

초임계 CO₂ 발전시스템 소개 및 개발동향

이정익*[†] · 안윤한* · 차재은**

Introduction to supercritical CO₂ power conversion system and its development status

Jeong Ik Lee*[†], Yoonhan Ahn*, Jae Eun Cha**

Key Words : S-CO₂ Power Cycle(초임계 CO₂ 발전사이클), SFR(소듐냉각고속로), SCIEL(초임계 CO₂ 종합실증루프)

ABSTRACT

During the international effort to develop the next generation nuclear reactor technologies, many new power cycle concepts were derived to improve efficiency and reduce the capital cost. Among many innovative power cycles, it was identified that the supercritical CO₂ (S-CO₂) Brayton cycle technology has a big potential to outperform the existing steam cycle and eventually replace it. The S-CO₂ cycle achieves high efficiency with very compact size, which is the ultimate advantage for a power cycle to have. The S-CO₂ cycle has a great potential not only for the future nuclear applications but also for general heat sources such as coal, natural gas, and concentrated solar. In this paper, a brief introduction to the S-CO₂ power cycle technologies will be first provided, and a short summary of current research and development status of the power cycle technology around the world will be followed. Especially the research works performed by KAIST, KAERI and several related research institutions in Korea will be reviewed in more detail, since they have recently developing a strong infrastructure to test these ideas by constructing a demonstration facility while producing many innovative ideas to improve and realize the concept.

1. 서 론

2000년대 초반에 들어와서 세계적으로 여러 나라들이 제 4세대원전개발과 관련하여 국제협력을 하게 되었다. 당시에 6개의 원자로형(소듐냉각고속로, 납냉각고속로, 가스냉각고속로, 초임계수원자로, 초고온가스로, 용융염 원자로)이 선정되었는데, 이 6개의 원자로형은 중성자 에너지 분포나 냉각재 등이 모두 다른 원자로들이다. 하지만 이 6개의 선정된 제4세대 원자로들은 모두 기존에 전 세계적으로 널리 쓰이던 가압경수로 또는 비등경수로의 노심출구 온도인 300 °C보다 적게는 200 °C 내외(500 °C)에서 많게는 600 °C 이상(900 °C)의 고온을 목표로 하는 공통점을 가지고 있다.

이와 같이 제4세대원전의 노심출구 온도가 기존의 경수로

기반의 상업용 원자로에 비해서 상승하게 된 주요 원인으로 는 현재의 원자력 발전소 발전효율이 타 발전소에 비해서 낮기 때문이다. 노심출구 온도의 상승은 발전시스템의 터빈입구 온도의 상승으로 이어지며, 이는 열역학 제2법칙에 의해서 발전시스템 효율 상승으로 이어진다. 따라서 제4세대 원전은 기존 상업용 발전소보다 발전효율이 노심출구 온도의 상승으로 인해 향상된다. 이는 특히 기존의 상업용 원자력 발전소의 효율이 다른 발전소의 효율에 비해 낮아서 발생하는 문제점을 해결할 수 있다. 다시 말하면, 1kWh의 전력을 생산할 시 발전효율이 낮기 때문에 원자력 발전소가 소모하는 냉각수의 양이 다른 발전소에 비해서 많으며, 이는 경제성뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 많은 지적을 받고 있는 문제이다. 제4세대원전에서는 이 문제를 노심출구 온도 상승

* 한국과학기술원, 원자력 및 양자공학과(Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 한국원자력연구원, 고속로 설계부(Fast Reactor Technology Development Division, Korean Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : jeongiklee@kaist.ac.kr

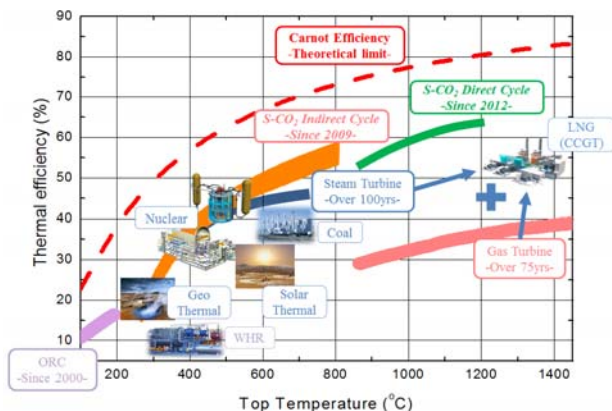


Fig. 1 Power Cycle Efficiencies

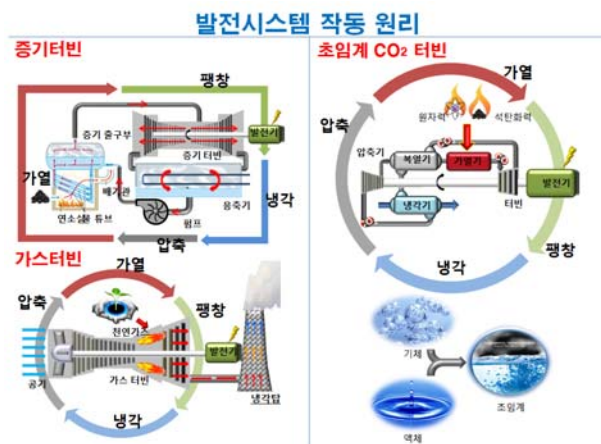


Fig. 2 Principles of Power Conversion System

에 기인한 발전효율 향상을 통해 해결하고자 하였다.

