

# 화력발전 소재 및 제조기술 개발

이경운<sup>†</sup>·공병욱\*·김민수\*\*·강정윤\*\*\*

## Development trend of material and manufacturing process for fossil power generation

Kyongwoon Lee<sup>†</sup>, Byeongook Kong\*, Minsoo Kim\*\* and Chung Yun Kang\*\*\*

(Received 1 June 2016, Revised 17 June 2016, Accepted 20 June 2016)

### ABSTRACT

This paper presents an overview of worldwide electric power development and National 700°C Hyper Supercritical coal-fired power generation(HSC) focus on materials and manufacturing process. To Increase the efficiency of electric power generation, It is necessary to increase steam temperature and pressure. In that case, New material and manufacturing process shall be developed for boiler and turbine component in high temperature and pressure operating condition. Therefore, Much Efforts in worldwide are progressing to develop materials and manufacturing technology and to build and operate an HSC.

**Key Words :** Boiler(보일러), Turbine(터빈), Steam temp.(증기온도), 초초임계압(USC, Ultra Super Critical), 초초임계압(HSC, Hyper Super Critical), Ni Super alloy(Ni기 초합금재료)

## 1. 서 론

전 세계 에너지 가운데 석탄화력 발전이 차지하는 비중은 약 40.6%(미국, 48%) 정도이며, 현재의 석탄 소비량 추이를 반영하면 향후 150년 정도 사용할 수 있을 것으로 추정되며, 석탄 화력 발전은 향후에도 지속적으로 유지 될 것으로 판단된다.<sup>(1-3)</sup>

최근 전세계 화력발전 설비는 전력산업의 경쟁심화와 환경규제 강화 등의 이유로 발전 효율을 향상하기 위하여 증기조건인 고온, 고압화가 이루어지고 있다.<sup>(4)</sup>

현재 화력 발전 플랜트는 전세계적으로 주증기 온도 약 600~620°C, 압력 30MPa이 최고 수준이며 대

부분 Fe base의 내열 소재가 사용되고 있다.

발전 효율 향상을 위해서 유럽, 일본, 미국 및 중국 등에서 고효율 발전설비 연구 개발을 오래 전 부터 진행해 오고 있으며, 증기 조건인 고온, 고압화를 실현하기 위해서는 고온 특성이 우수한 소재 및 제조 공정 개발이 필수적이다. 가동 온도 700°C 이상에서는 기존의 Fe base 내열소재로는 한계가 있으며, 초내열 합금이 사용되어야 한다.

본 논문에서는 국내, 외적으로 사용되고 있으며, 개발이 진행되고 있는 발전 설비 소재 및 제조기술 개발 동향에 대해 기술하였다.

## 2. 화력발전 소재 및 부품

### 2.1 화력발전 핵심 부품 및 소재

#### 2.1.1 화력발전 부품

화력발전소는 고온/고압의 증기를 만드는 보일러와 보일러에서 만들어진 고온/고압의 증기를 이용하

<sup>†</sup> 회원, 두산중공업(주)

Kyongwoon.lee@doosan.com

TEL : (055)278-6529 FAX : (055)278-8546

\* 두산중공업(주)

\*\* 두산중공업(주)

\*\*\* 부산대학교

여 전기를 생산하는 터빈으로 대별된다.

Fig. 1은 터빈 설비의 개략도를 나타내었다.

화력발전 터빈용 핵심 부품 소재는 고압(high pressure: HP) / 중압(intermediate pressure: IP) 로타, 회전 블레이드, Bolt/Nut 단조강 및 주조품으로 제작되는 Casing 및 Control valve 이다.

