

화력발전 기술개발 동향

장 신 규 · 한국남부발전(주), 기술본부장

_e-mail : skchang@kospo.co.kr

이 글에서는 선진국을 중심으로 전개되고 있는 화력발전 기술개발 동향을 초초임계압 발전소 중심으로 살펴보고자 한다.

21세기 세계 전력산업은 경보전이란 두 가지 문제를 동시에 해결해야 하는 도전에 직면해 있다. 현재까지 화석연료는 전세계 전력생산의 70%를 담당하고 있으며 특히 석탄은 세계적으로 널리 분포하고 매장량이 풍부한 자원으로 21세기에도 세계의 주요 에너지 자원이 될 것이다. 화석연료의 지속적 사용을 위해서는 기후변화협약 발효와 국제적 환경규제 강화에 대응하기 위해 유해물질과 CO₂ 점감을 위한 기술개발 노력이 절실히 요구되고 있다. 선진국을 중심으로 전개되고 있는 화력발전 기술개발 동향을 USC 발전소 중심으로 살펴보고자 한다.

초초임계압 화력발전소

Ultra Super Critical(USC) 혹은 Advanced Supercritical로 불리는 초초임계는 물의 임계

점(압력 221bar, 온도 374.15°C) 이상의 초임계압 조건을 의미하고 있다. 즉, 초초임계 발전소란 주증기 또는 재열증기 온도가 593°C 이상이고 증기압력이

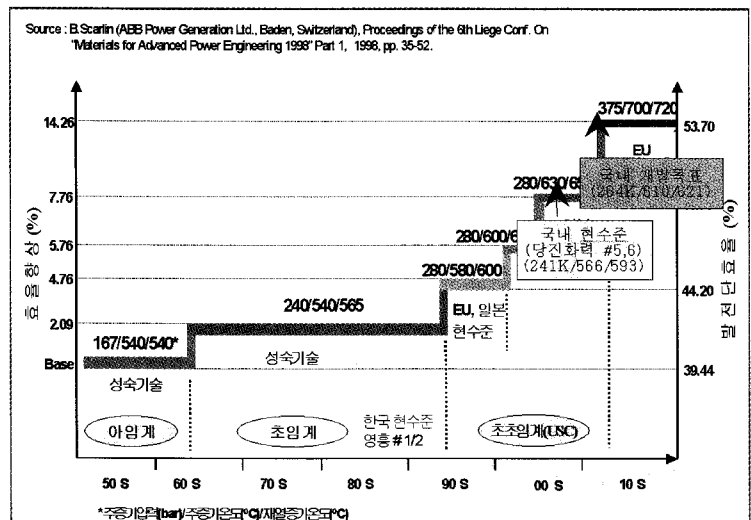


그림 1 화력발전소 증기조건 및 발전효율 변화

241bar 이상인 발전소를 USC 발전소라 부르고 있다. 고효율 저공해 발전소 건설을 위한 가장 직접적이고 경제적인 방법은 증기터빈 입구 증기온도와 압력을 높이는 것이다. USC 발전소는 효율향상에 따른 연료절감, CO₂ 배출량 감소, Ash 감소, 온배수 배출량 감소 등의 장점이 많아 일본, 유럽, 미국, 중국 등에서 운영 중이며 현재에도 많은 국가에서 건설 중이다. 화력발전에서 발전소 효율이 2% 증가할 때마다 CO₂는 약 5%씩 절감되며 보다 향상된 효율과 오염물질 저감을 위해 지속적으로 USC 발전소 기술개발이 진행되고 있다.

국내·외 USC 화력발전소 기술 개발 및 건설 현황

증기온도와 압력은 1950년대 초부터 현재까지 꾸준히 증가하여 발전단 효율이 39%에서 44.2%까지 상승하였다. '60년대에서 '90년대까지의 약 30년 동안의 초임계압 발전시기를 거쳐, '90년대부터 초초임계압(USC) 발전기술이 상용화 단계에 접어들었으며, 2020년까지 초초임계압 발전이 화력발전의 주력 기종으로 대두될 것으로 예상된다. 경제성과 직결되는 발전단위기 용량은 꾸준히 증가하여 2007년 현재 표 1과 같이 1,050MW급

석탄화력발전소가 상용 운전되고 있다.