상승한 노심출구온도를 발전효율로 상승으로 연결하기 위해서는 새로운 발전시스템에 대한 검토도 필요하게 되었다. 기존의 대형 발전시스템은 크게 증기발전시스템과 가스터빈 발전시스템이 있다. 증기발전시스템은 550 °C 이상의 터빈입구온도가 되면 초초임계압 증기발전시스템을 이용하여야 효율이 높일 수 있다. 그러나 초초임계압 증기발전시스템은 증기가 고온고압일 경우 재료의 여러 문제가 발생할 수 있기 때문에, 원자력 발전시스템의 안전성 또는 신뢰성에 문제가 생길 수 있는 문제점이 있다. 또한 현재 가스터빈은 터빈입구온도가 900 °C 이상의 범위에서 작동하고 있는데, 이는 가스터빈의 터빈입구 온도가 900 °C 이하가 되게 되면 발전효율(35% 이하)이 매우 낮아지기 때문에 경쟁력이 없기 때문이다. 즉 4세대 원자력 발전소의 노심 출구온도 범위가 되는 500 °C부터 900 °C 사이에서 작동하면서 효율이 높고 발전시스템의 안전성 및 신뢰성도 높은 새로운 개념의 발전시스템을 필요로 하게 된다.

이러한 배경에서 초임계 CO₂ 발전시스템은 기존의 증기발전시스템과 가스터빈 발전시스템의 경험과 장점을 적절하게 융합하고자 연구되기 시작하였다, 즉, 제4세대원전의 높은 작동온도에서 높은 효율을 보장하며 구조재료와의 양립성이 좋아 발전시스템의 안전성과 신뢰성이 향상된 발전시스템 개발의 필요성에 의해서 초임계 CO₂ 발전시스템 개발이 출발하였다.

2. 초임계 CO₂ 발전시스템 소개

2.1 초임계 CO₂ 발전시스템 원리 및 특징

기존의 증기발전시스템은 Fig.1에서도 확인할 수 있듯이 가스터빈 발전시스템에 비해서 터빈입구 온도가 낮음에도 불구하고 발전효율이 높을 수 있는 이유는 유체를 압축할 때

액체 상태의 물에서 이루어지기 때문이다. 다시 말하면, 액체 상태의 물은 비압축성 유체이기 때문에 압력을 높이는 데 필요한 일이 많지 않다. 반면에 가스터빈 발전은 압축을 할 때 압축성 유체인 공기를 사용하기 때문에 압축에 많은 일이 소모되고, 따라서 터빈에서 생산하는 일은 많지만 압축에 소모하는 일도 많아서 증기발전시스템보다 높은 온도에서 작동함에도 불구하고 효율이 높지는 않다. 하지만 고온의 공기가 고온 고압의 증기보다는 재료 건전성에 미치는 영향이 작기 때문에 증기발전시스템보다 700 °C 이상의 높은 터빈입구 온도를 유지할 수 있다.

초임계 CO₂ 발전시스템은 이런 두 발전시스템의 장점을 최대한 융합하고자 하는 시스템이다. 즉 압축은 최대한 비압축성 유체의 성질을 가지는 영역에서 하되, 발전유체 자체의 부식성은 기존의 증기보다 낮게 하여 더 높은 터빈입구 온도를 활용할 수 있게 하는 것이다. CO₂는 임계점이 30.98 °C, 72.8기압으로, 임계점 근처에서 CO₂의 압축성은 비압축성 유체에 가까워진다. 압축성을 측정하는 지표로 압축성 계수(Compressibility Factor)가 있는데, 이 지표가 0이면 비압축성 유체이고 1이면 이상기체이다. CO₂의 경우 임계점 근처에서는 압축성 계수가 0.2에서 0.3 근처까지 낮아지기 때문에 비압축성 유체에 가까워지게 되며 따라서 압축에 필요로 하는 일이 임계점에 가까워질수록 급격하게 줄어들게 된다. 또한 초임계 CO₂는 같은 온도의 증기보다 부식성이 낮기 때문에 기존의 증기발전시스템보다 더 높은 터빈입구온도를 유지하는 것에 유리할 수 있기 때문에 차세대 원자로에 적합한 발전시스템이다.

초임계 CO₂ 발전시스템의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 발전시스템이 임계점 이상에서만 항상 작동하기 때문에 최저압력이 높으며 따라서 발전시스템 내부의 유체의 밀도가 항상 높게 유지된다. 따라서 유체의 밀도가 높은 만큼 동일 질량유량 대비 체적유량이 작아지게 되며, 따라서 터보기기

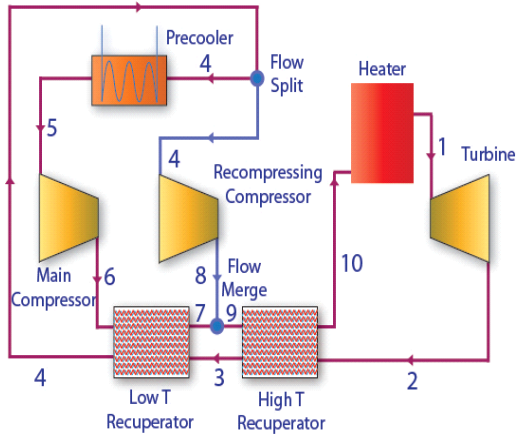


Fig. 3 Recompressing S-CO₂ Cycle Layout

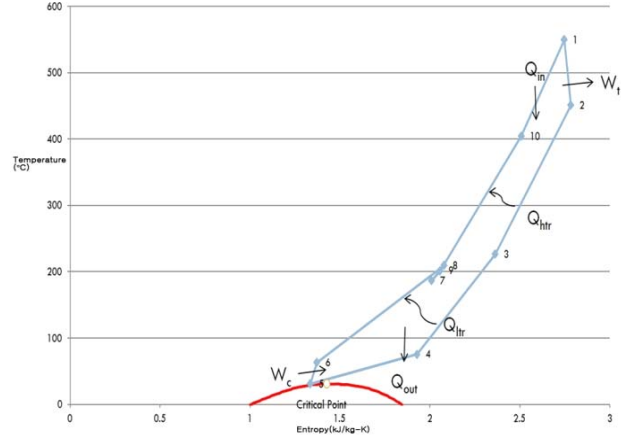


Fig. 4 T-S Diagram of Recompressing S-CO₂ Cycle Layout

의 크기가 증기발전시스템보다 최대 1/10 이하로 줄어들게 된다. 증기터빈의 경우 경수로의 작동조건에서는 60기압 이상에서부터 0.1기압 이하까지 감소하여야 발전효율이 높게 유지되기 때문에, 터빈의 최종 단에서는 증기의 밀도가 매우 낮게 유지되며 따라서 증기터빈의 크기가 커지게 된다. 반면에서 초임계 CO₂ 발전시스템은 터빈의 출구 압력도 73기압 이상으로 유지되고 있기 때문에 터빈이 매우 작게 된다.