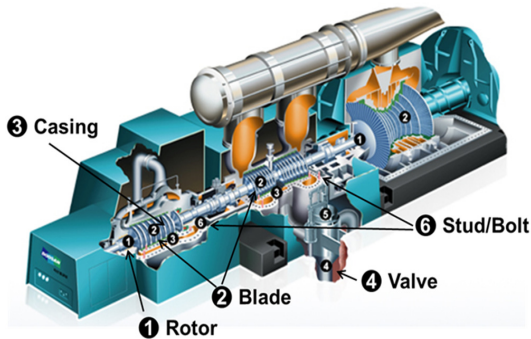


Fig. 1 Main components of steam turbine

로타는 고압 혹은 중압 재열 증기 조건에서 고속 회전(3,600 rpm) 하며 블레이드를 원심 운동시키는 대형 단조강이다. 고압, 중압 로타는 고온 강도 특성과 저주기 피로특성, 저압 로타는 고, 중압 로타 대비 비교적 낮은 온도에서 운전되며, 내식성이 요구된다. 또한 고속 회전하는 터빈 로타에 있어서는, 재료의 파괴역학적 특성이 뛰어나야 한다. 증기 조건의 고온/고압하에 따라 높은 Creep 강도와 Creep 파단 연신율이 더욱 더 중요해 지고 있다. 또한 증기온도 700°C 이상의 친환경 발전 설비에는 Ni기 초내열합금이 사용되며, 대형 후속 소재의 제조 용이성 및 용접성이 요구된다.

주조품으로 제작되는 Casing 및 Control valve 등은 형상이 대단히 복잡할 뿐 아니라, 제품의 최종 중량이 수 십 톤에 달하는 대형 제품으로 기계가공이나 자유단조에 의해 제작하는 것이 거의 불가능하다. 주조 시 수반되어야 하는 편석 및 제품 물성 불균일성을 방지하기 위한 최적 주조공정 확보가 필수적이다. 높은 온도와 압력하에서 사용되므로 크리프 파단강도, 고온 내산화성이 요구 되어진다. 또한 주조 시 발생된 주조결함을 보수하기 위한 용접공정 개발이 요구된다.

Fig. 2는 보일러 설비의 개략도를 나타내었다.

보일러는 석탄 연소에 발생된 고온의 열을 흡수하

는 수냉벽관(Waterwall), 석탄 연소에 의한 복사와 대류에 의해 열전달이 일어나며 고압/고압의 스팀을 생산하는 과열기(Superheater)와 재열기(Reheater), 보일러 급수를 가열하는 절탄기(Economizer), 고온의 증기를 모으는 드럼(Drum) 및 터빈에서 생산된 고온/고압의 증기를 터빈으로 이송하는 배관 등으로 나눌 수 있다. 형태로는 튜브 및 파이프로 구분되고, 고온, 고압 하에서 사용되므로 크리프강도, 피로강도, 산화저항성 및 고온 부식 저항성이 우수해야 하며, 부품 제조를 위해 제관, 밴딩 및 용접성이 우수해야 한다.

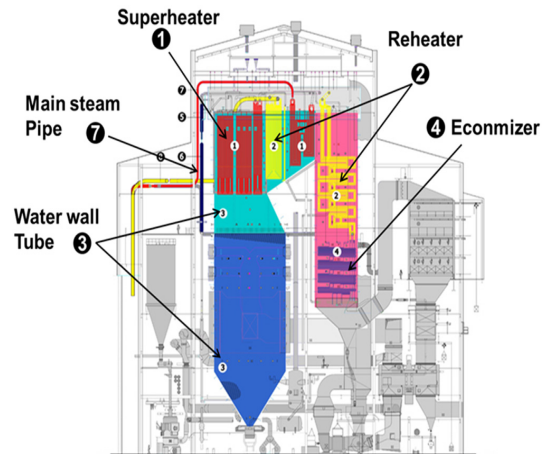


Fig. 2 Components of boiler

### 2.1.2 화력발전 소재

Table 1은 발전소 가동 온도 별 터빈소재를 나타내었다. 현재 상용되고 있는 SC(Super Critical) 및 USC(Ultra Super Critical) 발전소에는 탄소강, 1~3%Cr 저합금 및 9~12%Cr 고합금강이 사용되고 있다.

현재 국내, 외적으로 연구개발 및 상용화를 위해 전방위적으로 노력을 기울이고 있는 증기온도 700°C 이상의 발전소에는 기존의 발전소에서는 사용되지 않았던 Ni기 초내열합금이 사용되어 질 예정이다.

Table 2는 발전소 가동 온도 별 보일러 소재를 나타내었다. 터빈 소재와 마찬가지로 증기온도 600°C 이하에서는 탄소강, 1~3%Cr 저합금 및 9~12%Cr 고합금강이 사용되며, 증기온도 700°C 이상의 발전소에는 Ni기 초내열합금이 사용되어진다.

