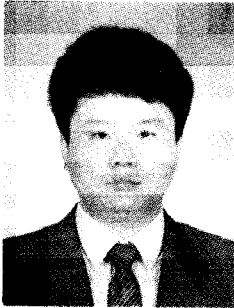


비행체 구조에 사용되는 철강 재료



최 병 학

(내열재료실 선임연구원)

- '80-'84 서울대학교 금속공학과(학사)
- '84-'86 서울대학교 대학원 금속공학과(석사)
- '86-'90 서울대학교 대학원 금속공학과(박사)
- '90.8-현재 한국기계연구원 선임연구원



이 용 태

(내열재료실장)

- '70-'74 서울대학교 금속공학(학사)
- '74-'76 한국과학기술원 재료공학(석사)
- '76-'80 국방과학연구소(선연 및 연구원)
- '80-'85 Case Western Reserve Univ. 재료공학(박사)
- '85-'85 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '85-'90 독일 항공우주연구소(DLR) 연구원
- '90-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 머릿말

최근 항공기 및 미사일, 인공위성과 같은 비행체에는 무게가 가볍고 비강도, 비강성이 높으면서 엔진의 열효율이나 초고속 비행에 적합하도록 내열성과 고온 강도가 우수한 재료의 사용이 점점 증가하는 추세에 있다[1]. 재료공학의 발전과 함께 새로운 항공기용 소재가 실용화됨에 따라 1950년대 말까지 항공기 구조용 재료로서 주종을 이루고 있던 알루미늄과 철강재료가 근래에는 티타늄 합금, 초내열 합금, 복합재료, 금속간화합물 등과 같은 경량고강도 신소재로 대체되고 있다. 따라서 철강재료는 그 사용량이 항공기 전체 무게의 30% 까지도 사용되다가 최근에는 10% 미만으로 감소하였으며, 경제적이면서도 경량 고강도를 가지는 새로운 항공기용 재료가 개발됨에 따라 그 사용량이 점점 더 감소하는 추세에 있다. 그림 1에 항공기 구조재료로 사용되는 여러가지 재료의 사용 추이를 나타내었다. 그림에서 1960년대에 항공기 구조재 중량중 30%를 차지했던 철강재료는 1990년대에 이르러 10%로 감소하였으며, 2000년대에 들어서서는 그 사용량이 10% 미만으로 감소하는 것을 알 수 있다.

초기 항공기의 엔진에 많이 사용되었던 철강재료는 비행체의 운항속도 증가에 따른 재료의 내열성과 고온 내식성의 관점에서 Ni기 초내열 합금과 고온 Ti 합금으로 대체되어지고 있으며, 비행체의 무게 감소에 따른 재료의 비강도와 비강성의 관점에서 고강도 Al합금과 Ti합금으로 대체되어지고 있기 때문에 그림 2에서와 같이 엔진에 사용되는 철강재료도 항공기 구조재에 있어서와 마찬가지로 그 사용량이 점차 감소하게 되었다.

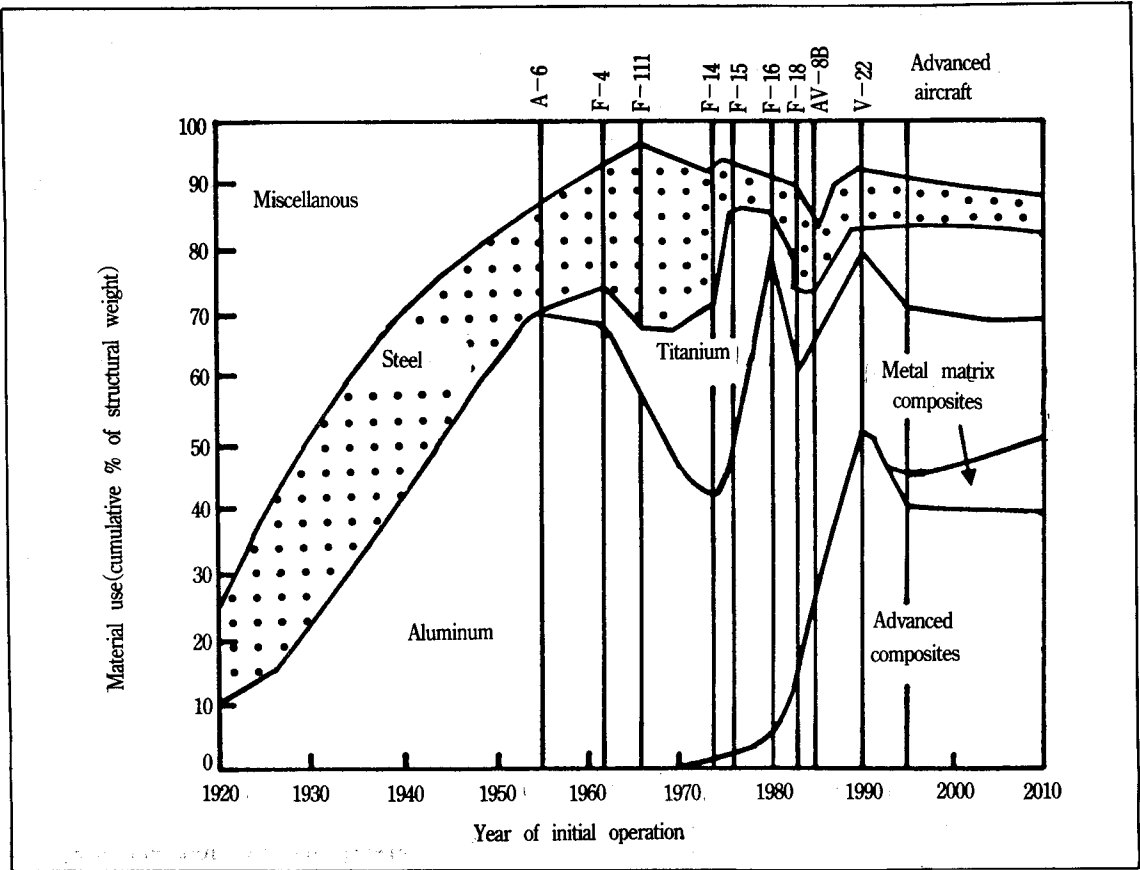


그림 1) 항공기 구조재료 사용되는 소재의 연도별 사용량의 변화

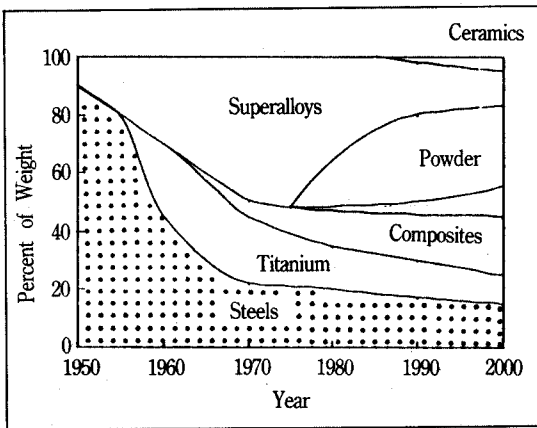


그림 2) 항공기 엔진재료로 사용되는 소재의 연도별 사용량의 변화

즉 1950년대에 엔진 중량의 90%를 차지했던 철강재료가 현재에는 20% 미만으로 감소된 것을

알 수 있다. 또한 철강재료가 가지는 취약점인 해수 분위기에서의 내식성과 수소 취성 등과 같은 안정성의 관점에서 이 재료는 해상 항공기와 같은 특수 환경하에 사용되는 비행체의 부품으로 부적합하기 때문에 그 사용량이 또한 감소하게 되었다.

