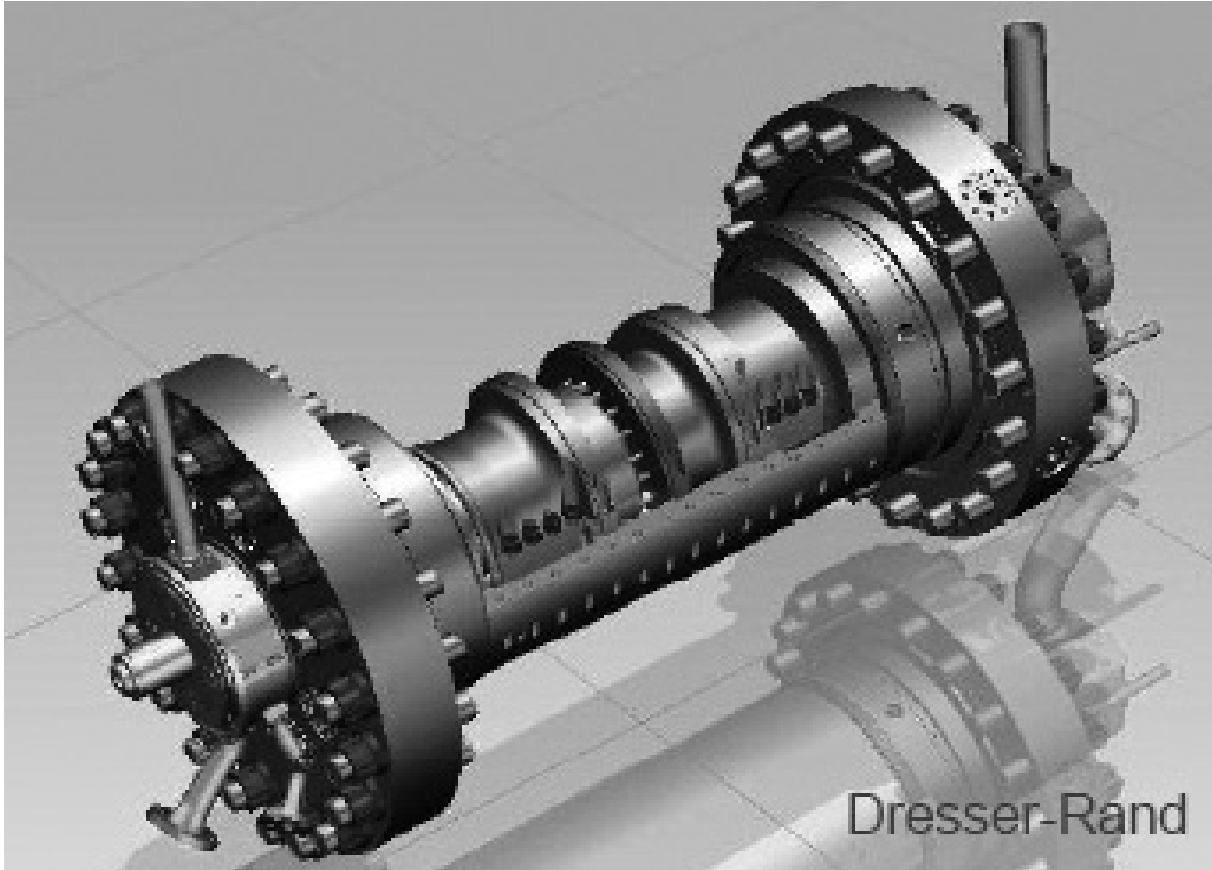


초임계 CO₂ 발전 기술



김범주
한전 전력연구원 선임연구원

1. 개황

오늘날 환경에 대한 영향을 최소화 하면서도 효율이 높은 발전 시스템에 대한 관심이 그 어느 때 보다 높아지고 있다. 최근 우리나라에서 발표한 제6차 전력수급기본계획과 제2차 국가에너지기본계획의 기본방향을 살펴보면, 온실가스 감축, 분산전원 및 신재생에너지 보급의 중요성이 계속 커지고 있음을 알 수 있다.

