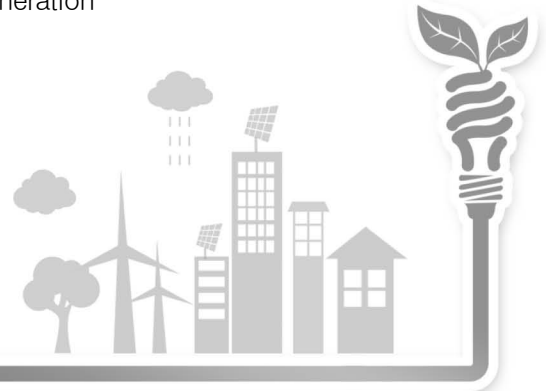


초임계 CO₂ 발전 기술개발 동향

The Technology Development Trends of Supercritical CO₂ Power Generation

한국전력공사 전력연구원 김범주

DOI <http://dx.doi.org/10.18770/KEPCO.2016.02.04.531>



Abstract

The worldwide research and development for high-efficiency power generation system is progressing steadily because of the growing demand for reducing greenhouse gas emissions. Many countries have spurred the research and development of supercritical CO₂ power generation technology since 2000 because it has the advantage of compactness, efficiency, and diversity. Supercritical CO₂ power generation system can be classified into an indirect heating type and a direct heating type. As of now, most studies have concentrated on the development of indirect type supercritical CO₂ power generation system. In the United States, NREL(National Renewable Energy Lab.) is developing supercritical CO₂ power generation system for Concentrating Solar Power. In addition, U.S. DOE(Department of Energy) also plans to start investing in the development of the supercritical CO₂ power generation system for coal-fired thermal power plant this year. GE is developing not only 10MW supercritical CO₂ power generation turbomachinery but also the conceptual design of 50MW and 450MW supercritical CO₂ power generation turbomachinery. In Korea, the Korean Atomic Energy Research Institute has constructed the supercritical CO₂ power generation test facility. Moreover, KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) is developing a 2MW-class supercritical CO₂ power generation system using diesel and gas engine waste heat with Hyundai Heavy Industries.

세계적으로 온실가스저감에 대한 요구가 높아지고 있는 가운데 고효율 발전 시스템의 개발에 대한 연구개발이 꾸준히 진행되고 있다. 초임계 CO₂ 발전기술은 효율 향상과 소형화, 다양성의 장점을 가지고 있어, 2000년대 이후 세계 여러 나라에서 연구개발에 박차를 가하고 있다. 초임계 CO₂ 발전 시스템은 CO₂를 작동유체로 하는 발전 시스템으로 크게 간접가열방식과 직접가열방식으로 구분될 수 있다. 현재, 대부분의 연구는 간접가열방식의 초임계 CO₂ 발전 시스템 개발에 집중되어 있고, 미국은 NREL을 중심으로 태양열 연계 초임계 CO₂ 발전 시스템을 개발 중이며, DOE는 올 해 화력 연계 초임계 CO₂ 발전 시스템 개발에 대한 투자도 시작할 계획이다. GE는 10MW급 초임계 CO₂ 발전 시스템 개발 뿐만 아니라, 50MW급과 450MW급 초임계 CO₂ 발전시스템의 개념 설계도 진행 중에 있다. 우리나라에서는 원자력연구원이 초임계 CO₂ 발전 시험 설비를 구축해오고 있으며, 한국전력공사 전력연구원은 현대중공업과 함께 디젤 및 가스엔진 폐열을 이용하여 2MW급 초임계 CO₂ 발전 시스템 개발을 진행 중에 있다.

