화력발전설비의 격상 수명 연장

한국과학기술연구원(KIST) 홍경태

DOI http://dx.doi.org/10.18770/KEPCO.2016.02.02.205

1. 서 론

에너지 분야는 경제성 뿐만 아니라 정책과 규제에 따라, 민감하게 변화되는 특성이 있다. 지구 온난화를 야기하는 온실가스를 줄이려는 노력에 가장 영향을 받는 석탄화력발전은 주증기온도와 압력을 높혀 고효율화를 하거나, 석탄가스화복합발전, 온실가스포집(CCS) 발전 등 다양한 청정석탄화력발전기술로 대응을 하고 있다.

지구온난화를 막기 위하여, 파리에서 개최된 유엔 기후변화협약 당사국 총회에서 새로운 기후변화협정이 체결되었으며(2015년 12월 12일), 195개 당사국이 모두 합의하여, 우리나라를 포함한 180개국 이상이 2030년까지 온실가스를 얼마나 줄일 것인지를 유엔에 전달하였다. IEA에서도 합의하기가 어려운 목표로 생각하는 대기중 이산화탄소 농도를 450 ppm 이하로 하여, 산업화 이전에 비하여 지구 평균온도 상승 2℃ 이하로 하는 450계획 보다 더 나아간, 온도상승을 1.5℃이하로 제한하기로 하였다. 2℃이하로 하기 위해서도 2050년까지 1차 에너지에서 탄소배출량을 현재의 60% 정도로 감소시켜야 하는, 실현하기 아주 어려운 합의를 할 정도로 기후 변화를 심각하게 여기고 있다는 것을 알 수 있다.

우리나라는 2030년 온실가스배출전망치(BAU)를 8억 5060만 ton에서 36.7% 감축된 5억 3590만 ton으로 줄이는 세계 최고 수준의 목표를 제시하였다. 이 목표는 현재의 감축노력으로는 달성하기 어려우며, 우리나라 경제발전을 저해하지 않도록, 에너지 신산업을 육성할 수 있는 창의적이고 획기적인 온실가스 감축 방안이 필요하며, 특히 해외감축분 11.3%를 달성할 수 있도록 에너지산업을 글로벌화 할 수 있어야 한다.

IEA의 World Energy Outlook 2014에서 2040년에 에너지원별 사용량에 대한 예측을 2012년의 에너지 정책이 지속되는 경우, 보다 강화된 새로운 정책의 경우, 그리고 실현이 어렵지만 450 ppm이하로 대기중의 온실가스 농도를 유지하여, 기후변화폭을 2℃이하로 하는 450 정책에 대하여, 비교하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 450계획에서는 석탄의 사용량이 대폭 감소하며, 그림 1의 전력에 사용되는 에너지원별 예측에서도 450계획에서는 15%정도를 차지할 뿐이다. 파리 협약전에도 미국과 EU는 신규 석탄화력발전소를 건설하지 않을 예정이라고 하였으며, 중국과 인도만이 신규로 대형 석탄화력발전소를 건설할 예정이었으나, 향후 상당한 변화가 예상된다. 이러한 정책변화를 예견하여, 화력발전설비업체도 커다란 변화가 있었다. GE가 Alstom의 화력발전설비분야를 인수하였으며, 일본의 미쓰비시중공업과 히타치제작소가 화력발전사업을 통합하여 세계 3위의 발전설비 업체가 되었다. GE, 지멘스는 우수한 발전설비 기술을 바탕으로 에너지서비스 사업을 본격화하는 등, 새로운 기후 협약으로 인한 시장

표 1 3가지 정책에 따른 1차 에너지 공급원의 변화 예상 (World Energy Outlook 2014)

		New Policies		Current Policies		450 Scenario	
	2012	2020	2040	2020	2040	2020	2040
Coal	3 879	4 211	4 448	4 457	5 860	3 920	2 590
Oil	4 194	4 487	4 761	4 584	5 337	4 363	3 242
Gas	2 844	3 182	4 418	3 215	4 742	3 104	3 462
Nuclear	642	845	1 210	838	1 005	859	1 677
Hydro	316	392	535	383	504	392	597
Bioenergy*	1 344	1 554	2 002	1 551	1 933	1 565	2 535
Other renewables	142	308	918	289	658	319	1 526
Total	13 361	14 978	18 293	15 317	20 039	14 521	15 629
Fossil fuel share	*82%*	*79%*	*74%*	*80%*	*80%*	*78%*	*59%*
*Non-OECD share***	*60%*	*63%*	*70%*	*63%*	*70%*	*63%*	*68%*

* Includes traditional and modern uses of biomass. ** Excludes international bunkers.

