

발전소용 Rotor재료의 개발 동향



김 성 준 (내식재료실 선임연구원)

- '76-'80 서울공대 금속공학과(학사)
- '80-'82 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '85-'90 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign
재료공학과(박사)
- '82-현재 한국기계연구소 선임연구원

1. 서 론

전기는 현대 인류생활을 영위하는데 있어 마치 물과 공기와 같은 존재라 할 수 있다. 지난 1988년 우리나라 국민 1인당 전력 소비량은 2000KWh에 이르고 있으며 국민생활수준의 향상과 더불어 전기사용량도 더욱 증대하고 있어 정부에서는 오는 2001년 까지 10년 동안 발전소 60기를 건설하여 모두 27,920,000KW 용량의 설비를 완공하기로 계획을 세우고 있으며 발전소 건설은 원자력 40%, 유연탄 30%, LNG 20%, 수력 10%의 구성비를 최적목표로 잡고 있다.

1900년대 초에 제작된 초기의 증기 Turbine-generator들은 5000KW 용량의 소형으로서 매우 낮은 온도와 압력하에서 작동되어 연료소모량이 많은 비효율적이 것이었다. 그러나 이후 입력 증기의 온도와 압력이 증가됨에 따라 열효율도 향상되고 발전소 용량도 현저하게 증대하여 최근에는 1500 MW급 발전소까지 등장하게 되었다.

Turbine 및 Generator 로터는 발전설비 중 가장 핵심부품 중의 하나로 발전소의 대형화 및 고효율화 추세에 따라 발전소용 로터축의 재질을 향상시키기 위한 제조공정의 발달뿐 아니라 재료개발을 위한 노력이 꾸준히 전개되고 있다. 1960년대에 16.6 MPa-566°C(주증기)/566°C(재가열)의 압력 및 온도조건을 갖춘 증기의 사용으로 약 350 MW급 용량을 갖춘 발전소 건설이 가능했고, 70년대에는 24.1MPa-538°C(주증기)/522°C(제1단 재가열)/566°C(제2단 재가열)증기 조건의 채택으로 500-1000MW 발전소 건설이 가능하게 되었으나 최근에는 34.5MPa-649°C/566°C/566°C의 높은 USC(Ultra Super Critical)증기 조건을 화력발전소에

표 1) Metallurgical and Mechanical Properties Requirement for Power Plant Rotors

	Properties required	Metallurgical characteristics and heat treatment	Candidate materials
H, IP	-high temp. properties -creep strength -corrosion resistance -thermal fatigue -high toughness	-high temp. transformation product -medium grain size -precipitates -high quenching temp. -slow quenching rate	CrMoV 12 Cr A 286
LP	-high toughness -fatigue strength -SCC resistance	-low temp. transformation product -fine grain size -lesser precipitates -low quenching temp. -rapid quenching rate	NiCrMoV Superclean
GEN.	-LP properties -magnetic permeability	-same as LP	NiMoV NiCrMoV

채택하고자 하는 노력이 진행중이므로 이에 상응하는 고온 고압용(HP, HIP) 로터재료의 개발과 대형 저압(LP) 및 Generator 로터재료의 개발도 매우 중요한 과제가 되고 있다.

표 1에는 LP, Generator, HP 및 HIP 로터에 요구되는 성질을 제시하였으며[1] 본 해설에서는 이러한 로터재료들의 개발동향을 서술하고자 한다.

2. Generator 및 저압(LP) 로터 재료

중기 터빈 Generator는 보통 NiMoV와 NiCrMoV강으로 제조된다. 현재 우리나라에서 건설중인 발전소에 채택하고 있는 NiCrMoV 합금은 표2에 제시된 ASTM A469 class 3-5와 유사하며 1800 rpm으로 회전하고 가공후의 중량이 50-60ton 정도인 2극 Generator 로터와 3600rpm의 고속으로 회전하며 가공후의 중량이 180ton에 달하는 4극 Generator 로터가 있다. 최근에는 ASTM A 469 class 7에 해당하는 NiCrMoV강으로 Generator 로터를 제조하기도 하는데 NiMoV에 비해 로

터 크기가 증대되어 현재의 발전소 설계수준에서 1200MW까지 발전이 가능하다. 그러나 Generator 로터에서 요구되는 강도와 인성값은 다른 로터들에 비해 엄격한 설계 구속을 갖지 않는다.