그러나 이러한 항공기 재료 사용 변화 동향에도 불구하고 철강재료는 지금까지 축적된 자료에 의한 재료의 안정성과 용접성이나 가공성 및 부품의 경제성 측면에서 다른 항공기용 신소재에 비해서 아직도 유리한 점이 많기 때문에 앞으로도 많은 양이 지속적으로 사용되어질 것으로 예측되고 있다. 철강재료로 제조된 항공기용 부품으로는 고강도와 고인성 및 피로강도가 요구되는 강착장치(landing gear), 휘팅류(fittings), 웨스너류(fasteners), 엔진 마운트, 크랭크축, 실린더, 강력

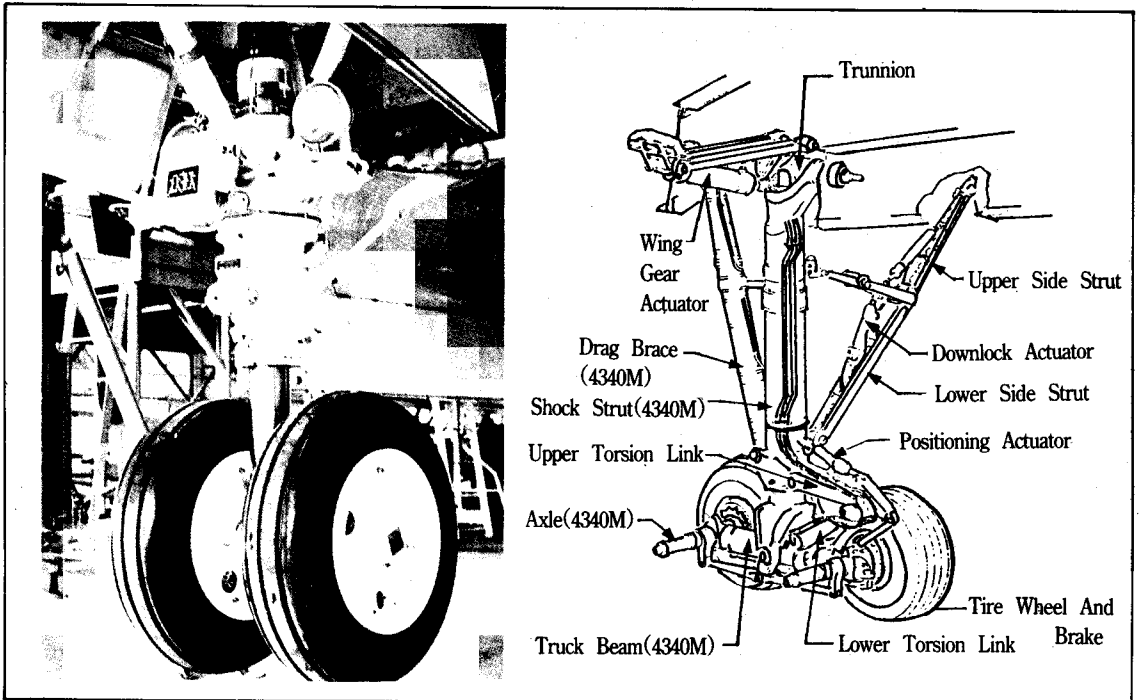


그림 3) B747의 강착장치(Landing Gear)

톱니바퀴, 터어빈 샤프트 등이 대표적으로 사용되고 있는 부품이다. 예로써 그림 3에 보인 747기의 강착장치의 부품과 이에 사용되는 재료를 나타내었는데, Drag Brace, Shock strut, Axle 및 Truck beam에 4340M의 사용되는 것을 볼 수 있으며, Trunnion, Crank 및 Axle에 300 M의 철강재료가 사용되는 것으로 알려져 있다. 이외에 각종 항공기에 강착장치 소재로 사용되는 철강재료를 표 1에 나타내었는데, 4340M과 300M 외에 주로 고강도가 요구되는 부품에 H11, 4330 및 D6AC가 이용되고 있다.

항공기에 사용되고 있는 철강재료로는 일반 탄소강, 탄소강의 인장강도를 높이기 위하여 탄소 외에 Ni, Cr, Mo 등의 원소를 첨가시킨 구조용 합금강(High Strength Steel)과 고온에서의 강도, 내산화성, 내식성을 개선시켜 고온 구조재료로 사용되는 스테인레스강 및 내열용강 등이 있다. 이들 철강재료 중에서 탄소강은 제2차 세계대전 이전의 항공기에 구조재료나 각종 부품 소재로 많이 이용되었지만 현재는 소형 항공기와 같이 고강도를 필요로 하지 않는 소형부품 또는 특수

표 1) 각종 항공기 강착장치에 사용되는 철강재료

Steel Type	Aircraft Designation	Tensile strength(MPa)
AISI 434(AMS 6414)	707, C-141	1800-1950
300M(or 4340M)	C-5A, 720, 727-200 737, 747, 2707	1950-2100
H11	B70	1800-1950
4330V Mod. VAR	F111A	1500-1650
D6AC	(axles 111A)	1800-1950

열처리를 통하여 가공한 케이블류도 사용되고 있는 정도이며, 최근에는 합금강과 스테인레스강이 항공기에 사용되고 있는 대부분의 철강재료이다. 구조용 합금강으로는 Cr-Mo강, Ni-Cr-Mo강, Ni-Cr-Mo-V강 등이 대표적으로 사용되고 있다. 스테인레스강은 Cr과 Cr-Ni 첨가량에 따라 분류되는 마르텐사이트계, 페라이트계 및 오스테나이트계가 있는데, 항공기 부품으로는 이중 마르텐사이트계와 오스테나이트계 스테인레스강이 많이 사용되고 있다[2-6]. 내열강으로는 Ni과 Co를

많이 합금시킨 초내열강, 철계 초내열 합금 등이 있다.

이러한 철강재료가 항공기 등 비행체에 아직 많은 부품의 소재로 사용되는 것을 고려할 때, 비행체 부품으로써의 철강제품 수요조사는 항공기 산업육성과 관련하여 국내에 이미 축적된 기술을 활용하는 면에서 매우 유용할 것으로 보여진다. 따라서 여기서는 먼저 여러 관점에서 일반적인 철강재료의 분류를 하였으며, 항공기용 철강재료의 기초자료를 중심으로 항공기와 우주선 등의 비행체에 사용되는 철강재료에 대한 화학적 조성, 일반적인 물성 및 기계적 성질에 대하여 알아보고 [3-5], 특히 이들 철강재료로 제조되어 항공기 부품으로 사용되는 사용 부품의 종류와 특성에 관하여 기술하였다.

