

항공기용 초강력강의 현황과 전망



강 석 봉

(내식재료실 책임연구원)

- '72.2 서울대학교 공과대학 금속공학과 졸업
- '74-'79 동국제강, 삼미중합특수강, 한국중공업 근무
- '81.2 한국과학원 재료공학과(석사)
- '86.8 한국과학원 재료공학과(박사)
- '80-현 한국기계연구소 책임연구원



최 재 영

(내식재료실 연구원)

- '83. 2 서울대학교 공과대학 금속공학과 졸업
- '85. 2 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사)
- '85. 3 한국기계연구소 연구원

1. 서 론

항공, 우주개발, 해양개발 및 원자력산업 등 첨단기술분야에서 고강도재료의 필요성은 날로 증가하고 있다. 그중에서 항공기에는 예로부터 철강재료가 많이 사용되어 오다가, 항공기의 고속화, 에너지절감의 추세에 따라, 고비강도 소재들인 Al 및 Ti 합금과 복합재료등으로 많이 대체되어 가는 추세이지만 몇몇 중요부품들은 아직도 철강재료(초강력강)가 많이 사용되고 있다.

철강재료(특수강)는 항공기에서 랜딩기어와 같이 큰 하중을 받는 부분에 많이 사용되며, 제트 엔진등 고온분위기에도 스테인레스계열의 강이 일부 사용되고 있다. 미사일과 로켓의 모터케이스등 고속비상체 등에도 많이 채택되고 있다. 일반적으로, 항공용재료를 평가할 때 비강도(강도/비중), 비강성(탄성률/비중) 개념을 사용하여 비중을 고려한 강도와 강성으로써 평가하게 되는데, 항공기의 랜딩기어와 모터케이스 등의 용도에서는 절대강도가 높은 재료가 불가결하기 때문에 현재 특수강이 거의 독점적으로 사용되고 있다. 통상 철강을 강도를 기준으로 분류할 때 $120\sim 280\text{kgf/mm}^2$ 의 인장강도의 강을 초강력강이라 부르는 경우가 많다[1]. 초강력강은 초고장력강, 초강인강등으로 불리고 있고, ASTM에는 140kgf/mm^2 이상의 항복강도를 가지는 강을 ultrahigh strength steel이라 규정하고 있다[2].

본 소고에서는 먼저 항공기용으로 사용되고

표1) 초강력강의 분류와 강화기구[3]

합금량	탄 소 량		
	중탄소 (≈0.4%)	저탄소 (0.2~0.1%)	극저탄소 (0.03% 이하)
저합금 (0.5%이하)	Ni-Cr-Mo강 (템퍼드 마르텐사이트)		
중합금 (5~10%)	5Cr-Mo-V강 (2차경화)	5Ni-Cr-Mo강 (2차경화) 5~7Ni-Cr-Mo-V강 (하부베이나이트)	
고합금 (10%이상)	매트릭스강 (2차경화)	9Ni-4Co강 (템퍼드마르텐사이트, 2차경화) 10Ni-8Co강 (2차경화) PH스테인레스강 (금속간화합물)	마르에이징강 마르에이징스테인레스강 (금속간화합물)

있는 초강력강의 종류를 살펴보고, 이들의 특성과 용도, 그리고 초강력강 개발과 관련된 기술등에 대해 개괄해 보고자 하였다.

2. 항공기용 초강력강의 종류

항공기용으로 사용되는 초강력강을 분류하는 방법에는 여러가지가 있겠지만, 주요원소인 탄소와 그외의 합금원소로 나누어서 이들 원소의 첨가량에 따라서 표1과 같이 분류할 수 있다.

이들 초강력강은 표1의 괄호속에 보는 것처럼 각각의 합금마다 그 강화기구가 조금씩 다르다. 표2에는 초강력강의 대표적인 강종과 화학성분을 실었다.

2.1. 저합금계

이 계열의 강은 퀴칭에 의한 마르텐사이트조직에 의하여 강화시키고, 비교적 저온에서 뜨임 처리를 하여 미세한 ε탄화물을 석출시켜 인성을

증가시킨다. 이러한 강종으로는 AISI 41XX계열(한국과 일본 SCM계열)의 Cr-Mo강과 AISI 43XX계열(한국과 일본 SNCM 계열)의 Ni-Cr-Mo강이 대표적인 것들이다. 성분상으로 볼 때 0.30-0.40%의 탄소를 함유하여 퀴칭시에 높은 강도를 부여하고, Cr, Ni, Mo등의 첨가에 의해 경화능을 향상시키고, 뜨임연화저항성을 개선한 합금으로서, 경화능향상으로 물렌칭대신에 기름퀴칭으로 가능하기 때문에 시험편 내외부의 온도차이를 줄이고, 소입중의 부피변화에 따르는 내부응력을 경감시킬 수 있어서 변형과 균열발생을 줄일 수 있다. 그러나, Cr첨가로 인한 뜨임취성이 발생할 가능성이 있는 것이 문제이다.

