



분산형 초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템 기술개발 동향

김영민 | 한국기계연구원

[요약문]

초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템은 액체와 기체의 복합 특성을 가지는 초임계유체의 특성을 잘 활용하여 고효율 및 고출력의 장점을 가지며, 다양한 열원을 이용한 발전이 가능하기 때문에 최근 차세대 발전기술로서 주목을 받고 있다. 미국, 일본 등 선진국에서는 현재 실험실 규모의 시스템 검증을 거쳐 수십 MWe급 시스템 개발을 진행 중에 있으며 수백 MWe급 플랜트를 구축하는 프로젝트도 준비 중에 있다. 본 고에서는 이러한 초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템의 기술적 특징과 기술개발 동향을 소개하고, 특히 향후 분산형 발전시스템으로 적용 가능성을 제시하고자 한다.

1. 서론

최근 유가의 상승, 에너지자원 고갈문제, CO₂ 총량 규제 등에 대한 대응이 시급해짐에 따라 기존 에너지의 효율적 사용, 신재생에너지의 개발뿐만 아니라 버려지는 폐열을 이용해 고급에너지인 전기에너지로 전환함으로써 에너지 사용에 드는 막대한 비용을 절감하고 CO₂를 저감하려는 수요는 계속적으로 증가하고 있다.

열을 전력으로 전환하는 발전시스템에서 대표적으로 사용되고 있는 것은 가스터빈과 증기터빈이다. 가스터빈은 고급연료인 천연가스를 내부에서 연소하여 발전하는 내연기관 방식이고 증기터빈은 원자력, 석탄화력, 복합화력(가스터빈 폐열발전), 태양열 등 다양한 열원을 활용하여 내부 증기를 가열하여 발전하는 외연기관 방식이다. 초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템은 가스 터빈과 증기 터빈의 장점을 효과적으로 결합하여 고효율 및 고출력을 달성할 수 있으며 다양한 열원을 발전에 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

현재 원자력발전, 화력발전, 신재생에너지(태양열, 바이오매스, 지열)발전, 폐열발전 등 다양한 용도로 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템이 주목받고 있다.^[1-4] 초임계 CO₂ 사이클 발전 연구는 주로 미국, 일본을 중심으로 이론적 연구와 실험실 규모의 파일럿 시스템 개발이 진행되었으며, 현재 연구개발 초기단계의 기술로서 향후 다양한 적용분야로 인한 성장 잠재력과 파급효과가 무궁무진하다고 할 수 있다. 이러한 초임계 CO₂ 발전시스템은 수십에서 수백 MWe급의 대규모 발전 뿐만 아니라 수십에서 수백 kWe급의 소규모 발전에도 적용할 수 있다. 일반적으로 저온 열원의 경우 유기냉매를 사용하는 유기랭킨사이클(ORC)을 적용하고, 고온 열원의 경우 물을 사용하는 스팀 사이클을 적용하고 있다. 초임계 CO₂ 사이클은 저온 및 고온 열원에 모두 적용 가능하며, 고압 운전 특성으로 기존 발전시스템 대비 장치가 매우 컴팩트하고 (터빈 사이즈는 ORC의 1/5, 스팀 사이클의 1/20 이하 수준), 효율 향상이 가능한 차세대 발전 방식으로 기대되고 있다.

미국과 일본에서는 수십에서 수백 kWe급 초임계 CO₂ 발전시스템 개발을 통해 기술을 검증하고 최근 수십 MWe급 발전시스템 개발을 시작하였으나, 국내의 경우 선진국과의 기술적 격차를 극복하고 시장 조기진입을 위해서는 소형 및 중대형 발전시장을 동시에 목표로 하여 핵심공통 원천기술을 공유하면서 수백 kWe급 소형 발전시스템 개발과 수십 MWe급 중대형 발전시스템 개발을 동시에 추진할 필요성이 있다.



2. 초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템

2.1 초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템의 특징

초임계 유체는 임계점(Critical point)을 넘는 온도와 압력조건에 있는 유체를 말하며, 그림 1은 액체와 기체가 동시에 존재하는 포화상태의 이산화탄소의 압력과 온도를 초임계 조건이상으로 높일 때 액체와 기체의 구분이 없어지게 되는 과정을 보여준다. 초임계 유체는 액체와 기체의 복합 특성을 가지며, 발전 사이클에 적용될 경우 기체에 비해서는 압축일이 작아지는 장점을 가지고 액체에 비해서는 유동저항이 작은 장점을 가진다.