2. 철강재료의 분류

철은 일반적으로 산화철(Fe_2O_3)을 용광로 내에서 코크스(C)로 환원시켜 얻어지게 되므로 철 중에는 많은 양(4% 정도)의 탄소와 다른 몇몇 불순물을 함유하고 있다. 강은 탄소가 많이 함유된 철을 전로를 이용하여 탄소함량을 0.5% 이하가 되도록 정련시킨 것으로서, 대부분의 강은 탄소함량이 원하는 정도 이하로 낮아질 때까지 탄소와 다른 불순물을 산화시켜 만든다. 항공기 부품소재와 같이 특수한 목적에 사용되는 특수강은 탄소함량이 제어된 강재를 다른 합금원소와 함께 VAR (Vacuum Arc remelting), ESR(Electro-Slag Remelting) 등의 방법으로 재용해 하여 특별한 성질을 가지는 강으로 제조되어진다.

특수강은 탄소함량에 따라, 합금원소에 따라, 사용 목적에 따라, 각 나라 별로 또는 각 제조 회사 별로 다양하게 분류되어지기 때문에, 이 재료의 오랜 사용 역사와 함께 다양한 이름을 지니고 있다. 이 글에서는 합금의 용도별 분류와 성분별에 따른 AISI(American Iron and Steel Institute) 규격을 이용하여 항공기에 사용되는 특수강에 대하여 기술하고자 한다. AISI 규격은 합금성분에 따라 분류되기 때문에, 각 나라에서 사용하고 있는 다른 규격으로 쉽게 변환이 가능하다. 일 예로

AISI 304는, KS규격 STS 304, JIS규격 SUS 304, DIN규격 X5CrNi189, BS규격 304S12, NF규격 Z6CN 18.09, SAE규격 30304, ASTM규격 304 등과 같이 규격에 따라 다양한 이름을 가지고 있다.

특수강은 사용 목적에 따라 구조용강, 스테인레스강, 내열강, 베어링강, 스프링강, 공구강 등으로 분류되어질 수 있다. 구조용강은 500MPa 이상의 인장강도가 요구되어지는 기계구조용 부품에 사용하기 위한 강재로 탄소 이외의 합금성분 함유에 따른 일반탄소강과 강인강(구조용합금강)으로 분류되는데, 합금 첨가량이 5% 미만인 Cr-Ni계, Ni-Cr-Mo계의 저합금강과 합금 첨가량이 10% 이상인 Ni-Cr-Mo-V계 및 마르에이징계 고합금강이 이에 속한다. 항공기의 부품으로 사용되는 많은 강재가 이러한 구조용합금강으로 만들어지며, 이들의 특성을 3.1에 기술하였다.

스테인레스강은 철강의 최대 결점인 녹 발생을 방지하기 위하여 표층부에 부동태를 형성시킬 수 있는 합금원소를 첨가하여 내식성을 향상시킨 강으로 내식성 및 내산화성과 내열성을 갖는 합금강을 총칭한다. 항공기 부품으로 사용되는 많은 강재가 스테인레스강으로 만들어지며, 이들의 특성 또한 3.2에 기술하였다.

내열강은 일반적으로 350°C 이상의 고온에서 사용하기 위하여 만들어진 특수강으로, 내산화성, 내식성, 고온 강도, 고온 크릴 등의 성질이 좋은 강재이다. 고온에서 작동하는 항공기 엔진에 사용되는 내열용강으로는 Ni, Co 등의 합금원소가 많이 함유된 초내열강, 철계 초내열 합금 등이 있다. 항공기 부품에 사용되는 대표적인 이들 재료를 3.3에 기술하였다.

이외에의 특수강으로써 베어링강, 스프링강 및 공구강을 들 수 있는데, 베어링강은 회전하는 베어링의 케드륀(Race), 볼 및 롤러 제조에 사용되는 강종으로, 최종 상태로 열처리 되었을 때 경도, 항복강도, 인성, 내마모성, 안정성, 피로강도가 좋은 재료이다. 이중에서도 회전 접촉에 의한 피로강도가 특히 좋아야 하며 또한 고온에서 경도가 낮아지지 않고, 칫수의 변화가 적어야 한다. 항공기에 사용되는 베어링에는 AISI 51100(Fe-1.0C-1.15Cr-0.5Mn-0.3Si-0.25Ni-0.25Cu), 52100

(Fe-1.0C-1.45Cr-0.5Mn-0.25Si-0.25Ni-0.25Cu) 등이 소량 사용된다. 스프링강은 굽힘 및 비틀림 응력이 크고, 탄성한계 및 피로강도가 높고, 크릴 및 이완에 대한 저항이 크며, 충분한 인성을 갖는 재료이다. 대표적인 스프링강으로는 피아노선, 강경선, 고속도강이 있으며, 소량이 항공기 부품의 기계류에 사용된다. 또한 공구강은 상온 또는 고온에서 다른 재료를 성형하거나, 절삭, 블랭킹 등의 가공을 위한 공구로 이용되거나 내마모성이 요구되어지는 공구에 사용되는 강재이다. 이 강재는 항공기 부품으로는 직접 사용되지는 않으나, 항공기 부품을 가공하는데 소요되는 다이나 게이지 등에 간접적으로 이용되는 강재이다.

3. 항공기에 사용되는 철강재료

항공기 부품에 사용되는 강재는 앞에서 기술한 것과 같이 구조재료로서의 그 사용량이 점차 감소하는 추세에 있다. 그럼에도 불구하고 많은 종류의 강재가 다양한 종류의 보조기기를 구성하는 필수적인 재료로 사용되고 있다. 따라서 이 절에서는 항공기용 부품으로 많이 사용되는 철강재료, 즉 구조용 합금강, 스테인레스강, 내열강에 대하여 중점적으로 살펴보고자 한다.

3.1. 구조용 합금강

일반적으로 상온에서 높은 인장강도가 요구되어지는 기계 구성요소 재료로 사용되는 강재를 구조용강이라고 분류하고 있다. 구조용강은 탄소와 그밖에 Ni, Cr, Mn, Mo 등의 합금성분을 첨가시켜 기계적 성질을 개선한 것을 일컫는데, 합금성분이 없는 강은 일반 탄소강이라 부른다. 이들 탄소강 및 합금강은 전 세계에서 생산되는 특수강의 50%가 넘으며, 그 중에서도 합금강은 특수강 전 생산량의 40% 이상이 생산되어 사용되는 가장 수요가 많은 재료이다.

철에 함유되어 있는 탄소는 미량으로도 강재의 기계적 성질에 큰 영향을 주며, 강의 제조 공정으로부터 필연적으로 혼입되는 Mn, Si, P, S 등이 불순물로 존재하며 소재 특성에 영향을 미친다.

