



초초임계 화력발전용 터빈 및 보일러소재

공병욱, 강성태, 이연수

| 두산중공업

[요약문]

석탄화력발전소의 효율향상은 스팀온도 및 압력의 증가를 통해 꾸준히 이루어지고 있으며, 이러한 고효율의 화력발전은 사용 연료의 감소 뿐 아니라 SOx, NOx, CO₂ 등의 환경 가스배출을 감소시키는 효과도 있다. 이에 따라 운전조건을 고온, 고압화하려는 노력이 전 세계적으로 꾸준히 전개되고 있으며, 경제성 있고 높은 고온특성을 갖는 터빈 및 보일러 소재 확보 여부가 발전소 건설 가능성을 결정하는 가장 주요한 요소 중 하나로 작용하고 있다. 본 고에서는 USC(Ultra Super Critical) 조건에 사용하기 위한 소재의 개발과정과 현재 사용되고 있는 다양한 발전용 고온소재의 특징에 대해 기술하고자 한다.

1. 서론

전기에너지는 각 국가의 삶의 질과 복지개선의 자원이기는 하나 지구환경보호를 위해 에너지 생산 자체가 엄격한 배출 규제에 직면해 있는 실정이다. 특히, 지구상에 고루 분포되고 매장량이 풍부한 석탄 의존도가 높아질 것으로 예상되나 공해 배출량을 감축하기 위해서 발전소의 효율을 개선시킬 필요성이 보다 높아질 것이다. 석탄화력 발전소의 열효율 개선은 그림 1과 같이 연료비 절감뿐만 아니라 SO_x, NO_x와 CO₂ 배출량을 감소시키는 부가적인 효과가 있다. 이산화탄소 배출량 감소는 현 정부에서도 2020년 BAU 기준 30%감축을 목표(2005년 기준 4% 감축)로 관련 정책을 추진하고 있다. 가장 배출량이 많은 화력발전소의 경우 800MW 발전소 효율 1% 개선은 발전소 수명동안 약 1,000천톤의 CO₂배출량을 줄이는 효과가 있는 것으로 평가되므로 이러한 환경적 요인 등의 부가적인 이점으로 USC 발전소 건설에 대한 관심이 높아지고 있다.

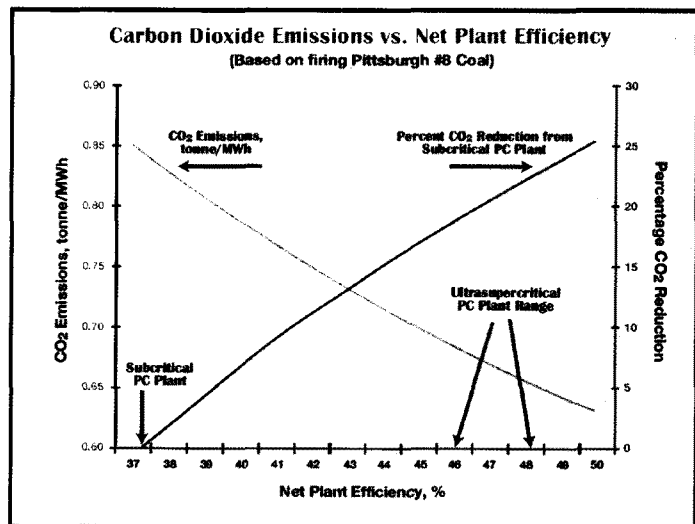


그림 1. 발전효율과 이산화탄소 배출량과의 관계¹⁾

Advanced 운전 조건인 고온에서 잘 견디고, 발전비용 상승에 영향을 미치는 발전소 건설 투자 비용을 최소화하기 위해 보일러와 터빈용 주요 부품 소재로 사용가능성이 가장 높은 것은 Martensitic 강이다. 특히 9-12%Cr계의 강은 대형 단조품, 주조품과 후속 파이프의 제조 용이성과 함께 고온·고압의 증기조건에서 산화 저항성과 장기간 높은 크리프 강도를 요구한다. 이러한 요인 때문에 대용량의 경제적인 USC 발전소 건설에 주요한 challenge가 재료기술 분야에 집중되어 왔다^[2].

현재 가동중인 USC 발전소 중에서 일본의 Tachiwanawan 1, 2 및 Isogo 1의 경우 주증기조건 25.0MPa/600℃, 재열증기온도 610℃ 발전소가 가장 앞선 형태이며, 그 이상의 증기조건에 사용 가능한 소재는 Pilot 규모 혹은 소형 규모로 제조하여 특성평가 중인 것으로 알려져 있다. 본 글에서는 USC 발전소에 사용 될 수 있는 재료를 중심으로 발전용 소재를 소개하고자 한다.

2. 터빈 재료

증기 터빈용 핵심 부품 소재는 고압(high pressure : HP) / 중압(intermediate pressure : IP)로터, 회전 블레이드, Bolt/Nut, Casing 및 제어 밸브용 단조 및 주조 소재이다. 이들 부품들은 터빈에서 가장 높은 온도에서 가동되기 때문에 가장 엄격한 요구조건을 충족시켜야 한다. 각 부품의 소재가 지녀야 할 특성은 표1에 나타내었다. 이들 부품은 크리프가 발생하는 고온에서 사용되기 때문에 크리프 강도를 개선하는 합금원소들의 영향을 고려해 합금설계가 진행되었고^[3], 현재까지 개발한 9-12%Cr 터빈 소재의 진척상황을 그림 2에 나타내었다^[4].