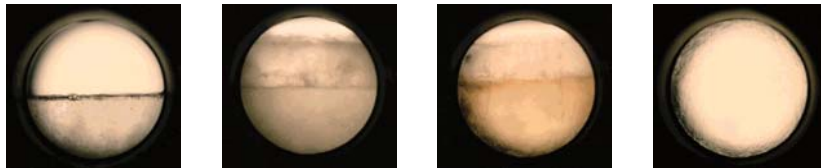


그림 1. 이산화탄소의 초임계 조건으로 상변화 과정^[6]

이산화탄소의 임계점은 32°C, 74기압으로 상온에 가까운 온도에서 고압이 되면 초임계 유체가 되므로, 발전 사이클에서 히트싱크인 대기에 의해 임계점 조건에 가깝게 갈 수 있고 임계점 가까운 조건에서 압축을 하면 압축일이 현저히 줄어들면서 열효율이 향상되게 된다. 초임계 CO₂ 사이클 발전은 열역학적으로 엄밀하게는 그림 2와 같이 임계점 이하로 냉각이 가능하여 상변화를 동반하는 초월임계(Transcritical) 사이클과 그림 3과 같이 임계점 이상으로 냉각이 되어 상변화를 동반하지 않는 초임계(Supercritical) 사이클로 구분된다. 임계점 이하로 냉각할 수 있는 냉각수 확보가 사계절 가능한 경우 효율이 좀 더 높은 초월임계(T-CO₂) 사이클이 가능하지만, 그렇지 않은 경우 초임계(S-CO₂) 사이클이 일반적이다.

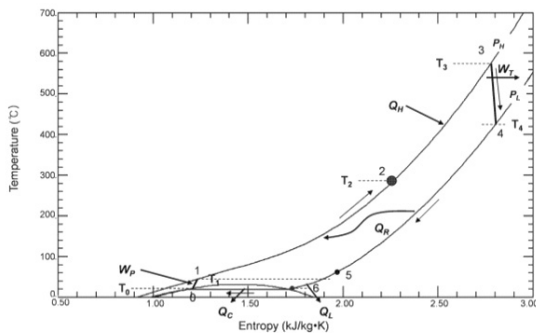


그림 2. 초월임계 CO₂ 사이클 T-s 선도^[6]

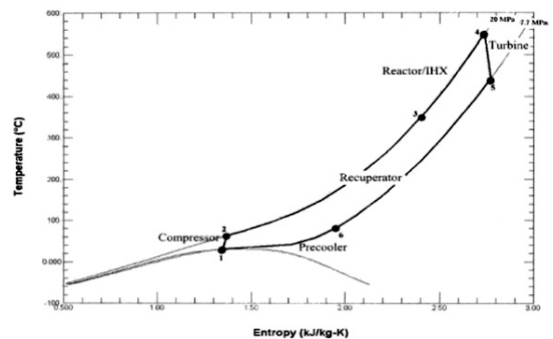


그림 3. 초임계 CO₂ 사이클 T-s 선도^[6]

초임계 CO₂ 사이클 발전에서 고압 조건은 대략 200bar 정도로 고압 스팀사이클과 다르지 않지만, 저압 조건은 임계점 압력인 70bar 정도가 되어 대기압 이하로 팽창을 하는 스팀사이클에 비해 현저히 높은 특징을 가진다. 초임계 CO₂ 사이클 발전은 고압영역에서 낮은 팽창비(대략 3정도)로 운전되는 특성으로 터빈 크기가 그림 4와 같이 같은 출력의 스팀터빈에 비해 현저히 작아지고 열교환기를 포함한 모든 장치의 크기가 매우 컴팩트해지는 장점을 가진다. 팽창 후 초임계 CO₂의 남은 열은 재생열교환기(Recuperator)를 통해 고압 CO₂를 가열하는데 재활용되며 이러한 고온 고압 재생열교환기로는 최근 상용화되어 사용되고 있는 인쇄기판형 열교환기(PCHE)가 적용되고 있다.