이러한 정책과 관련하여 초임계 CO₂ 발전 시스템은 분산전원으로서의 적용 가능성, 시스템의 단순화에 따른 비용 절감, 신재생에너지원과의 연계, 발전효율 증가 및 온실가스 저감 등 다양한 잠재력을 가지고 있다. 본고에서는 산업통상자원부의

‘창조경제 성장엔진 프로젝트’ 중 하나로 선정되어 관심이 높아지고 있는 초임계 CO₂ 발전기술에 대해 살펴본다.

[표 1] 제6차 전력수급기본계획 기본방향

- 적극적 수요관리를 통해 신규 발전설비 건설 소요 최소화
- 경제규모에 걸맞은 안정적 예비율 확보
- 지역수용성, 계통여건을 고려한 발전시설 확충

※출처: 지식경제부(2013.2)

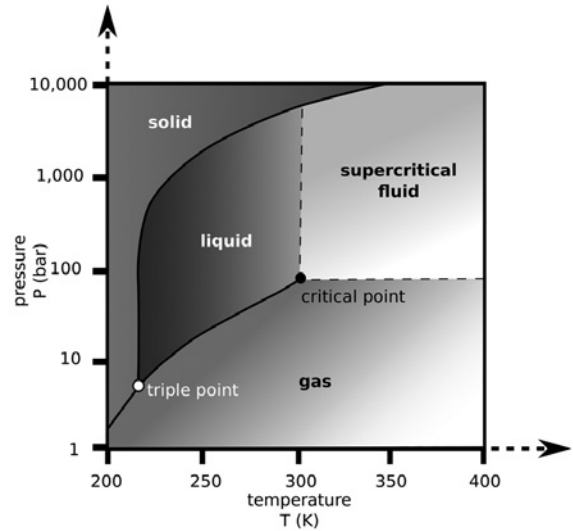
[표 2] 제2차 국가에너지기본계획 기본방향

6대 중점 과제	주요 목표
수요관리 중심의 에너지 정책 전환	2035년 전력수요의 15% 감축
분산형 발전시스템의 구축	2035년 발전량의 15% 이상을 분산형으로 공급
환경, 안전과의 조화 모색	신규 발전소에 대한 최신 온실가스 감축기술 적용
에너지 안보의 강화와 안정적 공급	해외 자원개발 역량강화, 신재생에너지 보급 11%
원별 안정적 공급체계 구축	석유, 가스 등 전통에너지의 안정적 공급
국민과 함께 하는 에너지 정책 추진	2015년부터 에너지 바우처 제도 도입

※출처: 산업통상자원부(2014.1)

가. 초임계 CO₂ 물성

CO₂의 임계점은 31℃, 7.37 MPa이다. 유체는 임계점보다 높은 온도와 압력에서는 초임계 상태로 변화한다. 초임계는 하이브리드 상태로서 액체처럼 밀도가 높지만, 가스처럼 팽창하여 공간을 차지한다. 임계점 근처에서 작은 온도 변화는 큰 밀도 변화를 유발하며, 온도를 약간 상승시키기 위해서는 많은 에너지가 필요하게 된다. 그리고 점성에서도 변화가 생기는데 밀도가 높은 액체에서 증기로 변하며, 자유표면이 없어 bubble 또는 drop이 생기지 않는다. 이러한 초임계 상태의 특징 때문에 초임계 CO₂가 브레이튼 사이클의 작동유체로 관심이 높은 것이다.