Keywords : Supercritical Carbon Dioxide, Supercritical CO₂ Power Cycle, SCO₂, Power Generation System

1. 서론

최근 국내 에너지산업의 현안 중에서 가장 높은 관심을 받고 있는 이슈는 온실가스감축이다. 2015년, 프랑스 파리에서는 “제 21차 기후변화협약 당사국 총회”(COP21)가 개최되었고, 195개국에 참가해서 2020년 만료예정인 교토의정서 이후의 새 기후변화체제 수립을 위한 파리협약이 타결되었다. 파리기후협약이 주요 내용은

지구평균기온 상승을 온실가스 배출전인 산업화 이전에 비해 2℃ 이내보다 낮은 수준으로 유지하고, 온도상승을 1.5℃이하로 제한하기 위한 노력을 추구한다는 내용이다. 우리나라는 2030년 배출전망치(BAU) 대비 37% 온실가스감축목표를 수립하였으며, 특히 발전부문에서 담당해야 할 온실가스감축량이 가장 높다. 이를 위해서는 효율이 높은 발전 시스템을 개발하여 발전 시스템의 연료 투입량을 낮추고 온실가스를 저감할 필요가 있다. 뿐만 아니라,

우리나라는 96%의 에너지를 해외에 의존하는 자원 빈국이므로 미래성장동력 확보를 위해서는 발전 시스템의 독자 기술확보가 절실한 상황이다. 그동안 우리나라에서는 에너지산업부문에서 기반 인프라 역할만 강조되어 타 산업대비 혁신이 지체되고 있다. 특히, 가스터빈 기술은 선진국에 비해 기술경쟁력에서 열위에 있고, 증기터빈 기술은 중국의 가격경쟁력에서 밀리고 있으므로, 미래 발전 시스템으로써 잠재력이 큰 초임계 CO₂ 발전시스템 개발을 통해서 우리 나라 에너지 산업의 기술 경쟁력을 끌어 올리는 것은 매우 중요하다.

1869년 토마스 앤드류스와 제임스 톰슨은 이산화탄소를 고압으로 압축시켜 액화시키는 실험을 하였고, 이 실험은 이산화탄소의 상변화 곡선을 완성하는데 중요한 정보를 제공하였다. 그로부터 약 80년 뒤인 1948년에 Sulzer Bros는 부분 응축 브레이튼 사이클에 대한 특허를 제출하였다. 이를 통해 이산화탄소의 장점이 인식되면서 많은 나라에서 초임계 이산화탄소의 연구가 수행되었다. 그로부터 약 20년이 지나서 Feher [미국, 1967], Gianfranco Angelino[이탈리아, 1968], Gokhstein과 Verhivker [소비에트 연방, 1969], Strub와 Frieder [스위스, 1970] 등이 초임계 이산화탄소 관련 연구를 진행하였다. 1970년대 초기에 시스템 설계와 제작이 시도되었으나, 당시의 기술로는 고 에너지 밀도의 소규모 스케일 시스템을 만드는 것이 비현실적이었고, 시스템 시작품의 제작비용이 너무 많이 들었기 때문에 곧 중단되었다. 이다. 이 기술은 다시 30년간 방치되었다가, 2000년대에 Vaclav Dostal (Czech Technical University 교수)이 그의 박사학위 논문에서 초임계 CO₂ 사이클의 무한한 잠재력을 제시하였고, 미국 에너지부는 관련 분야에 투자를 시작하면서 초임계 CO₂ 발전 사이클은 폭발적인 관심을 받게 되었다.