저압 로터재료 역시 고속도에서 회전을 하므로 원심력에 견디는 높은 인성과 낮은 파괴전이온도(FATT : Fracture Appearance Transition Temperature)가 가장 중요한 성질로 요구되며 약 350°C까지의 온도에서 장시간 사용되므로 고온강도와 함께 뜨임취성(Temper Embrittlement)또한 매우 중요한 인자로 인지되고 있다. 표 3은 화력발전소 저압용 로터재료의 규격인 ASTM A470 class 5, 6, 7의 화학조성을 제시한 것이다.[2]

고온취성은 저압 로터재료로 가장 많이 사용되고 있는 NiCrMoV강이 350-375°C 온도범위에서 장시간 노출되거나 냉각시 이 온도범위를 통과할 때 서냉되는 결과로 인해 재료가 취화되는 현상으로 이 현상을 피하기 위해 현재의 저압 로터는 343°C이하의 온도에서만 사용되고 있다.

1956년 Balajiva등에 의해 P, Sn, As, Sb등의 불순물이 적게 함유된 고순도의 NiCrMoV강은 고온취성 경향을 보이지 않는다는 사실이 발표

표 2) Specification for Chemical Compositions of ASTM A469

Element	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6, 7, 8
C, max	0.27	0.27	0.31	0.28
Mn, max	0.60	0.70	0.70	0.60
P, max	0.015	0.015	0.015	0.015
S, max	0.015	0.015	0.015	0.015
Si*	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.30
Ni	2.50 min	3.00 min	3.00 min	3.25-4.00
Cr	0.50 max	0.50 max	0.50 max	1.25-2.00
Mo	0.20-0.50	0.20-0.60	0.20-0.70	0.30-0.60
V	0.03 min	0.03 min	0.05-0.15	0.05-0.15

*Optional: All classes above may be vacuum deoxidized, Si 0.10 max.

표 3) Specification of ASTM A470 Class 5, 6, 7 and Superclean 3.5 NiMoV Steel

Element	Class 5, 6, 7	EPRI Aim	EPRI Spec.
C	0.28 max	0.25	0.30 max
Si	0.10 max	0.02	0.30 max
Mn	0.20-0.60	0.02	0.05 max
P	0.015 max	0.002	0.005 max
S	0.018 max	0.001	0.002 max
Ni	3.25-4.00	3.50	3.75 max
Cr	1.25-2.00	1.65	2.00 max
Mo	0.25-0.60	0.45	0.50 max
V	0.05-0.15	0.10	0.15 max
Al		0.002	0.005 max
As		0.005	0.005 max
Sn		0.002	0.002 max
Sb		0.001	0.002 max
H			1.5 ppm max
O			35 ppm max
N			80 ppm max

되고[3], 1967년 Gould[4]에 의해 그 사실이 다시 확인된 이후 McMahan[5]은 Mn, Si, P의 조합이 P만의 영향보다 훨씬 더 크다는 사실을 밝혀내었다. Watanabe[6] 역시 NiCrMoV 및 CrMo강에서 Mn과 Si가 결정입계에서 P 및 Sn과 함께 공존할 경우 고온취성을 가속시킨다는 것을 확인했다.

따라서 이 성분들의 효과를 다음과 같이 J factor로 정의하고 J factor가 어느 일정한 수치를 넘을 경우 취성이 일어난다고 보고하고 있다.

$$J = (Mn + Si)(P + Sn)$$

1980년대에 들어 2차 정련기술의 발달과 진공 탄소탈산(VCD: Vacuum Carbon Deoxidation)조업의 발전에 따라 Mn, Si, S 및 P와 불순물(Sb, As, Sn) 함유량을 낮춘 소위 초청정로-터강(Superclean Rotor Steel)의 개발이 미국 전력연구협회(EPRI)의 주도로 이루어 졌으며 현재 일본의 JSW, JCFC, Kobe 및 독일의 Saarlstahl등 많은 로-터제강회사들이 초청정강 로-터를 생산하고 있다. [2] 초청정로-터강은 고온취성을 거의 일으키지 않는 것으로 보고되고 있으며 표 3에 EPRI에서 제시한 초청정로-터강과 일반 로-터강(ASM A470 class7)의 규격을 소개하였고 그림 1에는 초청정로-터강의 제강 정련공정을 나타내었다.