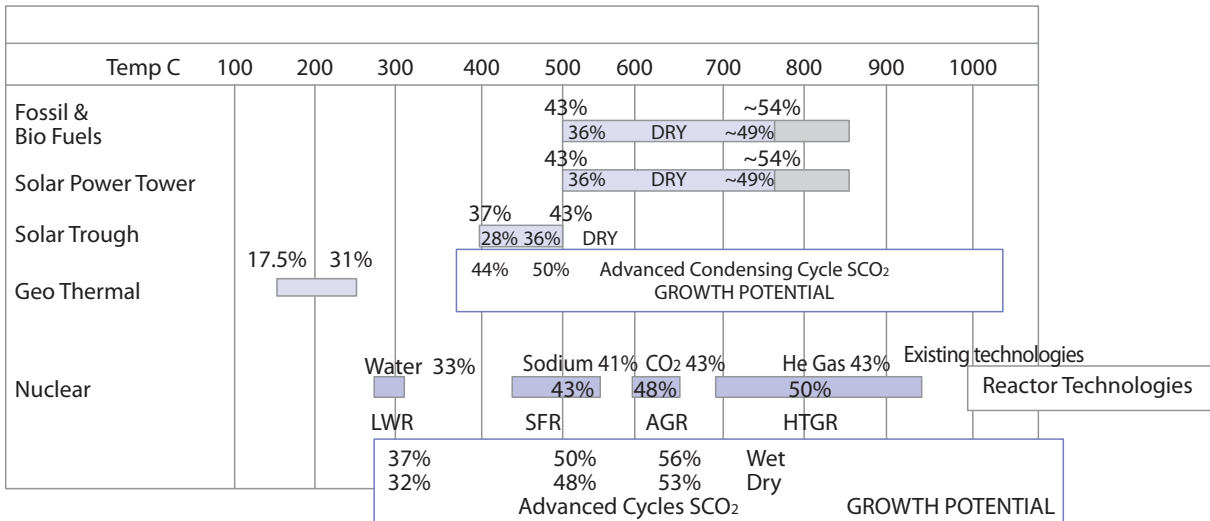
[그림 1] CO₂ 온도-압력 선도

나. 초임계 CO₂ 발전 시스템의 특징

초임계 CO₂ 발전 시스템은 터보기기의 크기가 작아지고, 시스템이 단순화되어 Capital Cost를 낮출 수 있으며, 발전 효율의 향상을 기대할 수 있는 특징을 갖고 있다. 그리고 소규모 분산전원부터 대규모 발전까지 확대 가능하고, 적용 가능 열원의 범위가 넓은 특징이 있다. 연계 가능한 열원으로는 원자력, 태양열, 화력, 바이오, 지열, 폐열 등이 있다. 그리고 물에 비해 재료 부식이 덜하기 때문에 일반적인 재료를 사용할 수 있고, 공랭식 냉각이 가능하다(그림 2 참조).

다. 연혁

1948년 Sulzer Bros.의 부분 응축 브레이튼 사이클에 대한 특허 출원이 초임계 CO₂ 브레이튼 사이클의 출발점으로 볼 수 있다. 이를 통해 CO₂의 장점이 인식되면서 많은 나라에서 초임계 CO₂의 연구가 수행되었다. 이 아이디어는 약 20년이 지나 재발견되는데, Feher(미국, 1967), Angelino(이탈리아, 1968), Gokhstein과 Verhivker(소비에트 연방, 1969), Strub와 Frieder(스위스, 1970) 등이 이 무렵에 관



[그림 2] 열원별 온도 범위에 따른 효율[출처 : Wright(2011)]

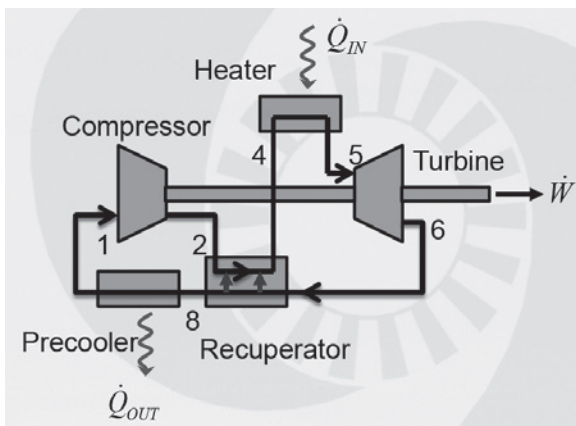
련 연구를 진행하였다.