변화에 능동적으로 대처해오고 있었으나, 보다 강화된 파리 기후협약으로 화력발전 설비업계들은 대폭적이고 빠른 변화가 필요하게 되었다.

전력 수요의 40% 이상을 공급하고 있는 석탄화력에서 배출하는 온실가스를 대폭 줄이면서, 전력을 생산하기 위한 방안으로 가장 실현 가능성이 큰 것이 기존 석탄화력 발전설비의 고효율화이다. 신규 부지 확보가 필요 없고, 신규건설비의 30%이내로 6개월의 공사기간으로 최대 10% 정도의 온실가스 배출량을 줄이면서, 연료 절감과 출력 증강을 할 수 있어, 전력 공급에 차질이 없으면서 경제성도 확보할 수 있는 온실가스 감축 방안으로, 장기가동 석탄화력 발전설비를 운영하고 있는 국가에서는 당장 선택할 수 밖에 없는 대안으로 여겨진다.

2. 석탄화력발전설비의 격상 수명연장 (Retofit) 기술이란

설계 수명(운전시간이 20만 시간 이상, 사용기간 30년 이상, 기동회수 3,000회 이상)이상 사용하고 있는 화력발전 설비를 노후 설비라고 하며, 노후 상태를 진단한 후, 수명 연장을 할 때, 최신 화력발전 설비 기술을 적용하여, 용량을 증대하고 주증기 온도를 높여, 열효율 향상을 통하여 이산화탄소 배출을 절감하고, 집진, 탈질, 탈황설비를 보완하여, 친환경화하는 경우를 격상 수명 연장이라고 한다.

기존 건축 구조를 그대로 활용하면서, 고온 설비인 보일러, 터빈, 주배관, 주변기기인 Fan을 보강하고, 필요에 따라, 제어 설비와 탈질, 탈황, 집진 설비를 보강하여, 신규 설비의 30% 이내의 비용으로 6개월 정도의 단기간에 효율향상, 출력증강, 수명 연장을 동시에 하는 것을 의미한다.

노후 석탄화력 발전설비를 격상 수명 연장을 함으로써, 열효율 향상으로 온실가스를 저감할 수 있다. 기존 발전부지를 그대로 활용하고, 용량을 10% 증대함으로써 신규 전원의 대체효과 있으며, 탈질, 탈황 집진 설비를 고도화하여 환경문제를 해소할 수 있다. 저급탄을 사용할 수 있도록 연소 시스템으로 개량하면 전력 생산비용 절감 및 연료수급 안정성을 확보할 수 있다. 빠른 시간(6개월 정도)에 신규발전소 건설비용의 30% 이내로 격상 수명연장을 할 수 있어, 전력 수급을 원활하게 할 수 있어, 전력수요가 급증하고 있는 개발도상국의 경우, 신규발전설비 건설에 더하여 노후설비의 격상 수명연장을 우선하게 되며, 선진국의 경우, 환경 문제에 부응하면서, 효율적이고 경제적인 전력 공급을 용이하게 할 수 있으므로 노후 석탄화력설비의 격상 수명 연장 기술은 향후, 화력발전설비 시장에서 우선적으로 확보해야 할 중요한 기술이 될 것이다.

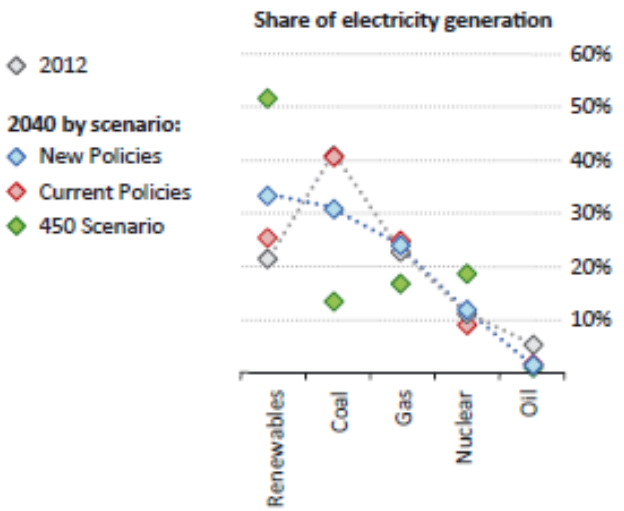

그림 1 3가지 정책에 따른 2040년 전력생산 연료별 변화 예상도 (World Energy Outlook 2014)

