.5			0.4	0.05	0.06				
MA 67	PM	2.5	8.0	1.0			1.5	0.07	0.06				
MR 61	PM	2.5	8.5	1.5	<0.5		0.6	<0.2	<0.15				0.2
7075	IM	2.5	5.6	1.6				0.7	0.50	0.30	0.3	0.2	
7178	IM	2.8	6.8	2.0				0.7	0.50	0.30	0.26	0.2	
7049	IM	2.5	7.7	1.6							0.15		
7050	IM	2.5	6.2	2.3									0.12
7475	IM	2.5	5.7	1.6							0.22		

동안 소실된다. 그러나 Scale-up 은 IM합금보다도 우수한 성질을 갖는 일부분을 만들어 냈다. 따라서 PM 합금은 plant 규모로도 제조 될 수 있는 것이다.

표 5. Plane-strength fracture toughness, K_{IC} , of PM alloy MA87 plate and plate of various IM alloys

Alloy	PM or IM	Fracture toughness, K_{IC} (MNm ^{-3/2})	Yield stress YS (MPa)
MA 87-A	PM	36*	490
MA 87-B	PM	29	503
7475-T651	IM	30	448
7475-T7351	IM	36	372
7050-T3651	IM	29	434
7075-T651	IM	20	448
7074-T7351	IM	22	372
2124-T851	IM	24	421

* K_Q because specimen was too thin for ASTM E 399.

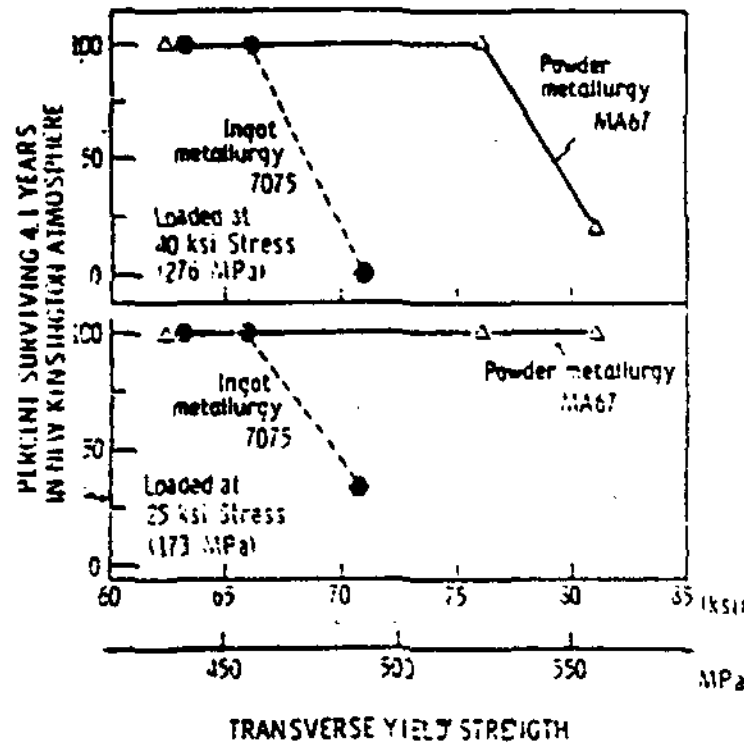
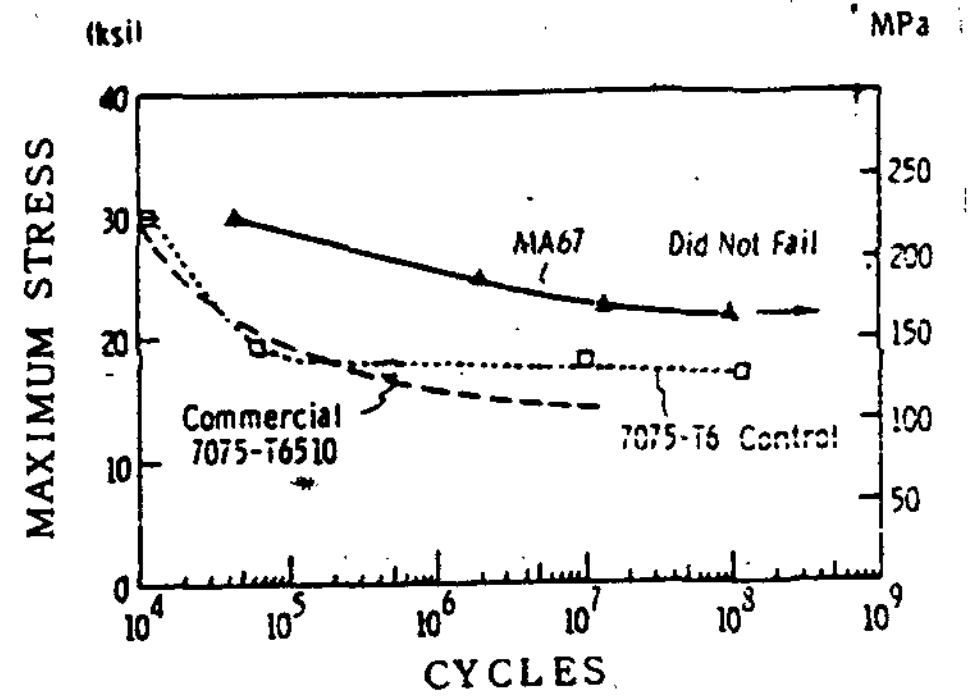