초청정로-터강의 화학조성을 살펴 보면 Mn, Si, S 및 P의 함량이 각각 약 0.03, 0.03, 0.002 및 0.003 정도로 일반 로터 재질보다 3-10배 정도 적게 함유되어 있으며 Sn, As, Sb등의 불순물 원소들이 낮게 조절되고 있음을 알 수 있다. 따라서 J factor가 일반 로-터의 경우 약 50×10^{-4} 정도 이나 초청정강 로-터의 경우의 10×10^{-4} 이하로 낮게 유지되어야 한다. 이와 같이 불순물을 줄임

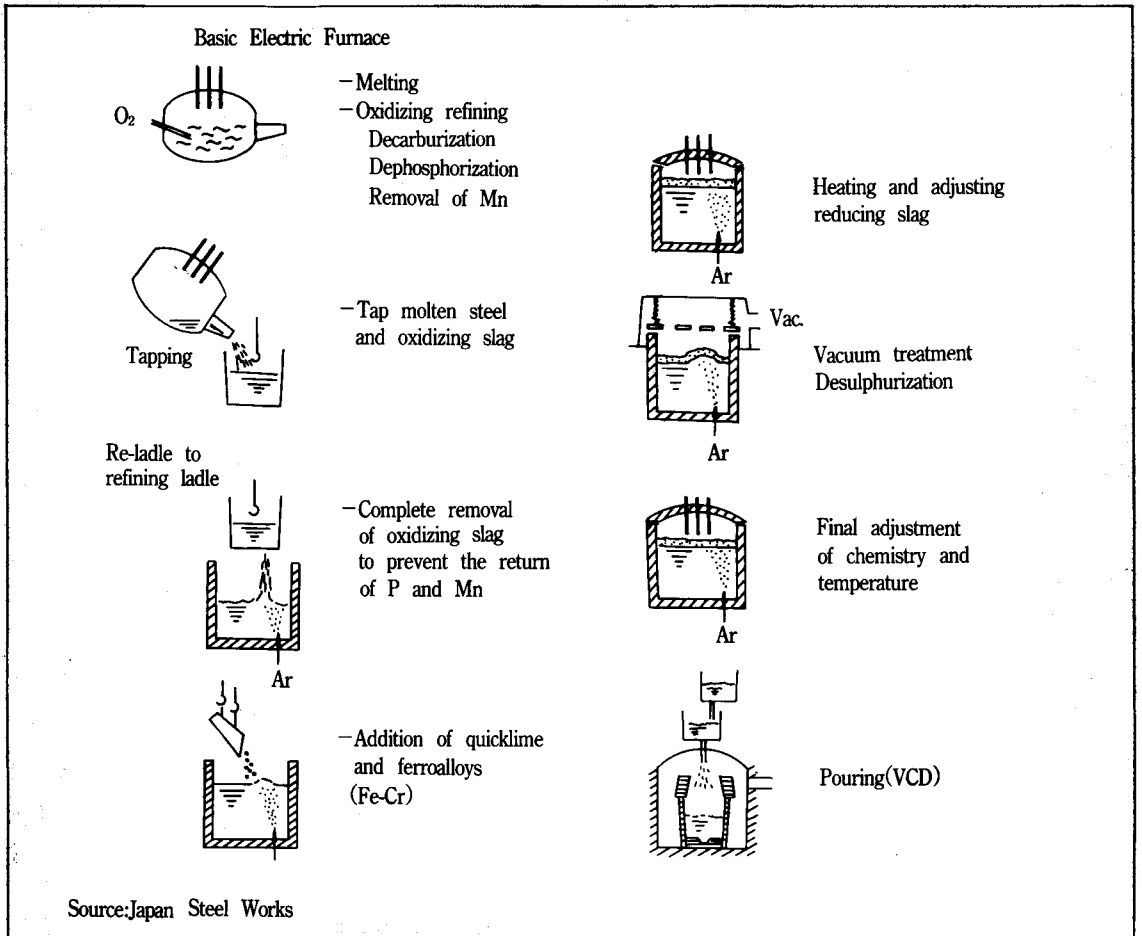


그림 1) A typical superclean steel-making process.

으로써 대형강괴의 성질을 좌우하는 강괴의 청정도, 균질성, 건전성 등이 초청정로-터강에서는 현저히 향상되고 있다. 그림 2는 초청정로-터강과 일반제강법에 의해 제작된 로-터강의 불순물 원소 차이 및 관련된 문제점들을 보여주고 있다.