그러나 탄소강의 기계적 성질은 거의 탄소 함량에 따라 결정되는데, 탄소량이 증가됨에 따라 강재의 경도, 강도가 증가하게 되며, 연신율, 단면수축률, 인성 등이 감소하게 된다. 그러나 탄소량이 같은 강재도 열처리 조건에 따라 그 기계적 성질이 현저히 변하게 된다. 일반 탄소강은 탄소의 함량에 따라 저탄소강(0.1-0.25%), 중탄소강(0.25-0.55%), 고탄소강(0.55-1.0%)으로 구분되며, 저탄소강은 열처리가 되지 않기 때문에 비교적 강도가 낮고 인성이 요구되는 일반 기계부품에 이용된다. 중탄소강은 열처리에 의한 다양한 강도 변화가 가능하며, 표면경화에 의한 피로성질이 현저히 증가되기 때문에 다양한 용도의 중요한 기계구조 부품에 이용된다. 고탄소강은 열처리에 의한 강도를 크게 향상시킬 수 있으나 인성이 나쁘기 때문에 사용이 한정된다. 이들 일반 탄소강의 분류는 AISI 1030과 같이 첫자리가 1로, 그리고 끝의 두자리(30)는 탄소의 함량, 즉 0.30%C으로 표시된다.

일반 탄소강의 기본 성분에 Mn, Cr, Mo, Ni 등의 합금원소를 첨가하여 구조용강의 기계적 성질을 개선한 강재를 구조용 합금강으로 분류하는데, 항공기 구조용 재료로 사용되는 철강재료로는 주로 중탄소강(0.25-0.55C)과 저탄소강(0.1-0.25C) 및 극저탄소강(0.03C 이하)이 사용된다. 이들은 합금화와 조질처리 등으로 강도를 높여 항공기 부품에 이용되는데, 중탄소강인 경우 다른 합금의 첨가량이 5% 미만인 저합금강의 Cr-Mo계 및 Ni-Cr-Mo계가 이에 속하며, 저탄소강인 경우 합금 첨가량이 5-10%인 중합금강의 Ni-Cr-Mo-V계와 극저탄소강인 경우 합금 첨가량이 10% 이상인 마르에이징계 강종이 항공기 부품으로 사용되는 주된 재료이다. 이러한 구조용 합금강은 고강도 및 강인성을 필요로 하는 기계부품인 축, 치차, 볼트 및 너트 등의 항공기 부품용 소재로 많이 이용된다. 항공기 부품으로 많이 이용되는 각종 합금강과 그 특성은 다음과 같다.

3.1.1. Cr-Mo 강

합금강으로는 Ni-Cr강(AISI 3140)이 먼저 개발되어 사용되었으나, Cr강에 소량의 Mo를 첨가

(a) AISI 4340

합금조성은 Fe-0.4C-1.8Ni-0.8Cr-0.25Mo로 대표되며, 0.4%C 중탄소강에 Ni, Cr 및 Mo의 적정량 첨가로 경화능을 크게 개선한 합금강으로써 경화능 개선으로 인하여 급냉-템퍼링에 따라 단면이 큰 시료에도 강도와 인성을 적절하게 조절할 수 있는 재료이다. 이러한 특성으로 인하여 4340은 특히 다른 저합금강으로는 균일한 기계적 특성을 얻지 못하는 중량이 큰 부분에 90-480°C 온도구간의 여러 극한 상황에서 사용될 수 있다. 그러나 이와같이 높은 경화능으로 인하여 용접성에 있어서 그 성질은 다른 탄소강에 비하여 나쁘다. 따라서 이 재료는 용접 연결이 필수적인 부분에는 사용하기가 어렵지만 아크나 가스 용접 및 electron beam technique과 같은 방법으로 용접할 수 있는 방안이 있다. 이 강재의 용도는 항공기의 착륙장치(landing gear), 기어, 피니온류(pinions), 크랭크 샤프트(crank-shafts), 피스톤과 볼트 및 웨스너류(fastners)에 사용된다.

(b) AISI 4330 V Mod.

합금조성은 Fe-0.3C-0.7Mn-1.5Si-1.8Ni-0.8Cr-0.4Mo-0.07V로 대표되며, 4340 합금강 조성을 바탕으로 하여 개발한 마르텐사이트 조직의 초강력(Ultra-high-strength) 합금강으로써 봉재, 단조재, 판재 및 관재로 성형되는데 열처리 시 1520-1660 MPa의 인장강도를 갖는 재료이다. 또한 4340 강에 비하여 탄소량이 적어 파괴 인성이 증가되며 용접성과 성형성이 우수하다. V의 첨가는 경화능을 개선하고 2차 경화효과를 제공한다. Si의 1.5% 첨가는 템퍼링을 지연시키고 더 높은 온도에서 경화효과가 얻어지고 강도를 높일 수 있는 효과가 있으며, C와 V 함유량을 증가시킴으로써 강도를 더욱 증가시킬 수 있다.

(c) D6AC

합금조성이 Fe-0.46C-1.0Cr-1.0Mo-0.55Ni로 대표되는 이 강재는 경화능이 4340 합금강보다 우수하고 항복강도가 1310 MPa 이하에서는 고인성을 갖는 재료이다. 급냉-템퍼링 열처리 조건에서 2070 MPa 이상의 인장 강도를 얻을 수 있으나 파괴 인성이 나빠진다. 냉각하는 동안 균열과 변형을 방지하기 위하여 오스테나이트화한 다음 524

°C에서 냉각시키는데, 파괴인성은 냉각 속도에 따라 크게 달라진다. 용접성은 우수하나 응력부식취성(stress corrosion cracking)과 습한 분위기에서 부식 피로(corrosion fatigue)에 300M 합금강 정도로 민감하여 이러한 분위기에서 사용시 주위를 필요로 한다. D6AC는 원래 고온 다이용 재료로 개발되었으나 최근에는 1500 MPa 이상의 항복강도가 요구되는 주요 구조용 부품으로써 seamless rolled rings의 압력용기(pressure vessel)와 같은 항공기 부품과 형단조(closed die forging)에 응용되고 있다.

(d) 300M

합금조성이 Fe-0.43C-1.8Ni-1.6Si-0.8Cr-0.4Mo-0.07V로 대표되는 300M은 4340강에 1.6Si와 Mo 및 약간 양의 C를 첨가하여 높은 강도를 가지게 한 재료이다. 즉 강도를 크게 하기 위하여 C 양을 0.4%에서 0.43%로 증가시켰는데, 기계적 성질은 4340강과 유사하다.