표 2와 같이 초임계압 발전설비에 있어서 566°C~593°C의 발전설비는 이미 상용화된 상태로 발전소 고효율화에 의한 높은 경쟁력의 확보 및 환경 친화성으로 인해 국내외에서 채용이 증가되고 있으며 600°C 이상의 보다 향상된 증기조건을 초초임계압 발전소 기술개발은 상용화를 목표로 지속적으로 각국에서 개발 중에 있으며 주요 국가별 내용을 살펴보면 다음과 같다.

미 국

미국에서는 초초임계압 발전소

표 1 운영 중인 USC 화력발전소

발전소명	국가	용량 (kW)	준공연도	주증기압 (kg/cm ²)	증기온도(°C)		제작사	
					주증기	재열증기	보일러	터빈
Tachibanawan#1	Japan	700	2000	246	566	593	BHK	GE/ Toshiba
Nanano Ohta 2	Japan	700	2000	241	593	593	MHI	Toshiba
Tachibanawan 1,2	Japan	1050	2001	255	600	610		Toshiba MHI
Bexbach II	Germany	750	2000	246	575	595	EVT	ABB
Tomato-Atsuma 4	Japan	700	2002	255	600	600		Hitachi
Hekinan 4, 5	Japan	1000	2002	246	566	593	BHK	Toshiba
Niederaussem	Germany	1025	2002	270	576	599		Siemens
Isogo	Japan	600	2002	246	600	610		Siemens
Hirono 5	Japan	600	2002	246	600	600		MHI
Hitachinaka 1	Japan	1000	2003	250	600	600	BHK	Hitachi
勿來 10, 11	Japan	1050	2004	246	593	593	IHI	
Waigaoqiao 1,2	China	980	2003	255	538	566		Siemens
Genesee 3	Canada	495	2005	246	566	566	BHK	
Qinbei 1, 2	China	600	2005	246	566	566	BHK	
Yuhuan #1, 2	China	1000	2007	268	600	600	MHI	

표 2 건설 중인 USC 화력발전소

발전소 명	용량 (MW)	주증기압력 (kg/cm ²)	주증기 온도 (°C)	재열증기온도 (°C)	상업운전
Yuhuan #3, 4	1000	268	600	600	2008
Waigaoqiao #3, 4	1000	275	600	600	2008
Huadian Zouxian #8	1000	254	600	600	2008
Taizhou #2	1000	246	600	600	2008
Ncurath	1100	265	600	605	2009
Sanbaimen #1,	1000	246	600	600	2009
Sanbaimen #2	1000	246	600	600	2010
ATCP #1	1070	250	600	610	2012
ATCP #2	1070	250	600	610	2013

에 대한 관심이 그렇게 높지 않았으나 일본과 유럽의 연구개발에 자극받아 전력연구소(EPRI)가 중심이 되어 1985년에 대규모 개발프로젝트를 발족시켰다. 이 프로젝트에는 미국 외에도 유럽과 일본의 보일러, 터빈 제작사가 참여하고 5년간에 걸쳐 세계적인 규모로 연구가 진행되었다. 이 결과로 1993년 운전을 목표로 한 316kg/cm²·g, 593/593/593°C의 600MW급 석탄화력 발전소가 건설되었다. 이후, 발전소 효율향상에 관심이 고조됨에 따라 최근 EPRI를 중심으로 다시 증기조건 개선과 환경오염물질 및 CO₂ 배출저감 연구를 진행하고 있다. 미국 에너지성은 21세기를 발전설비 효율 극대화의 시대로 보고 기존 기술 및 신기술의 항목별 목표 효율치를 설정한 'The Department of Energy's Clean Coal Power Program'을 운용하고 있다. 그 핵심 내용

은 전세계 CO₂ 배출량의 36%를 차지하고 있으며, 7%에 달하는 저감의무를 이행해야 할 미국으로서는 기후변화협약 비준 이후를 대비하여 효율을 극대화하고 유해 가스량을 줄이는 UltraGen I, II, III 추진하고 있다.

- ▶ UltraGen I : 주증기 온도 604°C(1,120°F)
- ▶ UltraGen II : 주증기 온도 699°C(1,290°F)
- ▶ UltraGen III : 주증기 온도 760°C(1,400°F)

UltraGen III은 최저의 발전단가를 추구하고 CO₂를 제거, 저장 처리하여 배출 가스량을 최소화하여 지구 온난화를 해결하기 위해 프로그램이다.