2. 초임계 CO₂ 발전 기술 개요

2.1 초임계 CO₂의 특성

이산화탄소의 임계점은 31℃, 7.37 MPa 이다. 참고로, 물의 임계점은 374℃, 22.1 MPa이다. 일반적으로 유체는 임계점보다 높

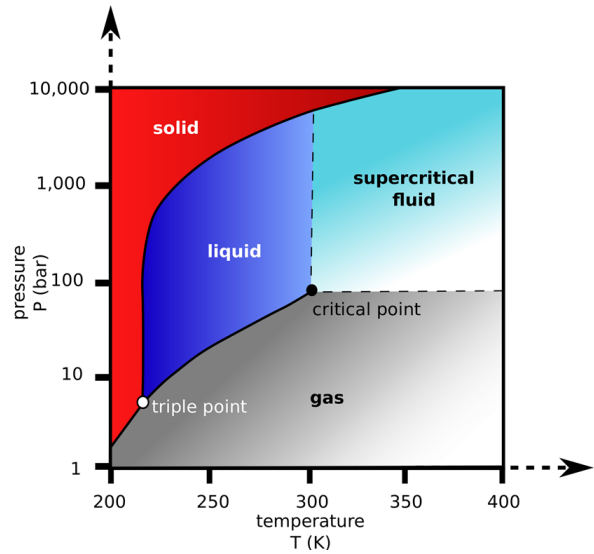


그림 1 이산화탄소 온도-압력 선도

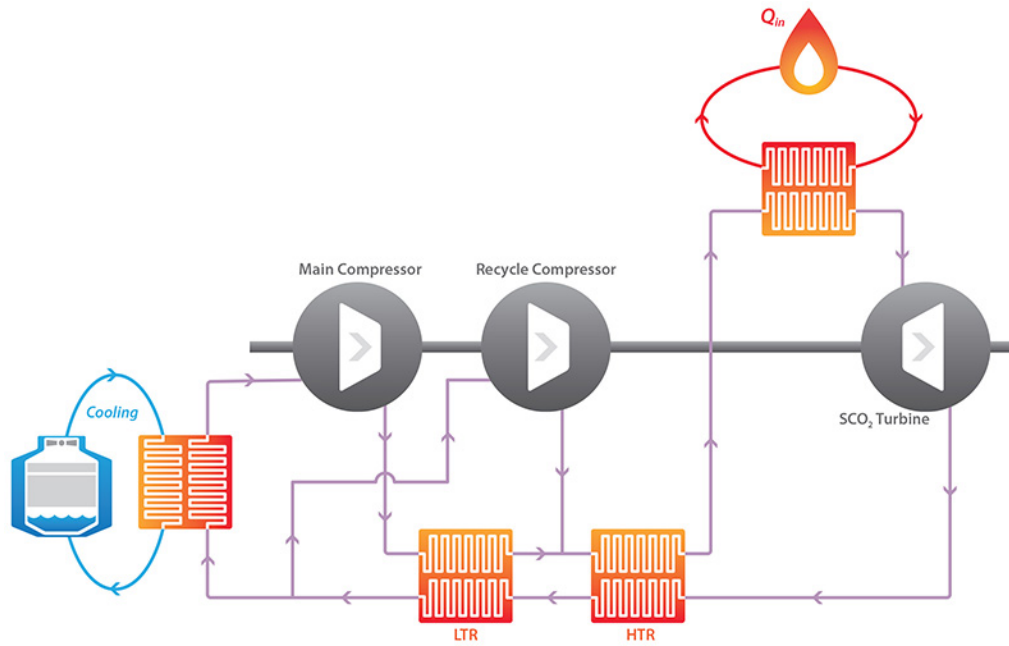
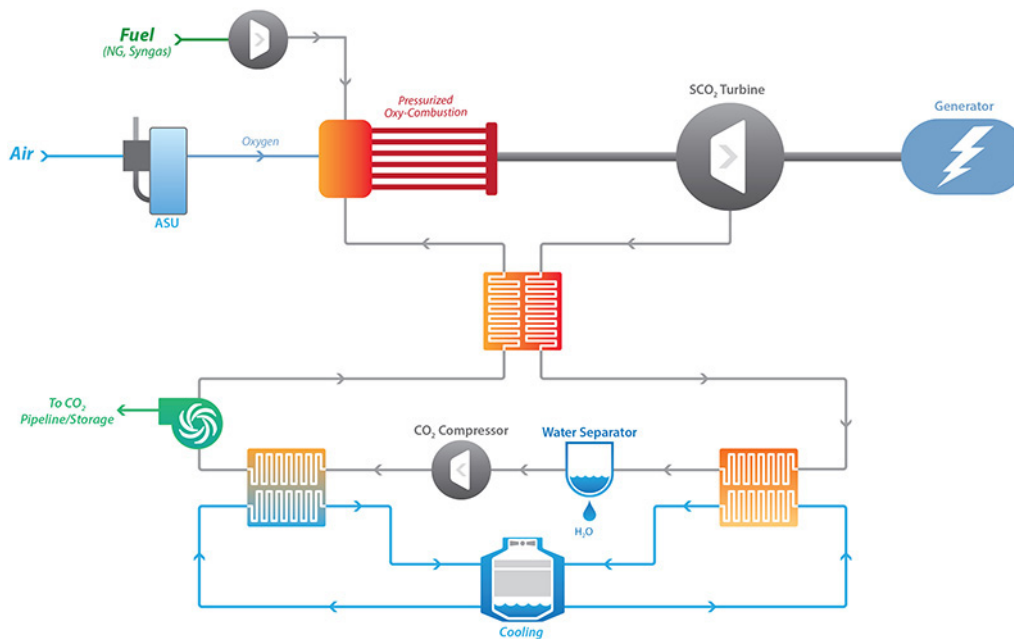
은 온도와 압력에서는 초임계 상태로 변화한다. 초임계는 하이브리드 상태으로써 액체처럼 밀도가 높지만, 가스처럼 팽창하여 공간을 차지하며, 임계점 근처에서 작은 온도 변화는 큰 밀도 변화를 유발한다.