**Table 1** Materials of steam turbine for operating conditions

온도	≤566℃	≤620℃	≤700℃	≤760℃
HP Rotor	1CrMoV	9~12CrWCo 12CrMoWVNbN	IN625 IN740H CCA617 Haynes230	CCA617 IN740H Alloy263 Alloy282
Nozzle Valve	1CrMoV 2.25Cr-Mo	9~10Cr(W) 12CrW(Co)	IN625 IN740H CCA67	CCA617 IN740H Alloy263 Alloy282
Casing	1CrMoV 2.25Cr-Mo	9~10Cr(W) 12CrW(Co) CrMoWVNbN	CF8C CCA617 IN625 IN718	CCA617 IN740H Alloy263 Alloy282

**Table 2** Materials of boiler for operating conditions

온도	≤566℃	≤620℃	≤700℃	≤760℃
Tube	T12 T22 T23	T12/T22/T23 T91/T92 Super304H HR3C	T12/T22/T91/T92 Super304H HR3C IN740H IN617B Alloy263	T12/T22/T91/T92 IN740H IN617B Alloy263
Pipe	SA106C P12 P22	SA106C P12/P22 P91/P92	IN740H IN617B HR6W	IN740H IN617B HR6W

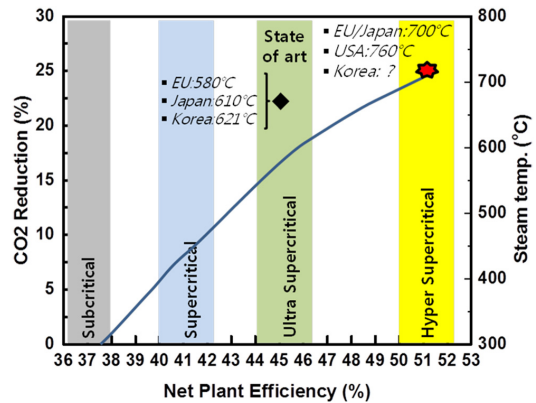
### 3. 소재 및 제조기술 동향

#### 3.1 가동 조건

Fig. 3은 화력발전 플랜트 가동 조건 변화 추이를 나타내었다.<sup>6)</sup> 온실가스 규제 대응 및 발전소 효율을 향상시키기 위해서 크게 1) 발전소 가동 조건 즉, 증기조건인 고온/고압화, 2) CCS(Carbon Capture Storage) 기술 개발이 이루어지고 있다. 발전소 효율 향상 측면을 보면 효율 2% 향상 시 CO<sub>2</sub> 감축은 약 5% 정도로 알려져 있으며 CO<sub>2</sub> 가스 발생량이 작아지면 CCS(Carbon Capture Storage) 저장설비가 작아지며 궁극적으로 저장설비 비용 절감이 가능하다.

현재는 증기온도 600~650℃, 압력 30MPa 정도의 USC(Ultra Super Critical) 발전소가 전세계적으로 가장 효율이 높은 발전소로 운용되고 있다.

USC(Ultra Super Critical) 발전소 보다 효율을 더욱 더 향상시킨 친환경 발전소 건설을 위해 유럽, 미국, 중국, 일본 등에서는 증기온도 700℃ 이상의 HSC(Hyper Super Critical) 발전소 개발을 시도 하고 있다.



**Fig. 3** Operating conditions of fossil power plants

#### 3.2 국가별 개발 동향

##### 3.2.1 미국

미국은 1978년부터EPRI (Electric Power Research Institute) 주관 하에 GE 및 Westinghouse(현재 Toshiba) 공동으로 발전소 효율 향상을 위한 연구를 진행하였다.

1978~80년 까지 2년간의 타당성 연구를 거쳐 증기 온도 593℃, 압력 316 bar를 목표로 한 기술개발을

1986년부터 5년 기간으로 시작하였으며, EPRI 주관 하에 일본 및 유럽 발전 제작 업체가 참여 하였다. 주로 발전소 효율, 신뢰성 향상을 목표로 하였다.

1964년 GE가 11%CrMoVNbN 로타 소재를 특허로 개발한 후 1970년대 후반 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)과 CE(현Alstom Power Inc.)가 공동으로 Grade 91 소재를 개발하였으며, 600°C, 100khr 크리프 강도가 약 94 MPa급으로서 SC(Super Critical) 및 USC(Ultra Super Critical) 발전 소재로 사용되고 있다.