초청정 로-터강의 기계적 성질을 살펴보면 항복강도가 700-760MPa 범위에 있으며 인장강도는 840-890MPa범위로서 일반적인 제조공정으로 생산되고 있는 저압 로-터의 항복강도 및 인장강도 값 보다 거의 같거나 높은 강도를 갖는다. 그러나 일반 저압 로-터보다 훨씬 균일하게 분포된 강도를 가지는 것이 특징이다. 강도와 함께 3.5NiCrMoV 로-터강의 기계적 특성중 가장 중요한 성질인 충격치와 파괴전이온도 값은 불순물

원소 함량이 극히 줄어든 초청정강 로-터에서 현저하게 향상된다. 즉 초청정강 로-터 충격치 범위의 가장 낮은 값이 일반 저압 로-터 충격치의 상한치에 접근하고 있으며 파괴전이온도 값은 현저히 줄어든다.

3.5NiCrMoV 로-터가 작동되는 온도인 343°C까지의 온도범위에서 가장 중요한 성질은 뜨임취성 현상이다. 뜨임취성은 일반적으로 350°C와 482°C 사이의 온도에서 로-터재를 약 50,000시간까지 시효시킨 후 파괴전이온도 값을 측정하여 판단한다. 일반적인 3.5NiCrMoV강은 10,000시간 이상 유지하고 나면 파괴전이온도 값이 약 20°C 정도에서 100°C이상으로 급격히 증가되는 경향을 보이지만 초청정 로-터강의 경우 그림3에서와 같이

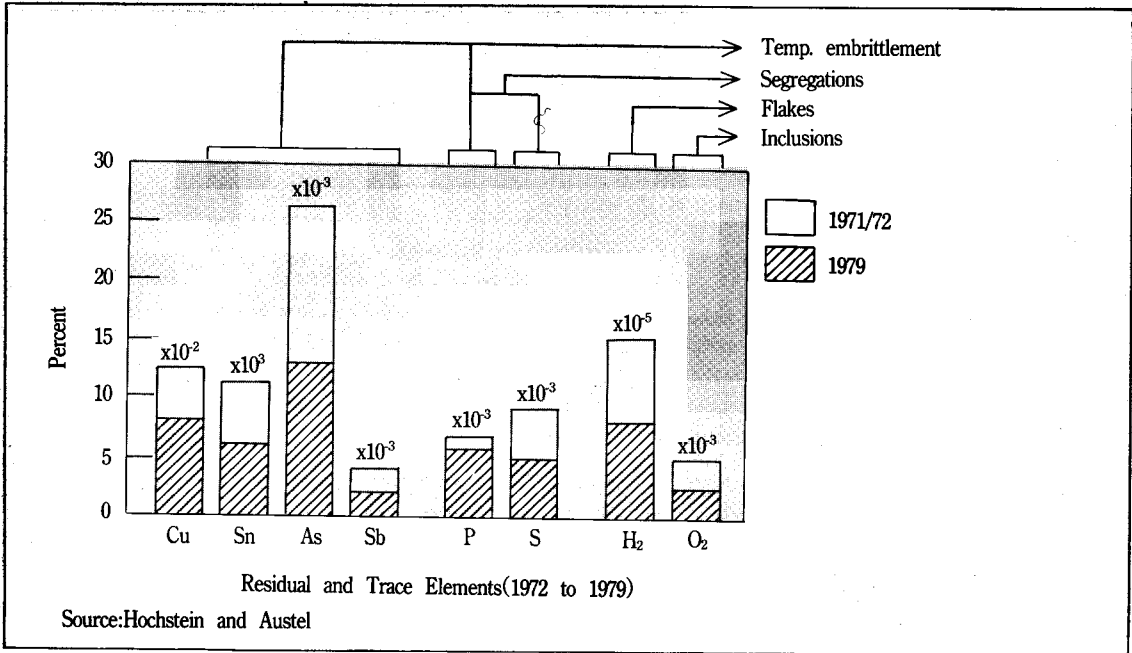


그림 2) Conventional steel composition—elemental levels and associated problems.

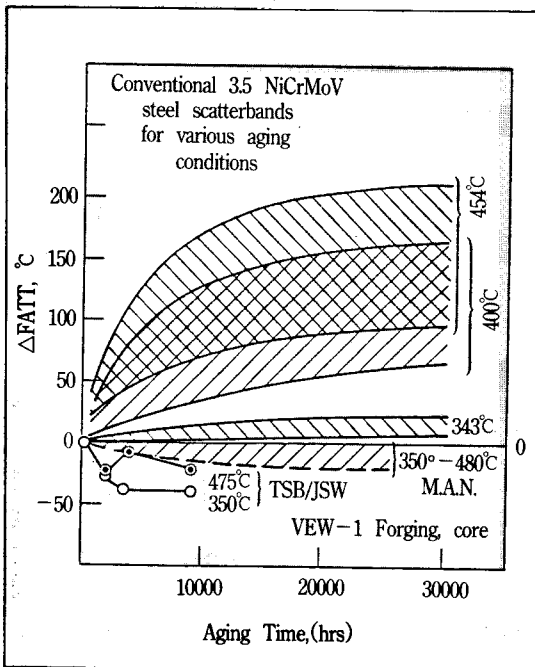


그림 3) Change in FATT versus time (temper embrittlement) for conventional material and for the superclean VEW-1 forging.