2.2 초임계 CO₂ 발전 사이클의 원리 및 구분

일반적인 초임계 CO₂ 발전 시스템은 두 개의 정압과정과 두 개의 등엔트로피 과정을 갖는 브레이튼 사이클이다. 이산화탄소는 압축, 가열, 팽창, 냉각과정을 거치면서 초임계 상태를 유지한다. 표 1는 스팀터빈과 가스터빈, 초임계 CO₂ 터빈의 주요 조건을 간략히 비교한 것이다. 스팀터빈과 초임계 CO₂ 터빈을 비교해 보면, 터빈 입구 압력은 유사하지만, 터빈 압력비에서는 상당한 차이를 보이고 있다. 한편, 가스터빈과 초임계 CO₂ 터빈을 살펴보면, 터빈 출구 온도는 유사하지만, 가스터빈은 이 열을 HRSG(Heat Recovery Steam Generator)에서 활용하는 경우가 일반적이고, 초임계 CO₂ 터빈에서는 CO₂를 예열하는데 쓰인다. 일반적으로 초임계 CO₂ 이산화탄소 발전 방식은 크게 가열방식에 따라 직접

표 1 터빈별 주요 조건 비교

분류	스팀터빈(랭킨)	가스터빈(브레이튼)	초임계 CO ₂ 터빈(브레이튼)
작동유체	물	공기	이산화탄소
터빈 입구 압력(bar)	300	35	320
터빈 압력비	3000	35	4.3
터빈 입구 온도(℃)	600	1350	600
터빈 출구 온도(℃)	38	530	500

그림 2 Closed Loop Recompression SCO_2 Brayton Cycle [1]그림 3 Oxygen Fueled Directly Heated SCO_2 Cycle [1]

가열방식(direct)과 간접가열방식(indirect)방식으로 나눌 수 있다. 직접가열방식은 개방형사이클(Open Loop), 간접가열방식은 밀폐형사이클(Closed Loop)로도 불린다.

- 간접가열방식

외부 열원으로 CO_2 를 가열하는 사이클로써 초임계 이산화탄소 사이클의 일반적인 방식이다. 간접가열형 중에서도 가장 대표적인

사이클이 그림과 같은 Recompression Cycle로써 화력, 원자력 등의 상부 사이클에 활용이 가능하다. 메인 압축기와 재 압축기에서 이산화탄소를 가압하고, 가압된 이산화탄소를 외부 열원을 이용해 가열하여 터빈을 구동시키고, 냉각 후 압축을 반복하는 사이클이다.