아래에 대표적인 저합금강계 초강력강을 개괄해 보았다.

2.1.1. Cr-Mo강(AISI 41XX)
(0.5-0.95%) Cr과 (0.13-0.20%) Mo을 첨가한

표2) 대표적인 초강력강의 종류 및 화학조성[4.5]

	강종		성분(wt%)								대표적 열처리 수준(ksi)
	명칭	관련규격	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	기타	
저합금강	4130	AMS6350E	0.28-	0.40-	0.20-	<0.25	0.80-	0.15-		P <0.01	
		AMS6370G	0.33	0.60	0.35		1.10	0.25	S		
	4340	AMS6414C	0.38-	0.60-	0.15-	1.65-	0.70-	0.20-		P <0.01	260-280
		MIL-S-8844	0.43	0.90	0.35	2.00	0.90	0.30	S		
	300M (4340M)	MIL-S-8844	0.40-	0.60-	1.45-	1.65-	0.70-	0.30-	0.05-	P <0.01	280-300 (275-)
		AMS6419	0.45	0.90	1.80	2.00	0.95	0.50	0.10	S	
4330Si	AMS6407	0.27-	0.60-	0.40-	1.85-	1.00-	0.35-		P <0.015	220-240	
		0.33	0.80	0.70	2.25	1.35	0.55	S			
D6AC	MIL-S-8949	0.42-	0.60-	0.15-	0.40-	0.90-	0.90-	0.07-	P <0.025	220-240 260-280	
	AMS6431B	0.48	0.90	0.30	0.70	1.20	1.10	0.15	S		
HY-Tuf	AMS6418B	0.23-	1.20-	1.30-	1.65-	0.20-	0.35-		P <0.04	220-240	
		0.28	1.50	1.70	2.00	0.40	0.45	S			
중합금강	35NCD16	(UK)	0.34-	0.30-	0.15-	3.50-	1.60-	0.30-			270-
		S28	0.40	0.50	0.40	4.50	2.00	0.60			
	HY130	ASTMA579-77	<0.12	0.60 -0.90	0.20- 0.35	4.75- 5.25	0.40- 0.70	0.30- 0.65	0.05- 0.10	P <0.01 S	140-160
H-11Mod	AMS6437A	0.38-	0.20-	0.80-	<0.25	4.75-	1.20-	0.40-	P <0.020	260-	
	AMS6485B	0.43	0.40	1.00		5.25	1.40	0.60	S		
고합금강	HP9-4-30	AMS65CE	0.29-	0.10-	<0.10	7.00-	0.90-	0.90-	0.06-	Co 4.25-	230-
			0.34	0.35		8.00	1.10	1.10	0.12	5.00	
18%Ni 마르테이징강	MIL-S-46850	<0.03	<0.10	<0.10	17.0- 19.0	-	4.60- 5.20	-	Co 7.0-8.5 Ti 0.3-0.5	220-350	

강으로 항공기 동체용 튜빙 등의 구조부재를 비롯하여, 압력용기, 차량의 액슬등에 사용된다. 로켓트 모터케이스 등의 용도에 AISI 4130과 AISI 4132등의 강을 120-130kg/mm²의 인장강도로 열처리하여 사용되고 있다. 이 강종은 기름켄칭에 의하여 마르텐사이트조직을 가지며 뜨임처리하여 템퍼드마르텐사이트조직으로 사용된다.

2.1.2. Ni-Cr-Mo강(AISI 43XX)

Cr과 함께 Ni이 첨가되면 탄성한의 상승, 경화능증가, 충격 및 피로저항치의 상승 등의 효과를 가져오므로 큰 하중을 받는 구조재로서 널리 사용된다. 또 Mo의 첨가는 Cr을 함유하는 저합금

강에서 나타나기 쉬운 뜨임취성에 대한 감수성을 낮추기 위해서이다. 기어나 항공기용 튜빙류등 큰 힘을 받는 부품에 사용되며, 이 강의 개량강들과 함께 항공기 랜딩기어 소재의 대부분을 점하고 있고, 로켓트 모터케이스용으로도 적합한 소재이다. 상당량의 합금원소로 공냉에 의하여 베이나이트조직으로 변태하며 용체화온도에서 기름켄칭에 의하여 마르텐사이트 조직이 되며 약간의 잔류오스테나이트가 존재할 수 있다.