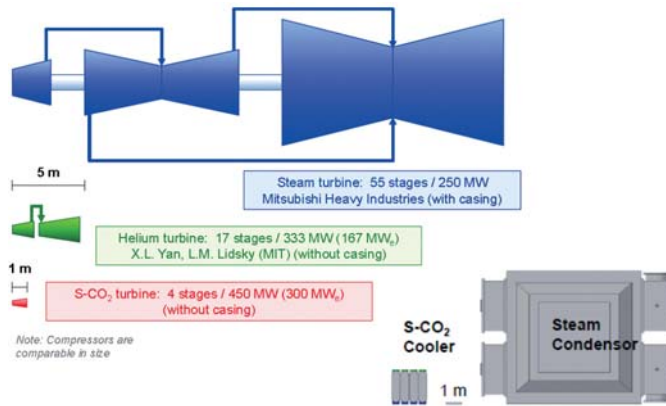


그림 4. 스팀터빈과 S-CO₂ 터빈 크기 비교^[6]

그림 5와 그림 6은 최근 고효율 석탄화력 발전을 위해 적용되기 시작하고 있는 초초임계(USC, Ultra Super Critical) 스팀사이클 발전시스템 구성과 T-s 선도의 한 예를 나타낸다. 효율 향상을 위해 재열사이클이 적용되고, 팽창과정의 증기일부를 단계별로(6단) 추출하여 보일러용 급수를 가열하는 추기 재열사이클 적용으로 고효율을 달성할 수 있게 된다. 반면 그림 7과 그림 8은 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템의 기본 구성과 T-s 선도를 나타낸 것으로 팽창비가 낮아 1단 팽창과 재생열교환기만으로 스팀사이클의 복잡한 추기 재열사이클을 대체할 수 있기 때문에 시스템 구성이 매우 간단하면서 고효율 달성이 가능하게 된다.

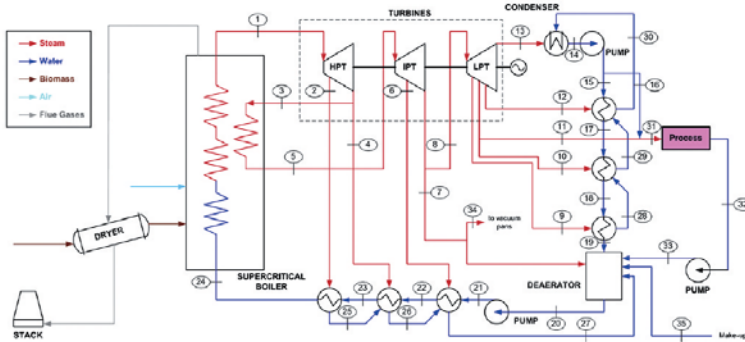


그림 5. 초초임계(USC) 스팀사이클 구성^[7]

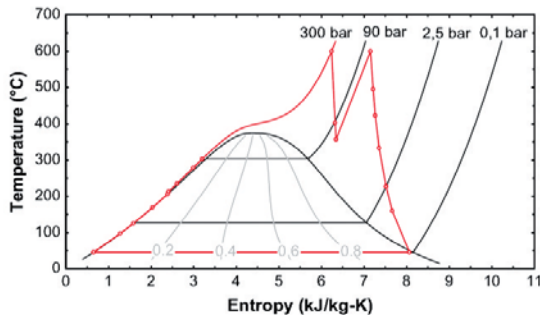


그림 6. 초초임계(USC) 스팀사이클 T-s 선도 (재열 및 6단 추기 사이클)^[7]

