

러시아의 항공기용 내열소재



조 창 용

(KIMM 재료기술연구부)

- '80. 2 부산대학교 공과대학 금속공학과(학사)
- '82. 2 부산대학교 대학원 금속공학과(석사)
- '94. 2 부산대학교 대학원 금속공학과(박사)
- '80-'82 국방부 조병창 금속시험시(연구원)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원
- '87. 8 금속기술사

Eugeniy, B. Kachanov

(Academician)

First Deputy Director, All-Russian Institute of Aviation Materials(VIAM)
 General Director, Russia-Korea Research Center for Aerospace Materials and Technologies(RKRC)



김 학 민

(창원분원 분원장)

- '72 서울공대 금속공학과 학사
- '72-'74 국방과학연구소 파견근무(ROTC 복무)
- '80 미국 카네기 멜론대 금속재료 박사
- '81-'82 미국 Wright Patterson 공군재료 연구소
- '83 한국기계연구원 입소
 내열재료실장, 재료기술연구부장 역임
- 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

항공기 구조물의 효율, 수명, 신뢰성을 개선하기 위한 지속적인 연구는 새로운 소재, 구조, 설계, 제조공정을 발전시키려는 연구의 관심을 자극시킨다. 새로운 항공소재는 극한의 사용조건하에서 완전한 신뢰성과 경량화의 특성을 지녀야 한다. 이러한 항공소재의 요구조건을 만족시키기 위해 VIAM(All-Russian Institute of Aviation Materials)의 과학자들은 많은 연구를 통해 기초소재와 최근에 개발된 신소재를 실용화시켜 왔으며, 러시아 항공기 및 우주선용 재료의 96%를 VIAM에서 개발 실용화시켰다. 이와 같은 VIAM과학자들의 노력에 힘입어 러시아의 항공소재는 그 응용분야가 광범위하게 확대되어 졌으며, 이러한 소재들의 수많은 특성들을 이용하여 다른 분야에도 응용가능성이 있음을 발견하였다.

본고에서는 각종 분야에서 응용을 확대시키고 한국내에 대체재료로 사용 등을 추진하기 위해 현재 러시아에서 개발된 항공기용 각종 재료의 내열성 향상에 대해 간략히 언급하고자 한다.

2. 금속소재의 내열성 향상

항공기용 소재는 각 부품에 따라 사용 조건이 다르지만 경량, 내열, 내식 등 소재가 갖는 극한의 성질을 요구하는 것이 대부분이다. 본 절에서는 러시아 항공기 및 우주선 소재의 내열성 향상과 경량화에 대해 VIAM에서 개발 실용화한 소재들을 소개하고자 한다.

2.1. Al합금

가공용 Al합금(Wrought Aluminium Alloys)은 현재 항공기 기본 구조재(Wing, Fuselage Skin, Internal Bearing Elements 등)로 최근의 민항기 및 수송기 중량의 70%를 차지한다. 또한 이 합금은 기계적, 물리적, 성질이 우수하고 제조가 효율적이므로 항공기용 이외의 다른 분야의 지상산업 구조물, 용수운반, 구조물, 전기, 건축, 전자기기 등에 널리 사용된다.

수명향상, 안정성확보, 연비개선을 위한 신형 항공기의 개발에 따라 구성부품에 사용되는 Al합금들의 특성과 신뢰성향상이 요구되어 다음과 같은 합금들이 러시아에서 개발되어 졌다.

여러 새로운 합금들이 개발되어 졌으며 기존 고강도 Al-Zn-Mg-Cu합금과 중강도 Al-Cu-Mg 합금 등에서 Fe, Si와 같은 불순물을 제거하고, 열처리, 가공열처리 조건 등을 조절하여 특성을 크게 향상시켰다. 즉, 파괴인성, 피로수명, 내식성을 소재고유의 강도저하 없이 크게 증가시키에 따라 기존합금을 대체할 수 있게 되었다. 이들 대표적인 합금들은 V95PshT2, V95OshT2, 1973, 1163 등이다.

Al합금의 경량화를 위해 첨가되는 대표적인 원소는 Li이다. Li 첨가합금 중 용접이 가능한 Al-Mg-Li계 중 Al 1420은 비중이 가장 낮은 합금으로(2.47g/cm³) 비강도가 높아($\sigma_b/\gamma=17\text{km}$) 구조물에서 중량을 20~25% 감소할 수 있는 유용한 합금이다. 대표적인 Al-Mg-Li합금의 특성을 그림 1에 나타 냈다.