- 직접가열방식

ASU(Air Separation Unit)에서 나온 산소와 연료가 연소기에서

연소하면, CO₂와 스팀의 혼합물이 터빈을 구동시킨다(그림), 터빈 출구에서 혼합물의 열은 냉각·압축된 CO₂를 예열하는데 사용된다.(복열과정) 혼합물은 냉각기를 거쳐 Water Separator에서 물은 분리되고, CO₂는 압축기를 거쳐 저장·격리 되거나 EOR(Enhanced Oil Recovery)에 활용될 수 있고, 일부는 초임계 CO₂ 사이클로 재순환되어 복열기를 거쳐 연소기로 간다.

2.3 초임계 CO₂ 발전 사이클의 특징

초임계 CO₂ 발전 사이클의 특징은 다음과 같이 크게 4가지 측면으로 구분하여 생각해볼 수 있다.

- **효율:** 이산화탄소를 고온 브레이튼 사이클의 작동유체로 활용하면, 증기를 활용하는 발전 시스템에 비해 최대 5% 포인트 효율을 개선할 수 있다.
- **CO₂ & Emissions:** 초임계 CO₂ 사이클의 고효율을 통해 온실가스 저감 효과를 얻을 수 있고, 이산화탄소의 가열방식에 따라 이산화탄소 포집도 가능하다.
- **다양성:** 넓은 온도 범위에서 활용가능하고, 화력발전(석탄 및 가스), 신재생(바이오매스, 태양열), 원자력, 폐열 등 다양한 분야에서 응용이 가능하다.
- **크기:** 초임계 이산화탄소의 상대적으로 높은 밀도는 터빈의 크기를 소형화시키고, 설비도 단순해지게 된다.

2.4 초임계 CO₂ 발전 사이클의 상용화 전망

단기적으로 소용량, 저온 영역의 폐열회수(WHR, Waste Heat Recovery)분야에서 상용화가 가장 빠르게 전개될 예정이며, 2020년 이후에는 고온영역에서 중규모 태양열 발전과 대규모 석탄화력 발전의 상용화가 예상된다. 그리고, 4세대 원자력과 직접가열 초임계CO₂ 발전 시스템은 2030년대 이후에 상용화가 진행될 전망이다 [3]

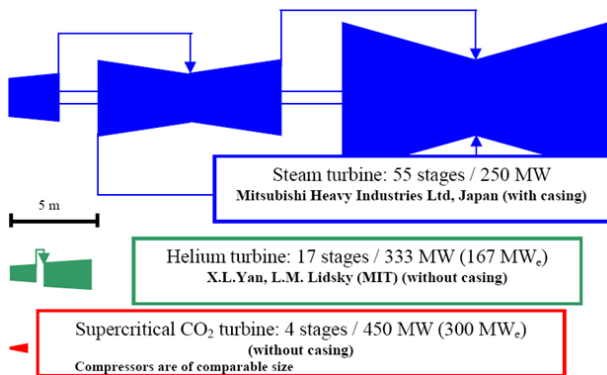


그림 4 터빈 크기 비교 [2]

3. 국내외 기술 개발 현황

현재 세계적으로 SCO₂ 발전 시스템 개발을 위한 연구 및 실증 사업이 진행되고 있다. 미국, 일본, 중국이 중심이 되어 원자력·화력·신재생 등 다양한 열원과 연계한 초임계 CO₂ 발전시스템 개발을 추진하고 있다. 미국에서 가장 활발하게 연구개발을 진행하고 있고, 미국 DOE의 원자력, 화력, 신재생 및 효율 분과에서 많은 예산을 투입하고 있으며, NETL, NREL, SNL, GE, Echogen, 도시바 등이 연구개발을 선도하고 있다. 특히, 미국 DOE 화력 분과는 초임계 CO₂ 발전기술이 장기적으로 화력발전의 탄소저감에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예측하고 있으며, GE는 초임계 CO₂ 발전기술을 폐열 및 태양열을 열원으로 개발한 후 화력발전으로 확대 추진할 계획을 가지고 있다.