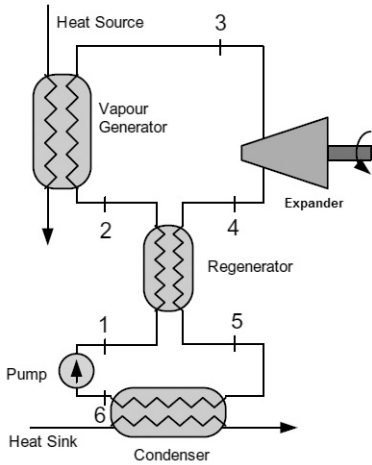


그림 7. 초임계 CO₂ 사이클 구성⁶⁾

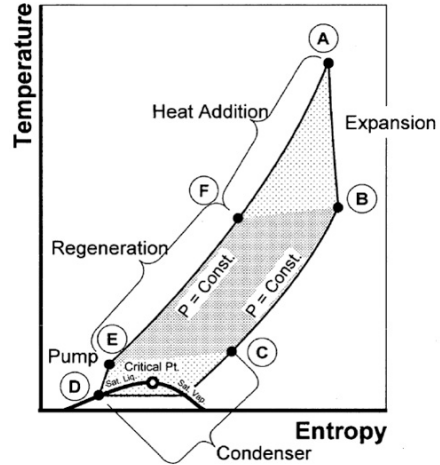


그림 8. 초임계 CO₂ 사이클 T-s 선도⁶⁾

복합화력과 같이 가스터빈의 배가스의 폐열을 이용하여 발전을 할 경우 그림 9와 같이 스팀사이클에서는 끓는 점이 일정해서 배열 회수과정에서 배가스와의 온도차가 커져 비가역손실이 증가하므로 2단 이상의 압력변화를 통한 열회수로서 이러한 손실을 줄일 수 있다. 그러나 초임계 CO₂ 사이클인 경우는 뚜렷한 상변화과정없이 배가스 온도를 따라 배열 회수가 가능해 비가역손실이 감소하므로 단순한 시스템 구성으로 고효율을 달성할 수 있게 된다. 그림 10은 미국 EchoGen의 폐열회수 초임계 CO₂ 발전시스템 EPS100을 GE 가스터빈 LM2500(25 MWe급)에 적용할 때 출력변화를 폐열회수 스팀사이클(HRSG)과 비교한 것이다. 스팀사이클 적용시 단일압력(SP, Single Pressure) HRSG의 경우 최대 5MWe의 추가발전이 가능하고, 2단압력(DP, Dual Pressure) HRSG를 적용하면 최대 8MWe의 추가발전이 가능하다. 그러나 초임계 CO₂ 발전시스템 EPS100을 적용할 경우 간단한 시스템 구성으로 DP HRSG에 근접한 출력을 달성할 수 있다. 이와 같이 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템을 폐열발전에 적용할 경우 고압영역 운전에 따른 사이클 특성에 따라 스팀사이클에 비해 장치가 매우 콤팩트해질 뿐만 아니라 단순한 시스템 구성으로 고효율을 달성할 수 있기 때문에 스팀사이클에 비해 큰 경쟁력을 가질 수 있다.