3. 석탄화력발전설비 격상 수명연장(Retrofit)의 시장 전망

3.1 세계 시장 전망

세계적으로 선진국 전력수요가 정체되고 있으나, 중국, 인도의 아시아 국가 및 개발도상국들의 경제성장에 따라 전력수요는 계속 성장 할 것으로 예상되며, 지구온난화에 대응한 신재생 에너지가 증가할 것이나. 2030년대에도 전력생산의 30% 이상을 석탄이 차지하여 가장 중요한 에너지 생산설비로 남아 있을 것으로 예상된다.

특히 전세계 발전설비의 20%(500 GW)의 설비가 30년 이상 사용되었고, 신규 발전설비 건설에 비하여 경제성이 우수하므로, 최신 기술을 활용한 노후 석탄화력 격상 수명연장 사업이 크게 성장할 것이다.

전력 수요가 정체될 EU와 미국도 30년 이상 운전된 석탄화력 발전설비가 전체의 50% 이상에 도달하고 있으며(그림 2), 환경 등의 문제로 가스터빈의 복합화력 발전소가 신규 건설되고 있으나 장기 운전된 석탄화력 설비가 많아 단기간에 이 발전소들에 CO_2 배출감소를 위한 설비개선을 시작할

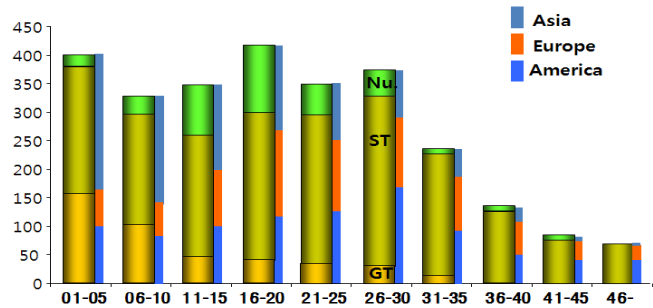

그림 2 전 세계 발전설비의 경년현황 (World Energy Outlook 2005)

것으로 전망된다. OECD 국가도 2030년까지 약 2,000 GW 규모의 신규발전 설비가 요구되는데, 그 중 1/3 이상은 기존 노후 발전설비의 교체분에 해당되며, 특히 미국의 경우 2025년까지 신규 및 교체에 의한 발전시장 규모는 371 GW에 달하므로, 노후 발전소 교체까지 고려할 때 석탄화력의 연간 전체 발주 물량은 120 GW 이상이 될 것이나, 신규 부지 확보와 인허가 등이 어려워, 격상 수명 연장을 하는 비중이 더욱 커 질것으로 예상된다.

발전 설비 제작 기술이 우수한 일본도 500 MW급 노후 발전설비가 10 호기 이상이 운전되고 있으며, 자국의 발전설비 전문업체에 국한된 시장 폐쇄정책을 고수하고 있어 외국 발전설비업체의 시장진입이 매우 어려운 시장이다.

개발도상국 중에 가장 시장이 큰 중국은 노후 발전설비의 대부분은 300 MW급이며, 노후 설비의 개보수 보다는 폐기 후 500 MW 급 이상의 신규설비로 대체하고 있어 노후 발전설비 개보수 시장은 신규에 비해 작은 규모이다.

인도 전력산업은 1998년부터 2012년까지 연평균 5.38%의 성장률로 꾸준히 성장해 왔으나 폭발적인 수요에 비해 만성적인 전력부족을 경험하고 있으며, 발전설비의 노후화로 인해 향후 10년간 31 GW의 발전설비의 수명연장 및 성능개선 개보수 시장이 예상되며, 노후발전설비 Retrofit관련하여 최고 수준의 기술과 실적을 갖고 있는 Simens가 이들 시장을 선점하기 위하여, 전문 합작회사를 인도에 설립하는 등 적극적으로 진출을 하고 있다.

3.2 국내시장 전망

설계 수명이 다해가는 20여기의 한국표준형 500 MW급 화력발전 설비 20기를 2017년 이후부터 10% 출력 증강과 고효율화, 저급탄 사용을 할 수 있도록 격상 Retrofit을 시작하여 국내 전력난 완화 및 에너지 효율향상, 전력 생산비용 절감에 기여하고, 1,000 MW 원전 1기의 전원을 추가로 확보할 수 있어, 전력난 해소에도 기여할 수 있다. 또한 노후 플랜트 효율향상으로 온실 가스를 8%이상 절감할 수 있어 1기당 연간 29만톤의 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있어, 총 20기를 격상 수명연장을 하면 년간 580만톤의 온실가스 배출을 절감할 수 있다.