1) UltraGen I

UltraGen I은 2012년 운영목표로 주증기 온도조건 604°C(1,120°F)에서 상업적으로 검증된 페라이트(Ferrite) 재질을 사용하면

서 현재 운전 중인 초초임계압 발전소보다 배출 가스량을 저감하도록 배출가스의 25%를 CO₂ 저감설비를 통해서 CO₂를 제거하는 프로그램

UltraGen I의 주요 특징

- CO₂ 제거 후 순발전량 800MW
- 주증기 조건은 264kg/cm², 604/610°C(1,120/1,130°F), 튜브와 헤드는 페라이트 재질 사용, 39%(HHV; High Heating Value) 효율(사용 석탄의 종류와 1단 또는 2단 재열 적용에 따라 약간 상이)
- 25%의 배기가스는 CO₂ 제거설비를 통해서 90% 이상 CO₂ 제거 압축, 이때 50~100MW 에너지 소비 예상
- SO₂와 NO_x는 각각 0.11kg/MWh로 저감 배출되며 이것은 현재 미국에서 허용하

표 3 Performance Parameters for UltraGen I, II and III

	UltraGen I	UltraGen II	UltraGen III
CO ₂ 제거 후 송전단 출력, MW	800	600	600
CO ₂ 제거 전 송전단 출력, MW	850 to 900	650 to 700	630 to 670
CO ₂ 제거 전 송전단 효율, %(HHV)	39	42 to 44	45 to 48
주증기 온도, °F	1120	1290	1400
고온용 재질	Ferritic	High nickel	High nickel
Flue gas slip stream flow, % ¹⁾	25 ²⁾	50 or 100 ³⁾	50 or 100 ³⁾
SO ₂ , lb/MWh	0.25	0.080	0.080
NO _x , lb/MWh	0.25	0.080	0.080
총 분진율, kg/MWh	0.04	0.029	< 0.029
수은제거율	90	>90	>90
추가비용, \$ million	250 to 350	미정	미정
프로젝트 완료 연도	2012	2015	2021

는 가장 청정한 발전소의 배출량의 절반의 값

○ 배출되는 수은의 90%는 제거

2) UltraGen II

UltraGen II은 2015년 운영 목표로 주증기 온도를 699°C (1,290°F)로 상승시키고 High-nickel 합금강을 사용하여 유해 가스 배출량은 10ppmv 이하로 저감계획이다. CO₂ 제거방안은 배출가스의 50%를 CO₂ 저감설비를 통해서 제거하여 NGCC-(Natural Gas Combined Cycle) 배출기준과 비슷하게 유지하는 방안과 100%를 CO₂ 저감설비를 통해서 90%의 CO₂를 제거하여 연간 3만 5,000톤을 제거하는 방안이다.

UltraGen II의 주요 설계 특징

- CO₂ 제거 후 순발전량 600 MW
- CO₂ 제거 전 효율 42~44% (HHV) 주증기 조건, 264kg/cm², 604/610°C(1,120/1,130°F), 튜브와 헤드는 High-nickel 합금강 사용
- 50~100%의 배기가스는 CO₂ 제거설비를 통해서 90% 이상 CO₂ 제거 압축, UltraGen I 단계보다 CO₂ 제거기술이 향상되어 동력 소비는 낮아져 50~100 MW 예상
- SO₂와 NO_x는 각각 0.036 kg/MWh로 줄어서 UltraGen I의 1/3로 저감 배출
- 전체 분진은 UltraGen I 대비

20% 저감되어 0.029kg/MWh

3) UltraGen III

UltraGen III은 2021년 운영목표로 UltraGen 프로그램에서 개발된 모든 기술을 포함하여 가장 높은 증기 조건에서 운전이 될 것이다.