1970년대 초기에 이 시스템의 설계와 제작이 시작 되었으나 곧 중단되었다. 그 이유는 고에너지 밀도의 소규모 스케일 시스템을 만드는 것이 당시의 기술로는 비현실적이었고, 시스템의 제작비용이 시작품을 만드는데 너무 많이 들었기 때문이다. 시스템 제작의 초기 시도가 불안정하였지만, 2000년대에 들어서 이 기술은 재조명을 받게 된다. Dostal이 그의 박사 학위 논문(MIT)에서 초임계 CO₂ 발전 사이클의 무한한

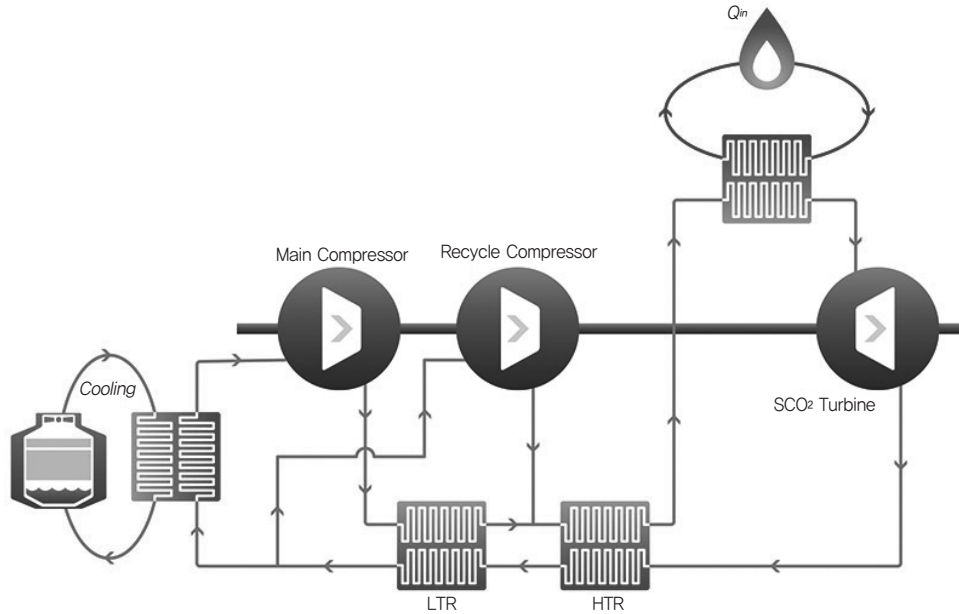
잠재력을 제시하였고, 미국 에너지성(DOE)은 이후 초임계 CO₂ 프로젝트에 본격적으로 투자하기 시작하였다.

라. 사이클 개요

초임계 CO₂ 발전 시스템은 두 개의 정압과정과 두 개의 등엔트로피 과정을 갖는 브레이튼 사이클이다. 압축, 가열, 팽창, 냉각 과정을 거치는 동안 작동유체는 초임계 상태를 유지한다. [그림 3]은 초임계 CO₂ 발전 시스템(Closed Loop)의 Simple 사이클을 나타낸 것이다. Heater에서 열을 받아 유체를 가열하여 터빈을 구동하고, Recuperator에서 열교환 후, Precooler에서 열을 버린 후 압축되어 Heater로 가는 과정을 반복한다. [그림 4]는 Closed Loop Re-compression SCO₂ Brayton Cycle로서 현재 개발되는 사이클 중에 가장 보편화 되어 있는 사이클이다. 기본 사이클에서 Recompressor가 추가되고, 재생열 교환기가 2개(고온부, 저온부)로 나뉘어지게 된다. Cooler로 보내어지지 않은 일부의 작동 유체를 재압축하는 사이클이다.



[그림 3] Simple SCO₂ 사이클(출처 : Carleton University)



[그림 4] Closed Loop Recompression SCO₂ Brayton Cycle(출처 : NETL)

마. 터보기기

전통적인 석탄화력발전을 구성하는 랭킨사이클에서는 작동유체로서 물이 사용되어 왔다. 그러나 물은

고온에서 부식성이 높아 온도를 높이는데 한계가 있어 브레이튼 사이클의 작동 유체로는 부적합하였다. 이러한 부식성을 피하기 위해서 CO₂가 발전 사이클

Power (MWe)	0.3	1.0	3.0	10	30	100	300
Speed / Size	75,000rpm / 5cm	30,000rpm / 14cm	10,000rpm / 40cm	3,600rpm / 1.2cm			
Compressor	Single Stage	(Radial Flow)	Multi Stage		(Axial Flow)	Multi Stage	
Turbine	Single Stage	(Radial Flow)	Multi Stage	Single Stage	(Axial Flow)	Multi Stage	
Bearings	Gas Foil			Hydrodynamic Oil			
		Magnetic		Hydrostatic			
Seals	Labyrinth			Dry Gas			
Generator	Permanent Magnet			Gearbox, Synchronous		Wound, Synchronous	
Shaft Config.	Dual / Multiple			Single Shaft			