2001년 에너지청(DOE, Department of Energy) 주도하에 국가 연구기관인 ORNL(Oak Ridge National Laboratory), 보일러/터빈 업체(Alstom, B&W, Foster Wheel, Riley Power, GE) 및 EPRI(Electric Power Research Institute) 등이 참여하여 기존 USC(Ultra Super Critical) 발전소보다 CO<sub>2</sub> 감축 20% 이상을 목표로 증기온도 760°C, 압력 35MPa 조건에서 안정적으로 사용이 가능한 발전시스템 및 소재 개발을 시작하였다.<sup>(6-9)</sup>

보일러용 소재는 장시간 크리프 강도, 저열팽창계수, 증기산화 저항성, 고온부식 저항성 등이 고려되어, Inconel 740H, Haynes 230 및 Haynes 282등의 소재 평가가 진행 중에 있다. 이 가운데 Inconel 740H는 Special Metal사에서 개발되어진 것으로 초기 용접시공 시 균열 등의 제조 공정상의 문제점이 발생되어진 Inconel 740를 개량한 것으로 상용화에 가장 근접한 소재이다.

터빈 케이싱 및 밸브 소재는 전통적으로 주조로 제작되어지며, NETL-Albany 및ORNL(Oak Ridge National Laboratory)가 Haynes 282, Nimonic 263, Nimonic 105 및 Alloy 617 등 다양한 Ni초합금재료에 대한 주조 특성 시험을 거쳐 현재는 Haynes 282 및 Nimonic 263 소재가 후보소재이며, 두께 별 주조 특성 평가를 위해 중량 약 450kg의 Step block 시제품에 대한 기계적 물성, 용접보수 및 미세조직 평가가 진행 중에 있다.<sup>(10)</sup>



Fig. 4 Haynes 282 step block casts

터빈 로타/디스크 소재는 케이싱 소재와 달리 단조 공정을 거쳐 제작되며, 제조성 뿐만 아니라 고온 물성을 동시에 만족시켜야 한다. 케이싱 소재와 마찬가지로 Haynes 282 및 Nimonic 263 소재가 후보소재로 검토되고 있다.

### 3.2.2 유럽

유럽은 1983년 유럽 공동 연구 프로그램인 COST 프로그램(COST 501, 522, 536)을 통해 증기온도 600°C에서 안정적으로 사용할 수 있는 9~12%Cr 소재 개발을 시작하였다.

터빈 로타 소재는 보일러의 Grade 91 소재와 유사한 X12CrMoWVNbN10 11(COST E) 및 고온강도 향상을 위해 B, Co를 첨가시킨 X12CrMoCoB9(COST FB2)를 개발하였다. 케이싱 소재는 9%Cr 을 기본으로 한 GX10CrMoVNbN 9-1을 상용화 하였으며, GX10CrMoVNbN 9-1 대비 탄소 함량을 높이고 Co를 첨가하여 고온에서 보다 안정적으로 사용할 수 있는 COST CB2가 개발 및 상용화 되었다.

보일러 소재는 일본에서 개발된 소재를 주로 사용하였으며 Grade 91 및 92, 600°C 이상의 고온부에는 TP347H, TP347H 및 일본에서 개발된 Super 304H와 유사한 XA704 등의 오스테나이트계 스테인리스 소재가 사용되고 있다.

전세계적으로 증기온도 700°C 이상의 발전 플랜트 건설을 위한 연구는 유럽에서 1998년에 처음 시작되었다.<sup>(11)</sup> 700°C 발전 플랜트 주요 기술은 소재 및 제조 공정 기술 확보를 통해 실증 플랜트 건설이 목표이다.

AD 700 프로젝트를 통해 700°C급 소재 선정, 실규모 시제품 제작 및 장시간 물성평가를 수행하였다.

COMTES 700 프로젝트는 AD700에서 개발된 소재에 대한 부품 실증 시험이 목표이며, 부품 테스트 중 Alloy 617 소재의 기술적 문제점이 발견되어, 2010~2017년 기간의 후속 프로그램 (GKM HWT II, ENICO)을 통해 Alloy 617, 263, 625 등의 소재에 대한 실증 시험이 진행중이다. 이 가운데 ENCIO (European Network for Component Integration and Optimization) 프로젝트는 핵심부품에 대한 재료, 제조공정 및 보수 기술 개발을 통해 700°C급 실증플랜트 건설이 목표이다. COMTES 700 프로젝트의 연속선상에 있으며 2011년 7월에 시작하였으며 총 6년을 목표로 하였지만 현재는 상업적인 이유로 중단되어 있는 상태이다.

NextGenPower 프로젝트는 2010년 시작되었으며

보일러 산화, 고온부식 평가, 신 코팅기술 개발, 석출 강화형 Ni기 초내열 합금 소재 개발, 제작 및 평가를 수행하는 것으로 실기규모 보일러, 케이싱 및 로타 소재 평가 이루어졌다.