표 1. 주요 터빈부품에 요구되는 특성

Requirements	HP&IP IP-Rotor	LP-Rotors, LP-Discs	HP, IP Casings	HP, IP Blades	LP-Blades	HP, IP Bolts
Tensile Properties	○	○	○	○	○	○
Creep Properties	○		○	○		○
Toughness :						
Low cycle fatigue(LCF)	○	○	○	○	○	○
High cycle fatigue(HCF)	○	○		○	○	
Crack growth :						
Static - Creep CG	○		○			○
Fatigue CG	○	○	○			○
Corrosion ;						
Local corrosion		○		○	○	○
SCC		○			○	○
Corrosion fatigue		○			○	
Erosion behaviour	○	○	○	○	○	
Oxidation behaviour	○		○	○		○

HP=High pressure turbine, IP=Intermediate pressure turbine, LP=Low pressure turbine

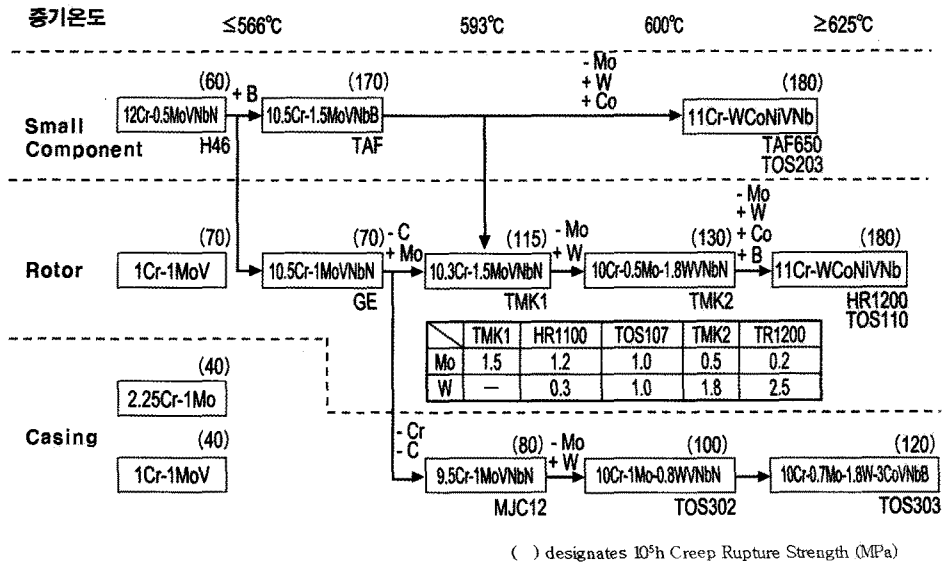


그림 2. 터빈소재의 개발 동향

이들 advanced 증기 조건의 터빈들에 사용 가능한 재료들은 표 2에 나타내었다. 각 부품의 사용조건에 부합되는 규정에 기초한 각 소재의 개발 현황과 실적을 아래 절에서 각각 설명한다.

표 2. 발전소 운전조건에 따라 주요터빈 부품에 사용되는 합금

	31MPa(4500psi) 565/565/565°C	31MPa(4500psi) 593/593/593°C	31MPa(4500psi) 620/620/620°C	31MPa(4500psi) 650/650/650°C
HP/IP rotor	CrMoV AISI 422 SS TOS 101 11Cr1MoVNbN (GE original)	TR1100 X12CrMoVWNbN101-1 TOS 10 GE-modified steel 7	X18CrMoVNbB91 TOS 110 EPDC alloy B TR1200 HR1200	HR1200
Blade	AISI 422 SS 12Cr1Mo1WV (Westinghouse)	TOS 202 GE-modified steel	TOS 203 EPDC candidate	M252 Naimonic 90 Refractalloy 26
Bolting	CrMoV AISI 422 SS Refractalloy 26	M252 Refractalloy 26	EPDC candidate Naimonic 80 Inco X750 Refractalloy 26	Inco 718 Naimonic 80 Refractalloy 26
Nozzle box	CrMo steel(cast)	9% Cr steel(cast)	Advanced 9-12% Cr steel, Cast Similar to 92, P122 GX12CrMoWNbV NbN10-1-1	316 austenitic stainless steel



2.1 HP/IP 로터

HP/IP로터는 블레이드를 원심 운동시키는 대형 단조강이며, 고압 혹은 중압 재열 증기 조건에서 고속회전(3,600 rpm)에 의한 원심력을 받고, 기동/정지 천이 동안 열응력을 받는다. 이러한 운전조건에 따라 요구되는 소재의 특성은 높은 크리프강도, 크리프파단 연신을 및 노치 민감성이 없을 것과 높은 저주기 피로강도 및 파괴인성과 강도와 인성의 균형이다. 또한, 제조성을 고려한 요구특성으로는 직경 1200mm 중심부까지 단상 tempered 마르텐사이트를 유냉 냉각조건에서도 얻을 수 있는 경화능 확보, 용접성, 제조 용이성 및 경제성이 있어야 한다.

크리프강도는 블레이드 부착부 혹은 중심공에서 변형과 균열 생성에 견딜 정도로 높아야 하며, 이를 위해서 증기 온도에서 10만시간 요구 크리프 파단강도는 최저 100MPa로 알려지고 있다^[5]. 저주기 피로강도는 발전소 운전 사이클에 기인한 열응력으로부터 야기될 수 있는 파손(cracking)을 방지하는데 필요하며, 파괴인성은 기동 정지 천이 조건에서 취성파괴의 가능성을 억제하는데 요구되는 성질이다. 그리고 열피로에 대한 위험을 최소화하기 위해서는 오스테나이트강보다 열팽창계수가 작은 페라이트강이 선호되고 있다.