[그림 5] SCO₂ 발전 용량에 따른 터보기기의 구성 부품

의 작동 유체로 대체될 수 있다는 것이 알려졌고, SNL(Sandia National Lab)의 차세대 원전 연구팀에서 이러한 분야의 연구가 선행되었다. 이곳에서는 초임계 CO₂와 관련된 실험적인 연구 및 터보기기, 베어링, 실링 등 구성요소 관련 연구가 수행되었다. 300MWe 스팀발전의 경우 터빈의 직경은 5m, 22~30의 stage가 필요하지만, 초임계 CO₂의 경우에는 직경 1m, 3stage면 가능하다. [그림 5]는 초임계 CO₂ 발전 시스템의 용량에 따른 터보기기의 구성 부품을 나열하고 있다.

2. 동향

세계 각 국은 초임계 CO₂ 발전 기술을 발전기술의 패러다임을 전환 시킬 수 있는 차세대 발전 기술로 인식하고 연구개발을 진행 중에 있다. 미국, 일본, 한국이 대표적인 개발 국가들이며, 각 국의 기술동향을 살펴보면 다음과 같다.

가. 미국

KAPL(Knolls Atomic Power Lab)은 미 해군 원자력연구소로서 추진용 원자로의 적용에 초점을 맞추어 초임계 CO₂ 발전의 예비 시스템 열성능 및 사이징 평가, 기본적인 초임계 CO₂ 유동, 재료시험, 구성기기 개발, 시스템 제어 모델링 등의 연구를 수행하