500 MW급 한국표준형 석탄화력발전설비를 격상수명연장

표 1 국내외 화력발전설비 수명 연장 시장 현황(요약)

(단위 : 억원)

구분	2017	2018	2019	2020(예상)
해외시장	576,000	576,000	576,000	576,000
국내시장	2,400	2,400	4,800	4,800

하는 데, 2400억원 정도가 소요된다고 할 때, 2017년부터 2024년까지 8년간 4조 8000억의 국내 시장이 형성될 것이다. 그 이후에는 800 MW급 석탄화력 발전설비의 격상 수명 연장을 시작하여야 하므로, 이보다 더 큰 국내 시장이 형성될 것으로 여겨진다.

4. 석탄화력발전설비 격상 수명연장(Retrofit) 기술 동향

미국에서는 초초임계압 발전소에 대한 관심이 그렇게 높지 않았으나 일본과 유럽의 연구개발에 자극받아 전력연구소(EPRI)가 중심이 되어 1985년에 유럽 및 일본업체가 참여한 대규모 개발프로젝트가 진행되었다. 발전소 효율향상에 관심이 고조됨에 따라 EPRI를 중심으로 증기조건 격상과 환경오염물질 및 CO_2 배출저감 연구를 진행하고 있다.

21세기를 발전설비 효율 극대화의 시대로 보고 기존 기술 및 신기술의 항목별 목표 효율치를 설정한 “The Department of Energy's Clean Coal Power Program”을 운용하여, 기후변화 협약 비준 이후를 대비하여 효율을 극대화하고 유해 가스량을 줄이는 UltraGen I, II, III를 단계적으로 추진하고 있으나, 가스터빈 분야에서의 기술적 우위와 풍부하게 생산되는 셰일가스를 활용하여 온실가스배출이 석탄화력에 비하여 대폭 절감되는 복합화력발전을 주력 분야로 하고 있다.

격상 수명연장 분야에서도 충동식 터빈을 대표하는 General Electric은 원천기술 보유사로 국내에 표준화력 500 MW의 원천설계자이며 많은 모델을 두산중공업과 공동으로 공급하였으며, 다양한 용량의 터빈모델을 바탕으로 성능향상과 신기술을 지속적으로 응용하고 있는 발전설비 분야의 선두 기업으로 다양한 조건의 노후 석탄화력발전설비를 격상하는데 유연성이 높으며, 최근에 Retrofit 분야의 선두 업계인 Alstorm을 합병하였다.

미국에서 DOE(Department of Energy)의 지원을 받은 “Virtual Simulation of Vision 21 Energy plants” 이 수행되어, 최신 화력발전설비의 운용 기법에 대한 기술을 확보한 바 있으며, 미국 브리검영대학의 ACERC에서는 EPRI의 지원을 받아 보일러내 ash deposit 해석프로그램인 TADIM을 개발한 바 있어 저급탄을 사용하는 원천 기술도 확보하고 있어, 노후 화력발전설비의 격상 Retrofit 관련하여 다양한 기술적 대비를 하고 있다 .

유럽에서는 1983~1997년 동안에 COST(European Co-Operation in Scientific & Technical Research) 501 연구 프로그램으로 화력발전소의 효율 향상에 대한 연구를 300 bar, 600℃/600℃의 목표로 진행되었다. COST 501의 연구 완료 후 1998~2003년 동안의 300 bar, 620℃/650℃를 목표로 COST 522 연구 프로그램이 완료되었으며, 현재는 COST 536 프로그램이 진

행 중이다.

다국적 기업인 Alstom은 M&A 과정을 거치면서 획득된 충동식과 반동식 기술을 활용하여 노후설비의 Spare Part 및 성능개선 시장에서 세계 41%를 점유 (세계시장 1위)할 정도의 다양한 Service Portfolio를 구성하고 있으나, 최근에 GE가 인수하였다. Alstom은 2005년에 영광 #1,2의 성능개선 수주 및 보령 #1,2 성능개선에도 제안서를 제출하는 등 국내 성능개선 시장의 진출하고자 노력을 하고 있으며, 국내의 GE와 관련한 설비의 격상 수명연장에도 참여할 가능성이 매우 높다.