UltraGen III의 주요 설계 특징

- CO₂ 제거 후 순발전량 600MW
- CO₂ 제거 전 효율 45~48%(HHV) 주증기 조건은 264kg/cm², 604/610°C (1,120/1,130°F)이며, 튜브와 헤드는 High-nickel 합금강 사용
- 50~100%의 배기가스는

주) 1) 배기가스 중 CO₂ 제거 설비를 통한 처리비율

2) 연간 100만 톤의 제거를 위해 배기가스 25%를 CO₂ 제거 설비를 통해 처리

3) 408kg/MWh 제거를 위해 배기가스 50%를, 연간 380만 톤의 CO₂ 제거를 위해 배기가스 100% CO₂ 제거설비를 통해 처리

※ HHV(High Heating Value) : 고위발열량 기준 열효율

CO₂ 제거설비를 통해서 90% 이상 CO₂ 제거 압축되며 CO₂ 제거기술이 향상되어 동력소비는 낮아져 30~70MW

- SO₂와 NO_x는 각각 0.036kg/MWh로 줄어서 UltraGen I의 1/3로 감소, 배출
- 전체 분진은 UltraGen I 대비 20% 저감되어 0.029kg/MWh

유럽

유럽에서는 1983~1997년 동안에 COST(European Co-Operation in Scientific & Technical Research) 501 연구 프로그램으로 화력발전소의 효율 향상에 대한 연구를 300kg/cm²·g, 600/600°C로 목표로 진행되었다. COST 501의 연구 결과와 일본의 신재료 기술을 적용하여 Esbjerg #3(245kg/cm²·g, 560/560°C)의 상업운전을 1992년 개시하였으며, 덴마크에서는 219kg/cm²·g, 580/580°C 조건의 400MW급 Nordjylland과 Skaerbaek 발전소를 1997년 준공하여 상업운전 중에 있다. COST 501의 완료 후 1998~2003년 동안에 300kg/cm²·g, 620/650°C를 목표로 COST 522 연구 프로그램이 완료되었으며, 현재는 COST 536 프로그램이 진행 중이다. 영국과 독일의 Siemens에서는 300kg/cm²·g, 700/720

°C를 목표로 Thermie 프로젝트가 진행 중이다.

1) Thermie 프로그램

300kg/cm² 600/600°C COST 501 프로그램 개발 이후, European Commission EC, 발전설비 업체의 주요 제작자 그룹, 유럽의 선도적인 전력회사간 협의로, EC에서 700°C 증기온도의 미분탄 PF, Pulverised Fuel 발전소에 대한 기획탐색연구에 대한 자금지원을 결정되었다. 이 기획탐색연구를 통해 기술성, 상용화, 경제성에 대한 긍정적인 결과를 발견하였다. 즉 효율증가에 의해 약 15%까지의 배출가스 감소가 가능하며, 특히 재료분야에서 중요한 기술개발이 필요하지만 해결 가능한 것으로 결론이 났다. 1996년 가을에 EC는 700°C급 1,000MW급 USC 석탄화력 발전소 실증을 위한 과제 제안을 요청하였고, 최종 40개의 유럽 회사들이 참여하게 되었다.

○ 연구목표

- 증기조건 : 375kg/cm²/700/720/720°C
- 발전소 효율 : 55%
- 발전소 용량 : 400~1,000 MW
- 1단계 핵심기술 개발 내용 1998~2003
- 증기조건에 필요한 합금 및 제조기술 개발
- 니켈계 초내열합금의 대형 주단강품 제조기술개발

- 제조 설비 능력 실증
- 재료 특성 적합성
- 혁신적인 터빈 제작 기술
- 니켈계 초내열합금으로 제작되는 설비의 소형화 설계
- 신기술에 대한 경제성, 상업성, 환경 및 규제에 대한 실증
- 보일러 및 터빈용 신재료의 장시간 특성 실증

일본

일본에서는 1983년부터 1994년까지 기간 동안에 표 4와 같이 Phase I, Step 1 단계에서 증기조건 314kg/cm² /593/593/593°C, 2단 재열기 채택으로 목표효율 44.2%로 USC 발전소 연구가 시작되었다. Step 2는 표 4와 같이 Step 1보다 더 높은 44.9%의 열효율을 목표로 하였다. Phase I에서는 그 당시 실현 가능한 모든 기술을 총 동원하여 효율 위주의 연구 목표를 설정하였다. 따라서 경제성을 떠나 Step 2의 증기온도를 650°C까지 높였고 2단 재열기를 도입하였다.