3.1.3. 마르에이징강(Maraging steel)

마르에이징강은 탄소량을 0.03% 이하로 매우 낮은 극저탄소강으로써 Fe-Ni 마르텐사이트 조직에서 시효처리를 통한 석출경화에 의하여 항복강도를 높은 합금인데, 높은 응력 조건에서 균열 전파에 대한 저항성이 월등히 향상된 합금이다. Ni를 18% 함유하는 마르에이징강은 95-205°C 온도 범위에서 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 변태하며 시효처리시 고강도가 얻어지는데, 항복강도가 1380 MPa(200 ksi), 1725 MPa(250 ksi), 1930 MPa(280 ksi)로 변화함에 따라 200, 250, 300 grade로 분류된다. 강도와 인성은 조성 및 제조 공정에 따라 달라지며, 두께가 얇은 판재에서는 큰 파괴인성을 얻을 수 있다. 또한 두꺼운 부분(heavy section)에 있어서도 인성과 충격치가 탄소강 및 고장력강보다 크다. 그러나 두꺼운 부분의 파괴 성질은 이방성을 나타내는데, 이는 용해나 제조 공정의 조건에 따라 영향을 받으며, 가공 방향의 횡축에서 그 성질이 가장 나쁜 것으로 알려져 있다. 부식과 산화 저항성은 4340 강보다 우수하며, 수소취성이 나타나지만 탄소강보다는 수소취화에 대한 저항성이 강하다. 어닐링 조건

하면 우수한 성질이 얻어지는 것으로부터 값이 비싼 Ni를 대신하여 Mo으로 대체하여 개발된 강재이다. 탄소강에 Cr을 합금하면 내식성과 경화능이 크게 증가하고, 안정한 탄화물을 형성시키므로 침탄이 촉진되며, Mo을 첨가하면 Cr과 함께 탄화물을 형성하여 뜨임저항을 증가시키는 등 Mo과 Cr을 병행하여 합금시키게 되면 경화능이 훨씬 증가하게 된다. 또한 Mo의 첨가는 결정립 조대화 온도를 상승시키기 때문에 고온에서의 강도도 안정하게 유지시키는 효과를 나타낸다. Cr-Mo계 강종은 탄소함량으로 보면 탄소량이 0.25-0.55%인 중탄소강이며 다른 합금의 첨가량이 5% 미만인 저합금강으로 분류될 수 있으며, 항공기 부품에 사용되는 대표적인 합금으로 AISI 4130, 4140이 있다.

(a) AISI 4130

합금조성은 Fe-0.3C-0.95Cr-0.2Mo로 대표되며, 비교적 낮은 경화능을 갖는 재료이면서 성형성과 용접성이 우수하여 항공기 부품으로 널리 사용되고 있는 강재 중의 하나이다. 급냉-템퍼링 열처리에 의해서는 경화능이 낮기 때문에 제한된 두께에서 그 최적의 기계적 성질을 얻을 수 있지만, 노말라이징에 의해 여러 방면에 응용될 수 있는 충분한 강도와 인성을 얻을 수 있다. 이 재료는 온도가 증가함에 따라 강도가 급격히 감소하기 때문에 370°C 이하에서 사용하여야 하며, 저온에서는 연성-취성 천이온도가 나타나므로 열처리를 통하여 이를 개선해야 한다. 또한 습기가 많거나 해상지역과 같은 부식 분위기에서는 부식을 방지하기 위하여 페인트, electro-plate와 같은 부식 방지 코팅을 반드시 해야 하는 등 특별한 주의가 필요하다. 이 강재는 주조 및 단조 등으로 부품 성형을 하며 목적에 따른 적절한 열처리를 통하여 강도를 900-1300 MPa로 조절하여 항공기용 강력 볼트류, 휘팅류(fittings), 착륙 구조(landing gear)의 스트러트(strut), 브레이스(brace)에 사용되며 이외에도 동체용 파이프류, 샤프트류(shaftings), 부싱(bushing), 기어류, 축(axles), 가스 실린더와 구조용 판재로 사용되는 등 사용범위가 매우 넓은 재료이다.

(b) AISI 4140

합금조성은 Fe-0.4C-1Cr-0.2Mo로 대표되며, 4130 강보다 탄소량을 0.4%로 많게 함으로써 성형성과 용접성을 낮추는 반면에 큰 경화능과 강도를 갖도록 개선한 재료이다. 일반적으로 이 재료는 급냉-템퍼링 상태에서 사용되며, 특별한 경우에 노말라이징-템퍼링 조건이 이용되기도 한다. 최대 사용온도는 480°C이며, 저온에서는 다른 마르텐사이트나 페라이트 강과 마찬가지로 연성-취성 천이온도를 나타내며, 기타 성질은 4130 강과 비슷하다. 이 강재는 항공기의 강착구조 내의 실린더, 피스톤, 트럭 빔(truck beam), 축, 브레이스, 링크(link) 등에 사용된다.

(c) H-11 Mod

합금조성이 Fe-0.4C-5Cr-1.3Mo-0.5V로 대표되는 H-11 Mod 강은 마르텐사이트 구조의 고온 다이(hot work die) 강으로 사용되는 H-11 강을 개량하여 인장강도가 2070-2140 MPa에 이르게 합금설계된 재료이다. Cr의 첨가로 480°C 이상의 템퍼링 온도에서 2차 경화 효과가 있으므로 이 온도 이상에서 고강도용 경화 조건이 된다. 그러나 이를 위해서는 부식과 산화를 방지하기 위한 적절한 표면 처리가 수반되어야 한다. 어닐링 조건에서 성형성과 용접성이 우수하지만, 파괴 인성이 낮아서 항복 강도가 1380 MPa 이상되는 조건에서는 재료 내부의 작은 결함도 주의해야 한다. 이 강재는 AISI 4130, 4140과 유사한 항공기 부품 제조에 사용된다.

3.1.2. Ni-Cr-Mo강

합금강으로 사용되는 Ni-Cr강에 Mo을 합금하여 담금질 온도에서 수냉하지 않고 공냉만으로도 경화시킬 수 있는 자경성을 가지며, 경화층의 인성이 다른 강종에 비하여 월등히 좋다. 따라서 대형 부품을 공냉만으로 경화시켜 열처리 변형을 최소화시킬 수 있기 때문에 대형 항공기 부품과 같은 정밀 부품에 이용되는 강재이다. Ni-Cr-Mo계 강종은 Cr-Mo계와 마찬가지로 탄소함량으로 보면 탄소량이 0.25-0.55%인 중탄소강이며 다른 합금의 첨가량이 5% 미만인 저합금강으로 분류될 수 있으며, 대표적인 합금으로 AISI 4340이 있다.

에서 성형성이 좋으나 용접하는 경우에는 용접부의 인성이 보통 모재보다 낮으므로 용접시 특별한 주의를 필요로 한다.

(a) 250 grade 마르에이징강

합금조성은 Fe-18Ni-7.5Co-5Mo-(0.3-0.5)Ti-(0.05-0.15)Al로 대표되며, 그 기계적 성질은 열처리와 제조공정에 따라 조절할 수 있는 폭이 넓은데, 항복강도가 1200-1380 MPa인 경우 심해용 잠수정에 주로 사용되고, 항복강도가 1380-1620 MPa인 경우 고체 추진식 로켓 모터 케이스나 특수 항공기의 단조류에 사용된다.