용접이 불가능한 Al-Li-Cu-Mg와 Al-Cu-Li합금은 종래의 Al합금 대신에 사용할 경우 현격한 중량감소 효과를 얻을 수 있다. 예로써 1440은 구조물의 칫수 변화 없이 10%중량감소가 가능하며, 높은 탄성계수를 고려하여 설계를 변경할 경우 15%의 중량감소가 가능한 합금이다. 1450합금은 고강도 B95합금(7075)를 대체하기 위해 개발된 합금으로 경량화 효과가 큰 합금이다.

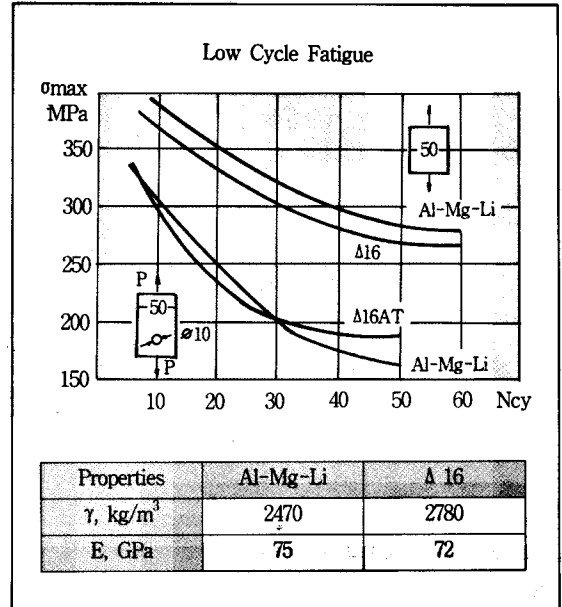


그림 1 Al-Mg-Li합금의 기계적 성질

러시아의 주조용 내열 Al합금들은 다음과 같다. 구조용 부품에 사용되는 Al주조합금 VAL 10은 강도가 우수한 합금으로 단조합금과 유사한 기계적 성질을 갖는다. 중간강도 Al-Si-Mg(Al 901, Al 34)합금들은 압력용기 부품에 널리 사용되며, Al-5-1, Al-9m, VAL 15 등의 합금은 연료공급장치, 제어장치의 부품에 사용된다. 이들은 300°C까지의 온도에서 압력이 걸리는 부품에 사용이 가능하다.

고강도 Al-Zn-Mg-Cu(VAL 12)합금은 금형주조용 고강도 합금으로 개발되었으며, 이는 최근 개발된 신공정(Liquid Forging, Squeeze Casting, Gravity Casting)에 적합하고 경량화를 위한 부품에 사용되며 특히 Ti합금이나 주철, 주강의 대체 재료로 사용된다. 러시아의 대표적인 Al주조합금의 기계적 성질들을 그림 2에 나타 냈다.