30,000시간 이상 장시간 유지하더라도 파괴전이 온도 값이 상온을 넘지않는 우수성을 보이고 있다. 즉 초청정 로-터강은 고온취성을 일으키지 않는다고 판단할 수 있다.[9]

초청정 로-터강을 제조함으로써 약 15-25% 정도의 부가경비가 소요되기는 하지만 기계적 성질이 향상되고 고온취성이 제거되어 450°C 정도 까지 사용한계 온도를 높일 수 있게 되어 발전소의 효율향상 및 로-터재의 신뢰성과 내구성도 개선되었다. 따라서 앞으로의 발전소 건설에는 초청정 NiCrMoV 로-터강의 채택이 불가피한 것으로 간주된다.

3. 고압(HP) 및 중고압(HIP) 로-터 재료

고압용 로-터는 원자력과 화력 발전소의 용도에 따라 요구 성질에 현격한 차이가 있다. 원자력 발전소용 고압 로-터는 앞에서 거론한 저압용 로-터와 마찬가지로 운전속도가 뜨임취성 발생 온도 이하로 적용되므로 NiCrMoV강이 많이 사

용되는데 Ni의 함량을 3.5% 정도로 약간 높게 하는 점이 다르다. 따라서 본 장에서는 사용조건이 더욱 엄격한 화력발전소용 고압 로-터 재료를 중심으로 소개하였다.

저압 로-터와 마찬가지로 고압 및 중고압 로-터에서도 초청정강의 필요성이 요청되고는 있으나 저압 로-터에 비해 운전조건이 뜨임취성이 발생하는 온도 이상이므로 그 보다는 오히려 증기사용조건을 고온, 고압으로 높여 보다 더 가혹한 조건에서 견딜 수 있는 재료를 개발하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

3.1. CrMoV 로-터 재료

현재까지 고압용 로-터 재료로 가장 많이 사용되고 있는 재료는 10Cr-(1.0-1.25)Mo-0.25V를 기본조성으로 하는 ASTM A470 class8 CrMoV강으로서 대개 Si-Killed 탈산법이나 VCD조업 또는 ESR(Electroslag Remelting) 조업을 통해 제작되고 있다. 일반적으로 CrMoV강에서는 NiCr-MoV계 보다 편석이 더욱 심하고 강과 하부의 산화개재물에 의한 Sedimental Zone도 크게 형성되기 때문에 제작이 더욱 까다롭다. 그러나 제강설비의 개선으로 Ladle 정련 및 진공탈가스를 이용하여 Si과 Mn량을 극히 미량으로 제한한 Cr-MoV재의 제조가 가능하게 됨으로써 편석을 줄이고 크리프 강도가 향상되었으며 산화개재물 및 수소의 함량도 감소되는 것으로 확인되었다. 하

지만 인성과 경화능이 감소되기 때문에 Si탈산법도 아직은 많이 채택되고 있다.

표 4는 현재 세계 각국에서 사용하고 있는 1% CrMoV 터-빈 로-터축 재료의 화학조성을 보여주고 있다.[7]

3.2. 12Cr 로-터 재료

700MW 이상의 대용량 발전소에서는 고압 및 증압 로-터가 대형으로 되어 날개의 중심응력도 크게 되므로 566°C 증기에 있어서도 CrMoV재는 강도가 충분하지 못한 것으로 생각되어 1960년대 초에 미국에서 CrMoV강 보다 훨씬 크리프 파단 강도가 향상된 12CrMoVNb강이 개발되었는데, 이후 약 50개의 대형 터-빈이 1000MW급 발전소에 채택되어 20년이 지난 오늘날 까지도 사용되고 있다. 표 5에 일반적으로 많이 사용되고 있는 여러가지 12Cr 로-터 재료의 종류와 화학조성을 제시하였다.[8]