크리프 파단 강도를 개선하여 개발한 사용 가능한 증기 온도별 HP/IP 로터강의 화학조성은 표 3에 나타내었다^[5,6]. 증기 터빈 운전 온도 조건에 적합한 강들의 크리프 시험 조건에 따라 얻은 대표적인 크리프 파단 데이터를 Larson-Miller 인자로 환산하여 그림 3에 나타내었다.

일반적으로 560°C 이상의 고온에서는 12%Cr강이 크리프강도와 내식성을 위해서 적용되고 있으나 초기 개발된 12%Cr강은 560°C까지 사용 가능한 X21CrMoV121이었다. 12%Cr강의 3가지 대체용으로 개발한 Nb+N 첨가강은 GE가, W첨가 version은 Westinghouse가 그리고 Ta+N을 첨가한 TOS101강은 일본에서 사용하고 있다.

표 3. 증기온도별 HP/IP 로터강에 사용되는 합금의 조성

Steam Temperature	Alloy designation	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ta	N	W	B	Co
≤560°C	X21CrMoV121	0.23	0.55	-	0.55	11.7	1	0.3	-	-	-	-	-	-
≤575°C	11Cr1MoTaV ⁹⁾	0.17	0.6	-	0.35	10.6	1	0.22	-	0.07	0.05	-	-	-
	GE-Original	0.19	0.5	0.3	0.5	10.5	1	0.2	0.08	-	0.06	-	-	-
	11CrMoVNbN Whestinghouse	0.16 0.23	0.62 0.8	- 0.4	0.38 0.75	11.1 13	1 1	0.22 0.25	0.07 -	- -	0.05 -	- 1	- -	- -
≤593°C	10CrMoVNBN ⁹⁾	0.14	0.5	0.05	0.6	10.2	1.5	0.17	0.06	-	0.04	-	-	-
	TOS107	0.14	-	-	0.7	10	1	0.2	0.05	-	0.05	1	-	-
	X12CrMoVWNbN1011 (COSTE)	0.12	0.4	0.01	0.75	10.5	1	0.19	0.05	-	0.06	1	-	-
≤621°C	TMK2(TR1150)	0.13	0.5	0.05	0.7	10.2	0.4	0.17	0.06	-	0.05	1.8	-	-
	X18CrMoVNbB9 ⁹⁾	0.18	0.07	0.06	0.12	9	1.5	0.25	0.05	-	0.02	-	0.01	-
	TR1200	0.12	0.5	0.05	0.8	11.2	0.3	0.2	0.08	-	0.06	1.8	-	-
≤630°C	TOS110	0.11	0.08	0.1	0.2	10	0.7	0.2	0.05	-	0.02	1.8	0.01	3
≤650°C	HR1200	0.1	0.55	0.06	0.5	11	0.23	0.22	0.07	-	0.02	2.7	0.02	2.7

이러한 강들은 Nb과 Ta는 탄질화물(carbon nitrides)의 생성에 의한 석출강화로 X21CrMoV121강에 비하여 증기 온도를 15°C 높일 수 있는 것으로 평가되고 있으며 565°C까지 성공적으로 적용되고 있다.

그 이후에는 고용 강화 효과를 얻기 위해서 Nb+N 혹은 Ti+N 첨가 개량강에 W를 첨가하여 일본에서는 GE-origin을 개량한 TOS 107과 유럽에서의 COST 501프로젝트 사업으로 COST E(X12CrMoVWNbN10-1-(1))를 개발하여 80,000시간 실제 크리프시험을 수행하였고, 이들 강을 이용하여 허용 운전온도를 593°C까지 높여 현재

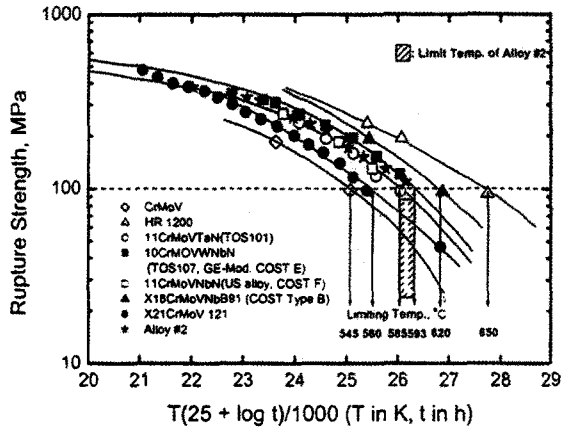


그림 3. 로터에 사용되는 터빈소재의 크리프강도

발전소가 가동되고 있다. 593°C까지 적용 가능한 또 다른 강은 C 함량을 낮추고 M_6C 와 $M_{23}C_6$ 탄화물을 안정화시키는 Mo 함량을 1%에서 1.5%로 증가시켜 고용강화 효과를 높인 TMK1 혹은 TR1100으로 일본과 유럽의 COST 501 과제에서 COST F(X12CrMoVNB(N)) 강을 개발하였다.

유럽에서는 COST 501^[7]과제에서 W이 포함되지 않은 100ppm의 B첨가 X18CrMoVNB91강(COST FB2)을 55,000시간 이상 크리프 시험하여 625°C에서 요구하는 크리프 강도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이 연구과정에서 1.0% W첨가에 의한 크리프강도 개선 효과가 없음을 보고한 것은 크리프 파단강도 개선을 위한 연구에 중요한 시사점을 던져 주는 것으로 평가된다.