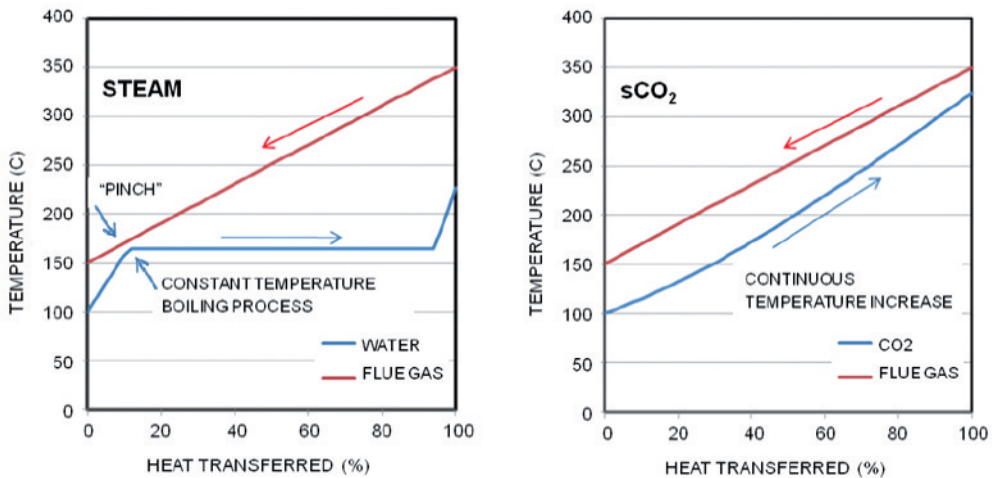


그림 9. 배기열 회수시 스팀사이클과 초임계 CO₂ 사이클 비교⁶⁾

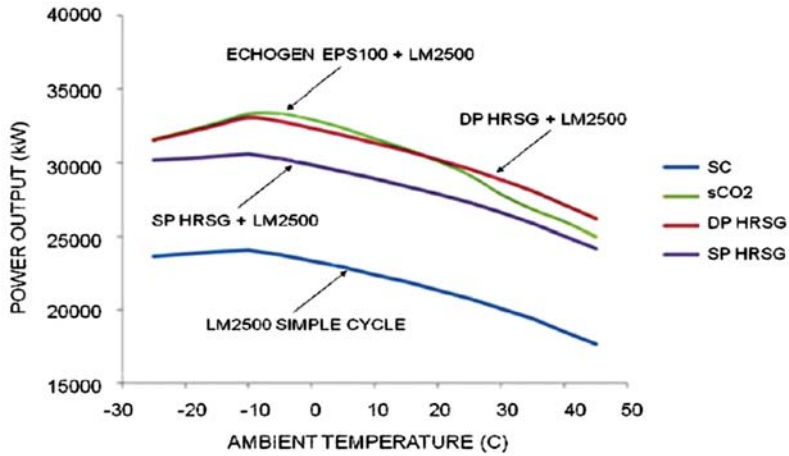


그림 10. 가스터빈(LM2500) 폐열발전 스템사이클과 초임계 CO₂ 사이클 출력 비교⁶⁾

2.2 초임계 이산화탄소 사이클 발전시스템 기술개발 동향

초임계 CO₂ 발전 사이클에 대한 연구는 1960에서 1970년대 미국, 러시아, 이태리, 스위스 등에서 초임계 CO₂ 발전 사이클에 대한 이론적 연구가 진행되었으나, 고온 고압 조건에 따른 열교환기 및 터보기계 기술 등의 어려움으로 더 이상 연구가 진행되지 못하였다. 그러나 최근 기계기술의 발달과 함께 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템 개발이 미국, 일본 등에서 다시 활발히 진행되고 있으며, 이론적 연구 뿐만 아니라 파일럿 발전시스템과 데모 플랜트를 통한 실용화 연구가 진행 중이다.

미국은 국가연구소인 SNL, INEEL, ANL, LANL 등이 참여하고 있으며, MIT, RPI, Colorado 대학이 참여하여 2000년부터 차세대 원자로 적용을 위한 초임계 CO₂ 사이클 연구를 진행해 오고 있다. 그러나 최근에는 원자력보다는 태양열 발전, 화력 발전, 폐열 발전 등 적용분야를 다양화하여 시스템 개발을 진행하고 있다. 현재 300 kWe급 파일럿 발전시스템 개발을 완료하였으며, 10 MWe 시스템 개발을 진행 중에 있다. 미국 DOE는 2012년부터 SunShot 프로젝트를 통해 NREL, SNL, EchoGen 등에 투자하여 10 MWe급 태양열 발전용 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템을 개발하고 있다.