하지만 이와 같은 특징 때문에 증기발전시스템보다 초임계 CO₂ 발전시스템은 터빈에서 팽창비가 작게 되며(증기발전 : 100대 1, 초임계 CO₂ 발전시스템 : 2~3대 1) 이는 초임계 CO₂ 발전시스템이 복열이 많이 이루어져야 효율을 높게 유지할 수 있는 시스템임을 의미한다. 왜냐하면 터빈 팽창비가 높을수록 터빈의 출구 온도가 낮아지게 되는데, 초임계 CO₂ 발전시스템의 경우에는 팽창비가 낮기 때문에 터빈출구 온도가 여전히 높으며 이를 활용하여 충분히 복열을 하지 않으면 발전시스템의 효율이 낮아지게 된다. 따라서 초임계 CO₂ 발전시스템의 경우에는 복열기(Recuperator)가 발전시스템의 효율에 미치는 영향이 매우 크다.

초임계 CO₂ 발전시스템의 대표적인 사이클 레이아웃으로는 재압축 (Recompressing) 레이아웃이 있다. 이 레이아웃은 1967년도에 Fehr에 의해서 제안되었으며⁽¹⁾, 후에 차세대 원자력 발전소 적용에 대해서 MIT의 V. Dostal이 2004년에 재평가함으로 해서 다시 주목받기 시작하였다⁽²⁾. 그러나 최근 연구결과에 따르면 열원 특성에 따라서 발전시스템과 같이 다양한 최적 레이아웃이 존재할 수 있으며, 이는 레이아웃 관점에서는 증기발전시스템과, 핵심기기 설계 측면에서는 가스터빈 발전시스템과 유사함을 의미한다.

초임계 CO₂ 발전시스템의 특징 중에 하나는 고압부와 저압부 사이의 정압비열이 2배에서 많게는 3배 가까이 차이가 나게 되는 점이다. 이 부분은 복열이 중요한 초임계 CO₂ 발전시스템에서 특히 중요한 사안으로 재압축 사이클 레이아웃이 효율이 높은 이유이기도 하다. 즉, 재압축 사이클과 같

이 저압 복열기 전단에서 유량 분배를 통해서 비열의 비를 상쇄하는 유량비를 고압부와 저압부 사이에 형성하여 최대한 저압부의 고온의 열을 고압부의 저온 쪽으로 전달하게 한다. 이는 최종적으로 사이클에서 외부로 나가는 열의 양을 최소화하기 때문에 사이클의 최종 열효율을 상승시키는데 큰 도움을 주게 된다.

초임계 CO₂ 발전시스템은 이와 같이 복열기의 역할뿐만 아니라 작동조건 선정도 중요하다. 그러나 복열기가 작동하는 온도와 압력이 기존 발전시스템에서 적용되는 열교환기에 비해서 상당히 높은 편이며, 초임계 CO₂가 액체 상태의 물보다는 밀도가 낮고 상변화가 없기 때문에 기존의 쉘앤튜브형 열교환기를 사용할 경우 전체 발전시스템의 높은 경제성을 확보하는 것이 힘들다. 하지만 2000년대에 들어와서 인쇄형열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger)를 비롯하여 고온고압에서 견디면서 면적집적도가 기존의 쉘앤튜브형 열교환기보다(최대 10배 이상) 높은 다양한 열교환기가 상용화됨에 따라서 초임계 CO₂ 발전시스템의 경제성도 높아질 수 있는 가능성이 생겼다.

이런 초임계 CO₂ 발전시스템의 장점을 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 기존 증기 발전시스템보다 2%p ~ 5%p까지 열효율 상승을 기대할 수 있다.
- (2) 기존 증기 발전시스템보다 터보기기가 소형화되고, 최근에 개발된 고집적 열교환기 덕분에 면적집적도가 높아지게 되어서 최대 부지면적을 1/4 이하로 소형화가 가능하다.
- (3) 기존의 증기발전시스템보다 높은 발전효율을 가지고 있기 때문에 공랭식으로 이행하여 발전효율에 감소가 발생하여도, 기존의 수냉식 증기발전시스템과 공랭식 초임계 CO₂ 발전시스템의 효율이 대등하여 경제적으로 공랭식 발전시스템 운영이 가능하다.
- (4) 최저 작동압력이 고압으로 유지됨에 따라서 CO₂가 외