반동식 터빈을 대표하는 Siemens는 다국적기업으로 1950년대부터 초임계압 발전소를 건설하였으며 작은 용량 발전소에 대해 양호한 운전실적을 가지고 있다. 저압터빈의 출구 후드(Exhaust Hood) 및 고효율 저압터빈 블레이드 등을 개발하여 노후 설비의 효율 증대에 활용하고 있으며, 인도의 화력발전설비의 수명 연장 시장을 확보하기 위하여 합작회사를 출범시킨 바 있다. 국내에서는 고리원자력 1~4호기의 저압터빈 성능개선을 1997년도에 수행하였다. 1980년대부터 유럽각국의 연구기관과 공동으로 증기터빈 효율상승을 위한 연구에 많은 투자를 하고 있다. 이러한 연구 결과를 1990년대에 새로운 고효율 모델을 발전시장에 발표하고, 향후 화력발전설비 격상 수명연장에 이러한 첨단 기술을 적극 적용하여, 이 분야를 주도하고자 노력하고 있다.

일본기업의 3사(Mitsubishi, Hitachi, Toshiba)는 정부의 적극적인 지원으로 초초임계압 및 성능향상의 핵심기술을 확보하였다. 2차례의 오일쇼크 이후 에너지효율을 높이기 위한 노력과 이산화탄소(CO_2) 발생을 줄이기 위한 활발한 연구를 진행하였으며, 초초임계압 대형화력발전분야에서는 세계 최고 수준이다. 이러한 기술적 우위에도, 일본 내수 시장의 한계 극복과 국제 경쟁력 강화를 위하여, Mitsubishi와 Hitachi의 화력발전분야는 2012년 합병을 하였으며 Toshiba의 화력발전분야도 GE와 2013년 합병을 하여, 대대적인 시장 개편이 이루어 졌다. 일본 내 500 MW급 석탄화력 초임계 발전소를 초초임계 발전소로 개조하는 기술개발을 정부지원 하에 도시바, 히타치 등 전문 메이커 별로 다양한 기술개발이 추진중이며, 2016년도 완료 예정이다. 특히 일단재열 및 이단 재열 뿐만 아니라 증기조건 및 압력을 다양하게 적용시켜 4가지의 격상 수명연장에 대하여 개발을 하고 있어, 수요자의 다양한 요구사항에 대응할 수 있는 기술역량을 확보할 수 있는 강점이 있다. (표 2)

표 2 일본의 화력발전 설비 격상수명연장 기술개발 분야

구분	형식	주증기압 (bar)	주증기온도 (℃)	출력 (MW)	재열온도 (℃)		효율(%)		
					1단	2단	소내부하	터빈	플랜트 효율 (%)
기존	일단 재열	241	538	500	538	-			
Case 1	일단 재열	250	600	500	600	-	4.67	48.8	44.3
Case 2	이단 재열	350	700	500	720	720	4.3	53.0	48.1
Case 3	일단 재열	250	700	500	720	-	4.46	51.1	46.4
Case 4	일단 재열	241	610	500	720	-	4.54	50.2	45.5

석탄화력발전설비에 대한 원천기술을 확보하고 있지 못하나, 자국 시장 우대 정책으로 보일러 및 터빈시장 점유율이 가장 높은 중국의 발전 3사(Harbin, Dongfang, Shanghai)는 급격한 경제성장으로 자국의 신규발전설비 물량 때문에 아직은 노후설비의 성능개선시장에 관심을 가질 여력이 없으나, 국가적인 차원에서는 엄청나게 많은 량의 성능개선 Project가 예정되어 있고, 최근에는 고급사양의 터빈을 도입하여 기술개발의 기반을 구축하고 있어 비록 원천기술을 확보하고 있지 못하나, 향후 5년 후에는 격상 수명연장 시장에서 위협적인 존재가 될 수 있다.

인도는 지방 정부를 중심으로 노후한 소형 석탄화력발전설비(200 MW급 이하)를 용량과 주증기 온도 조건은 그대로 이면서, 첨단 기술을 적용하여 효율만 향상시키는 고효율화 수명 연장을 추진하고 있으며, 인도 발전회사와 Simens에서 합작 회사를 만들어, 시범사업을 우선 한 후, 본격적인 사업 추진을 하고 있다.