3.1 미국

SNL(Sandia National Lab.) 및 Bechtel Marine Propulsion Corp.는 수 백 kW급 초임계 CO₂ 발전 시스템 실험장치를 구성하여 SCO₂ 발전시스템 실증을 통해 타당성 검증을 진행하였다.

DOE의 NREL(National Renewable Energy Lab.)는 Sunshot 프로그램에 참여하여 태양열 발전(Concentrating Solar Power, CSP) 연계 초임계 이산화탄소 발전 연구를 진행 중에 있으며, 올해 10MW SCO₂ 터빈이 설치될 예정이다. 참여기관으로는 SNL, 위스콘신대, Echogen, EPRI, BNI 등이 있다. 그리고, 올해 3월 DOE의 NETL에서는 발전용량 10MW, 터빈입구온도 700℃를 갖는 화력발전 연계 SCO₂ 발전시스템 연구개발을 위한 사업을 공고하였고, 올 하반기에 사업자가 선정되어 과제가 착수될 예정이다. 한편, GE는 10MW급 SCO₂ 터빈 개발을 진행 중이고, 향후 50MW급과 450MW급 SCO₂ 발전 사이클과 터보기기의 개념 설계를 진행하고 있으며, Echogen은 Multi-MW급 SCO₂ 발전 시스템을 실증 중에 있다.

3.2 중국

서안열공(Xi'an Thermal Power Research Institute, TPRI)은 5MW 화력발전 연계 초임계 CO₂ 발전 시스템 개발을 목표로 연구를 진행중에 있으며, NPIC(Nuclear Power Institute of China, NPIC)은 2020년까지 10MW 실증 설비 건설을 계획 중에 있다.

3.3 일본

TIT(Tokyo Institute of Technology)는 독자적인 열교환기를 제작하였으며, 10kW급 실험장치를 구성하였다. 도시바는 직접가열방식 초임계 이산화탄소 발전 사이클의 연소기와 터보기기를