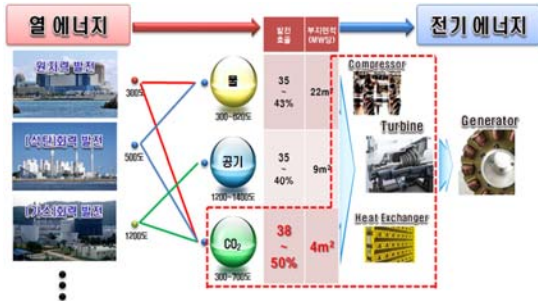


Fig. 5 발전유체별 비교

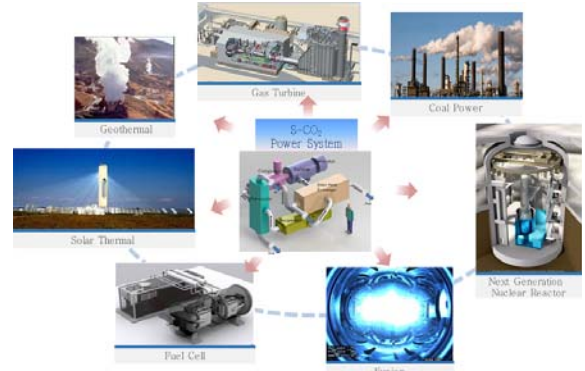


Fig. 6 초임계 CO₂ 발전시스템 적용가능 열원

부로 누설되기는 하여도 외부 공기 유입으로 인한 발전유체인 CO₂의 순도문제가 발생하지 않으며, 이는 전체 발전시스템의 BOP 설계를 단순화하는데 기여한다. 기존 증기 발전시스템은 터빈출구의 복수기가 저압으로 유지되기 때문에 물에 비응축성 기체가 함유되게 되며, 이를 정화하고 물의 순도를 유지하기 위한 다양한 부대설비들이 발전시스템을 복잡하게 한다.

- (5) CO₂는 발전유체 중에 물이나 공기 다음으로 가격이 싼 유체이며, 누설이 되더라도 환기시스템만 잘 갖추어져 있으면 인체에 크게 유해하지 않아서 발전시스템에 적용하기에 적합한 유체이다.

2.2 초임계 CO₂ 발전시스템 응용

앞서 설명한 바와 같이 초임계 CO₂ 발전시스템은 기존 발전시스템에서 담당하지 못하였던 열원 온도 적용이 가능하면서 동시에 여러 가지 장점을 가지고 있다. 따라서 기존 증기발전시스템을 대체하는 개념으로는 경수로 기반 원자력 발전소, 석탄화력 발전소의 상부사이클, 가스복합화력 하부사이클 등에 적용될 수 있다. 신규로 개발할 수 있는 열원으로는 고온 연료전지, 태양열, 지열 등의 신재생 열원과 함께 소듐냉각 고속로, 핵융합로와 같은 차세대 원자로에도 적용이 가능하다. 열원별로 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 원자력: 소듐냉각고속로에 적용하는 연구는 우리나라와 일본, 미국 등에서⁽³⁻⁵⁾ 진행되었다. 이는 초임계 CO₂ 발전시스템의 고효율 및 초소형화에 의한 경제적 장점뿐만 아니라 증기발전시스템 차용으로 인해서 잠재적으로 발생할 수 있는 소듐-물 반응을 반응이 훨씬 안정적인 소듐-이산화탄소 반응으로 대체할 수게 됨에 따라 안전성 증진 측면에서도 이점이 있어서 고려되고 있다. 프랑스의 경우에는 소듐냉각고속로에 질소 브레이크 사이클을 적용하는 것을 계획하고 있는데, 이는 분명 화학 반응에 의한 안전성 위해 측면에서는 소듐-이산화탄소 반응보다 우위에 있다. 하지만 효율 측면에서 기존의 증기발전시스템보다 높을 수 없기 때문에 경제성 향상에서 질소 사이클은 한계가 있다.⁽⁶⁾

또한 질소 사이클은 소듐냉각고속로를 제외한 여타의 다른 열원에는 효율이 낮아 고려하기 힘든 발전기술이기 때문에, 산업적 역량 및 공급사슬을 구축하는 것이 매우 어렵다는 한계점도 있다.

초임계 CO₂ 발전시스템은 이외에도 SMART와 같은 소형 경수로 적용^(7,8)에 대한 연구, 대형 경수로 적용 연구⁽⁹⁾, 핵융합로 적용 연구⁽¹⁰⁾ 등이 이루어졌다.

- (2) 석탄화력: 미국이 Pratt Whitney & Rocketdyne사, 프랑스의 EDF사 등이 초임계 CO₂ 발전시스템을 상부사이클로 활용하여 기존 석탄화력 발전소의 효율을 상승시키는 개념을 제시하였다^(11,12). 제시된 개념은 향상된 발전효율에서 추가 발전량을 CO₂포집 및 저장에 소모되는 전력으로 충당하여, 기존 발전시스템 대비 총 생산전력량은 같으나 CO₂배출은 현저히 줄어든 발전소이다.
- (3) 복합화력 및 폐열재생: 미국의 Echogen사나 GE사는 이와 관련된 특허^(13,14)를 제시하였으며, 가장 먼저 초임계 CO₂ 발전시스템이 상용화되고 있는 열원이다. 가스터빈의 배기가스는 통상적으로 450 °C 이상으로 고온이기 때문에, 추가적으로 증기발전시스템으로 폐열 회수를 하여서 발전효율을 높일 수 있다. 동일한 원리로 증기발전시스템 대신 초임계 CO₂ 발전시스템을 활용하여 복합 가스터빈의 발전효율을 크게 향상시킬 수 있다.
- (4) 신재생 열원: 태양열, 고온연료전지 폐열, 지열 등의 열원⁽¹⁵⁻¹⁷⁾과 초임계 CO₂ 발전시스템을 연계하여 신재생 에너지의 경제성 향상에 기여할 수 있다.