보일러용 소재는 Inconel 740H, Inconel 617 소재 평가가 주로 수행 되어졌으며, 터빈 로타 소재는 Nimonic 263, 케이싱 소재는 Nimonic 263, Inconel 740H 및 Haynes 282 소재에 대한 평가가 이루어졌다.

**3.2.3 일본**

일본은 1979년부터 EPDC(Electric Power Development Corporation) 주관 하에 1000MW, 증기온도 593℃ 및 649℃ 사용을 목표로 기술개발을 시작하였다.

1980년도 초 로타 소재 TR 1100 및 TR 1200이 개발 되어졌으며, USC(Ultra Super Critical) 발전소용 10%Cr 소재인 TMK1이 개발되어졌으며, TMK1에 W를 첨가한 TMK2, Cr 함량을 11%로 높이고 Co, W를 첨가한 HR1200 및 TOS110이 상용소재로 개발되어졌다.

터빈 케이싱 소재는 9%Cr 계열인 MJC12, MJC12 소재에 W를 첨가한 TOS 302, TOS 302 소재에서 Mo 함량을 낮추고W 및 Co를 첨가한 TOS 303을 개발하였다.

보일러 소재는 1980년대 초 Grade 91 소재를 개발 하여 9%Cr에 W 약 1.75% 첨가한 Grade 92, Cr 량을 12%로 높이고 산화저항성을 향상시키기 위해 Cu를 1% 첨가시킨 Grade 122 소재가 개발 되어졌다.

600℃ 이상의 고온부에는 TP347H, TP347H 등의 오스테나이트계 스테인리스 소재가 사용되었으며 최근에는 NSSMC사에서 개발되어진 고온강도 및 고온부식 특성을 향상시킨 Super304H 및 HR3C 소재의 사용 빈도가 높아지고 있다.

2008년 부터 정부 주도로 “Cool Earth Program”을 가동하여 700℃급 친환경 발전소 건설을 위한 연구를 시작하였으며, 보일러, 터빈 및 밸브재료 개발, 신뢰성 평가 및 실증시험을 목표로 하였다. 초기에는 8 기관이 참여하였으며, 현재는 ABB Bailey Japan, Babcock-Hitachi, MHI(Mitsubishi heavy Industries) 및 NIMS(National Institute for Materials Science)등 총 12개 기관이 참여하고 있다.<sup>(11)</sup>

보일러용 소재는 HR6W, HR35, Alloy 617, Alloy 263, Alloy 740H 및Alloy 141을 고려하고 있으며, 장시간 크리프 강도, 피로 및 산화부식 시험 등이 진행 중이다.

터빈 로타 소재는 FENIX-700, LTES 및 TOS1X 등의 Ni 초내열 합금을 검토하고 있다. FENIX-700은 Alloy 706을 개량한 것으로 Nb를 줄이고 Ti 및 Al 함량을 높였다. 궁극적으로 10톤 이상 규모로 편석을 제어한 로타 소재를 목표로 하고 있다. LTES 및 TOS1X는 약 10톤 크기로 제작하여 Ferrite계 내열강과의 용접을 통해 최종적으로 약 30~40톤 규모의 용접형 로타 제작이 목표이다. LTES 700R은 MHI에서 개발되었으며, 12Cr과 열팽창계수가 비슷하다. 원래 LTES 700은 Casing bolt 소재로 개발되었으며, LTES 700R은 700을 개량한 것이다.<sup>(11)</sup>

TOS1X는 Alloy 617을 개량한 것으로 이 초기 버전을 TO1X-I으로 통칭하며, Al 및 Ti함량을 증가시킨 TOS1X-II 개발하였으며, 13톤 규모의 mock up 제작이 완료되었다. 케이싱 후보소재는 Alloy740, Alloy 625 및 Alloy 617소재이다. 2013년 실기규모의 케이싱 및 밸브 등이 제작되었으며, 건전성 평가가 진행 중이다.<sup>(12)</sup>



Fig. 5 LTES700R welding test

**3.2.4 중국**

중국은 최근 10년간 급격한 발전을 거듭하였으며 최초의 SC(Super critical) 발전소는 2004년 상업운전이 시작된 Huaneng Qinbei 발전소로 600MW, 증기온도 566℃, 압력 24.2MPa 이다. USC(Ultra Super Critical) 발전소는 2004년 상업운전이 시작된 Huaneng Yuhuan 발전소가 최초이며, 1000MW, 증기온도 600℃, 압력 26.25MPa이다.