반면에 일본은 W 함량을 1%에서 1.8%로 높여 620°C급 소재인 TMK2(TR1150)을 개발하였다. 이들 소재를 20ton pilot규모의 잉크트로 제조한 로터 소재를 평가 중인 단계이며, 아직 이들 소재를 이용한 USC 발전소를 건설할 계획은 없는 것으로 알려지고 있다.

다음 단계로 650°C급에 적절한 소재는 W을 1.8%에서 2.7%로, 3.0%Co와 100ppm의 B를 첨가하여 일본에서는 HR1200, COST 522에서 F계를 각각 Mock up 규모 및 150kg급으로 제조하여 장시간 신뢰성 평가 중에 있다. 그러나 아직까지 페라이트계 강으로 650°C까지 사용할 수 있는 소재는 확보되어 있지 않으며, 실험실적으로 개발된다 하더라도 제조성과 경제성 등을 면밀히 검토해야 할 것으로 판단된다.

2.2 블레이드

기존의 블레이드 재료는 422 스테인리스 강이 550°C까지 사용되어 왔으며, 그 이상의 온도에서는 크리프 파단강도가 낮아 사용이 곤란하다. 따라서 온도와 압력이 증가되는 USC 발전소에 적용될 수 있는 새로운 블레이드 소재의 개발 필요성이 대두되었으며, 미국 GE사에서는 566°C까지 사용 가능한 11%CrMoVNB(N) 소재를 개발하였으며, 593°C까지 사용 가능한 재료는 일본의 Toshiba사에서 로터 소재인 TOS107을 고려하여 TOS202(11%Cr1Mo1WVNB(N)) 소재를 개발하였다. TOS202 소재의 특징은 W을 1% 이상 첨가하고, Nb 함량을 로터 소재보다 많이 첨가하였으며, 담금질 온도를 높여서 크리프 파단 강도를 크게 향상시켰다. TOS202 블레이드 소재로 제작된 고압 및 중압 1단과 2단 블레이드 소재는 주증기와 재열증기 온도가 각각 566°C/593°C 조건인 USC 발전소에 1991년에 처음 적용되어 현재까지 문제없이 잘 운전되고 있다.

593°C 이상의 운전 온도에서 사용 가능한 새로운 블레이드 소재 또한 일본의 Toshiba사에서 TOS203이란 소재로 개발하였으며, 주증기와 재열증기의 온도가 각각 593°C/593°C인 USC 발전소에 1998년부터 적용하고 있다. TOS203 블레이드 소재는 TOS202에 비해 탄소의 함량을 0.16%에서 0.11%로 줄이고, Mo 함량을 최소화하고 W

함량을 크게 증가시켰으며, Re을 0.2% 정도 첨가하였다. Re의 효과는 단독으로 탄화물이나 다른 상을 형성하지 않지만, Mo와 W이 Laves 상이나 탄화물을 형성하는 것을 억제하여 고용상태의 Mo와 W 양을 증가시켜 고용강화 효과를 활용하였다.

표 4는 운전 온도별 적용가능 한 블레이드 소재에 대한 화학조성을 나타냈다⁸⁾. 621°C 이상의 운전 온도에 적용될 수 있는 블레이드 소재는 현재까지 12Cr계 합금강은 개발된 것이 없는 실정이며, 주로 Nimonic 80 또는 Inconel 718 초합금 소재가 사용될 것으로 사료된다.

표 4. 운전 온도별 터빈소재 합금성분표

Steam Temperature	Materials	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Nb	B	N	Re
≤593°C	TOS202	0.16	0.05	0.5	0.7	11	1	0.2	1.1	-	0.2	-	0.05	-
	GE Modified	0.14	0.06	0.4	0.69	10	1	0.18	1	-	0.05	-	0.04	-
≤621°C	TOS203	0.11	0.03	0.6	0.6	10.5	0.1	0.2	2.5	1	0.1	0.01	0.03	0.2

2.3 케이싱과 밸브

화력발전소에 사용되는 터빈 케이싱, 밸브 Chest 등은 제품의 특성상 노즐, 플랜지 등의 돌출부가 많아 형상이 대단히 복잡하므로 기계가공, 용접조립 또는 자유단조로 제작하는 것이 거의 불가능하여 현재 구조 외에는 특별한 공업적 제작방안이 없다. 터빈 케이싱의 경우 기계가공후의 최종 제품중량이 30톤에 달하며, 최대두께가 600mm이상 임에 비해 최소 두께는 200mm 전후로 두께의 변화가 심해 구조 공정에도 높은 기술력이 요구된다.

화력 발전용 대형 주강소재의 개발은 로터용 소재와 마찬가지로 증기온도의 상승에 대응한 크리프 파단강도의 개선을 중심으로 진행되어 왔다. 로터와 같이 동적인 환경에서 사용되지는 않으나 로터강에서 고려되지 않는 구조결합의 보수를 위한 보수용접, 주증기 배관 등과의 조립을 위한 구조용접, 압탕의 가스절단, Padding의 Gouging 등 제작 중 열적인 취급이 매우 다양하게 이루어지므로 양호한 용접성, 내균열성 등이 중요한 특성으로 요구된다.

표 5는 주증기 온도 별로 사용 가능한 주강소재를 나열한 것으로, 566°C까지 사용된 종래의 1%CrMoV강 또는 2.25%Cr-Mo강의 경우 593°C 이상의 증기온도에서는 온도상승에 따른 허용응력의 저하로 주강품의 두께가 대폭 증가하므로 편식, 응고 등의 구조문제, 용접, 운반, 제조비 상승 등 제조상의 문제 외에도 운전 중 발생하는 열응력 증대 등 많은 문제점을 파생시킨다.