(b) 200 grade 마르에이징강

합금조성은 Fe-18Ni-8.5Co-(3-3.5)Mo-(0.15-0.25)Ti-(0.05-0.15)Al로 대표되며, 연성과 인성을 높이기 위하여 항복강도를 1380 MPa로 낮춘 18% Ni 마르에이징강의 일종으로써 Mo와 Ti 첨가량을 낮게 한 것이 다른 마르에이징강과 다르다. 수소취성에 대한 저항성이 일반 탄소강보다 우수하며 내부식성도 4340 강보다 우수하다. 그러나 다른 고장력강과 마찬가지로 단조류의 횡축 방향의 파괴 성질이 저하되는 것에 주의하여야 한다. 용접성에 있어서도 200 grade는 다른 마르에이징강에 비하여 많이 개선되었지만 용접부의 인성이 모재에 비하여 낮으므로 이에 대한 특별한 주의를 필요로 한다.

(c) 300 grade 마르에이징강

Fe-18Ni-9Co-5Mo-(0.55-0.8)Ti-(0.05-0.5)Al의 합금조성으로 대표되는데, 이 강은 18 Ni 마르에이징 강에 항복강도를 높이기 위하여 Ti를 0.5-8.0%로 많이 첨가시켜 석출경화 효과를 크게 한 재료이다. 그러나 기계적 성질은 250 grade 마르에이징 강과 비슷하다.

3.2. 스테인레스강(Stainless Steel)

스테인레스강은 철강의 표면에 산화에 의하여 녹이 스는 것을 방지하기 위하여 강재에 많은 양의 Cr을 첨가하여 표면에 부동태를 형성시키는 내식성의 개선으로부터 얻어진 산물이다. 고 Cr강에 관한 연구는 1820년대에 이미 M. Faraday(영국), M. Berthier(프랑스) 등의 연구자에 의하여 시작

되었으나, 내식성에 관한 연구에 의한 실용화는 1912년에 H. Brearley(영국)의 포신 내부의 라이닝재로 13Cr강을 사용한 것으로부터 발전되어 왔다. 또한 독일에서는 Strauss의 열전대 보호관용 Cr-Ni강의 연구로부터 고 Cr강 및 고 Cr-Ni강을 발전시켜 1912년에 독일 특허를 등록하였고, KRUPP사가 이를 발전시켜 현재까지도 가장 많이 사용되는 대표적인 18Cr-8Ni 스테인레스강이 개발되었다.

스테인레스강은 합금원소의 성분상으로 Cr계와 Cr-Ni계로 구분되고, 미세조직상으로는 Cr계는 웨라이트와 마르텐사이트계로 Cr-Ni계는 오스테나이트계로 구분된다. 이들 세가지 외에도 석출경화형 또는 쾌삭용 스테인레스강이 개발되어 사용되고 있다. 이들 항공기 부품으로 사용되는 스테인레스강에 대한 재료별 특성을 다음에 기술하였다.

3.2.1. 웨라이트계 스테인레스강

웨라이트계는 C가 0.1% 이하, Cr이 14-18%로, 스테인레스 생산량의 20-25% 정도로 주로 건축재, 주방용, 식기류에 많이 사용된다. 그러나 이 재료는 항공기용 부품의 제작에는 거의 사용되지 않는다.

3.2.2. 마르텐사이트계 스테인레스강

마르텐사이트계는 C가 0.1-1.0%, Cr이 12-18%, Ni이 2.5% 이내로 스테인레스 생산량의 10-15% 정도를 점하고 있으며, 주로 저탄소는 내식성을 필요로 하는 기계구조용 재료로, 0.1% C 정도의 것은 상온에서 고장력을 요하는 구조용 재료로 사용됨과 아울러 500°C 근처에서 사용되는 내열 압축기, 증기터빈 날개, 가스 터빈 및 제트 엔진 부품 등에 사용되며, 0.3% C 이상의 것은 구조용 재료로 뿐만 아니라 항공기 부품, 칼, 외과용 의료기기 등에 많이 사용되며, 1% C의 것은 칼, 베어링, 계기 등 내마모, 내식용 부품의 재료로 사용된다. 항공기 부품으로 사용되는 대표적인 재료로는 AISI 403, 410, 416, 420, 440 등이 있다.

(a) AISI 403, 410, 416

합금조성은 Fe-low C-12Cr로 대표되는데, 이들 재료는 비교적 저렴하며 우수한 내부식성을

가지기 때문에 300 grade 마르에이징강 보다는 강도면에서 뒤떨어짐에도 불구하고 다방면에서 오랜 기간동안 상용되어 왔다. 그러나 고강도 조건에서 응력 부식에 약하며 상온 및 저온 인성이 나쁜 단점을 지니고 있다. Si 첨가량이 낮은 403 강은 터빈 부분에 단조 형태로 사용되며, Si 첨가량이 많은 410 강은 단조류 외에도 주조재로도 사용된다. 또한 쾌삭성(free machining type)을 갖는 416과 416 Se 강은 봉재와 단조류로 사용된다. 이들 스테인레스강은 첨가된 성분 원소의 편석으로 인하여 델타 페라이트(delta ferrite) 상이 형성되어 기계적 성질과 성형성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 항공기 부품에 많이 사용되는 재료로는 AISI 410 강이 있으며, 대표적인 부품으로는 제트 엔진 케이스류에 널리 사용된다.

(b) AISI 420

합금조성이 Fe-0.35C-13Cr로 대표되는 AISI 420 스테인레스강은 410 강에 비하여 탄소량을 0.35%로 비교적 많이 첨가시켜 급냉-템퍼링 조건에서 높은 경도와 강도, 내마모성 및 내부식성을 향상시킨 재료이다. 420 강은 항공기에 480°C 이하 조건에서 사용할 수 있으며 합금 첨가량이 더 많은 422 강은 더 높은 온도까지도 사용이 가능하다. 또한 쾌삭성을 높인 유황 첨가 Sulfur 베어링(Free-machining Sulfur-bearing)의 420F 강과 Selenium 베어링 강인 420F-Se 강이 420 강으로부터 개량되어 쓰이는데 이들은 피삭성(machinability)이 420 강보다 약 10% 좋다. 420 강은 절단기류, 외과 의료기구나 기어류, 밸브, 다이 재료 및 수공구와 같이 내부식성과 높은 스프링 경화(high spring temper)가 요구되는 많은 부분에 사용된다.

(c) AISI 440A, 440B, 440C

합금조성은 Fe-high C-17Cr-0.5Mo로 대표되며, 이들 17% Cr 스테인레스강은 탄소 함유량에 따라 440A(0.7% C), 440B(0.85% C) 및 440C(1.1% C)로 분류된다. 쾌삭성을 갖는 440F는 440C에 S와 Se를 부가적으로 첨가하였다. 440 강은 높은 탄소량과 Cr 첨가로 인하여 내마모성과 내부식성이 향상되는데, 특히 탄소량이 증가함에 따라 경도와 강도 및 내마모성이 증가하지만 연성과 내충격성이 감소한다. AISI 440 강은 탄소 및 Cr 함유량이

높아 고온에서 내부식성, 내마모성과 강인성이 요구되는 벨트 시트, 스프링, 베어링 등에 사용된다.