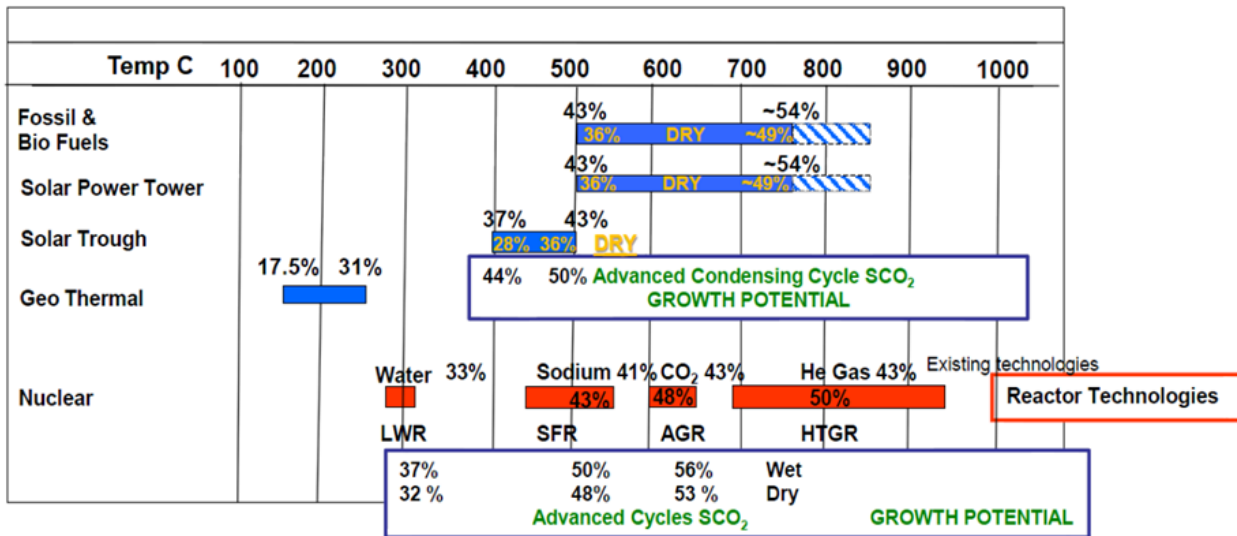


그림 5 열원별 온도 범위에 따른 효율

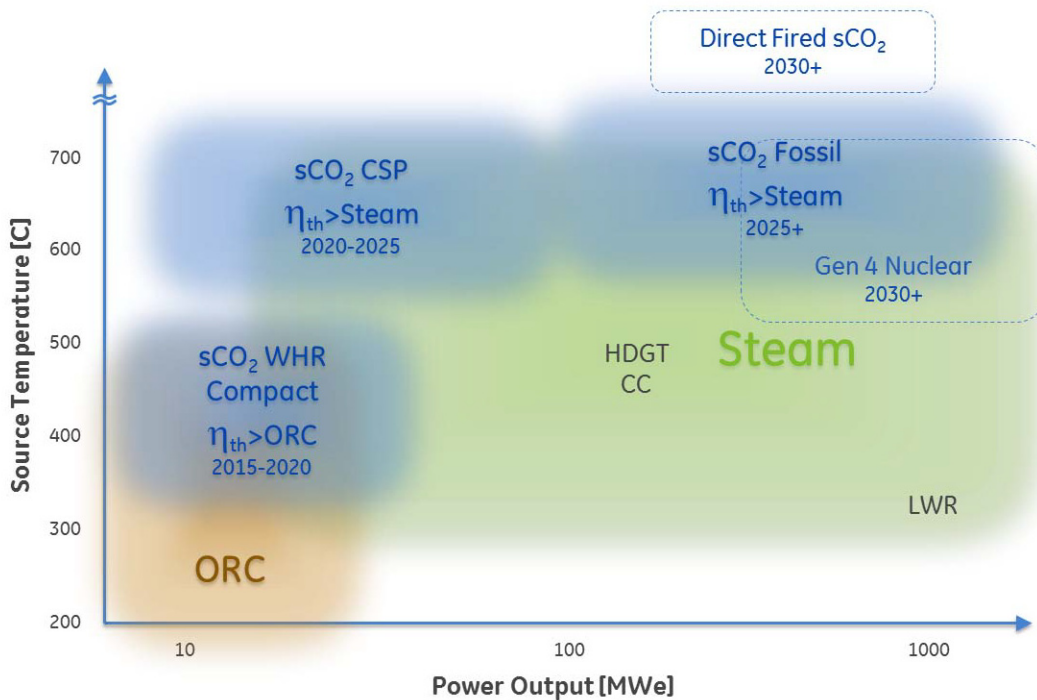


그림 6 Application space for sCO2 Power Cycles [3]

개발하고 있으며, 미국의 NETPOWER, CB&I, Exelon과 함께 프로젝트를 진행하고 있다. 1단계 25MW급 파일럿 플랜트를 건설할 예정이며, 2단계에서 250MW로 용량을 확장할 예정이다.

3.4 한국

초임계 CO₂ 발전 기술은 2014년 13대 산업엔진, 2015년 19대 미래성장동력으로 선정되었으며 정부출연연구소와 대학을 중심으

로 연구개발이 확대 되고 있다. 원자력연구원이 국내 최초로 초임계 CO₂ 발전 기술 연구를 시작하였고, 현재 에너지기술연구원, 기계연구원, 카이스트 등이 초임계 CO₂ 발전 기술을 활발히 연구하고 있으며, 원자력연구원과 에너지기술연구원은 1MW이하 초임계 CO₂ 실증 설비를 보유하고 있다. 한국전력공사 전력연구원은 현대중공업과 함께 2019년까지 '디젤 및 가스엔진 폐열을 이용하여 2MW급 초임계 CO₂ 발전 시스템 개발을 공동으로 진행 중에

있으며, 엔진발전 플랜트와 선박엔진의 폐열을 단기 목표 시장으로 겨냥하고 있다.