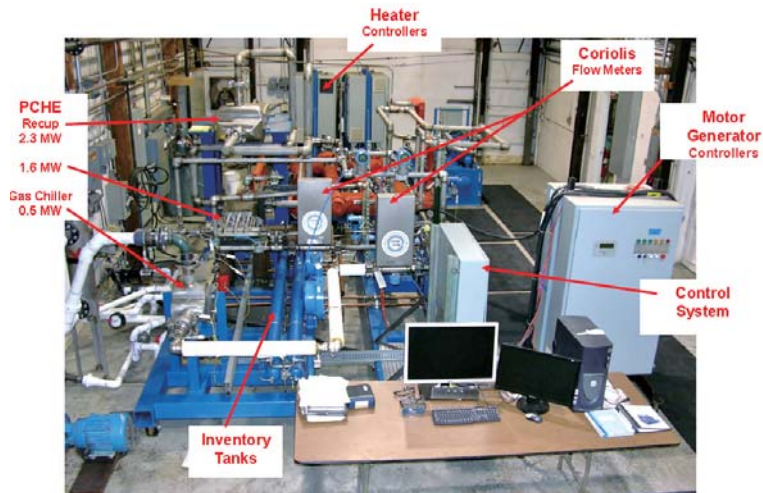


그림 11. 300 kWe급 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템 (SNL)⁶⁾

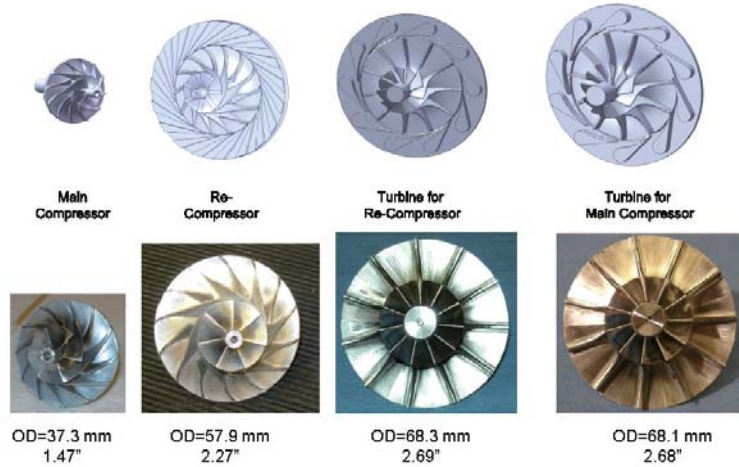


그림 12. 300 kW급 초임계 CO₂ 사이클 압축기/터빈 (SNL)^[6]

일본은 에너지종합공학연구소(IAE)와 동경대, 동경공업대가 협력하여 미국과 협력하여 차세대 원자로 적용을 위한 초임계 CO₂ 발전 사이클에 대한 연구를 수행해 오고 있으며, 피일롯 발전시스템 개발을 진행하고 최근 적용분야를 다양화하려는 노력을 하고 있다. 최근 NET Power는 Toshiba, Shaw Group, Exelon 등이 투자하여 화력발전소 적용 25 MWe급 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템 개발을 진행하고 있으며, 2017년까지는 250 MWe급 발전 플랜트를 건설하여 운영할 계획으로 있다. Net Power는 화력발전소에 기존 간접 가열방식의 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템과 CCS(Carbon Capture & Storage)를 결합한 무배출(Zero Emission) 화력발전시스템 뿐만 아니라 그림 13과 같이 직접 가열방식의 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템과 CCS를 결합한 시스템 구성도 제시하고 있다.^[10] 초임계 상태의 CO₂를 순산소 연소에 의해 직접 가열하고 연소 후 물과 분리된 CO₂는 가압되어 재순환되며 연소에 의해 발생하는 잉여의 CO₂는 외부로 배출되어 저장된다. 이러한 시스템 구성은 천연가스 발전 뿐만 아니라 석탄화력 발전에도 그대로 적용될 수 있다.

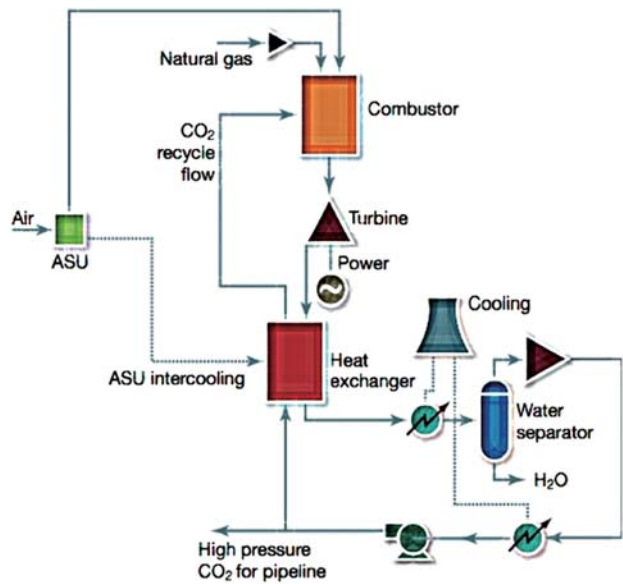


그림 13. 직접가열 초임계 CO₂ 사이클 적용 무배출 화력발전시스템^[10]