표 5. 주증기 온도별 사용가능한 주강소재

Steam Temperature	Materials	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Nb	B	N
≤566°C	21/4Cr1Mo	0.15	Max. 0.5	0.3~0.6	-	2.0~2.5	0.91.1	-	-	-	-	-	-
	1Cr1MoV	0.12~0.2	-	-	Max. 0.5	1.0~1.5	0.9~1.2	0.2~0.35	-	-	-	-	-
≤593°C	MJC12 ¹⁾	0.12	0.149	0.68	0.51	9.7	0.78	0.15	-	-	0.05	-	0.039
	B50A349 ²⁾	0.11	0.35	0.6	0.5	9	0.94	0.22	-	-	0.05	-	0.055
	TOS 301	0.14	-	-	0.5	10	1	0.2	-	-	0.1	-	0.05
	Mod.9Cr-1Mo	0.1	0.4	0.5	0.3	8.9	0.95	0.23	-	-	0.08	-	0.01
600~620°C	GX10CrMoVNbN9-1	0.09	-	0.51	0.12	9.36	0.94	0.22	-	-	0.073	-	0.044
	GX12CrMO (W)VnNbN10-1	0.12	-	0.62	0.93	10.5	0.99	0.22	0.99	-	0.08	-	0.048
	TOS 302	0.12	-	-	1	10	1	0.2	0.8	-	0.1	-	0.05
625°C	COST CB2	0.12	-	0.88	0.17	9.2	1.49	0.21	-	0.98	0.06	0.011	0.02

593°C 급의 경우 표5와 같이 MJC12, B50A349 등 10CrMoVNbN계의 합금이 주로 사용되며, 600°C 이상에서는 W첨가 개량 12%Cr강, W+Co+B첨가 개량 12%Cr강 등이 개발되어있다^[9, 10]. 50,000시간이 넘는 장시간 크리프 파단 실험 결과에 의하면 W 첨가에 의한 크리프 파단강도의 개선은 고응력 단시간 측에서는 상당한 개선 효과가 있으나, 저응력 장시간 측에서 Laves Phase의 형성에 의해 그 효과가 소실되어 W 첨가에 의한 크리프 강화효과에 의문이 제기되고 있다. 따라서 600°C 이상의 증기조건에서 설계수명동안 안전하게 사용 가능한 소재의 개발을 위해 W의 고용화율을 대체할 수 있는 B를 첨가한 새로운 합금설계의 접근과 시도가 요구된다.

3. 보일러 재료

현재 및 향후 USC보일러용 재료로 사용 가능한 튜브 및 파이프소재는 2.25Cr-1Mo강의 개량형, 9~12Cr강, 18Cr-8Ni계 및 20Cr의 오스테나이트강의 개량형으로 분류할 수 있으며 이들 소재에 대한 특성을 간략히 소개하고자 한다.

3.1 2.25Cr-1Mo계 소재

기존의 2.25Cr강의 용접성을 개량하고자 Mo함량을 0.1%로 낮추고 1.6W과 V, Nb등을 첨가한 HCM2S가 일본에서 개발되어 1995년 ASME Code Case 2199에 비용접 2.25Cr-1.6W-V-Cb소재, SA-213 T23로 등재 되었다. 합금성분은 표 6에 나타내었다. 이 소재는 기존의 STBA24에 대해 약 200%이상의 고온강도를 가지고 있기 때문에 관 두께를 현저히 얇게 하여 중량감소에 의한 원가 절감을 할 수 있게 되었다. 또한 탄소량이 0.06%수준으로 매우 낮게 제어되어 용접 균열 감수성이 극히 낮은 것으로 알려져, 예열 및 후열처리를 생략할 수 있는 것으로 제안되었다. 이에 따라 최근 800MW급 화력발전소에 T23이 보일러 튜브소재로 적용되고 있다.

3.2 9~12Cr계 소재

보일러의 과열기관과 재열기관 재료 선정은 관벽온도, 압력 및 내식성을 고려하여 선정된다. 통상 관벽온도가 590°C까지는 2.25Cr-1Mo계 강이 사용 가능하나, 590°C를 초과하는 고온영역에서는 오스테나이트 스테인리스강이 사용되어 왔다. 그러나 오스테나이트계 스테인리스강은 가격이 비싸고, 페라이트강에 비해 열팽창계수가 크고, 열전도율이 낮기 때문에 배관 구속점이나 노즐에서 커다란 열응력이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 현재는 기존 페라이트강의 사용 한계를 초과하는 고온영역에서는 오스테나이트 스테인리스강의 대신 9~12Cr강이 사용되고 있다. 9%Cr계는 T9(9Cr-1Mo)를, 12%Cr계는 SS410(12Cr)을 기초로 다양한 합금원소를 조절하여 고온강도를 확보하는 방향으로

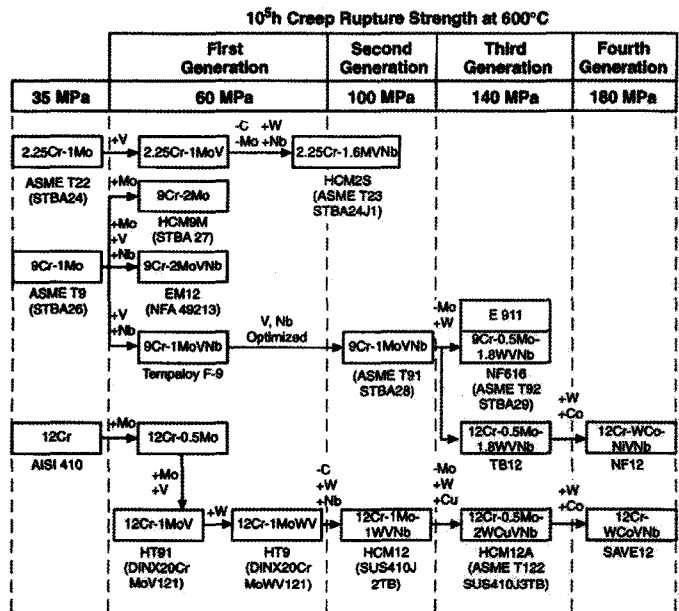


그림 4. 2~12Cr계 보일러 재료의 개발과정^[11]