5. 석탄화력발전설비 격상 수명연장(Retrofit)관련 국내 기술

노후 석탄화력 발전설비의 격상 수명 연장을 위한 요소기술 및 설비 제작 기술은 국내에서도 확보하고 있다.

격상 수명 연장을 하기 위하여 가장 핵심적인 기술이, 터빈 및 보일러 설계 기술을 포함하여 전체 시스템 기술이다. 국내에서는 500 MW급 초임계압 석탄화력 발전설비를 국내 기술로 설계, 제작을 한 한국 표준형 화력발전소가 20개 가동중으로, 실증 경험까지 확보한 상태이다.

격상 수명 연장을 하기 위한 고효율 화력 발전 기술로는 주증기 온도 566℃, 재열증기온도 593℃급 800 MW 화력발전설비를 10여기 자체 설계, 제작, 운전을 역시 하고 있으며, 주증기온도 610℃급, 1,000 MW 석탄화력발전설비도 자체 설계 제작하여, 실증용으로 2기를 건설 중에 있어, 초초임계압조건까지 격상 수명연장을 할 수 있는 기술을 확보하고 있다.

노후화력 발전설비의 비파괴적 수명 진단 기술 역시, 20여기의 임계압 화력발전설비 단순 수명 연장을 통하여 이미 확보하고 있다.

용량 증대를 위한 기술로 Fan 설계, 제작, 저급탄 연소를 위한 설비와 탈질, 탈황 설비 기술 역시 국내 전문 기업들이 확보하고 있으며, 고효율 발전기 기술도 국책사업 등을 통하여 확보하고 있다. 보일러 튜브에 사용되는 고합금 내열강 Seamless tube 제조 기술 역시 국내 강관 및 합금강 회사에서 확보하여, 소량 다품종 생산이 가능하여, 격상 수명 연장에 필요한 보일러 tube도 국내 공급이 가능하다.

이러한 요소기술에 더하여, 500 MW급에 대한 격상수명연장에 대한 표준화를 하고, 20여기에 대한 실적을 확보한다면, 이 분야를 선점할 수 있을 것이다.

반면에 다양한 용량과 효율의 발전 설비에 대한 경험이 부족하고, 500 MW급 미만의 저효율 석탄화력발전설비에 대한 설계, 및 제작 경험이 없고, 저급탄 연소와 같은 다양한 연료탄에 대한 경험이 미흡하여 다양한 수요에 대응하기가 어려운 약점이 있다.

격상 수명 연장시 당초 설계와는 다르므로, 이에 대한 안전도 확보를 위한 실증이 필요하나, 국내에서는 실증에 대한 경험과 기술이 미흡하여 국제적인 신뢰도 확보가 어렵다.

발전설비의 고효율 운전에 필요한 제어 기술과 설비에 대한 첨단 기술 개발이 개발된다면, 세계적인 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

여기에 주증기온도가 700℃ 이상의 A-USC 기술을 개발하여, 500 MW급 이하의 격상 수명연장에 우선 적용할 수 있다면, 대용량 A-USC 개발에 따르는 문제점도 없고, 신규 설비 실증에 비하여 기간과 비용을 대폭 단축할 수 있어, 가장 먼저 A-USC 발전을 상업화할 수 있을 것이며, 다양한 수요자의 요구에도 부응할 수 있어, 격상 수명연장 분야를 선도할 수 있으리라 여겨지며, 우리나라가 제시한 온실가스 감축을 효과적으로 하면서도, 화력발전설비산업을 세계적으로 육성하는 좋은 계기가 될 것이다.

References

[1] World Energy Outlook 2014, 2014, International Energy Agency.

[2] World Energy Outlook 2005, 2005, International Energy Agency.

[3] 500 MW 표준석탄화력 수명연장 및 출력증강사업 예비타당성 조사분석보고서, 2015, KDI.

[4] 화력 발전설비 해외진출 활성화 방안, 2014, 한국수출입은행 산업리스크분석보고서.

[5] Projected Costs of Generating Electricity, 2010, International Energy Agency.

[6] Cleaner Coal Workshop in Ha Long, Vietnam, 2008, Aug.18

[7] Performance Improvement of Pulverized Coal Fired Thermal Power Plant: A Retrofitting Option, R.Paul, L.Pattanayak, 2014, Research Inventy: International Journal of Engineering and Science, Vol.4, Issue 9, p.5-13.

[8] National Perspective Plan for Renovation, Modernisation and Life Extension of Thermal Power Stations, Government of India, Central Electricity Authority, 2009, Dec.