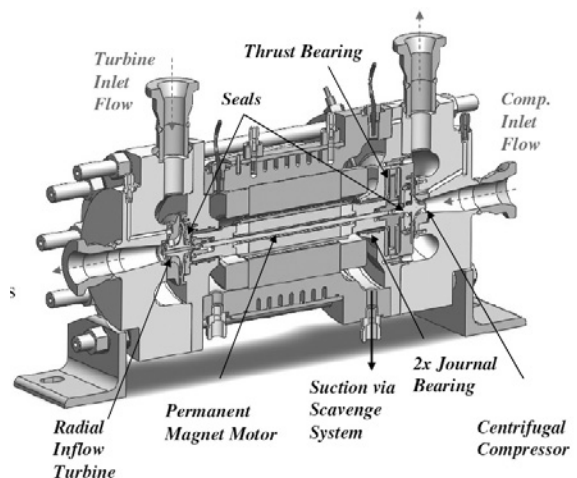


[그림 6] KAPL의 시험설비

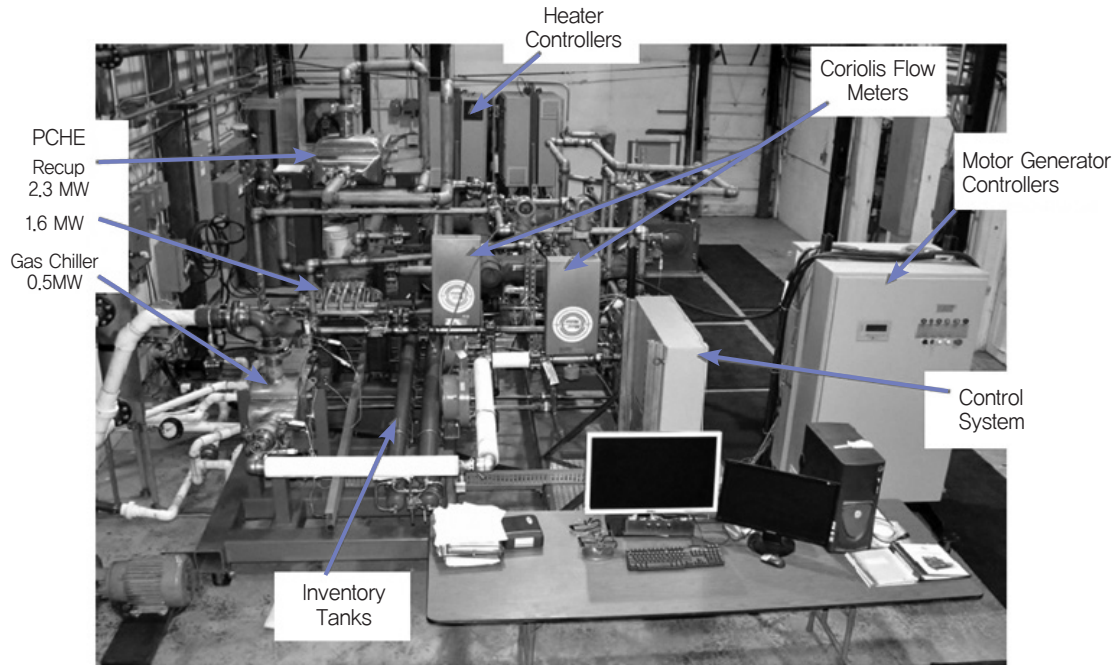
였다(2005~2009년). 이후에는 100kWe급 설비의 설계와 제작에 중점을 두고 있으며, 이 설비의 터보기기는 BNI(Barber Nichols Inc)가 제작하였다(그림 6, 7 참조).

SNL과 DOE는 BNI와 계약하여 MW급 SCO₂ 브레이크 사이클의 제작 및 운전과제에 참여하고 있다. Sandia-DOE의 시험 설비는 [그림 8]과 같으며, 터빈 입구온도 615K, 축속도 5만2,000rpm, 압력비 1.65, 유량 2.7kg/s, 출력 20kWe를 기록하였다. 구성기기를 살펴보면 BNI의 터보기기 및 Heatric社(영국)에서 제조한 PCHE (Printed Circuit Heat Exchanger) 타입 열교환기가 적용되었고, Gas-foil 베어링, 영구 자석 발전기, Advanced labyrinth 실링 등이 사용되었다.

National Renewable Energy Lab에서도 DOE의 지원을 받아 SunShot 프로그램에 참여하고 있다. SunShot은 2020년까지 인센티브 없이 경쟁력 있는 태양에너지를 만들기 위한 DOE의 프로그램으로 CSP(Concentrating Solar Power)와 태양광에서 2~3배의 비용 절감이 목표이다. 특히 CSP에서 목표를 달성하기 위해서는 Solar Collector 비용절감 뿐만 아니라, 초임계 CO₂ 사이클을 적용하여 사이클의 효율을 개선할 계획이다. CSP와 연계한 10MW



[그림 7] BNI에 의해 설계된 터보기기



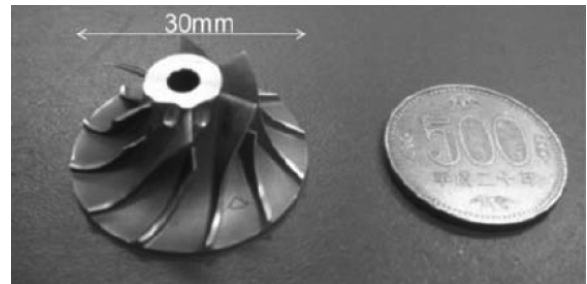
[그림 8] SNL의 시험설비

SCO₂ 발전 사이클 개발 프로젝트의 협력기관으로는 SNL, 위스콘신大, Echogen, EPRI(Electric Power Research Institute), BNI 등이 있다.

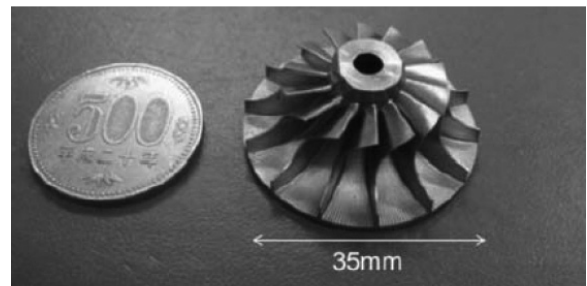
나. 일본

도시바는 초임계 CO₂ 발전 사이클(Open Loop)의 연소기, 터빈, 발전기를 개발하고 있으며, 미국의 NET POWER, CB&I, Exelon과 함께 프로젝트를 진행하고 있다. 1단계 25MW급 파일럿 플랜트를 건설할(2017년) 예정이다. 2단계에서 250MW로 용량을 확장할 예정이다. 이 사이클은 순산소 연소 공정이 추가되며, CCS(Carbon Capture Sequestration), EOR(Enhanced Oil Recovery)와 연계되는 특징을 갖는다.