개발되었다. 보일러용 2~12Cr강의 발전과정과 크리프 파단강도를 그림 4에 나타내었다

60MPa급의 재료는 Cr-Mo강에 V, Nb 및 Mo량을 첨가함으로써 가능하고, 100MPa급 소재는 탄소 및 V, Nb량을 60MPa소재보다 적게 최적화 시킨 동시에 Mo와 W를 복합 첨가시킴으로써 강도를 확보할 수 있도록 개발되었다. 또 140MPa급은 Mo의 대부분을 W로 치환시킴으로써 달성되었다.

기본적으로 9~12Cr강의 크리프 강도 향상은 V, Nb, N 첨가에 의한 석출강화와 W, Mo에 의한 고용강화에 의존하고 있다. 그리고 고온 강도를 확보하기 위해서는 Ni를 가능한 적게 첨가하고, 변태점을 높여 사용 조건보다 높은 조건에서 고온 템퍼링이 가능하도록 성분이 조절되었다.

표 6. 2~12Cr계 보일러 재료의 대표 화학성분

Steel		Specification		Chemical Composition(mass %)												제조사
		ASME	JIS	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	B	N	Others	
1.25Cr	T11	T11		0.15	0.50	0.45	1.25	0.50	-	-	-	-	-	-	-	
2Cr	T22	T22	STBA24	0.12	0.30	0.45	2.25	1.00	-	-	-	-	-	-	-	
	HCM2S	T23	STBA24J1	0.06	0.20	0.45	2.25	0.10	1.60	-	0.25	0.05	0.003	-	-	S
9Cr	T9	T9	STBA26	0.12	0.60	0.45	9.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	V
	HCM9M		STB27	0.07	0.30	0.45	9.00	2.00	-	-	-	-	-	-	-	S
	T91	T91	STBA28	0.10	0.40	0.45	9.00	1.00	-	-	0.20	0.08	-	0.05	0.8Ni	V, S
	E911			0.12	0.20	0.51	9.00	0.94	-	0.20	0.06	-	0.060	-	0.25Ni	
12Cr	HT91	(DIN x20CrMoV121)		0.20	0.40	0.60	12.00	1.00	-	-	0.25	-	-	-	0.5Ni	V
	HT	(DIN x20CrMoWV121)		0.20	0.40	0.60	12.00	1.00	0.50	-	0.25	-	-	-	0.5Ni	V
	HCM12	SUS410J2TB		0.10	0.30	0.55	12.00	1.00	1.00	-	0.25	0.05	-	0.03	-	
	HSCM12A	T122	SUS410J3TB	0.11	0.10	0.60	12.00	0.40	2.00	-	0.20	0.05	0.003	0.06	1.0Cu	
	NF12			0.08	0.20	0.50	11.00	0.20	2.60	2.50	0.20	0.07	0.004	0.05	-	N
	SAVE12			0.10	0.30	0.20	11.00	-	3.00	3.00	0.20	0.07	-	0.04	0.07Ta, 0.04Nd	S

9Cr-1Mo강의 대체용으로 9Cr-2Mo강(HCM9M, STBA27)이 일본에서 개발되었고, 이는 탄소량을 저하시키고, V 및 Nb를 첨가되지 않기 때문에 우수한 용접성 및 가공성을 가지게 되었다. T91은 미국에서 9Cr-1Mo강에 V, Nb등을 첨가하여 개발한 개량형 9Cr-1Mo강으로 550~600℃에서 고온강도가 종래의 9Cr-1Mo강이나 2.25Cr-1Mo강에 비해 2배이며, 304 스테인리스강과는 비슷한 값을 가지고 있다. 또한 용접성 및 가공성도 매우 우수한 것으로 알려지고 있다. 이를 바탕으로 1983년 ASTM에 정식으로 등록되어 ASTM A213 T91로 추가되었다. 또한 1986년 5월 ASME Boiler and Pressure Vessel Code case 1943에 화학조성, 기계적 성질과 허용인장응력이 등재되고, ASME SA335에 P91로, SA182에는 F91로 정식 규격으로 등록되었다. 그리고 Grade 91을 개량한 NF616은 Mo의 함량을 0.5%로 낮추고, W를 1.8%첨가해 1995년 ASME Code case 2170에 seamless 9cr-2W(SA-213 T92, SA-335 P92)가 등재되어 현재까지 사용되고 있다.