2.1.3. 300M강

AISI 4340 강에 2%의 Si를 첨가하면 이 합금의 강도와 인성이 크게 증가한다. Si함량이 낮은 합

금강을 퀘칭-뜨임처리를 하면 200~300°C 범위에서 잔류오스테나이트가 분해하여 주위에 시멘타이트막을 형성하게 되어 취성을 나타내게 된다. Si의 역할은 잔류오스테나이트와 ε탄화물이 시멘타이트로 변하는 것을 억제하여 뜨임상태의 강을 보다 강하고 질기게 만든다. 300M강은 4340강보다 충격치, 파괴인성, 인장강도, 항복강도등이 현저하게 향상된다. 뜨임연화저항성이 크므로 4340보다 고온특성도 우수하다. 이 강종은 항공기 랜딩기어에 많이 채용되고 있으며, 특히 F/A-18(Mcdonnell Aircraft) 전투기의 경우, 주기어(main landing gear)는 거의가 이 소재로 만들어지고 있다[7].

2.1.4. 기타 저합금 초강력강

이상의 합금강외에 재료에 대한 요구특성에 따라 합금원소의 첨가량, 소재제조 및 가공공정을 달리하여 많은 합금강들이 개발되어 실용화되고 있다. 300M강 외에 Si를 첨가한 강은 Hy-Tuf강이 있는데, 탄소량을 낮추어 인성과 용접성을 개선한 것이다. D6AC강은 4340강보다 Ni를 낮춘 대신에 Cr, Mo, V등을 증가시키거나 새로이 첨가함으로써 뜨임저항성을 개선한 강종이다. 그외에 4330강보다 Si과 V를 증가 혹은 첨가한 4330Si, 4330V등도 현재 항공기용으로 활용되고 있는 저합금 초강력강이다. 여기서 V는 결정립을 미세화하여 인성을 증가시키는 역할을 한다.

2.2. 중합금 초강력강

중합금 초강력강은 석출강화를 적극적으로 이용한 합금들이다. 탄소를 함유하는 강에 다량의 Cr, Mo, V, 등을 첨가하여, 퀘칭후에 500-550°C의 고온에서 뜨임처리를 실시하면 이들 합금원소들이 합금탄화물을 생성하여, 이들이 미세하게 대량으로 생성되면 경우에 따라서는 퀘칭상태보다 더 높은강도가 얻어지게 된다. 이와같이 고온에서의 합금탄화물의 석출에 의한 강화를 2차경화라고 하며 중합금 초강력강의 주된 경화기구이다. 중합금 초강력강은 고온에서 경화가 일어나므로

내열성이 우수하여 AISI H11이나 AISI H13등의 열간다이스강용으로 개발된 강들이다. 이들은 그대로 혹은 약간의 성분 및 공정개량을 거쳐 항공기용으로 사용되고 있다.

2.2.1. 5Cr-Mo-V강(H11, H13)

H11강을 비롯한 열간다이스강용으로 널리 사용되고 있는 강종으로서, 탄소는 약 0.4% 정도 함유하며 높은 Cr함량으로 열처리에 공기퀘칭이 가능하여 대형부품에 적용가능하고 비틀림 발생이 적다. 그러나 대형강괴를 주입하였을 때 탄화물의 편석이 생기기 쉬운 결점이 있다. 인장강도가 약200 kgf/mm²이며, 320°C까지는 강도하락이 없고 고온강도가 뛰어나지만 인성은 약간 낮은 편이다. H11은 B70기의 랜딩기어로 사용되고 있다. 오스포밍, 변형시효, 직접소입, 2차경화로 장인화하여 사용된다.

2.2.2. 5Ni-Cr-Mo-V (HY-130)

초강력강들 중에서는 드물게 마르텐사이트가 아닌 베이나이트조직으로 사용되는 강이다. 하부 베이나이트 조직으로서 항복비(항복강도/인장강도)가 낮아서 가공경화율이 크므로 연신율이 크다. 크랙전파에 대한 저항성이 크고 Mo의 첨가에 따라 2차경화능 정도가 달라진다. 용접한체로 사용할 수 있고, 130~170kg/mm²의 인장강도를 갖고 있으며, 로켓트 모터케이스 재료로 사용되고 있다.

2.2.3. 기타 중합금 초강력강

0.8C-4Cr-4Mo-1V-0.2Si의 조성을 갖는 M-50강은 고속도강의 일종으로서, 항공기 가스터빈 엔진의 베어링으로 널리 사용되고 있다. 35NCD16은 Mirage, Concorde 등의 유럽에서 개발된 항공기의 랜딩기어로 사용되고 있다.

2.3. 고합금 초강력강

합금원소의 첨가량이 10%이상일 때 고합금으로 분류한다.

이에는 MA강(매트릭스 강), Ni-Co강, PH스테인레스강, 마르에이징강 등으로 대표된다. MA강은 (0.3-0.5) C-5Cr의 기지에 Mo, W, V등의 합금탄화물을 첨가하여, Cr을 포함한 합금원소의 총량이 12%정도까지 되면, 그 강도가 245kgf/mm²까지 얻을 수 있어서 탄화물을 이용한 강화로서는 최고의 강도가 얻어진 강을 말한다[1].