보일러용 소재는 Grade 91, 92 및 23 소재 등이 사용되고 있으며, 로타 소재는 유럽에서 개발된 COST F 및 FB2 소재 등이 사용되고 있다.

중국은 700℃ 발전소 건설을 위해 정부 NEA (National Energy Administration) 주도하에 연구기관 Institute of Metal Research(Chinese Academy of Science) 및 발전 제조사 등 총 18 기관이 참여하는 프로젝트를 2011년에 시작하였다. 2014년 CTH700

설비에서 컴포넌트 테스트를 거쳐 2021년까지 660MW, 증기온도700℃, 압력 35MPa 플랜트 건설 및 가동을 목표로 하고 있다.

재료개발 측면에서 중국은 기존 소재의 개량 및 신합금 개발을 동시에 진행하고 있다.

보일러용 소재는 NF 709R, Sanicro25(중국GH2984G), Inconel 740H 및 CCA 617 가 후보소재로 평가되고 있다.

로타 소재는 Alloy 617 소재를 개량한 CN617, Inconel 740H 소재를 개량한 Inconel 740HM 소재에 대한 평가가 진행 중에 있다.<sup>(12)</sup>

### 4. 국내 개발동향 및 제조기술

#### 4.1 국내 개발동향

증기온도 538℃급 한국 표준화력이 1960년대부터 수십년 동안 가동되어져 왔으며, 2000년대 초부터 600℃급 USC(Ultra Super Critical) 발전소용 소재 및 제조기술 개발을 시작하였는데, 2002~2008년까지 6년에 걸쳐 정부지원 하에 용량 1000MW, 증기온도 621℃급 USC(Ultra Super Critical) 기술개발이 수행되었다. 국내에서 가동 중인 화력 발전소 가운데 당진화력 #5, #6호기가 증기온도 593℃에서 가동되고 있으며, 2016년에 증기온도 621℃급 USC(Ultra Super Critical) 발전소 신보령 #1, #2호기가 건설 예정이다.

보일러용 소재는 주로 Tube 및 Pipe가 사용되어지기 때문에 대부분 해외에서 상용으로 개발되어진 소재를 사용하고 있다. 탄소강부터 저합금강(~3%Cr), 고합금강(9~12%Cr), 스테인리스강(TP347, TP347HFG, Super304H) 등이 저온부 및 고온부에 사용되고 있다. 최근 국내에서도 보일러용 Seamless 튜브(탄소강, 저합금강, 고합금강) 소재 개발이 이루어지고 있으며, Super304H 등의 스테인리스강도 동시에 개발되고 있다.

터빈 로타 소재는 증기온도가 566℃ 이하인 초임계압(SC, Super Critical) 조건에서는 모두 1CrMoV강을 사용하고 있으며 유럽의 COST 프로그램에서 개발된 COST F, E 및 FB2 소재를 개량하여 USC(Ultra Super Critical) 조건에서 사용이 가능한 9~12Cr 로타 소재 3종을 자체 개발하여 현재 상용화 단계에 접어들었다.

케이싱 소재는 566℃ 이하인 초임계압(SC, Super

Critical) 조건에서는 1%CrMoV강 또는 2.25%Cr-Mo강이 사용되고 있으며, 593℃ 이상의 증기온도에서는 10CrMoVNbN계의 합금이 주로 사용되고 있다. 유럽의 COST 프로그램에서 개발된 COST CB2 소재를 개량하여 USC(Ultra Super Critical) 조건에서 사용이 가능한 케이싱 소재를 자체 개발하였다.

증기온도 700℃ 이상의 고효율 친환경 발전소(HSC, Hyper Super Critical) 건설을 위해서는 소재 및 제조공정 기술의 확보가 반드시 수반되어야 한다.