12%강의 경우 HT9(DIN X20CrMoV121)은 12%Cr과 0.2%C를 함유하고, V과 W으로 고온 강도를 증대시킨 합금으로 높은 고온강도와 δ -ferrite량을 줄이기 위해 0.5%Ni를 첨가한 것이 특징이다. 그러나 이 재질은 크리프 파단 시간이 증가할수록 연성이 감소하는 경향을 보이고, DBTT가 사용시간이 증가됨에 따라 급격하게 증가되는 단점이 보고되고 있다. 그리고 이 합금의 용접은 상대적으로 높은 탄소함량으로 인해 제작 시 주의가 요구되어 유럽을 제외한 일본, 미국에서는 용접성에 대한 심각한 우려 때문에 사용이 제한되고 있다. 한편 HCM21A는 Mo함량을 0.4%로 낮추고, W를 2% 정도 첨가한 재료가 일본에서 개발됐다. 1995년 ASME Code Case 2180에 seamless 12Cr-2W

소재(SA-213 T122, SA-335-P122)와 NF616(ASME Code Case 2179, T92/P92)로 T91/P91보다 고온강도가 140%높고, 650도 이하에서는 316HTB등의 오스테나이트계 강보다 높은 허용응력을 가지고 있다.

3.3 18Cr-8Ni계 와 20~25Cr계 오스테나이트강

오스테나이트계 스테인리스강은 보일러의 고온부 적열관에 적용되고 있다. 대표적인 강종으로는 304H, 316H, 347H등이 있다. 최근에는 과열기 등의 고온강도와 고온부식에 대한 대책으로 Tempaloy A-1, Super 304H 및 Fine grain TP347H, HR3C, Tempaloy A-3, 및 NF709 등이 개발되어 사용되고 있다. 이들 오스테나이트계 강의 개발 과정을 그림5에, 주요성분을 표 7에 나타내었다.

오스테나이트계 강의 기원은 SS 302(18Cr-8Ni)로 Ni, Nb의 복합 첨가 또는 Nb의 단독 첨가에 의한 석출 강화에 의하여 고강도화가 진행되었다. 또한 Ti이나 Nb첨가량을 크리프 강도가 최고가 되도록 탄소량을 상대적으로 적게 하여 고강도를 목적으로 하는 오스테나이트를 얻는 방향으로 개발이 진행되었다.

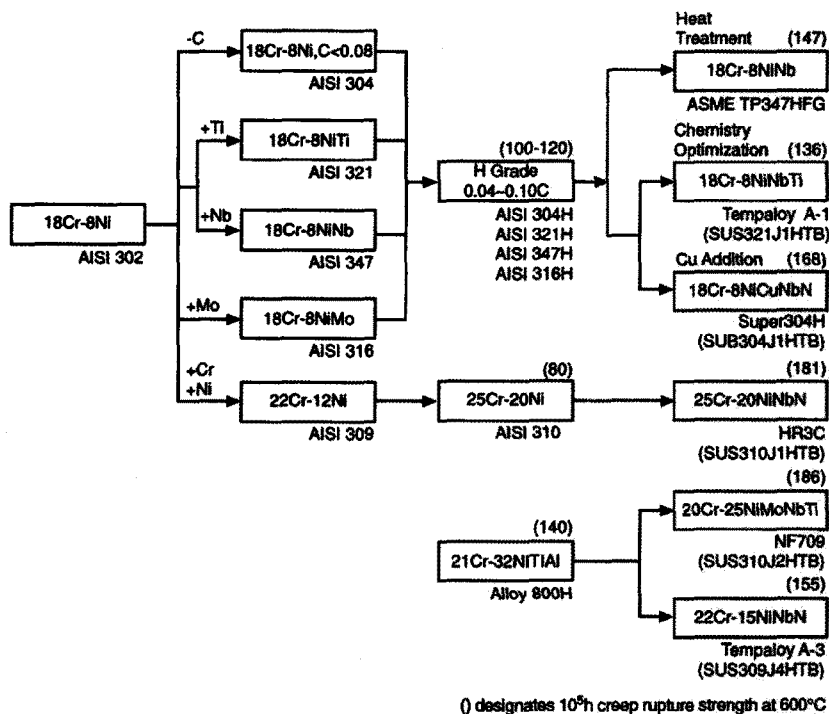


그림 5. 오스테나이트계 보일러 재료의 개발과정⁽¹⁾

과열기와 재열기의 외측은 고온부식이, 내측은 수증기 산화가 문제가 된다. 그런데 재료표면에서의 수증기 산화스 케일을 방지하기 위해서는 코크롬강과 동시에 결정입도가 미세하고 냉간가공(Shot balst처리)을 하는 경우 우수한 효과를 기대할 수 있다. 따라서 18-8계 스테인리스강 중에서 347HFG가 내식성 및 내산화성이 우수하여 많이 사용되고 있다. 이밖에 크리프 강도를 향상시키기 위하여 새로운 합금원소를 적용한 예가 Super 304H이다. 3%의 Cu를 첨가한 합금이 있다.

20~25%Cr계에서는 HR3C, Tempaloy A-3, NF709의 내식성이 개선 이외에 높은 허용응력을 가지고 있어 과열기, 재열기관 등에 사용할 수 있다. 20~25Cr계 강은 18cr-8Ni계 강보다 내고온 부식성이 우수하지만 통상적으로