3.2.3. 오스테나이트계 스테인레스강

오스테나이트계는 내식성은 물론 용접성, 인성도 Cr계 스테인레스강보다도 우수하므로 고급의 재료로 거의 모든 분야에 사용되고 있다. 이 계는 C가 0.1% 이내, Cr이 18%, Ni이 8%가 기본 화학조성이지만, 용도에 따라 Ni, Cr 양을 변화시키거나, Mo, Ti, Nb, Cu 등의 특수원소를 첨가하여 물성을 변화시킨 많은 강종이 다양하게 개발되어 있다. 오스테나이트계는 전 스테인레스강 생산량의 60% 이상을 점유하고 있으며, 주로 광폭 판재로 많이 생산되지만 용도에 따라 다양한 형상으로 생산된다. 주요 용도는 항공기용 부품으로 뿐만 아니라 화학공업, 제지, 건축재, 차량, 주방용재 등 다양하게 이용된다. 항공기 부품으로 사용되는 대표적인 오스테나이트계 스테인레스강으로는 AISI 302, 304, 316, 321, 347 등이 있다.

이들 합금의 조성은 Fe-(18-20)Cr-(8-11)Ni로 대표되며, 내부식성과 내산화성이 우수한 재료로써 어닐링 상태에서 성형성도 매우 좋다. 이 강종의 내부식성은 성분 원소에 크게 영향을 받는데 Cr과 Ni 함유량이 많을수록 그 성질이 개선되며, 탄소량이 증가하면 탄화물이 오스테나이트 결정립계에 석출되어 입계 부식을 유발하며 내부식성이 저하되는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성으로 인하여 오스테나이트계 스테인레스강은 내열 및 내부식성을 필요로 하는 엔진 부품이나 파이프 튜브류 혹은 Fire-wall이나 Safety-wire, 핀, 리벳 등에 사용된다.

3.2.4. 석출 경화형 스테인레스강

석출경화형 스테인레스강은 ARMCO사에서 개발한 대표적인 강재로, 마르텐사이트 기지 중에 Cu를 풍부하게 함유한 석출상의 미세한 분산석출에 의하여 경화시킨 재료이다. 이 합금은 고용 경화시 강도를 낮추기 위해서 탄소함량을 0.07%로 낮추었으며, Nb를 첨가하여 탄소를 안정화 시켰다. 또한 Cu는 최대 3% 이내로 제한되는데, 이는 다량의 Cu로 인한 용접성과 인성을 저하시키기

때문이다. 이 강재에는 일부 웨라이트가 공존하기 때문에 대형 부품에서는 압연 또는 단조 방향과 직각 방향에서 연성이 저하되는 이방성을 가지고 있다. 항공기 부품에 이용되는 대표적인 강재로 17-4PH, 17-7PH가 있다.

(a) 17-4 PH

합금조성은 Fe-17Cr-4Ni-4Cu로 대표되며, 미세조직상으로는 마르텐사이트계로 분류된다. 이 재료는 480°C에서 620°C까지의 간단한 시효처리만으로 다양한 기계적 성질의 시효경화 효과를 얻을 수 있도록 합금화한 재료이다. 이것은 고강도와 함께 내부식성, 가공성, 인성 등의 기계적 성질도 우수한 재료인데, 480°C까지 사용할 수 있으며 다른 마르텐사이트강과 같이 Subzero 온도에서 연성-취성 천이를 나타낸다. 17-4 PH는 주로 항공기 및 미사일의 휘팅류(fittings)로 사용되거나 웨스너(fastners), 기어류, 제트 엔진 부품, 밸브, 화학공정 장치, 펌프 샤프트, 핵반응 부품(nuclear reactor component), paper mill 장치 등에 사용된다.

(b) 17-7 PH

합금조성은 Fe-17Cr-7Ni-1Al로 대표되며, 미세조직상으로는 오스테나이트계로 분류된다. 이 스테인레스강은 열처리를 통하여 강도를 1660 MPa 이상으로 높일 수 있으므로 Cr계 스테인레스강에 비하여 내부식성이 우수하다. 425°C 까지 사용할 수 있으며 어닐링 조건에서 성형성이 좋으며 사용될 수 있는 크기의 폭이 넓고 주로 판재로 사용된다. 고강도 조건과 Subzero 온도에서 균열 전파에 대한 저항성이 감소하므로 특별히 주의하여야 한다.

구조용 합금강이나 스테인레스계로 분류되는 철강재료중 특히 고강도를 갖게 되어 항공기 부품으로 사용되는 경우가 있다. 일반적으로 이들은 강도를 기준으로 하여 고장력강(High strength steel)으로 분류되는데, 저합금강으로 4340, 300M, H-11과 고합금강으로써 마르에이징강, 그리고 석출경화형 스테인레스계 강종이 고장력강에 속하며, 높은 강도를 필요로 하는 항공기 부품으로 사용된다. 이와같이 재료의 고장력 특성으로 인

표 2) C-5A 항공기에 사용되는 고장력강의 종류 및 용도

Alloy	Strength level(MPa)	Applications
300M	1950	Main & nose landing gear major structures, Misc. back-up structure & high strength pins, Cargo tie-down rings
4340	1800 1000	Main landing gear drag strut spring back, Main landing gear back-up structure, Pylon attach fygs & damage tolerance straps, Flap & flap actuator tracks, Flap carriage & lugs, Empennage pins & damage tolerance straps, Engine mounts, Fastner & higt temperature applications
H-11	1400	Engine mounts, Hinge pins & fittings, Back-up structure Visor & door hinges & latching mechanisms
4340 Mod	1400	Landing gear pins, Engine mounts, Hinge pins & fittings, Engine mounts, Hinge pins & fittings
PH13-8	1400	Visor latching & locking mechanisms, Cargo rails
PH17-4	950	Back-up structure in corrosive areas, Empennage pivot fittings
PH15-5	1300	Visor latching mechanisms

하여 C-5A 항공기에 사용되는 철강재료의 종류와 강도 및 용도를 표 2에 나타내었다[7].

3.3. 내열강

내열강이란 18Ni-8Cr 스테인레스강에 Mo, W, Nb, Ta, Al, Ti, B, N 등의 합금원소를 첨가해서 고온강도를 증가시키고, Ni 함량을 높이거나 Co를 첨가시켜 오스테나이트 조직을 안정화시킨 합금인데, A286, N-155(SUH 661) 및 16-15-6 등이 항공기의 엔진 등 고온용 부품 소재로 사용되는 대표적인 합금이다.

(a) A286

Fe-25Ni-2Ti-1.5Mn-1.3Mo-0.3V의 합금조성으로 대표되는 석출경화형 내열강으로써, 700°C까지 고온강도를 유지하며 815°C까지 내산화성을 갖는 합금이다. 980°C에서 용체화처리를 한 후 715°C에서 16시간 시효처리를 하면 1000 MPa의 인장강도를 갖는데, 항공기 엔진의 터빈 디스크, 샤프트, 케이스 및 고온용 볼트류로 사용된다.

(b) N-155(SUH 661)

Fe-20Co-20Cr-20Ni-3Mo-2.5W-1Nb의 합금조성으로 대표되며, 이것에 탄소와 질소를 각각

0.15%까지 첨가하여 탄화물이나 질화물을 조직내에 석출시킴으로써 고온에서 높은 강도를 유지하게 하여 815°C 온도까지 사용이 가능하게 한 합금이다. 항공기 엔진의 연소실, after-burner, exhaust assemblies나 고온용 볼트류로 사용된다.