2.2. Ti합금

최근 수년간 Ti합금들은 여러 분야에 응용이 확대되고 있으며, 이들은 항공기 구조물 외에도

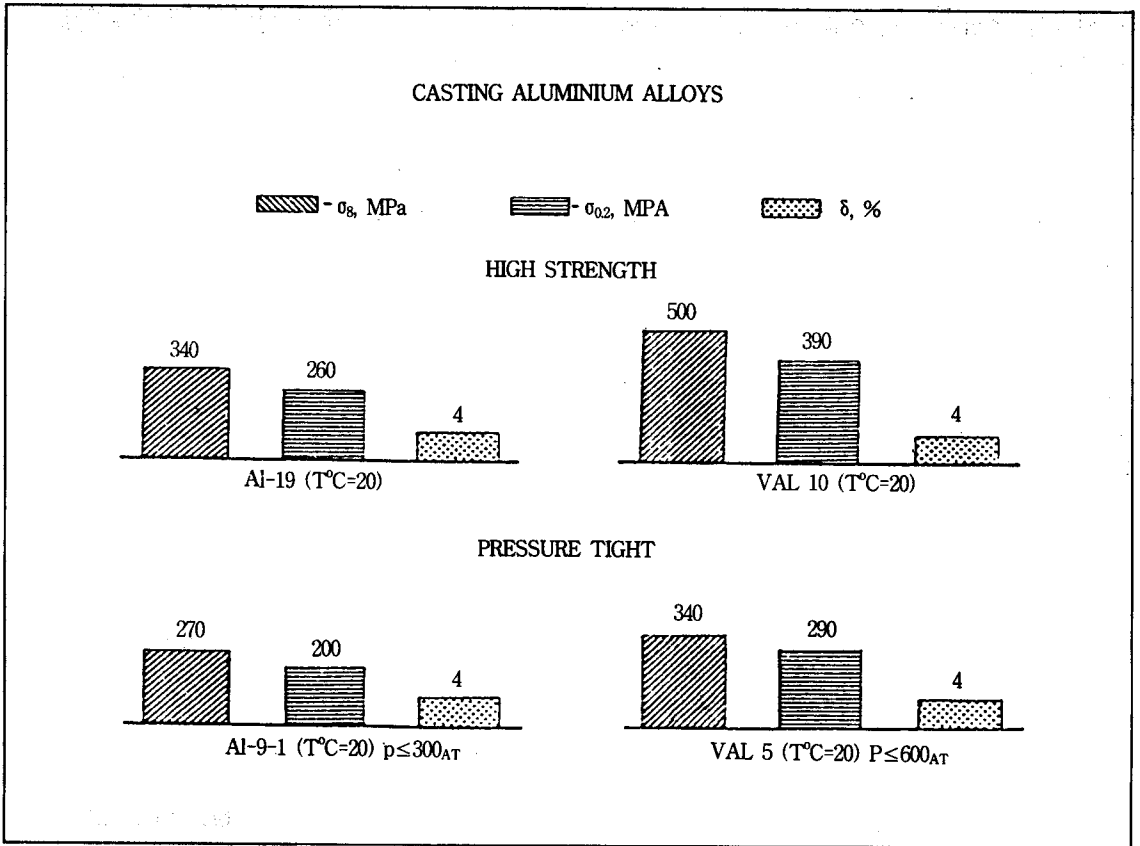


그림 2 대표적인 Al주조합금의 기계적 성질

원심분리기(Centrifugal Equipment), 펌프 등의 부식성 유체와 접촉하는 부품에 사용된다. 또한 Ti 합금은 내식성이 우수하여 항공산업뿐 아니라 화학공업, 펄프, 제지 및 식품산업 등 각종 산업용 소재로 널리 사용된다.

단련용 고강도 Ti합금($\sigma_b = 700-1200\text{MPa}$)은 항공기에서 고응력이 작용하는 1차 구조물 즉, Landing Gear, High-lift device, Engine mount, Rocker and cross piece of gear 와 튜브 등에 사용된다. 고강도 VT22합금은 형단조 및 수단조(hand forging) 부품, 튜브, 판재 등의 항공기 1차 구조물에 사용된다. VT8m은 Copressor Blade 에 사용되며 이재료들은 비강도와 파괴인성이 우수하고 VT3-1과 같은 종래 합금보다 높은 온도

에서 사용할 수 있다. 항공기 Compressor Disk 및 Balde 소재로 사용되는 대표적인 Ti합금 VT 3-1 및 VT8의 기계적 성질을 표 1에 나타냈다.

표 1 Compressor Disk 및 Balde용 Ti합금의 기계적 성질

properties alloy	$\sigma_{0.2}^{20}$	σ_B^{450}	σ_{100}^{400}	KCT kgcm/cm ²	δ %	ψ
	MPa					
VT3-1	960	650	550	0.8	8.0	18
VT8	980	680	580	1.2	6.8	20

2.3. 고장력강

러시아에서 최근에 개발된 고장력강들은 강도

와 인성의 조합이 우수하고 피로강도가 좋으며 상대적으로 생산원가가 저렴하여 항공기의 1차 감속기 등에 주로 사용된다. VKS7은 carbide에 의해 강화한 강종으로($\sigma_b = 1400\text{MPa}$, 경화능 110 mm, $\sigma_{-1} = 700\text{MPa}$) 감속기 기어의 접착상태($\sigma_{-1} = 1000\text{MPa}$)에서 내마모성이 우수하다. 이는 대형 감속기 기어의 중량을 기존 소재에 비해 25% 감소할 수 있을 정도의 강도를 가지며 250°C까지의 온도에서 20%의 수명 향상효과를 갖는 소재이다. 대형감속기 기어에 사용되는 대표적인 강종인 VKS7 강종의 특성을 표 2에 나타 냈다.