표 7. 오스테나이트계 보일러 재료의 대표 화학성분

Alloy	Specifications		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Ti
	ASME	JIS										
18Cr-8Ni	TP304H	SUS304HTB	0.08	0.6	1.6	8.0	18.0	-	-	-	-	-
	Super 304H	SUS304J1HTB	0.10	0.2	0.8	9.0	18.0	-	-	-	0.40	-
	TP321H	SUS321HTB	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	-	0.5
	Tempaloy A-1	SUS321J1HTB	0.12	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.10	0.08
	TP316H	SUS316HTB	0.08	0.6	1.6	12.0	16.0	2.5	-	-	-	-
	TP347H	SUSTP347HTB	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.8	-
	TP347 HFG		0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.8	-
15Cr-15Ni	17-14CuMo		0.12	0.5	0.7	14.0	16.0	2.0	-	-	0.4	0.3
	Esshete 1250		0.12	0.5	6.0	10.0	15.0	1.0	0.2	1.0	-	0.06
	Tempaloy A-2		0.12	0.6	1.6	14.0	18.0	1.6	-	-	0.24	0.10
20-25Cr	TP310	SUS310TB	0.08	0.6	1.6	20.0	25.0	-	-	-	-	-
	TP310NbN	SUS310J1TB	0.06	0.4	1.2	20.0	25.0	-	-	-	0.45	-
	NF707*		0.08	0.5	1.0	35.0	21.0	1.5	-	-	0.2	0.1
	Alloy 800H	NCF800HTB	0.08	0.5	1.2	32.0	21.0	-	-	-	-	0.5
	Tempaloy A-3*	SUS309J4HTB	0.05	0.4	1.5	15.0	22.0	-	-	-	0.7	-
	NF709*	SUS310J2TB	0.15	0.5	1.0	25.0	20.0	1.5	-	-	0.2	0.1
	SAVE25*		0.10	0.1	1.0	18.0	23.0	-	1.5	-	0.45	-
HighCr-HighNi	CR30A*		0.06	0.3	0.2	50.0	30.0	2.0	-	-	-	0.2
	HR6W*		0.08	0.4	1.2	43.0	23.0	-	6.0	-	0.18	0.08
	Inconel617			0.40	0.4	54.0	22.0	8.5	-	-	-	-
	Inconel617**		0.05	-	-	51.5	48.0	-	-	-	-	-

18Cr8Ni보다 크리프 강도가 낮다. 이를 개선하기 위해 HR3C가 개발되었고, NF709와 Tempaloy A-3은 고가의 Alloy 888H를 기본으로 Ni의 양을 대폭 감소시켜 고온강도를 향상시켰다. 이들 강 대표적 특징은 Nb, Ti의 미량 첨가와 Ni양을 저감하는 대신 약 0.2%의 N를 첨가하여 오스테나이트상의 안정화를 도모한 것이다.

4. 요약

증기 온도와 압력을 상승시켜 효율을 높일 수 있는 초초임계(USC) 증기 터빈 화력발전소의 경제적 건설과 운영은 소재의 기술이 Critical Key를 갖고 있으며, 현재 증기온도 610°C와 증기압력 30MPa의 USC 조건의 발전소를 상업적으로 건설할 수 있는 재료 engineering기술이 가능하고, 국내의 경우 세계최고 수준의 621°C, 26.5MPa의 USC 조건의 발전소가 2010년부터 상용화 개발을 통한 건설이 진행될 예정이다.

보다 효율적인 건설 및 운영을 위해서는 우수한 내열재료의 개발과 이해가 필수적이고, 신재료의 사용은 강도향상 및 수명증대에 따라 건설비 및 유지보수비용 절감에 매우 큰 영향을 미치게 되므로 지속적으로 신재료에 대한 정보 수집과 관련된 연구가 요구된다.

❁ 참고 문헌

- [1] R. Viswanathan, J.F. Henry, J. Tanzosh, G. Stanko, J. Shingledecker, B. Vitalis, Advances in Materials Technology for Fossil Power Plant (2005)
- [2] D.T. Llewellyn and R.C. Hudd: Steel: Metallurgy and Applications, Third edition, Butterworth-Heinemann, 1998
- [3] T. -U. Kern, M. Staubli, K. H. Mayer, K. Escher, G. Zeiler : 7th Liege COST Conference, 30 Sep. Oct., 2002, Liege, Belgium. p.5
- [4] Fujimitsu Masuyama: Trends in Power Engineering in Japan and Requirements for Improved Materials and Components, 7th Liege COST Conference, 30 Sep. Oct., 2002, Liege, Belgium.
- [5] R. Viswanathan and W. T. Bakker, J. mater. Eng. Performance, Vol. 10(1) Feb. (2001), pp. 96-101
- [6] Klaus, M. Retzlaff and W. Anthony Ruegger, "Steam Turbines for Ultrasupercritical Power Plants", 39th GE Turbine state-of-the Art Technology Seminar, Ref. No. GER-3945, (1996) GE Company.
- [7] European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research(COST)
- [8] M. Miyazaki, M. Yamada, Y. Tsuder and R. Ishii : In Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation, R. Viswanathan and J. Nutting, eds., IOM Communications Ltd., London, (1999) pp. 574-585
- [9] B. B. Seth ; R. Viswanathan and J. Nutting, eds., IOM Communications Ltd., London, (1999) pp. 519-542
- [10] M. Staubli, K. -H. Mayer, W. Giselbrecht, J. Stief, A. Digiamfrancesco, T.-U. Kern : Development of Creep Resistant COST Steels within the European Collaboration in Advanced Steam Turbine Material, for Ultra Efficient, Low Emission Steam Power Plant/COST 501-522, : ibid. 5
- [11] F.Masuyama, ISIJ International, vol.41 (2001) . pp.612-625



공 병 옥

- 두산중공업 기술연구원
- 관심분야 : 터빈 및 보일러 소재 특성평가
- E-mail : byeongook.kong@doosan.com



강 성 태

- 두산중공업 기술연구원
- 관심분야 : USC 터빈 로터소재 개발
- E-mail : sung-tae.kang@doosan.com



이 연 수

- 두산중공업 기술연구원
- 관심분야 : 보일러 소재 선정 및 평가
- E-mail : lee.yeonsoo@doosan.com