2.3.1. PH스테인레스강(석출경화스테인레스강) [6]

PH스테인레스강은 Ni과 Cr을 함유하는 내식성이 좋은 기지에 금속간화합물을 석출하여 강화를 도모한 강으로서, 스테인레스강의 항복강도가 낮은 것을 보완한 것이다. 기지조직에 따라서, 마르텐사이트, 페라이트, 오스테나이트 및 이들의 혼합조직강이 있다. 그중에서 가장 강도가 높은 마르텐사이트를 주체로 한 것이 17-4PH(17Cr-4Ni-3Cu 0.25Nb)과 17-7PH(17Cr-7Ni-1.15Al)이다.

17-4PH는 시효처리에 의하여 Cu상을 석출하여, 그리고 17-7PH는 Ni과 Al의 금속간화합물의 석출에 의하여 강화시키고 있다. 시효처리후의 강도는 약100-140kg/mm²이고, 용도에 따라서 냉간가공후에 시효를 하여 180kg/mm²의 강도도 얻을 수 있다. 이러한 PH스테인레스강은 내열성과 내식성이 우수하여 항공기 부품, 미사일의 부품에 사용되고 있고 그외에 압력용기나 화학플랜트 부품, 해양구조물의 기계부품등에 널리 사용되고 있다.

2.3.2. 9Ni-4Co강[8]

1960년대에 Republic Steel사에서 개발된 강종으로서 높은 강도에서 파괴인성이 양호한 강종으로서 탄소함량이 다른 4종의 강이 실용화되어 HP9-4-20, HP9-4-25, HP9-4-30, HP9-4-45로 각각 탄소함량이 0.2, 0.25, 0.3, 0.45%로서 HP9-4-20과 HP9-4-30이 많이 사용되고 있다. 경화능과 인성을 높이고, 고용강화효과를 주기 위하여 Ni의 함량을 높이고, Ni의 함량이 높아짐에 따르는 잔류오스테나이트 발생을 억제하기 위하여 Ms(Martensite start temperature)를 높이는 Co를 첨가한 강으로서,

켄칭중에 오토템퍼링에 의하여 고강도와 고인성을 가지게 된다. 이강은 또한 성형성이 좋고 용접성도 우수하여 HP9-4-30강은 항공기 구조부재, 압력용기, 로터축등으로 사용되고 있다. HP9-4-30강은 F/A-18의 nose larding gear로 많이 사용되고 있다.

2.3.3. 마르에이징강[2,6]

마르에이징강은 1950년대 후반부터 미국의 INCO사에서 개발이 진행되어, 현재 대표적인 초강력강의 하나로 되어 있다. 마르에이징강은 종래의 초강력강과 같은 높은 강도와 인성뿐만 아니라 가공성, 용접성 등 구조재료로서의 구비조건을 두루 갖추고 있다. 마르에이징강(maraging steel)은 "Martensite Age Hardening"에서 유래한 용어로서, 용체화처리(표준열처리 815°C)시에 생성되는 연질의 Fe-Ni마르텐사이트기지에, 시효처리(표준열처리 482°C에서 3시간)를 하면, Ni, Ti, Mo등이 금속간화합물로 석출하여 강화되는 강화기구를 갖고 있다. 용체화처리상태에서는 경도가 H_RC 30 정도로 연한 상태이므로 가공성이 뛰어나, 공구등을 제조할 때 이상태에서 가공한 후 시효처리를 하면 편리하다. 더욱이 마르에이징강에서는 탄소를 불순물원소로서 규제하므로 시효열처리에 치수 및 형상변화가 거의 없다. 따라서, 복잡한 형상의 공구 및 금형제작에 극히 유리하다. 마르에이징강의 종류를 표3에 보았다. 마르에이징강의 용도를 크게 보면 항공용과 공구용으로 대별할 수 있다.

표3) 대표적인 마르에이징강의 조성 및 항복강도[9]

	Ni	Co	Mo	Ti	Al	C (max)	Y.S (ksi)
18Ni200	18	8	3	0.2	0.1	0.03	200
18Ni250	18	8	5	0.4	0.1	0.03	250
18Ni300	18	9	5	0.7	0.1	0.03	300
18Ni350	18	12	4	1.6	0.2	0.03	350
400Alloy	13	15	10	0.2	0.1	0.03	400
500Alloy	8	18	14	0.2	0.1	0.03	500

기계적특성과 우수한 용접성(낮은 탄소함량) 및 성형성을 살린 용도가 항공용이라면, 기계적특성과 가공성, 열처리시의 치수불변성을 살린 것이 공구용이다. 표4에는 마르에이징강이 적용되는 항공용 부품을 열거하였다.