최근 정부에서는 HSC 터빈 소재개발의 중요성을 인식해 국내에서 터빈소재 제조가 가능할 수 있도록 2015년 6월부터, 5년간 총 150억원의 자금을 지원해 두산중공업을 중심으로 산업계, 연구소 및 학계의 전문가로 구성된 “HSC 로타/케이싱용 초내열합금 소재 및 제조공정 기술개발” 연구과제를 시작하였으며 주요 내용은 다음과 같다. 향후 이를 통해 HSC 대형 단조품 로타와 주조품 Casing 소재 및 제조기술이 확보될 수 있을 것으로 판단된다

- 로타용 단조소재 : ESR정련, 단조 및 열처리 기술 등의 제조 공정기술 확보
- 케이싱용 주조소재 : 대형주조 초내열합금의 주조성 확보 및 케이싱 보수용접을 대비한 용접기술 확보
- 장시간 물성 평가 및 Data 구축 : 로터 및 케이싱 소재에 대한 설계용 기초물성 및 설계수명을 보증하기 위한 열물성, 물리상수, 열팽창계수, Creep, 피로 특성 평가 Data 확보

Fig. 6은 국내 700℃ 플랜트 기술개발 추진 개략도를 나타내었다. 두산중공업을 주관기관으로 발전설비 제작 업체, 학계 및 국책연구기관이 참여하고 있다.

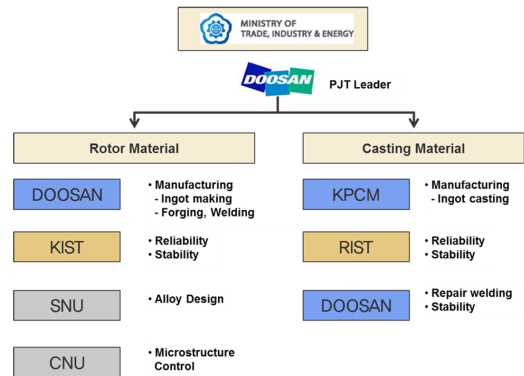


Fig. 6 Schematic diagram of technology development for 700℃ power plants

### 4.2 700°C급 발전소재 및 제조기술

600°C USC(Ultra Super Critical) 발전소에는 Fe base 페라이트계 내열강 소재가 주로 사용되어져 왔다.

대형 Ni기 초내열합금 단조품은 제강→정련→단조→열처리 → 비파괴 검사 공정 등으로 제작되어진다

700°C HSC(Hyper Super Critical) 발전소는 Ni 초내열합금이 사용되기 때문에 더욱 더 정교한 단조, 주조, 용접, 열처리 및 비파괴 검사 기술의 개발이 요구된다.

제강 공정에서 초내열합금 성분 제어 기술 개발을 통해 성분 편석 및 산소 농도 등의 최적 제어가 필요하다. 또한 ESR(Electro Slag Remelting) 등 정련설비를 이용한 Slag성분 및 최적 용해속도 확보 등의 특수 정련기술 개발이 필수적이다. Ni기 초내열합금은 종래의 Fe base 소재와 다른 재료적 특성을 보이기 때문에 단조 가능온도 범위 및 최적 단조비 확보가 요구된다.

단조 후 미세조직 및 물성 제어를 위한 열처리 기술이 개발되어져야 하며, 최종 제품의 품질 확보를 위한 비파괴 검사 기술이 수반되어야 한다.

그림 7은 Haynes사에서 제작된 로타 소재용 Haynes 282 소재 Ingot을 나타내었다.<sup>(13)</sup>

Ni기 초내열합금은 최대 약 10톤 규모까지 제작이 가능하며, 터빈 로타는 약 30~40톤 규모이기 때문에 일체형으로 제작이 불가하다. 따라서 기존 로타 제작공정과는 달리 Ni기 초내열합금을 중량 10톤 규모로 제작한 후 용접으로 일체형으로 만드는 기술 즉, 용접형 로타 제작 기술이 필요하다.

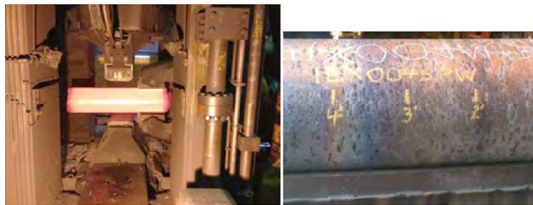


Fig. 7 Forging/Triple melt ingot of Haynes 282

그림 8은 용접형 로타 제작 개략도를 나타내었다. Ni기 초내열합금의 동종용접 및 Ni기 초내열합금과 Fe base 소재와의 이종용접으로 이루어진다.

대형Ni기 초내열합금 주조품은 대형 후속 제품의 물성 균질성 확보를 위한 편석 제어, Mold 내부 산화 및 Turbulence 제어 및 주조품에서 발생하는 주조결함 보수를 위한 보수용접기술 개발이 요구된다.