미국 EchoGen는 Dresser-Rand의 투자를 받아 세계 최초로 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템을 상용화하고 있으며, 특히 산업용 폐열, 가스터빈 폐열, 선박엔진 폐열 등 폐열발전 분야와 태양열 및 지열 등 신재생에너지 발전분야에 적용을 하고 있다.^[11] 현재 개발된 모델은 EPS100이며 532°C의 33 MWt의 배기열에 적용하여 8 MWe의 추가 동력을 발생하여 효율 24% 폐열 발전을 달성하였다. 미국 EchoGen은 일반적으로 경제성, 장치 크기 및 구성의 복잡성 때문에 HRSG가 적용되고 있지 않은 수십 MWe급 이하의 중소형 가스터빈에 이러한 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템을 적용하면 큰 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 보고 있다. 또한 엄격해지고 있는 연비규제에 대응하여 최근 배기열 발전이 도입되고 있는 선박엔진에 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템을 적용하면 스팀사이클에 비해 경제성, 장치 무게

및 크기 측면에서 월등히 유리하기 때문에 잠재 시장은 매우 크다고 할수 있다.

미국 SECCO2 Engines은 터보 팽창기가 아닌 스크롤 팽창기를 적용한 수십 kWe급 이하의 소형 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템 개발을 NASA의 지원을 받아 진행해 왔으며, 발전용 뿐만 아니라 수송용 동력장치로서 다양한 연료와 열원을 이용한 고효율, 고회전력 엔진 개발을 진행하고 있다. 터보 기기를 사용하는 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템의 경우 수백 kWe급 이하에서는 발전출력에 비해 터보기기의 블레이드 크기가 너무 작아짐으로서 효율이 저하되고 기술적 어려움이 생기기 때문에 용적형 기기를 적용하는 방안이 좋은 대안이 될 수 있다.^[12-14]

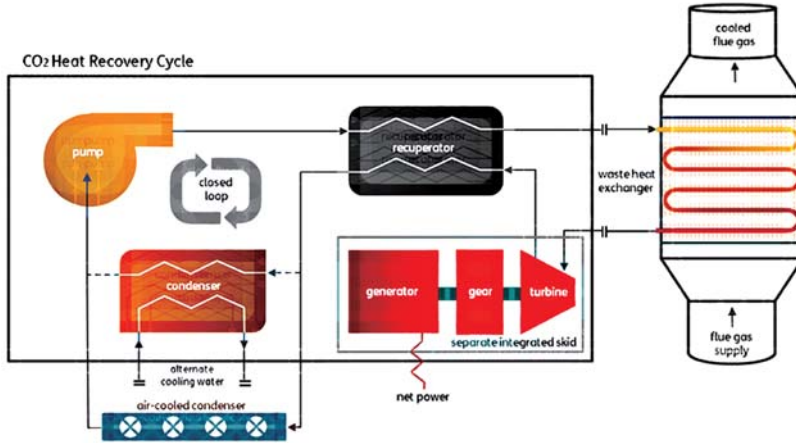


그림 14. EchoGen 폐열회수 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템^[11]



그림 15. EchoGen 폐열회수 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템 (EPS100)^[11]

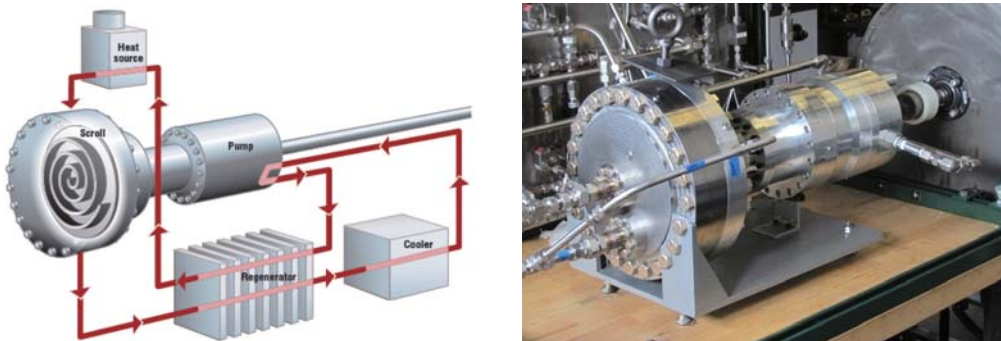


그림 16. SECCO2 Engines사의 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템^[8]