표4) 마르에이징강이 사용되는 항공우주 및 항공기용 부품[9]

- Large rocket-motor cases
- Load cells
- Smaller, special-purpose rocket motor cases
- Universal flexures
- Gimbal-ring pivots
- Helicopter flexible drive shafts
- Jet-engine shafts
- Anchor rails for mobile service tower of Saturn IB
- Explosive bolts for Lunar Excursion Module (LEM)
- Shock absorbers for Lunar Rover
- Landing gears
- Arresting hooks
- Wing hinge for swing-wing planes

3. 초강력강의 항공우주용도

제2절에서 살펴본 초강력강들은 강도와 인성을 요하는 용도에 널리 사용되고 있지만, 특히 항공기용으로 적용되는 곳을 살펴보면 항공기의 랜딩기어와 볼트, 너트, 핀 등의 부품과, 로켓 모터케이스 등을 들 수 있다. 아래에 대표적인 용도인 랜딩기어와 모터케이스에 대해 간략히 살펴보았다.

3.1. 항공기 랜딩기어[5]

항공기의 랜딩기어는 수톤에서 수백톤에 달하는 기체의 중량을 지지하고, 착륙에 따르는 충격을 흡수하는 역할을 하기 때문에 높은 강도와 인성이 동시에 요구되고, 피로강도도 높아야 한다. 한편, 이 랜딩기어는 비행중에는 무용지물이 되기 때문에 비강도가 높음과 동시에, 비행중의 공력성능의 관점에서 랜딩기어의 수납시 공간절감에도 관심을 가져야 하므로 단위부피당 강도도 높은 것이 바람직하다. 이러한 여러가지 요구조건에 부응하는 소재의 선정이 매우 중요하며, 초강력강이 주로 사용되고 있다. 항공기의 기체재료층에 종래에 철강재료가 사용되던 곳에 Al, Ti합금 및 복합재료 등으로 대체가 많이 진행되었지만, 랜

표5) 랜딩기어용 초강력강 및 사용기종[10]

소재(초강력강)	기종	비고
4330M	C-1, T-2, B-727, F-16	공구강으로 개발된 강 4340+2%Si
4340	B-707, DC-8, C-141	
D6AC	F-111, F-16	
300M	B-747, DC-10, C-5A F-14, F-15, F-16, F/A-18(MLG)	
HP9-4-30	F/A-18(NLG)	주로 특수군용기등에 응용
35NCD16	Mirage, Concorde	
Maraging	VTOL Harrier, VC-10	