TIT(Tokyo Institute of Technology), Thermal Engineering & Development, The University of Tokyo는 NEDO(New Energy Development Organization)의 지원을 받아 초임계 CO₂ 발전 시스템 관련 연구를 진행하고 있다. [그림 9]는 TIT에서



Centrifugal Compressor



Radial Turbine

[그림 9] TIT의 터빈, 압축기 Wheel

10kW급 용량으로 제작된 시험설비의 압축기 및 터빈의 Wheel 사진이다.


다. 국내

한국원자력연구원에서는 원자력 국제협력프로그램에서 소듐냉각고속로 적용을 위한 초임계 CO₂ 발전 시스템 연구에 참여하고 있다. 최근에는 초임계 CO₂ 발전시스템 실증 설비(300kWe급)를 구축하여 시험을 진행 중에 있다. 한편, 산업통상자원부에서는 2013년부터 창조경제 산업엔진 프로젝트의 일환으로 초임계 CO₂ 발전 기술개발을 선정하였고, 산·학·연으로 구성된 별도의 추진단을 만들어서 예비타당성 조사 준비를 진행 중에 있다.

3. 전망

1970년대에 도출된 초임계 CO₂ 발전기술의 개념은 기술의 한계로 개발이 진행되지 않았으나, 2000

년대에 미국에서 기술적 타당성이 검증되어 연구 개발이 가속화 되고 있다. 최고 기술 보유국인 미국에 비해서 연구개발의 착수가 지연되었지만, 중공업·건설·발전설비 운영 등의 경험과 산업통상자원부의 창조경제 성장엔진 프로젝트를 발판으로 단기 Catch Up이 가능할 것으로 예상된다.

발전 운영의 측면에서 보면 수MW~수백MW의 발전 용량 및 연계 열원의 다양화로 신규 전력 비즈니스 모델이 도출 가능할 것으로 예측된다. 증기 및 가스터빈 시장의 경우 가격 및 기술경쟁에 밀려서 중국 및 기술 선진국에 종속되어 있는 형국이다. 초임계 CO₂ 발전 시장도 초기 시장은 일부 기술 보유국에 의해 주도될 확률이 높다. 이러한 기술 선진그룹에 속하여 차세대 발전 시장을 이끌고, 신성장동력을 확보하기 위해서는 조속히 정부 주도의 연구개발 사업이 본격적으로 추진되어야 할 것이다. 

[참고문헌]

1. Thomas Conboy, Steven Wright, James Pasch, Darryn Fleming, Gary Rochau, Robert Fuller, 'Performance Characteristics of an Operating Supercritical CO₂ Brayton Cycle', Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68415, American Society of Mechanical Engineers, 2012
2. Darryn Fleming, Thomas Holschuh, Tom Conboy, Gary Rochau, Robert Fuller, 'Scaling Considerations for a Multi-Megawatt Class Supercritical CO₂ Brayton Cycle and Path Forward for Commercialization', Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68484, American Society of Mechanical Engineers, 2012
3. Kenneth J. Kimball, Eric M. Clementoni, 'Supercritical Carbon Dioxide Brayton Power Cycle Development Overview', Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68415, American Society of Mechanical Engineers, 2012
4. Craig S. Turchi, Zhiwen Ma, John Dyreby, Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle Configurations for use in concentrating solar power systems, Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68697, American Society of Mechanical Engineers, 2012
5. Motoaki Utamura, Hiroshi Hasuike, Kiichiro Ogawa, Takashi Yamamoto, Toshihiko Fukushima, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno, 'Demonstration of OF Supercritical CO₂ Closed Regenerative Brayton Cycle in a Bench Scale Experiment', Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68697, American Society of Mechanical Engineers, 2012