(c) 16-15-6

Fe-16Cr-15Ni-7.5Mn-6Mo-0.35N의 합금조성으로 대표되며, Timken 16-25-6 합금에서 Ni 함량을 낮게 하고 이를 Mn으로 대체하여 질소를 0.35%까지 잔류하게 제조한 내열합금이다. 이 합금은 질소의 높은 함량으로 인하여 완전한 오스테나이트 조직을 얻을 수 있게 되어 고온 특성이 향상되며, 용접성과 강성이 16-25-6에 비하여 우수하다. 16-15-6은 주로 터빈 휠 재료로 개발되었으나 미사일의 블레이드로 사용되기도 한다.

내열강에는 이외에도 JIS 규격 SUH로 분류되는 여러 합금이 있는데, 사용온도와 특성 및 용도는 표 3과 같다. 이러한 내열강의 내열 온도를 다른 합금과 비교하고자 그림 4에 스테인레스강(SUS)과 내열강(SUH) 및 초내열합금의 1000시간 파단 강도를 나타냈다. 내열강은 어느정도 내열성을 갖는 스테인레스강에 고온에서의 내산화성이나 강도를 높이고자 합금원소를 조정된 것으로써,

표 3) 내열강의 사용온도와 특성 및 용도

분 류	종 류	사용온도 및 특성	용 도
Cr-Ni계	SUH31	1150°C 이하의 내산화용	자동차 및 항공기 고급 배기 밸브, 디젤 엔진용
	SUH 309	1100°C 이하의 내스케일성	열처리 설비, 노부품
	SUH 310	1150°C 이하의 내스케일성	
	SUH 330	800-1150°C의 내스케일성	
	SUH 661	816°C 이하에서 고강도 우수	터어빈 로터, 샤프트, 아프터 버너, exhaust assemblies, 고온용 볼트류
	SUH 446	용력이 작은 곳	보일러 연소실, 송풍기
Cr 계	SUH 1	750°C 이하에서 내산화성	자동차 흡기밸브(Inlet valve)
	SUH 3	850°C 이하에서 내산화성	자동차 흡기밸브(Inlet valve)
	SUH 600	600°C 이하에서 크리프강도	터빈 블레이드
	SUH 616	550°C 이하에서 크리프강도	고온용 볼트, 너트류, 터빈 블레이드
스테인 레스계	SUS310	1040-1100°C에서 내산화성 고온강도 우수	열교환기 노부품, 디젤분사기

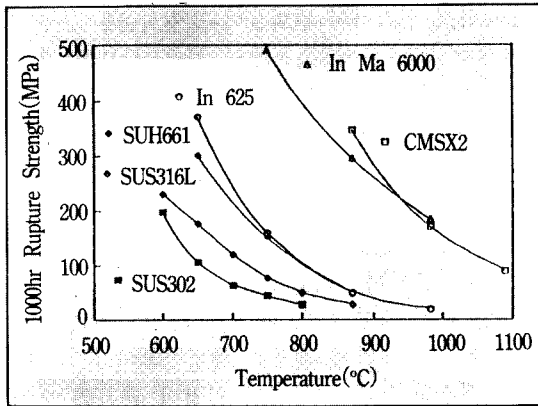


그림 4) 스테인레스강(SUS)과 내열강(SUH) 및 초내열 합금의 온도에 따른 1000시간 파단강도의 변화

그림에서와 같이 SUH 661의 파단강도는 스테인레스강보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 이를 니켈기 초내열합금과 비교할 때, 단조형 초내열합금 Inconel 625와 유사하나, 최근에 개발된 분말성형 합금(inconel MA 6000) 혹은 단결정 초내열합금에 비하여 낮음을 알 수 있다.

4. 맺음말

합금강 등의 철강재료가 과거에는 고강도가 요구되는 항공기 구조용 부품 재료로 많이 사용되었으나, 새로운 재료 개발의 결과로 점차 가벼우며 강도가 높고 환경에 대한 저항성이 큰 복합재료나 Ti기 합금과 같은 재료의 출현과 더불어 그 용도가 적어지고 있다. 그러나 오랜 사용을 통한 물성의 신빙성과 경제성의 관점에서 철강재료는 항공기 부품의 소재로써 아직 상당량 사용되고 있으며, 대표적으로 미국 INCO사에서 개발된 고인성 고강도를 겸한 마르에이징강이 항공기 강착장치(landing gear)에 필수 소재가 되는 등 여러 합금강과 내열강이 항공기 구조용 재료로써 고정적으로 사용되고 있다.

항공기 재료로 사용되는 철강재료들은 철강의 일반적인 특성인 가공성과 용접성이 우수한 장점 외에도, 진공용해 방식이나 VAR(Vacuum Arc Remelting)/ESR(Electro Slag Remelting)과 같은 진공

재용해 방식으로 정련하여 재질을 고급화하고 파괴인성 등의 기계적 성질을 개선시킬 수 있으며, 해양 분위기와 같은 부식환경 등 특수 분위기에서 사용되는 철강재료의 경우 내부식성 향상을 위한 합금화와 코팅과 같은 표면처리로써 그 성질을 개선할 수 있는 가능성을 갖고 있다. 또한 오랜 사용기간 만큼 축적되어진 자료에 의한 재료의 안정성과 경제적인 측면에서 비교적 저가로 생산할 수 있는 장점이 있어 미래의 비행체에도 철강재료의 고정적인 사용은 지속될 것으로 예상된다.

국내에 있어서도 특수강 산업으로 대표되는 합금강은 자동차, 기계 및 선박 등 관련산업과 함께 생산능력, 생산강종 및 기술개발에서 괄목할 만한 성장을 가져왔다[8]. 이를 바탕으로 항공기 산업과 관련하여 철강재료 부품을 국내에서 제조할 경우 소재 기술의 향상과 더불어 수입대체 효과가 클것으로 예상되며 국내 항공산업의 정착에 큰 몫을 담당할 것으로 보여진다.

참 고 문 헌

- [1] J.J. De Luccia, R.E. Trabocco, J. Waldman and J.F. Collins : Advanced Materials & Processes, No. 5, 1989, p.39.
- [2] "특수강", 한국종합특수강 편저, 1978.
- [3] "Aerospace Structural Metals Handbook", H.J. Huccek ed., Metals and Ceramics Information Center at Battelle's Columbus Labs., U.S.A., 1985.
- [4] "Military Standardization Handbook - Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures", Department of Deffence, U.S.A., 1983.
- [5] 김광배, 박명과, 최환중: "항공기 재료", 한국항공대학 출판부, 1990, pp.54-76.
- [6] W.F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill Book Comp., 1981.
- [7] 홍용식: "항공공업 육성 기본방안 연구보고서", 대한항공 한국공항공기술연구소, 1979, 12월 p.393.
- [8] 강희수: "특수강 산업의 기술개발 동향", 산업기술, 한국산업은행, 1992, 3월, 제304호, p.3.