*MLG : Main Landing Gear
NLG : Nose Landing Gear

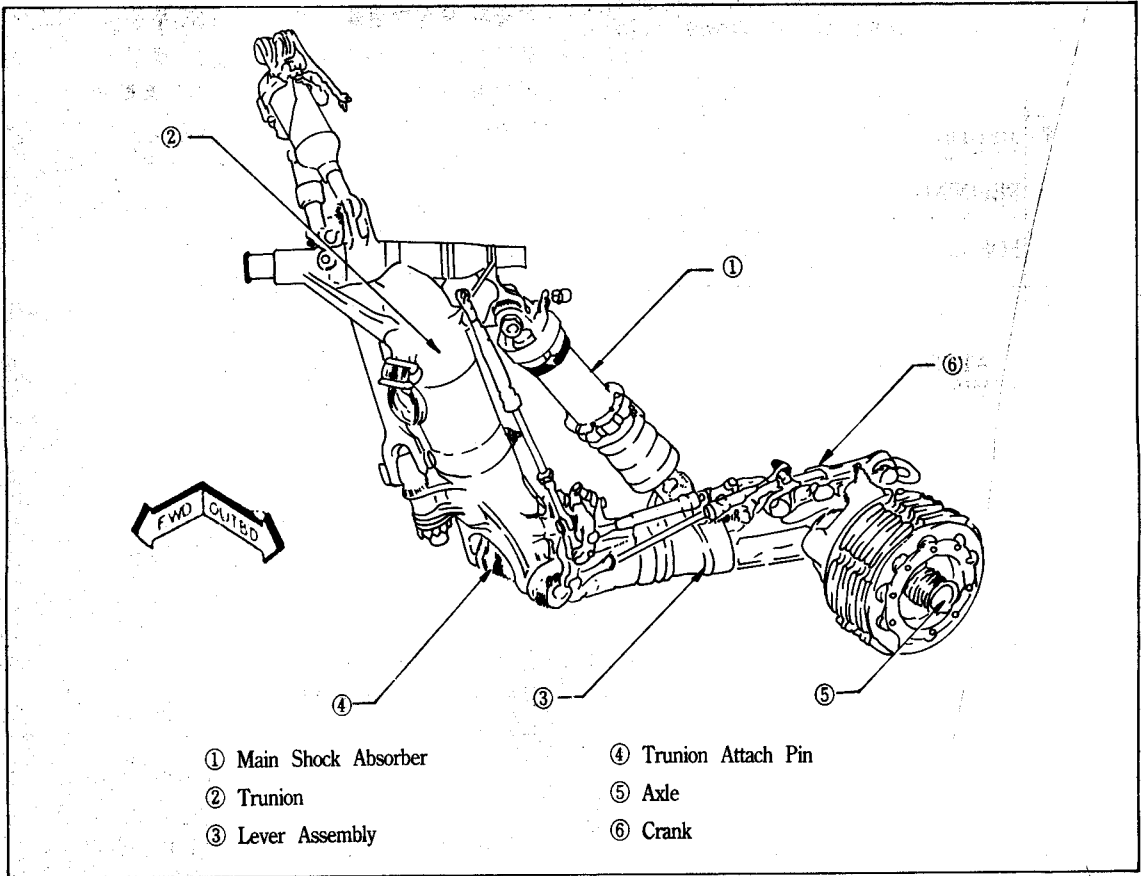


그림 1) 300M강이 사용되는 F/A-18전투기의 주랜딩기어의 주요부품[7]

딩기어는 아직까지 초강력강이 독점적으로 사용되고 있는 실정이다.

표5에는 제2절에서 개관한 랜딩기어 소재가 사용되는 항공기종을 분류하여 보았다.

그림1에는 300M강이 사용되고 있는 F/A-18 전투기의 랜딩기어를 보였다.

항공기 랜딩기어의 제조공정은 소재업체 및 가공업체가 담당하는 부분으로 대별할 수 있는데 표6에 제조공정의 일례를 나타내었다.

3.2. 로켓트 모터케이스[5]

로켓트 모터케이스 특히 우주개발 등에서 고체연료를 사용하는 모터케이스에 고강도 고인성 재료가 필요하다.

로켓트 모터케이스의 구비특성을 살펴보면, 고비강도, 고인성의 재료특성외에 용접성, 절삭성, 성형성 등의 가공특성을 들 수 있는데, 이러한 특성들은 경량화, 파괴에 대한 신뢰성, 제품의 치수정밀도, 가격 등에 영향을 주게 된다. 로켓트 모터케이스용 소재로 대표적인 것들을 표7에 실었는데, 이 표에서 보면 초강력강들이 비강도 측면에서 Ti합금에 약간 처지지만, 파괴인성이 월등히 높기 때문에 우수한 것을 알 수 있다.

현재 가장 일반적인 것은 AISI4130, 4132 등이고, 더 높은 강도가 요구되거나 경화능이 문제가 될 때는 AISI 4340이나 D6AC등이 사용된다. 그러나, 탄소량이 높아지면, 용접균열에 유의해야 한다. 마르에이징강은 고강도, 고인성에 압연등 성형성과 용접성이 양호하여, 특히 적합하며 모터케이스에

표6) 항공기 랜딩기어 제조공정례

분 야	공 정
소재업체 ↓	MELTING ↓
	REFINING ↓ ← 품질인증시험
	FORGING ↓ ← 품질인증시험
가공업체 ↓	ROUGH MACHINING ↓
	HEAT TREATMENT(QUENCH & TEMPER, H _r C50) ↓
	TEST(탈탄시험, 인장시험) ↓
	FINAL MACHINING ↓
	STRESS RELIEVE(350°F, 4시간) ↓
	TEST(Penetration, Magnaflux, Ultrasonic, Tensile) ↓
	SHOT PEENING ↓
	PLATING

대한 용도는 더욱 확대될 것으로 전망된다.

4. 항공기용 초강력강 개발 관련기술

항공기용 초강력강의 개발은 합금설계, 철강제조

기술과 특성발현을 위한 공정기술, 부품제조기술이 유기적으로 결합되어 얻어지는 총합적 성격을 가지며, 소재의 비금속개재물을 극소화하기 위한 노외정련 및 특수정련(ESR, VAR 등) 기술의 발전과 케를 같이하여 산소, 황, 인 등의 불순원소의 함유량을 ppm 단위까지 관리할 수 있는 초청정강 제조 기술, 제어압연 및 정밀압연과 같은 압연기술, 가공열처리 기술, shot peening, 열처리기술, 내부 및 표면의 품질보증기술 등을 바탕으로 초강력강의 개발이 가능하다. 여기에서는 이들 몇몇 기술에 대해 간략히 살펴본다.