3. 초임계 CO₂ 발전시스템 개발현황

3.1 해외 현황

초임계 CO₂ 발전시스템 중에 브레이크 사이클 부분은 아직 실험실 단계이지만, 폐열재생에 사용되는 초임계 CO₂ 펌

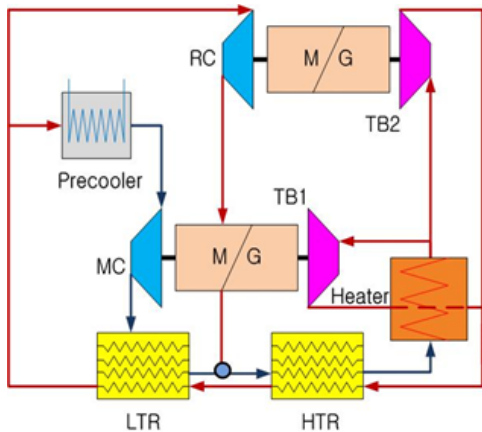


Fig. 7 샌디아 국립연구소 시험장치 개념도

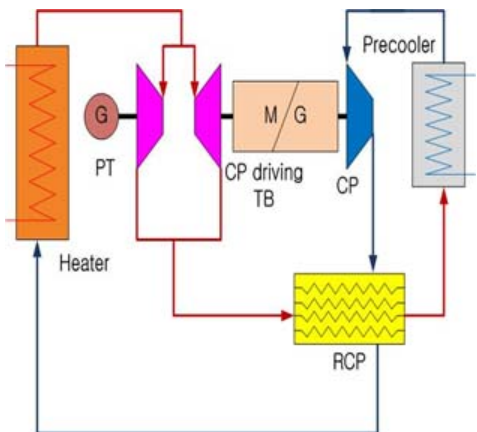


Fig. 8 놀스 원자력연구소 시험장치 개념도

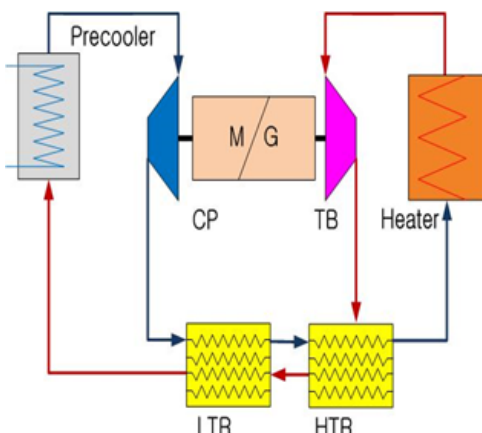


Fig. 9 일본 에너지연구소 시험장치 개념도

킨 사이클은 일부 상업화가 진행될 정도로 개발 진척도가 높다. 본 논문에서는 원자력을 비롯하여 대형 발전소에 적용 가능한 브레이튼 사이클 기술에 더 초점이 맞추어져 있으므로, 개발현황도 주로 브레이튼 사이클에 맞추어서 소개하도록 하겠다.

발전시스템의 핵심기기인 터보기기와 열교환기를 종합적

Table 1 세계 초임계 CO₂ 발전시스템 IST 현황

	Sandia National Lab (US)	Knolls Atomic Power Lab (US)	Institute of Applied Energy (Japan)
Turbo-machinery feature	2-TAC	1-TAC, 1-turbine	1-TAC (2-recuperaters)
Cycle layout	Recompressing	Simple recuperated	Simple recuperated
Heat, kW	780	834.9	160
Efficiency, %	31.5	14.7	7
Mass flow rate, kg/s	3.5 (target) 2.7 (achieved)	5.35 (target) 3.54 (achieved)	1.4 (achieved)
T.I.T, °C	537 (target) 342 (achieved)	300 (target)	277 (achieved)
Pressure ratio	1.8 (target) 1.65 (achieved)	1.8 (target) 1.44 (achieved)	1.4 (achieved)
Rotating speed, x1000 rpm	75 (target) 52 (achieved)	75 (target) 55-60 (achieved)	69 (achieved)
Turbine efficiency, %	86 (turbine 1) 87 (turbine 2)	79.8 (Power turbine) 79.7 (Compressor driving turbine)	65

으로 구성된 종합실증장치(Integral System Test : IST)를 현재는 미국의 샌디아 국립연구소, 놀스 원자력 연구소, 일본의 에너지연구소가 보유하고 있다. 이들은 초임계 CO₂ 발전시스템을 위해서 개발한 터보기기와 인쇄판형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger : PCHE)를 공통적으로 활용한다. 다만 샌디아 국립연구소는 차세대 원자력 발전소 적용을 생각하기 때문에 재압축(Recompressing) 사이클을 시험하고 있고, 놀스 원자력연구소는 경수로를 이용하는 추진 사이클로 고려하고 있기 때문에, 터빈이 2개인 단순복열(Simple recuperated) 사이클을 시험하고 있다. 일본은 터보기기 설계 및 제작의 한계로 압축비가 낮고 용량이 작으면서 레이아웃이 단순한 실험 시스템을 구축하여서 초임계 CO₂ 발전시스템 연구를 진행하였다⁽¹⁸⁻²⁰⁾. 지금까지 수행된 실험 결과에 따르면 다음과 같은 사실을 확인할 수 있다.

- (1) 초임계 CO₂ 발전시스템의 효율은 임계점 근처로 접근할수록 효율이 좋아지지만, 그렇다고 하여서 초임계

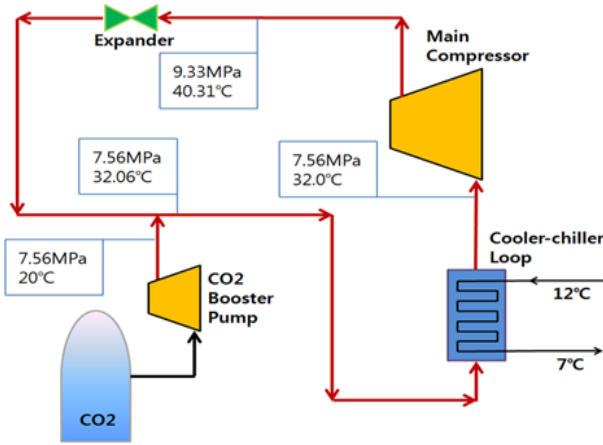


Fig. 10 한국과학기술원 시험장치 SCO₂ PE 개념도



Fig. 11 한국과학기술원 시험장치 SCO₂ PE 전경

CO₂ 발전시스템이 임계점 근처에서 매우 급격하게 운전조건이 변하거나 압축기가 임계점 근처에서 상변화가 발생하여도 터보기기의 성능이 급격히 저하되지는 않는다.