4. 결론

초임계 CO₂ 발전 기술은 세계적으로 연구개발 초기단계이므로, 아직 상용화된 시스템이 없고 전망을 예측하기는 이르지만, 미국 DOE에서 연구개발에 많은 투자를 하고 있고, 산업계에서는 GE, Echogen, NETPOWER, 도시바가 기술개발을 주도하고 있으며, 연구기관으로는 SNL, SWRI, NREL, EPRI 등이 연구 역량을 집중하고 있다. 현재 폐열회수 활용 시장에서는 초임계 CO₂ 발전 기술이 상용화에 근접해 있다. 중기적인 관점에서는 석탄화력 발전 시스템에 간접가열 방식의 SCO₂ 발전 시스템 개발이 가속화 될 것이고, 장기적인 측면에서는 직접가열방식의 SCO₂ 발전 시스템이 보급될 것으로 전망되고 있다. 뿐만 아니라, 기존의 발전 분야 이외에도 전력저장 및 지열발전 등 새로운 분야와의 융합도 시도되고 있다.

초임계 CO₂ 발전 시스템은 발전 효율 향상을 통해 파리기후협약(COP21) 이후 본격화되고 있는 정부의 2030 국가 온실가스 감축 목표달성에 기여할 것이며, 에너지신산업의 원동력이 되어 발전산업의 패러다임을 바꿀 수 있는 잠재력이 높은 기술이다. 세계적으로 초임계 CO₂ 발전 기술 개발은 연구개발 초기 단계이므로, 아직 보급된 시스템이 없고 전망을 예측하기는 이르지만, 응용분야가 넓고 파급효과가 크기 때문에 발전산업의 패러다임을 전환할 수 있는 가능성이 높다. 보수적인 발전산업의 성격을 고려해 볼 때, 초임계 CO₂ 발전 시스템의 상용화를 위해서는 성능, 안전성, 경제성, 신뢰성 측면에서 검증이 필요하고, 향후 보급이 원활하기 위해서는 일반적인 Code와 Standards 들을 충족시켜야 하며

실증을 위한 Track Record가 제도적으로 뒷받침되어야 한다. 장기적으로 석유, 가스 채굴 비용이 상승하고 재생에너지 개발 및 에너지 효율 개선 비용이 하락하여, 저탄소·신재생에너지·에너지효율향상 정책이 강화될 것으로 예상되고 있으며(World Energy Outlook 2015, IEA), 이러한 정책 기조에 따라 초임계 CO₂ 발전은 소형화와 효율향상의 장점으로 인해 연구개발이 지속적으로 확대될 것으로 예상된다.

References

- [1] NETL, "Technology Development for Supercritical Carbon Dioxide Based Power Cycles", <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/turbines/supercritical-CO2-power-cycles> (2016.05.20.)
- [2] Vaclav Dostal, "A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors", Ph.D. Dissertation, MIT, 2004
- [3] Douglas Hofer, "Phased Approach to Development of a High Temperature sCO₂ Power Cycle Pilot Test Facility", The 5th International Symposium - Supercritical CO₂ Power Cycles, 2016
- [4] R. A. Bidkar et al, "Conceptual Designs of 50MWe-450MWe Supercritical CO₂ Turbomachinery Trains for Power Generation from Coal. Part 2: Compressors", in The 5th International Symposium - Supercritical CO₂ Power Cycles, San Antonio, TX, 2016.
- [5] Timothy J. Held, "Initial Test Results of a MegaWatt-Class Supercritical CO₂ Heat Engine," in 4th International sCO₂ Power Cycles Symposium, Pittsburgh, PA, 2014.
- [6] 김범주, "초임계 CO₂ 발전 기술", p42-48, Journal of the Electric World, Aug, 2014