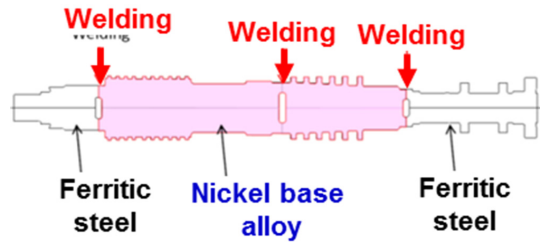


Fig. 8 Welded rotor

특히 Ni 초내열합금에 첨가되어있는 Al, Ti 등의 산화성이 큰 성분의 제어가 중요하다.

Fig. 9는 주조품 제작 후 산화성 개재물에 의한 표면 결함 사진을 나타내었다.<sup>(14)</sup>

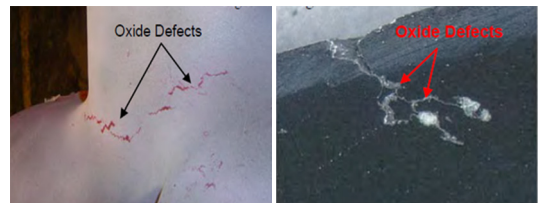


Fig. 9 Oxide defects of Alloy 617 cast

## 5. 결 론

친환경, 고효율 발전 설비 건설을 위해 미국, 유럽, 일본 및 중국 등 전세계적으로 정부 주도하에 산업계, 학계 및 발전 설비 제조업체와 공동으로 광범위한 기술개발을 수행하고 있다. 특히 700°C HSC (Hyper Super Critical) 발전소는 Ni 초내열합금의 사용이 필수적이다.

국내에서는 발전 설비용 대형 Ni 초내열합금 제조 기술은 아직 초보 단계에 있으며, 전세계적인 추세에 비추어 볼 때 상용화까지 지속적인 기술개발이 이루어질 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- (1) EPRI, 2012, “The CURC-EPRI Coal Technology Roadmap”
- (2) IEA, 2013, 2012 Annual Report © OECD/IEA
- (3) Diczfalusy, B., 2012, “HELE Coal Technology Roadmap.”, IEA Clean Coal Centre Workshop: on Advanced ultra supercritical coal-fired Power Plants, Vienna, Austria, pp. 12~20.

- (4) Fujimitsu, M., 2001, "History of power plants and progress in heat resistant steels", *ISIJ Int.* Vol. 41, No. 6, pp. 612~625.
- (5) EPRI, 2007, "The Challenge of Carbon Capture", p.15.
- (6) Viswanathan, R., Purgert, R. and Rao, U., 2002, "Materials for Advanced Power Engineering 2002", *Proceedings Part II*, pp. 1109~1129.
- (7) EPRI, 2011, "U.S Department of Energy and Ohio Coal Development Office Advanced Ultra-Supercritical Materials Project for Boiler and Steam Turbines," *EPRI Report No. 1022770*.
- (8) Viswanathan, R., Henry, J. F., Tanzosh, J., Stanko, G., Shingledecker, J., Vitalis, B. and Purgert, R., 2005, "U.S. Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plants." *J. of Mater. Eng. & Perf.*, Vol. 14, No. 3, pp. 281~292.
- (9) Shingledecker, J. P. and Wright, I. G., 2006, "Evaluation of the Materials Technology Required for a 760°C Power Steam Boiler." *Proc. to the 8th Liege Conference on Materials for Advanced Power Engineering*, pp. 107~120.
- (10) Maziasz, P. J., Evans, N. D. and Jablonski, P. D., 2010, "High Temperature Mechanical Properties and Microstructure of Cast Ni-Based Superalloys for Steam Turbine Casting Applications", *6th Int. Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*, Santa Fe, New Mexico.
- (11) Fukuda, M., Saito, E., Tanaka, Y. and Izumi, S., 2013, "Advanced USC technology development in Japan", *Proceedings from the Seventh International Conference*.
- (12) Liu, Z. et al., 2013, "Material advancement used for 700°C A-USC-PP in China", *Proceedings from the Seventh International Conference*.
- (13) Shingledecker, J., Purgert, R. and Rawls, P., 2013, "Current status of the U.S. DOE/OCDO A-USC materials technology research and development program", *Proceedings from the Seventh International Conference*.
- (14) Birks, S. et al., October 2013, "Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants", *Proceedings from the Seventh International Conference*.