- (2) 소형 초임계 CO₂ 압축기-터빈 세트에서는 축방향 하중 (Thrust load)을 지지할 베어링 제작이 어려우며, 초임계 CO₂ 터보기기의 밀봉을 위한 씬 설계도 고려해야 할 사항이 많다.
- (3) 초임계 CO₂ 터보기기 내부가 고압으로 유지될 경우 로터에서 발생하는 마찰손실(windage loss)이 커서 압축기의 성능에 많은 영향을 주게 된다. 따라서 터보기기의 공동(Cavity)을 20기압 정도로 낮추어서 CO₂의 밀도를 낮게 하여 마찰손실을 최소화하여야 한다.
- (4) 샌디아 국립연구소와 같이 재압축 사이클을 구성하여 운전할 경우 초임계 CO₂ 압축기가 두 개이기 때문에 기동조건이 까다롭다. 그 이유는 압축기 두 개로 유량이 분기되어서 나가는 데 각각의 토출 압력이 서로 균형을 이루지 않으면 한 쪽 압축기 쪽에서 다른 쪽 압축기로 유동이 발생하는 경우가 발생하게 된다. 이에 대한 운전전략 수립이 재압축 사이클 기동에 중요한 부분을 차지한다.
- (5) 실험장치 전체의 운전이 안정적이기 위해서는 전체 실험 장치에 충전되는 CO₂의 양을 정밀하게 측정하고 조정해야 한다. 또한 실험 장치에서 감압을 급격하게 진행할 경우 배관과 배관을 이어주는 테플론 소재 같은 곳에 흡수되었던 CO₂가 빠져나오지 못하고 흡수되었던 지점에서 급격하게 팽창을 하여 배관 연결부를 파괴할 수도 있기 때문에 주의하여야 한다.
- (6) 열교환기는 설계사양의 조건을 대부분 만족하였으며, 고집적 열교환기인 PCHE의 성능과 운전성은 일단 실험실 스케일에서는 검증이 되었다.
- (7) 대부분의 발전시스템은 용량이 클수록 효율이 좋아지

게 되며, 초임계 CO₂ 발전시스템도 마찬가지이다. 즉 작은 용량의 초임계 CO₂ 발전시스템으로는 높은 효율을 검증하기는 어렵다. 하지만, 10 MW 이상의 대용량 초임계 CO₂ 발전시스템으로 실증할 경우에는 대부분의 상용 베어링과 씬 기술을 활용하고 터보기기의 효율을 감소시키는 인자들이 상대적으로 줄어들기 때문에 전체 발전시스템의 효율이 높아질 수 있다. 따라서 초임계 CO₂ 발전시스템의 높은 효율과 여러 장점들을 검증하기 위해서는 10 MW 이상의 실험설비가 필요하다.

3.2 국내현황

기존의 발전시스템의 효율은 고온부 기술인 터빈과 열원 기술에 크게 의존하지만, 초임계 CO₂ 발전시스템의 효율은 저온부인 압축기와 압축기 앞의 예냉각기 기술이 중요하다. 이런 이유로 한국과학기술원은 초임계 CO₂ 발전시스템 전부를 모사하는 대신 낮은 압력비를 가진 압축기와 셀엔튜브형 예냉각기로 실험을 할 수 있는 SCO₂PE 실험 장치를 제작하였다.⁽²¹⁾

이 실험 장치를 통하여 한국과학기술원에서는 해외연구에서 도출된 결론과 유사한 결론을 재확인할 수 있었다. 또한 CO₂의 다양한 상(기체, 액체, 초임계 등)에서 압축기 및 열교환기 거동을 확인함으로써 해서 초임계 CO₂ 발전시스템의 천이해석을 수행할 수 있는 실험자료 및 초임계 CO₂ 발전시스템의 핵심기기를 제작할 수 있는 핵심기술을 확보 중이다.

한국원자력연구원에서는 한국과학기술원과 포항공과대학교 함께 초임계 CO₂ 발전시스템 300 kW급 종합실증장치(S-CO₂ Integral Experiment Loop: SCIEL)를 구축하고 있는 중이다. 기존의 해외 종합실증장치와의 차이점은 높은 압력비를 목표로 하여 두 번에 걸친 압축 과정이 이루어지게 한 점이다. 브레이튼 사이클은 통상적으로 터빈 입구 온도뿐만 아니라 터빈의 팽창비 또는 압축기의 압축비에 의해서 효

Table 2 한국원자력 연구소 SCIEL 설계조건

Design Variable	Value
Maximum Pressure	20 MPa
T. I. T.	500 °C
Pressure Ratio	1.8 (LPC), 1.5 (HPC)
Compressor Efficiency	65 %
Heater Power	1,300 kW
CO ₂ Flowrate	4.8 kg/s
Turbine Efficiency	85 %
HTR & LTR Effectiveness	74 %, 54 %
Cycle Efficiency	19.6 %
LPT RPM	83,000 rpm
TAC RPM	100,000 rpm
LPC RPM	70,000 rpm