그림 5. Comparison of stress corrosion resistance of MA 67 with that of IM 7075



* It should be noted that Alcoa's experimental scale is really a small

그림 6. Notched axial fatigue performance of MA 67 compared with that of IM 7075

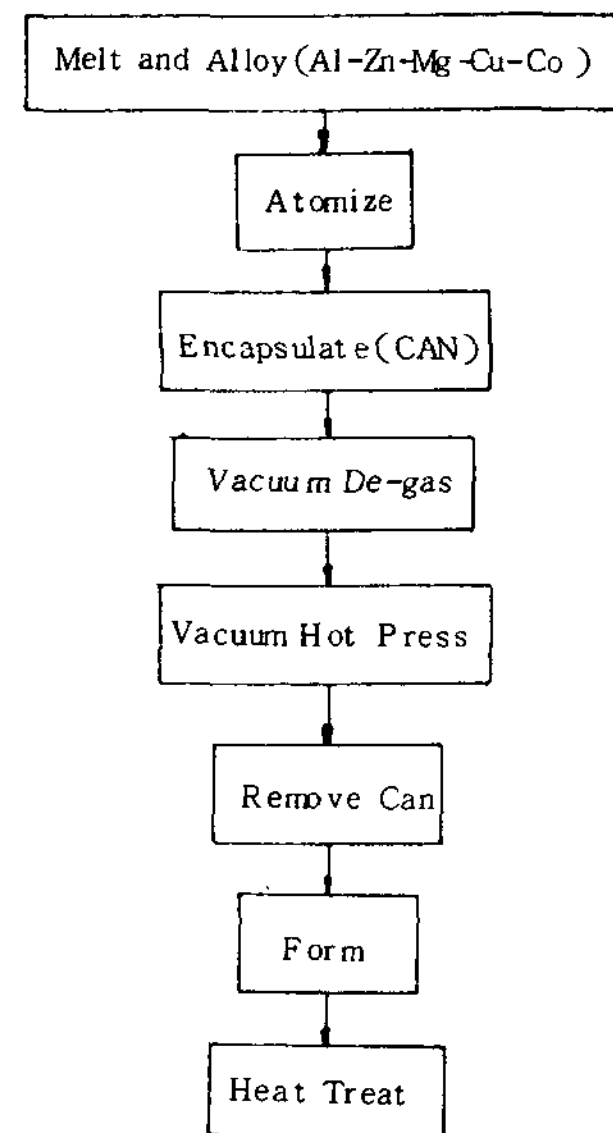


그림 7. The consolidation procedure used by Alcoa to make 1545 kg billets

표 4. Comparative longitudinal properties of die forgings of PM alloys MA67 and MA87 with the equivalent IM 7075 alloy

Alloy	Time* at final ageing temperature (163°C) for PM alloys (h)	Ultimate tensile stress (UTS) (MPa)	Yield strength (YS) (MPa)	Elongation (%)	Ratio of notched tensile strength to tensile yield strength	Fracture toughness, K_{IC} MNm ^{-3/2}	SCC- Days to fail at stress			
							310 (MPa)	290 (MPa)	241 (MPa)	172 (MPa)
MA 67	1	641	600	10	0.9	23.2	29,46,47	NA	3 > 84*	3 > 84*
MA 67	12	586	538	12	1.14	NA	84,2 < 84*	NA	3 > 84*	3 > 84*
MA 87	4	607	558	12	1.25	36.1	71,78,84	NA	3 > 84*	3 > 84*
MA 87	18	565	510	14	1.34	NA	2 > 84*	3 > 84*	2 > 84*	2 > 84*
7075-T6		641	572	12	1.34	NA	1,2,2	NA	2,3,3	2,3,3
7075-T73		503	434	13	1.45	NA	NA	No failures anticipated		

참 고 문 헌

1. C.COVAULT: Aviation Week and Space Tech. 109 (1978) 14.
2. C.T.Post: Iron Age 221(1978) 41.
3. J.P.LYLE and W.S.CEBULAK: in "Proceedings of the 18th Sagamore Army Materials Research conference on PM for High Performance" edited by J.J.Burke and V.Weiss (Syracuse Press, Syracuse, 1972) P.231
4. R.E.LEWIS: Lockheed Interim Report LUSCD 674-504, Palo AHo, March 1979
5. E.A.STARKE: Mat. Sci , Eng. 29(1977) 99
6. M.V.HYATT: Aluminio 46(1977) 81
7. A.J.JACOBS: Trans. ASM 58(1965) 579
8. E.A.BLOCH, Metall: Rev. 6(1961) 22
9. R.J.H, WANHILL: Aluminium 54(1978) 455
10. J.T.STALEY: Properties Related to Fractvre Toughness, ASTM STP 605 (1975) P.71.
11. D.S.THOMPSON: Met, Trans, A6A(1975) 671.
12. M.LEBO and N.J.GRANT: Met, Trans, 5(1974) 1547.
13. R.IRMANN: Metallurgia 46(1952) 125.
14. J.S.BENJAMIN: Sci, Amer, 234(1976) 40.

BCIRA
International
CONFERENCE

ENSURING QUALITY CASTINGS -
DEMANDS AND ACHIEVEMENTS
WORLDWIDE

"Quality -
the key to an assured future"

UNIVERSITY OF WARWICK
Nr. Coventry, England

Tuesday 29th - Thursday 31st March 1988