12Cr 로-터재를 설계할 때 가장 유의해야 할 점은 δ -ferrite의 생성방지와 Al 함량의 극소화이다. δ -ferrite는 12Cr강을 오스테나이트 영역에서 용체화처리(대개 약 1050°C)하여 수냉시킨 후에 남아 있는 페라이트로 정의되는데 강의 인성과 FATT성질을 매우 저하시키고 크리프 성질도 떨어뜨리므로 δ -ferrite가 생성되지 않도록 합금설계, 용해 및 열처리에 유의해야 한다. 일반적으로 δ -ferrite는 Cr당량으로 표시되는 인자에 의해 그

표 4) Chemical Compositions of High-Temperature 1% CrMoV Turbine Shafts

Element	US	German	British	French
C	0.25-0.35	0.25-0.30	0.20-0.29	0.23-0.33
Si	0.15-0.35	0.25 max	0.30 max	0.35 max
Mn	1.00 max	0.35-0.85	0.50-0.75	0.35-0.85
P	0.015 max	0.015 max	0.015 max	0.020 max
S	0.018 max	0.015 amx	0.015 max	0.020 max
Cr	0.90-1.50	0.90-1.20	0.70-1.00	0.90-1.50
Mo	1.00-1.50	0.80-1.00	0.55-0.85	0.90-1.30
Ni	0.75 max	0.50-0.75	0.30-0.75	0.40-0.80
V	0.20-0.30	0.25-0.35	0.30-0.40	0.25-0.35

표 5) Nominal Chemical Compositions of 12% Cr Rotor Steels

Element	12CrMoV (KWU)	12CrMoV (Saarstahl)	11CrMoVNbN (GE)	11CrMoVTaN (JSW)
C	0.23	0.21	0.18	0.17
Mn	0.55	0.70	0.75	0.60
Si	0.20	0.15	0.25	0.06
Ni	0.25	0.76	0.70	0.33
Cr	12.00	11.70	10.50	10.60
Mo	1.00	0.92	1.00	1.00
V	0.30	0.29	0.20	0.22
Nb			0.06	
N		0.04	0.06	**
W				
Ta				**

** Data not available

생성가능성이 예견되는데 Cr당량이 10이상이면 δ-ferrite가 생성되는 것으로 알려져 있다. 많은 사람들이 각각 표현방법이 다른 Cr당량을 제시하였는데 12Cr 로-터강에 가장 많이 적용되는 Cr당량은 다음 식과 같이 표현된다.[9]

$$Creq = Cr + 6Si + 4Mo + 1.5W + 11V + 5Nb - 40C - 2Mn - 4Ni - 30N$$

식에서 볼 수 있는 바와 같이 C, N, Ni, Mn 등의 오스테나이트 안정화 원소는 δ-ferrite 생성억제에 좋은 영향을 주고 Si, Mo, W, V, Nb 등의 페라이트 안정화 원소는 δ-ferrite 생성을 촉진시킨다. 그리고 12Cr강의 특징중의 하나인 거시편석을 고려하여 대개 Cr당량을 6-6.5정도 되도록 합금설계하고 있다. Al함량의 경우에는 많은 실험에 의해 Al이 0.01% 이상일 경우 12Cr강의 크리프 성질에 치명적인 영향을 미치는 것으로 알려져 엄격히 규제되고 있다.[10]

12Cr 로-터강이 특히 고온에서 아주 우수한 강도를 보임에 따라 최근에는 이 재료를 약간 개량하여 593°C까지 사용온도를 높여 사용할 수 있는 새로운 재료도 개발되어 실용화되고 있다. 이 신 12Cr로-터강은 USC(Ultra Super Critical)

turbine용 재료의 하나로 개발된 것으로서 화학 성분 중 종래의 12Cr 로-터강에 비해 C, Si, Nb를 감소시키고 Mo를 조절하고 새로 W를 첨가한 것이다. 최근 일본에서 개발된 신 12Cr 로-터강은 566°C에서의 10시간 크리프 파단강도가 종래의 12Cr 로-터강에 비해 약 40% 향상되었고 593°C에서는 동등한 강도를 얻을 수 있다고 보고되고 있다. 이는 종래의 로-터 강철을 변경하지 않고 12Cr로터를 적용하는 것이 가능하며 사용 증기 온도를 593°C로 올림으로써 열효율 향상을 꾀할 수 있다는 것을 의미한다. 이 신 로-터강은 이미 700MW 이상의 발전소에 채용되어 사용되고 있다.