4.1. 초청정강 제조[11]

항공기용 소재는 높은 강도와 인성, 내피로성, 등이 우수하고 신뢰성이 높아야 하는데, 이들은 소재내부에 존재하는 불순물과 연관이 있다. 높은 경도에서의 피로성질은 표면연마도, 잔류응력, 비금속개재물에 따라 민감하게 변한다. 기지의 경도가 높아지면 피로강도는 거의 직선적으로 증가하다가 특정치 이상의 경도에서는 증가하지 않는다. 이처럼, 초강력강의 강도가 높아지면 노치감수성이 커지고, 응력집중원인 비금속개재물에 특성이 크게 영향을 받게 된다. 초강력강등의 특수강에서 존재하는 결합이자, 응력집중원이 되는 것은 비금속개재물이다. 이런 비금속개재물은 Al₂O₃나 MnS등이다. 이런 초청정강을 제조하기

표7) 모터케이스용 재료

재 료 명	열처리상태	밀 도 (g/cm ³)	항복응력 (kgf/mm ²)	인장강도 (kgf/mm ²)	비 강 도 (mm)	파괴인성 (kgf/mm ^{3/2})
AISI4130	*Q. T.	7.83	120	133~147	17~19	-
D6AC	Q. T.	7.86	148	158~172	20~22	290
마르에이징강 (300ksi)	*STA	8.00	191	199	25	320 ⁵⁾
Ti-2Al-2Mn	*ANN	4.5	64	70	15	-
Ti-6Al-4V	STA	4.44	109	116~127	26~29	120
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	STA	4.8	120	130~140	27~29	170

*Q. T. : Quench. Tempering STA : 용체화후 시효처리
ANN : 어닐링

위하여는 우선 청정한 고품위원료를 사용하는 것이 필수적이다. 최근에는 노외정련기술 및 ESR, VAR 등 특수정련기술의 발달로 불순원소를 제거하여 비금속개재물을 엄격히 관리할 수 있어, Al_2O_3 의 경우 산소량으로 환산하면 10ppm이하로 관리함으로써 강종의 특성을 비약적으로 개선시키고 있는 것이 선진국의 현황이다. 또한 함유량의 저감뿐만 아니라 비금속 개재물의 형태를 제어하여 응력집중원으로서 무해하게 만드는 연구도 진행되고 있다. 초청정강 제조로 저합금초강력강에서 크게 문제가 되고 있는 뜨임취성(temper embrittlement), 지연파괴(delayed failure)등의 취성이 크게 경감될 수 있기 때문에, 초청정강 제조기술은 초강력강 개발에 불가결한 기술이다.

4.2. 가공열처리 기술

합금첨가, 열처리, 가공등으로 향상시킨 강의 강도와 인성을 더욱 개선시키는 방법으로서 가공열처리(thermo-mechanical treatment)가 초강력강에 많이 적용된다. 가공열처리에는 여러가지가 있지만, 초강력강에는 주로 오스포밍이 많이 채용되고 있다.

오스포밍처리[12]

오스포밍처리는 A_2 점이상으로 가열하여 오스테나이트화한 강을 일단 준안정오스테나이트의 온도로 냉각한 다음, 항온으로 유지하여, 강한 소성가공을 준 후 퀴칭하여 마르텐사이트변태를 하게 한다. 이렇게 하여 초강력강의 약 150-250 kg/mm²의 영역에서 50-70kg/mm²의 대폭적인 강도상승을 가져오고, 인성은 저하되지 않는다[12]. 마르에이징강에서도 강도향상을 위하여 오스포밍처리가 연구되고 있다[9].

4.3. 열처리기술

열처리에 따르는 균열방지와, 기계적 특성향상을 위해 초강력강의 열처리에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.

D6AC강의 열처리에 개발된 오스베이퀸칭(Ausbay quenching)[12,13]이 실용화되었고, 오스텨퍼링을 변형시켜 오스텨퍼링을 부분적으로 실시하여, 마르텐사이트와 베이나이트의 2상조직을 갖게함으로써, 파괴인성을 향상시키는 연구도 행해지고 있다[14].

4.4. 쇼트피닝처리 공정기술[15]

재료가공면에 쇼트(shot)를 고속으로 충돌시키면 가공경화와 함께 표면층에 소성변형에 수반하는 압축잔류응력을 생성하고, 피로강도를 증대시킨다. 또한, 내용력부식성 향상에 도 효과가 있다. 쇼트피닝은 비교적 값싸게 강도향상을 꾀할 수 있는 방법으로, 나사류, 기어류 등 피로강도를 요구하는 부품에 적용되고 있다. 재질에 따른 쇼트피닝의 효과를 보면 침탄한 상태에서는 Cr-Mo강이 Ni-Cr-Mo강에 비해서 피로강도가 낮지만 쇼트피닝처리를 하면 거의 비슷해지므로 재질의 존성이 적다는 공정상의 이점이 있다.

이상에서 언급한 공정외에, 표면처리 결함탐사 기술 등 부품처리기술 및 품질보증기술 등 초강력강 개발에 관련된 기술은 많이 있지만 여기서는 이상으로 줄인다.