3. 결 론

초임계 CO₂ 사이클 발전시스템은 액체와 기체의 복합 특성을 가지는 초임계유체의 특성을 잘 활용하여 고효율 및 고출력을 달성할 수 있으며 다양한 열원을 발전에 활용할 수 있는 장점을 가지고 있어 향후 성장잠재력과 파급효과가 큰 차세대 발전기술로서 주목을 받고 있다. 미국, 일본 등 선진국에서는 수백 kWe급 실험실 규모의 검증을 거쳐 수십 MWe급 시스템 개발 중에 있으며 수백 MWe 플랜트를 구축하는 프로젝트도 준비 중에 있다. 초임계 CO₂ 사이클 발전시스템은 저온 및 고온 열원에 모두 적용 가능하며, 고압 운전 특성으로 기존 발전시스템 대비 장치가 매우 컴팩트한 장점을 가진다. 특히, 기존 스팀사이클은 복잡한 시스템 구성으로 고효율 달성이 가능하기 때문에 대규모 스팀사이클은 고효율 달성이 가능하지만 중소규모의 스팀사이클은 효율이 현저히 낮게 되는데, 초임계 사이클 CO₂ 발전시스템은 간단한 시스템 구성과 컴팩트한 장치 구성으로 고효율 달성이 가능하기 때문에 이러한 중소규모의 분산형 발전분야에서 큰 경쟁력을 가질 수 있다. 수백 kWe급 이하의 발전시스템에서는 과도하게 소형화되는 터보형 기기보다 피스톤, 스크롤, 스크류 등 용적형 기기를 적용하는 것도 좋은 대안이 될 수 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] I.V. Dostal, "A supercritical carbon dioxide cycle for next-generation nuclear reactors", Ph.D. thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT, USA, 2004.
- [2] E. G. Feher, "The supercritical thermodynamic power cycle", Energy Conversion, Vol. 8, pp. 85-90, 1968.
- [3] V. Dostal, P. Hejzlar, M. J. Driscoll, "The supercritical carbon dioxide power cycle: comparison to other advanced power cycles", Nuclear Technology, Vol. 154, pp. 283-301, 2006.
- [4] Y. M. Kim, C. G. Kim, D. Favrat, "Transcritical or supercritical CO₂ cycle using both low- and high-temperature heat sources", Energy, Vol. 43, pp. 402-415, 2012.
- [5] Available online at <http://www1.chem.leeds.ac.uk/People/CMR/criticalpics.html>
- [6] S. A. Wright, T. M. Conboy, G. E. Rochau, "Overview of supercritical CO₂ power cycle development at Sandia National Laboratories", 2011 University Turbine Systems Research Workshop, October 25-27, Columbus, Ohio, 2011.
- [7] L. F. Pellegrini, S. O. Junior, J. C. Burbano, "Supercritical steam cycles and biomass integrated gasification combined cycles for sugarcane mills", Energy, Vol. 35, pp. 1172-1180, 2010.
- [8] Available online at <http://www.secco2.com/>
- [9] M. Persichilli, A. Kacludis, E. Zdankiewicz, T. Held, "Supercritical CO₂ power cycle developments and commercialization: why sCO₂ can displace steam", Power-Gen India & Central Asia 2012, 19-21 April, Pragati Maidan, New Delhi, India, 2012.
- [10] R. J. Allam, "NET Power's CO₂ cycle: the breakthrough that CCS needs", Modern Power Systems, 2013. Available online at <http://www.modernpowersystems.com/features/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs>
- [11] Available online at <http://www.echogen.com/>
- [12] X. Li, X. Zhang, "Component exergy analysis of solar powered transcritical CO₂ Rankine cycle system", Journal of Thermal Science, Vol. 20, pp. 195-200, 2011.
- [13] H. Yamaguchi, X. R. Zhang, K. Fujima, N. Sawada, "Solar energy powered Rankine cycle using supercritical CO₂", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 2345-54, 2006.

- [14] Y. Chen, P. Lundqvist, A. Johansson, P. Platell, "A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic Rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 2142-7, 2006.



김 영 민

- 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부
그린동력연구실
- 관심분야 : 열동력 시스템, 폐열/태양열 발전,
압축공기저장발전
- E-mail : ymkim@kimm.e.kr