12Cr 로-터강에서는 특히 편석에 의해 국부적으로 생성되는 δ-ferrite 발생확율이 매우 높고 비금속개재물의 침전가능성이 많기 때문에 일반적인 전기로제강-진공조괴 조업으로는 제조가 힘들다. 따라서 12Cr 로-터 강은 대개 ESR 공정을 이용하여 제조되고 있으며 대형 ESR설비를 갖춘 일본의 Kobe 제강, 미국의 BethForge 및 독일의 Saarstahl에서 가장 활발한 생산을 하고 있고 세계 로-터시장 점유율이 가장 높은 일본의 JSW사도 금년 말 부터 100톤 ESR 설비를 가동하여 본격적인 생산을 시작할 계획으로 알려졌다.

표 6은 12Cr 로-터강을 일반적인 공정으로

표 6) Mechanical Properties of Rotors from ESR and Conventional Ingots

Ingot Type Wgt. - Dia.	Dia. mm	Loc. Dir.	Tensile Properties				Charpy Impact		
			TS MPa	YP MPa	EI %	RA %	E(RT) J	FATT C	NDT C
ESR 80t - 2300mm	1100	S-Tan	815	657	17	45	48-52	20	
		C-Tra	800	627	14	45	44-47	30	-25
Conventional 92t - 2000mm	1110	S-Tan	702	564	5.5	22	39-44	20	
		C-Lon	697	545	5.6	21	22-25	60	10

key : S-Tan - Surface - Tangential direction

C-Tra - Center - Transverse direction

C-Lon - Center - Longitudinal direction

제조했을 때와 ESR공정을 이용하여 제조했을 때의 기계적 성질의 차이를 보여주는 것으로서 ESR공정이 매우 효과적임을 보여주고 있다.

3.3. A286 초내열 로터 재료

A286 초내열 로터재료는 증기 조건이 가혹한 34.5 MPa-649°C의 압력 및 온도에서 사용될 수 있는 가장 유력한 재료로 거론되고 있으나 freckling의 발생, 심한 편석, 미세조직 조절의 어려움, 그리고 변형저항이 너무 커 단조하기에 어려운 점 등 제조상 많은 문제가 있어 생산이 극히 제한되고 있다. 그러나 일본에서는 Kobe Steel을 중심으로 ESR을 이용한 A286강의 제조가 매우 활발하며 최근 이 재료를 약간 개량한 새로운 재료가 개발되어 실제 발전소에서 장차시험을 하고 있다. 이 재료는 15Cr-26Ni-1.25Mo합금인 A286 강종에 Ti와 Al을 각각 1.5% 및 0.2%까지 첨가하여 Turbine 로-터재료로서의 특성을 갖도록 개량한 것으로 42 ton ESR Ingot을 성공적으로 제조하여 Wakamatsu 발전소의 고온 Turbine에 사용하고 있다.

3.4. LP/HP 혼합형 로-터 재료

발전 효율 향상과 에너지 비용의 절감을 위해 중·소형 발전소에 적합한 고압 및 저압 로-터를 하나의 축에 혼합시킨 로-터 제조가 증가되고

있다. HP/LP 혼합형 로-터재는 고압 쪽에서는 현재 사용되고 있는 고압 로-터가 가지는 고온 성질을 유지하고 상온에서는 보다 높은 0.2% 항복강도 및 파괴 인성을 가지며 저압용 로-터에 요구되는 성질을 갖추어야 한다.

HP/LP혼합형 로-터재의 개발은 GE 또는 Siemens의 주도로 일본과 독일에서 많이 제작되고 있으며 그 주요 조성으로는 2.5NiCrMoV(JSW), 2CrMoNiWN(Saarstahl), 0.2Mn1.8NiCrMoV(JSW & Hitachi) 그리고 2.25CrMoV(JCFC)등을 들 수 있다.