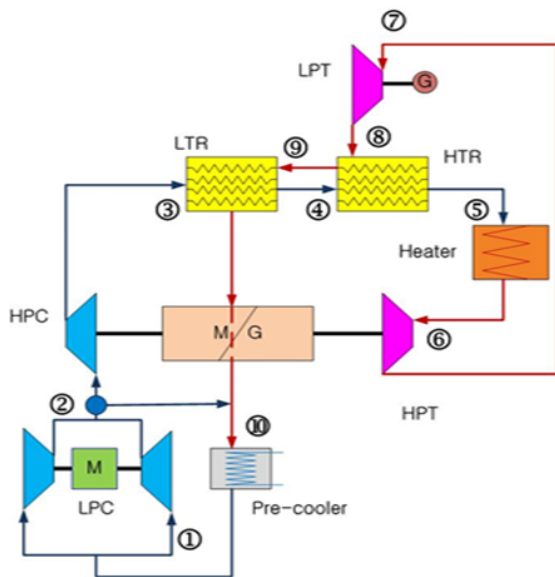


Fig. 12 한국원자력연구원 시험장치 SCIEL 개념도

율이 결정된다. 하지만 해외 종합 실험 장치에서는 높은 압력비를 달성하기 위한 압축기 제작이 기술적으로 어렵기 때문에 대부분 2 이하의 압축비로 설계되었다. 하지만 초임계 CO₂ 발전시스템은 압력비가 2.7 정도가 되어야 높은 효율을 보장할 수 있기 때문에 SCIEL에서는 이 높은 압력비를 달성하기 위한 2단 압축과정을 거치게 설계되었다. 터빈입구 온도는 차세대 원자로인 소듐냉각고속로 적용을 염두에 두고 500°C로 샌디아 국립연구소와 유사하게 하였으나, 사이클 레이아웃은 실험장치 운영이 용이한 단순복열 사이클로 정하였다.⁽²²⁾

한국원자력연구원의 종합실험장치가 가지는 큰 특징 중 하나는 기존 해외 실험 장치에서는 압축기와 터빈 임펠러에서의 압력분포 차이로 인해 발생하는 축방향 하중을 제어하

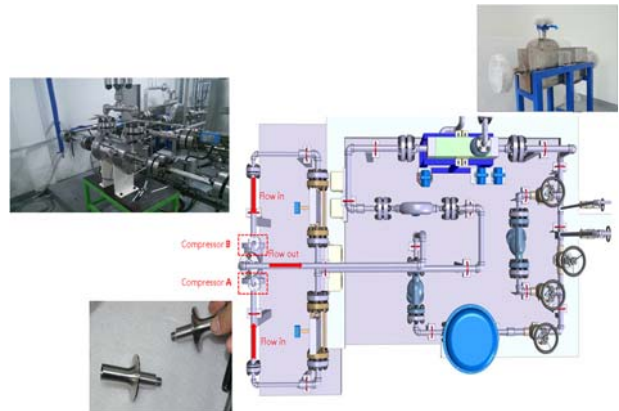


Fig. 13 한국원자력연구원 시험장치 SCIEL 압축기 시험부 전경

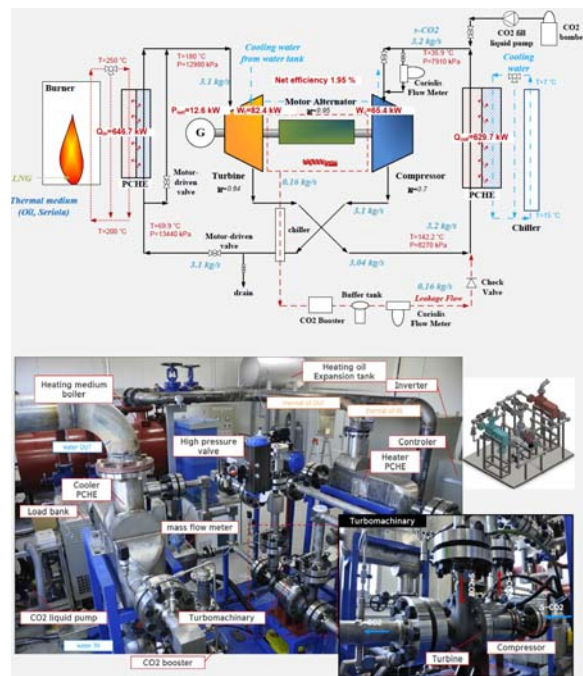


Fig. 14 한국에너지기술연구원 시험장치 전경

기 어려웠던 문제를 크게 두 가지 방법으로 극복하려고 한 부분이다. 하나는 압축기와 터빈을 다른 축으로 하고, 동일한 형태의 압축기 임펠러를 양쪽으로 설치하여 축방향 하중을 상쇄시켰다. 또한 기존의 해외에서 실험된 압축기 임펠러가 unshrouded 형태였다면, shrouded 형태를 채택하여 단일 임펠러 안에서도 shroud 내부와 외부의 압력분포를 적절히 조절하여 축방향 하중을 최소화하는 전략도 함께 채택하였다.

현재 한국원자력연구원의 종합실험장치는 압축기 성능실험을 위한 실험장치 구성이 끝난 상태이며, 임계점 이상에서 압축기 운전까지 마쳤다. 한국원자력연구원의 종합실험장치에서 사용되는 열교환기는 모두 PCHE로 해외의 종합실험장치와 유사한 열교환기를 사용하고 있다. 2014년까지는 저

압 터빈과 열원을 단계적으로 추가하여 전력을 생산하고, 2015년에는 고압 압축기 및 터빈까지 설치하여 종합실증장치를 완료하려고 한다.