Phase II에서는 상용화와 경제성을 고려하여 Phase I의 Step 2보다 증기조건이 낮아지고 1단 재열기를 도입하였다. Phase II의 증기조건은 보일러 최종 과열기/재열기 전열관을 제외하고는 터빈과 보일러에 경제성과 발전소 운전효율을 동시에 높일 수 있는 페라이트계 재료를 적용할 수 있도록 300kg/cm²/630/630°C를 목표로 하였다. Phase II의 열효율

은 Phase 1의 Step 2보다 낮은 44.16%를 목표로 하였다. 최근 까지 1단 재열방식을 위주로 재열증기 온도만을 566°C로 높여 적용하였으며, 1989년 316kg/cm²·g, 566/566/566°C 조건의 Kawagoe #1 700MW급 발전소를 준공한 후 1993년에는 그간의 재열증기온도 개선 경험을 바탕으로 246kg/cm²·g, 538/593°C 조건의 Hekinan #3 700MW급 발전소 및 246kg/cm²·g, 593/593°C 조건의 Matsuur #2 1,000MW급 발전소를 준공한 후 현재 일본에는 20여기의 USC 발전소가 가동 혹은 건설 중에 있으며, Tachibanawan 2호기는 2002년 현재 세계 최고의 증기온도 255kg/cm²·g, 600/610°C를 보이고 있다. 일본은 593°C 보일러가 현재 실용화되어 있으며, 각 민간 발전소 및 J-Power가 발전설비 제작사 등과 연합하여 1994~2000년 연구기간 중 도달목표를 300kg/cm²·g, 630/630°C로 설정하였지만

2000년 현재까지 보일러와 터빈 재료의 실증 문제로 630°C에 도달하지는 못하였다. 따라서 재료 문제 해결을 위해 1997년 NRIM (National Research Institute for Material) 내에서 350kg/cm²·g/650°C급 페라이트계 내열강 개발/실용화를 목표로 STX-21 프로젝트를 수행했다.

국내

국내는 '70년 이후 전력수요의 급팽창으로 인한 양적 충족을 위하여 500MW급 표준화 발전소를 개발하기 위한 연구가 시작되고 '80년대 이후 국내의 보령화력 3~6호기를 중심으로 초임계압 증기 조건인 246kg/cm²·g, 538/538°C(1,000/1,000°F)을 개발하여 현재 국내 22기의 발전소가 건설되었다. 이에, '85년 이후 기력발전 송전단 효율은 34%대를 유지하고, 양적 팽창 이후인 '90년 이후 고효율 및 친환경적인 발전 모델을 추구하여 현재 36%대의 송전단 효율 상승을 가져왔다.

이후, 21세기에는 연료비의 상승 및 대용량, 고효율에 대한 관심이 고조되어, 2001년 당진 5·6호기에 증기조건이 246kg/cm²·g, 566/593°C(1,050/1,100°F)을 적용하여 국내 최초로 초초임계 발전소의 건설이 시작되었으며, 2006년 당진화력 5·6호기에 246kg/cm², 566/593°C의 주증기 및 재열증기 조건으로 USC 발전소가 운영 중이다. 산업자원부는 2002년부터 8년 과제로 기후변화협약에 따른 환경문제 해결과 고질적인 발전설비 입지난 해소, 발전효율 개선 그리고 수출산업화 등 다목적으로 차세대 화력발전기술 개발 사업의 일환으로 한전 전력연구원과 두산중공업을 중심으로 1,000MW 대용량 초초임계압 발전시스템 개발을 추진 중이며, 한전 전력연구원은 시스템설계와 신뢰성 평가, 제어계통 설계기술 개발을 담당하고, 두산중공업은 보일러, 터빈, 발전기 설계와 제작 기술 개발을 담당하고 있다.

표 4 EPDC 주관의 USC 발전소 연구 스텝 및 개발목표

항 목	기존 발전소	Phase I(1983 ~ 1994)		Phase II 1994 ~ 2000
		STEP 1	STEP 2	
주 사용재료	페라이트계	페라이트계	오스테나이트계	페라이트계
증기압력, bar	241	314	343	300
증기온도, °C	538/566	593/593/593	649/593/593	630/630
설계발전단효율, %	42.1	44.2	44.9	44.16
효율향상, %	Base	5.0	6.5	4.8
연간 석탄절감량, ton	Base	96,000	175,000	95,000
연간 CO ₂ 저감량, 10 ⁶ Nm ³	Base	117	152	