HP/LP혼합형 로-터 제조상의 가장 중요한

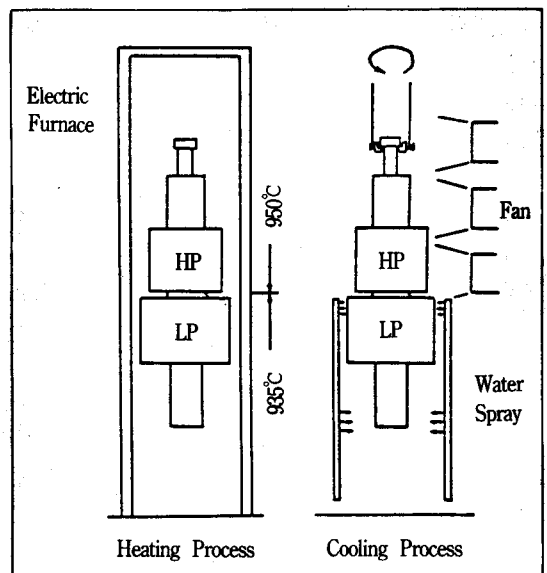


그림 4) Schematic of the Differential Heat Treatment

기술은 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 제품 열처리시 저압쪽과 고압쪽 사이에 분리벽을 설치하고 각각 서로 다른 열처리 Cycle을 적용하여 각 부분이 요구하는 성질을 만족시켜야 하는 점이다.[11] 즉, 저압 부위에서는 파괴인성을 증대시키기 위해 935°C에서 오스테나이트화 처리한 다음 Waterspray 담금질을 하고, 고압 부위에서는 크리프 강도의 유지를 위해 950°C에서 Fan 또는 Oil-quenching에 의한 냉각방법을 사용하여 미세 조직을 조절한다. 그리고 저압 쪽의 축지름이 크기 때문에 서로 다른 단조방법의 적용도 매우 중요하다.

4. 결 론

발전설비 소재중 가장 핵심적인 부품중의 하나인 로-터재료는 발전소의 효율향상과 내구성 향상을 중심으로 개발되고 있다. 저압 또는 Generator 로-터 재료는 NiMoV와 NiCrMoV강을 중심으로 새로운 재료의 개발 보다는 제강정련 및 조괴기술의 개선으로 불순물 함량을 극소화 함으로써 초청정(Superclean)강의 개발에 주력하고 있다. 그러나 사용조건이 보다 엄격하고 증기 사용조건이 고온, 고압화에 따라 발전효율 향상이 크게 증대되는 화력발전소용 고압 로-터재료는 제강정련, 단조 및 열처리 기술의 발전에 힘입어 12Cr강의 개발이 가능하게 되었으며 623°C의 증기조건에서도 작동이 가능한 A286 소재의 개발도 가능하게 되었다. 따라서 향후 전세계 시장에서의 로-터 판매는 Ultra Super Critical HP, HIP 로-터와 Superclean LP 로-터에 의해 좌우될 것으로 판단되므로 발전소 추가건설 수요가 많은 우리나라로서는 이에 대한 대비가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] S. Sawada, T. Ohhashi and S. Kawaguchi; "Development of an Interl HILP Combination Rotor For-

ging", in R.I. Jaffee, ed., Workshop Proceedings: Forgings of Turbines and Generators", EPRI WS-79-235, September 1981, pp.4-75 to 4-80.

[2] R. H. Richman and W. P. McNaughton; "Superclean Steel Development: Status Report", Interim Report, EPRI GS-6610, RP 1403-32, December 1989.

[3] W. Stevens and K. Balajiva; JISI, Vol. 193, 1959, pp.141-147.

[4] G. C. Gould; "Temper Embrittlement in High-Purity 3.5Ni-1.75 Cr-0.20C Steel", in Symposium on Temper Embrittlement in Steel, ASTM STP 407, 1968, pp.59-73.

[5] C. J. MvMahon, Jr., et al.; "Elimination of Impurity-Induced Embrittlement in Steel", EPRI NP-1501, Part 1, 1980.

[6] J. Watanabe and Y. Murakami; American Petroleum Ins., 1981, pp.216-223.

[7] H. Hinkler and E. Potthast; "Heat Treatment of 1% CrMoV Steel with Special Regard to the Effects of the Quenching Rate on the Properties. Presentation of a New Steel for High Pressure Shafts", in R. I. Jaffee, ed., Workshop Proceedings: Rotor Forgings for Turbines and Generators", EPRI WS-79-235, September 1981, pp.5-83 to 5-104.

[8] D. L. Newhouse; "Guide to 12-Cr Steels for High- and Intermediate-Pressure Turbine Rotors for the Advanced Coal-Fired Steam Plant", EPRI CS-5277, RP 1403-7, July 1987.

[9] R. F. Cappellini, R. L. Bodnar, T. D. Nelson and K. F. Reppert; "The Production of 12Cr Rotor Forgings-A Forgemaster's Perspective", BethForge TP, 1986.

[10] A. Choudhury, R. Jauch, H. Lowenkamp and F. Tince; Stahl und Eisen, Vol.97, 1977, pp.857-866.

[11] Proceedings of the 11th International Forgemasters Meeting, Spoleto, Italy, June 1991.