표 2 대형감속기 기어용 강종의 기계적 성질

Mechanical Properties	Steel	
	VKS-7	12X2N4A
Hardenability, mm	110	70
σ_b , MPa	1400-1600	1000-1200
σ_{-1} , MPa	650-700	500-600
Grain size, points	6-8	2-4
Contact Durability at $\sigma_b=230\text{ MPa}$, $N_c \times 10^6$	≥ 200	80-110

VKS10강종은 복잡한 강화기구에 의해 강화되며 강도는 약간 낮으나($\sigma_b = 1300\text{MPa}$) 내열성이 우수한 소재로 450°C까지는 장시간, 550°C까지는 단시간 사용이 가능한 내열강이다. 고응력의 감속기 기어와 같은 비틀림 응력과 비윤활 조건에서 사용될 수 있는 VKS9은 최근에 개발된 강종으로 용접성도 우수하여 사용이 많아질 것으로 기대된다. 이는 화학성분 조절과 열처리 등의 공정기술을 조절하여 최대인장강도가 1950-2150MPa 까지 높일 수 있다. 또한 경화능이 우수하고(직경 60mm), 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking) 저항성, 파괴인성, 저주기 피로성질이 우수하여 Strut, Damper Cylinder, Landing Gear 등에 사용된다.

2.4. 스프링 소재의 신뢰성 및 수명향상

스프링이 장시간 사용에 그 기능을 유지하기 위해서는 인장강도, 높은 탄성치, 연신율, 조직 안정성, 내식성 등을 갖춘 적당한 재료선택이 가장 중요하다. 현재까지 알려진 소재중 가장 적당한 것은 인장강도 1760MPa, 비례한도 1570MPa 이상의 고강도 Martensite 기지의 강이다. 이는 마르 에이징 강으로 알려져 있으며 그 강화는 Martensite 기지에 Ti, Mo, Ni, Cr과 같은 원소의 고용과 Ni_3Al 상의 석출 등과 관련이 있다. 좀더 높은 강도(1960MPa)의 스프링강은 이들 소재를 가공 열처리, 인발, 압연에 의한 냉간가공과 시효처리에 의해 제조될 수 있다.

2.5. 엔진재료

엔진의 사용 효율과 성능 향상을 위해 구성부품의 사용가능 온도상승이 요구됨에 따라 새로운 초내열재료 개발이 촉진되어 졌다. 이에 따라 주조용 Ni기 초내열합금 GS6K, VGL-12U, GS6U 등의 Turbine Blade와 Integral Turbine Rotor용 합금들이 개발되어 졌다. 이들은 Ni-Co-Cr-Al-Ti-W-Mo계 다결정용 합금으로 γ 의 고용강화와 Ni_3Al 상에 의해 석출강화되며 정밀주조후 열처리하여 사용한다. 이들 합금은 1000°C까지는 장시간 사용할 수 있으며 1050°C까지 단시간 사용할 수 있다.

민항기용 Turbine Blade는 GS30, GS26과 GS32합금을 일방향응고, 단결정 조직으로 제조하여 사용하며 전체 사용온도 구간에서 높은 파단강도, 수명, 내열한도, 조직안정성 등이 우수한 합금이다. 이들 합금은 상대적으로 높은 비중을 가지지만(8.6-8.75) 비강도가 다결정 합금에 비해 크다. 이들은 1050-1100°C에서 장시간 사용할 수 있으며 1150°C까지는 단시간 사용이 가능하여 엔진 수명을 4-5배 향상시킬 수 있었다. 주조용 러시아 초내열합금의 특성을 표 3에 나타 냈다.