한국에너지기술연구원에서는 저온열원에 적합한 초임계 CO₂ 발전시스템 개발을 위해서 한국원자력연구원 종합실증장치와 유사한 개념이 적용된 실험 장치를 구성 중이다. 실험장치 용량은 10kW급이며, 주요 특징으로는 레이아웃에 복열과정이 없고 터빈입구 온도가 200°C 이하라는 점이다.⁽²³⁾

4. 요약 및 결론

초임계 CO₂ 발전시스템은 기존 발전시스템에서 담당하지 못하였던 열원 온도에 적용 가능하고, 고효율이며, 발전시스템의 부피가 작아서 기존 증기발전시스템을 대체할 수 있는 차세대 발전시스템이다. 경수로 기반 원자력 발전소, 석탄화력 발전소, 가스복합화력 하부사이클 뿐만 아니라 고온 연료 전지, 태양열, 지열 등의 신재생 열원과 함께 소듐냉각 고속로, 핵융합로와 같은 차세대 원자로에도 적용이 가능하다.

전 세계적으로 다양한 나라에서 초임계 CO₂ 발전시스템 실험 장치를 만들어서 기술실증을 하고 있으며, 현재 국내에서도 대학교를 비롯하여 정부출연연구소 중심으로 활발히 연구가 진행 중이다. 하지만 실제로 초임계 CO₂ 발전시스템의 상용화를 위해서는 10MW 이상 규모의 실증설비가 필요하다. 해외에서는 현재 10MW급의 실증설비 제작에 대한 구상이 활발히 진행 중이며, 국내에서도 초임계 CO₂ 발전시스템 개발에서 뒤처지지 않기 위해서는 빠른 시일 내에 대용량 실증장치 개발에 착수하여야 할 것이다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government (MSIP).

References

- (1) E. G. Feher, The supercritical thermodynamic power cycle, the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1967.
- (2) V. Dostal, M. J. Driscoll, P. Hejzlar, A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors, MIT-ANP-TR-100, 2004.
- (3) 차재은, 김성오, 성승환, 어재혁, 이태호, 최석기, 한지웅, 배성원, 초임계 이산화탄소 Brayton Cycle 에너지 변환 계통 연구, KAERI/TR-3500/2007, 2007.
- (4) N. Kishihara, S. Kotate, T. Sakamoto, Studies of Supercritical CO₂ Gas Turbine Power Generation Fast Reactor, JAEA-Research 2008-040, 2008.
- (5) A. Moisseytsev, J. J. Scienicki, Performance Improvement Options for Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle, ANL-GenIV-103, 2007.
- (6) Y. Ahn, J. I. Lee, Study of Various Brayton Cycle Design for Small Modular Sodium-cooled Fast Reactor, Nuclear Engineering and Design, 2014.
- (7) H. J. Yoon, Y. Ahn, J. I. Lee, Y. Addad, Potential advantage of coupling supercritical CO₂ Brayton cycle to water cooled small and medium size reactor, Nuclear Engineering and Design, 2012.
- (8) J. Lee, J. I. Lee, H. J. Yoon, J. E. Cha, Supercritical Carbon Dioxide Turbomachinery Design for Water-Cooled Small Modular Reactor Application, Nuclear Engineering and Design, 2014.
- (9) S. Wright, T. M. Conboy, E. J. Parma, T. G. Lewis, G. A. Rochau, A. J. Suo-Anttila, Summary of the Sandia Supercritical CO₂ Development Program, Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, 2011.
- (10) S. Ishiyama, Y. Muto, Y. Kato, S. Nishio, T. Hayashi, Y. Nomoto, Study of steam, helium and supercritical CO₂ turbine power generations in prototype fusion power reactor, Progress in Nuclear Energy, 2008.
- (11) G. A. Johnson, M. W. McDowell, Supercritical CO₂ Cycle Development in Pratt & Whitney Rocketdyne, Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, 2011.
- (12) Y. L. Moullec, Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle, Energy, 2013.
- (13) T. J. Held, S. Hostler, J. D. Miller, B. F. Hume, Heat engine and heat to electricity systems and methods, US Patent US8096128, 2012.
- (14) M. A. Lehar, V. Michelassi, System and method for recovery of waste heat from dual heat sources, US Patent US0247570, 2013.
- (15) Z. Ma, C. S. Turchi, Advanced Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle Configurations for Use in Concentrating Solar Power Systems, Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, 2011.
- (16) S. J. Bae, J. I. Lee, Y. Ahn, J. Lee, Various Supercritical Carbon Dioxide Cycle Layouts for Molten Carbonate Fuel Cell Application, Journal of Power Sources, 2014.
- (17) A. S. Sabau, H. Yin, L. A. Qualls, J. McFarlane, Investigation of supercritical CO₂ Rankine Cycles for geothermal power plants, Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, 2011.
- (18) S. A. Wright, R. F. Radel, M. E. Vernon, G. E. Rochau, P. S. Pickard, Operation and Analysis of a Supercritical CO₂ Brayton Cycle, SANDIA2010-8840, 2010.

- (19) E. M. Climentoni, L. C. Timothy, C. P. Sprague, Start and Operation of a Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle, ASME Turbo Expo, 2013.
- (20) M. Utamura, H. Hasuike, K. Ogawa, T. Yamamoto, T. Fukushima, T. Watanabe, T. Himeno, Demonstration of Supercritical CO₂ Closed Regenerative Brayton Cycle in a Bench Scale Experiment, ASME Turbo Expo, 2012.
- (21) S. G. Kim, J. Lee, Y. Ahn, J. I. Lee, Y. Addad, B. Ko, CFD Investigation of a Centrifugal Compressor Derived from Pump Technology for Supercritical Carbon Dioxide as a Working Fluid, Supercritical Fluids, 2014
- (22) J. E. Cha, Y. Ahn, J. Lee, J. I. Lee, H. L. Choi, Installation of the Supercritical CO₂ Compressor Performance Test Loop as a First Phase of the SCIEL facility, Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, 2014.
- (23) Y. J. Baik, J. Cho, M. Kim, Current R&D Status of the Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle in KIER, 13th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2014.