5. 국내 초강력강 개발 현황

항공기용 초강력강은 선진제국에서는 이미 오래전에 개발이 완료되어, 공정개선을 통한 특성향상에 치중하고 있고 미국, 영국, 일본 등이 주요공급국이다. 저합금계와 중합금계에서는 합금설계에 의한 신탍금개발은 그다지 이루어지지 않고 있다. 대신에, 용해와 정련, 가공공정을 보다 엄격히 관리함으로써 강도와 인성을 개선시키는 쪽으로 노력이 경주되고 있다. 일본은 주로, 항공기용 소재를 미국의 라이선스생산하는 방식으로 생산하고 일찍부터 국가적 지원을 받아 초강력강 생산에 높은 기술수준을 보유하여 거의 자급단계에 이르고 있다. 최근에는 350ksi급 이상의 고강도 마르에이징 연구가 활발히 이루어지고 있다.

국내의 기술수준을 보면, AISI4340계의 저합금강은 일반산업용 및 군사용으로는 만족할 수준에 도달해 있으며, 생산업체는 품직제고에 진력하고 있지만 요구조건이 까다로운 항공기용으로는 아직 부족한 점이 많다고 할 것이다.

항공기용 소재에 기본적인 정련설비들인 ESR, VAR 설비를 보유하고 있는 업체도 많지 않을 뿐 아니라 생산에 따르는 기술축적이 되어 있지 않아, 전반적으로 초보단계라 할 수 있다. 근래에 철강 전문제조업체가 정련설비를 도입·설치하는 경우가 늘고 있으나, 생산에서부터 품질관리까지 많은 난관이 놓여있다.

실험적인 연구를 살펴보면, 한국기계연구소, 한국과학기술원, 산업과학기술연구소 등 연구소와 포항공대 등의 대학에서 초강력강의 뜨임취성, 미세조직과 기계적특성등에 대한 연구를 하고 있다. 마르에이징강의 경우, 한국과학기술원에서 Co를 함유하지 않고, Mo을 W으로 대체한 마르에이징강(W-250)을 개발한 경험을 갖고 있고[9], 생산과 관련하여 삼미특수강이 ESR공정을 정련 공정으로 하여 마르에이징강의 시험생산을 실시한 예가 있다. 초강력강을 사용한 항공기부품을 제조하는 업체를 보면 소재는 외국에서 반제품을 들여와서 가공하여 제조하고 있으며, 항공기용 초강력강의 활용에 필요한 기초자료등의 부족으로 애로를 겪고 있는 실정이다.

6. 결 론

항공기용 초강력강은 일반산업용 특수강에 비교하여 수요물량면에서 극히 비중이 작고, 요구특성이 까다로워서 개발과 생산에 고도의 기술을 요하는 많은 공정이 복합적으로 수반되어 많은 어려움이 따른다. 그러나, 이런 기술들은 그대로 금속소재산업의 기반기술들이어서 기술의 파급효

과가 크고, 소재산업중에서는 부가가치가 대단히 높으며, 통상 초강력강은 단강제품이기에 거대한 단조기(수만톤급) 등 설비투자가 막대하여, 국가적인 차원에서 집중투자가 이루어져야 할 분야이다. 더우기 항공산업이 신뢰성이 높은 소재를 바탕으로하여 발전하는 산업인만큼 소재를 중심으로한 소재업체와 항공기부품 제조업체와의 긴밀한 협조가 산학연의 연구체제속에서 이루어질 때, 이 분야의 기술향상이 앞당겨질 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 極限に挑む 金属材料 田中良平編著 工業調査會 1979.
- [2] Metals H/B 9th ed. Vol.1 1978.
- [3] 金尾正雄, 河部義邦: 日本金屬學會會報, 12(1973) 309
- [4] Aerospace Structural Metals H/B, Metals and Ceramics Information Center Battelle 1985.
- [5] 中村洋明: 特殊鋼 36(1) (1987), 45.
- [6] W. F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys McGraw-Hill 1981.
- [7] McDonnell Aircraft Manufacturing Data
- [8] 材料テクノロジ 11 構造材料[I]金屬系 堂山昌男外編, 1985. 3.
- [9] Maraging Steels, Recent Developments and Applications 1988, TMS.
- [10] 日本航空宇宙工業會: 特殊鋼 31(4) (1982)
- [11] 小口征男 金屬 1984(4) 2
- [12] 鐵鋼材料便覽: 日本金屬學會編, 丸善 1981.
- [13] G.L. Peterman, R.L.Jones: Met. Eng. Quart 15(2) (1975), 59
- [14] Y. Tomita: Met. Trans 189(1987), 1495
- [15] 竹田仁, 青木洋二: 特殊鋼 38(6) 39.