표 3 주조용 Ni기 초내열합금의 특성

Ni-Base Superalloys Equiaxial Solidification				
Equiaxial Solidification				
properties \ Alloy	VGL12U	GS6K	GS6U	
γ	7900	8100	8400	
$\sigma_{1000h}^{1000^{\circ}C}$ MPa	150	160	170	

Directional and Single Crystal Solidification

$\sigma_{1000h}^{1000^{\circ}C} = 200$ MPa GS 30, GS26y

Ni기 초내열합금은 엔진소재로 Turbine Blade 뿐 아니라 Turbine Disk와 Compressor의 마지막 단에 사용되며 이와 같은 경향은 2000년대까지 계속될 전망이다. 현재 Ni-Cr-Mo-Ti-Al계의 U698의 Co, W을 함유하지 않은 합금이 직경 1000mm까지의 단조품 Turbine Disk에 사용된다. 이합금은 550-700°C범위 내에서 2200시간 동안 사용이 가능하다. Ni기 Co함유 합금 EP742는 Turbine Disk와 Compressor의 마지막 단에 사용되며, EP41np 분말성형 합금은 Turbine Disk와 Compressor Shaft(분말야금으로 성분의 균질화 가능)으로, EK79, EK79U는 제 5세대(차세대) 엔진에 사용될 합금으로 기대된다. 표 4에 Turbine Disk용 합금들의 100시간 크리프파단 응력을 온도에 따라 비교하여 나타 냈다.

용접가능한 VG145합금은 Liner 등의 고온부용 합금으로 개발되었으며 이는 용접에 의한 수리가 가능하고 Sharp Notch에 대해 R = 0.15까지는 민감하지 않다. 이들 고온부용 합금(Stationary part)들의 고온 특성을 표 5 에 나타 냈다.

표 4 Turbine Disk용 합금들의 고온 기계적 성질 비교

NICKEL-BASE SUPERALLOYS FOR TURBINE DISKS		
ALLOY	σ_{100} , MPa	
	650°C	750°C
EI698	720	420
EP742	830	520
EK79	900	600
EK79U	1050	650

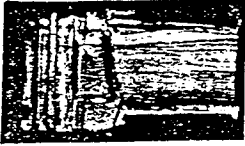
표 5 고온용 Ni기 합금들의 특성

NICKEL-BASE SUPERALLOYS FOR GAS TURBINE ENGINE HOT SECTION COMPONENTS						
properties \ alloy	σ_b , MPa			σ_{100} , MPa		
	800°C	900°C	1000°C	600°C	900°C	1000°C
EP648	420-500	220-230	110-140	140-160	40-50	20-25
VG145	450-480	270-300	150-170	160-170	70-80	30-35

2.6. Cast In-Situ Composite-Superalloy γ/γ' -MeC Eutectic

γ/γ' -MeC 형태의 공정합금(Eutectic) In-Situ Composite-Superalloy는 1100°C까지의 온도에서 가스터빈의 Blade로 사용가능하다. 이합금은 높은 온도구배($G > 120^{\circ}C/cm$)에서 아주 느린 냉각속도 $R = 0.8-1.0$ mm/hr의 조건으로 일방향응고 시킬 때 Eutectic Phase plane front 성장조건에서 복합조직(composit)의 형성이 가능하다. 이 합금은 내열성 기지에 미세하게 분산된 γ' 상과 MeC carbide fiber가 존재하여 20-1100°C에서 높은 강도, 우수한 피로성질을 가지며 1000-1100°C에서 내열성이 우수하다. 그림 3에 In-Situ Composite-Eutectic Superalloys의 성질과 조직을 나타냈다.

CASTING IN-SITU COMPOSITES-EUTECTIC SUPERALLOYS



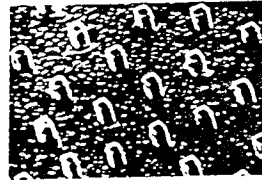
Cooled Gas Turbine Engine Blade Macrostructure



Uncooled Gas Turbine Engine Blade Macrostructure

Stress Rupture of Superalloys and Single-Alloys

Materials	$\sigma_{100} \text{MPa}$			$\sigma_{500} \text{MPa}$		
	900°C	1000°C	1100°C	900°C	1000°C	1100°C
Heat-Resistant Composite	49	30	20	45	25	17
Single-Crystal Superalloy:GS-26	41	20	8.7	30	11.5	7
Single-Crystal Superalloy:GS-32	47.5	25	12.5	39	19	9



Microstructure of γ/γ' -MeC Eutectic Superalloy

그림 3 Cast In-Situ Composites Eutectic Superalloy의 조직 및 고온 기계적 성질