

고온가스로형 원자로의 기술적 과제

서다현, 송창빈

현대청운고등학교 44017 울산광역시 동구 방어진순환도로 1077(서부동)0

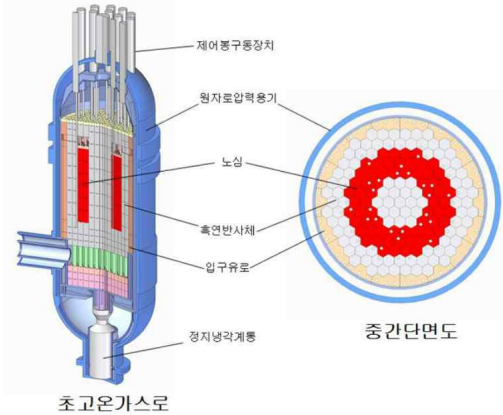
ABSTRACT: 고온가스로형 원자로(HTGR)는 고온의 열에너지를 이용해 전기 없이 수소를 생산하는 기술이다. 본 연구는 이 기술을 산업에 적용할 때의 주요 문제점을 분석하고, 이를 해결하기 위한 다양한 공학 분야의 융합 가능성을 탐구하였다.

서론 (Introduction)

수소는 연소 시 물만을 배출하는 청정에너지원으로, 탄소중립 사회 실현의 핵심으로 주목받고 있다. 또한, 수소는 다양한 원료와 기술을 바탕으로 생성될 수 있다. 이러한 친환경성을 지닌 수소는 수소전기차, 선박, 항공 등 차세대 운송수단의 핵심 동력원으로 주목받고 있다. 그러나 현재 수소의 대부분은 천연가스 개질을 통해 생산되어 이산화탄소가 발생한다. 이를 대체하기 위해 고온가스로형 원자로(HTGR)를 이용한 열화학적 수소생산 기술이 제안되고 있으며, 전기를 사용하지 않고 고온의 열에너지만으로 수소를 생산할 수 있다는 점에서 높은 잠재력을 가진다. 하지만 이 기술을 산업에 적용하기 위해서는 고온 부품의 내구성, 냉각 효율, 자동제어 안정성 등 여러 기술적 문제를 해결해야 한다. 따라서 본 연구는 HTGR 기반 수소생산 기술을 산업에 적용할 때 가장 시급한 기술적 과제가 무엇인지 분석하고, 이를 해결하기 위해 다른 분야의 기술과 어떤 융합이 가능한지를 탐구한다. 이를 통해 현재 기술의 한계를 구체적으로 파악하고, 개선 방향을 모색하는 것을 연구의 목표로 하며, 고온가스로형 원자로를 활용한 수소생산기술의 산업적 적용을 위해 필요한 기술을 탐구하기 위해 문헌 기반의 분석적 연구 방법을 사용했다. 국내외 주요 학술논문, 기술 보고서, 특허 자료 등을 중심으로 HTGR기술의 원리, 공정 구조, 그리고 수소 생산 효율 관련 데이터를 수집하고 분석했다.

재료 및 방법 (Materials and Methods)

1. HTGR(고온 가스형 원자로)



(그림1:초고온가스로형 원자로(VTGR)) HTGR은 핵분열 반응에서 발생한 고온의 열에너지를 비활성 기체인 헬륨 냉각재를 통해 외부로 안정적으로 전달하는 4세대 원자로이다. HTGR은 주로 원자로 본체, 연료 장전부, 냉각재 순환계, 제어봉 계통 등으로 구성되며, 약 700 °C 수준의 고온을 안정적으로 발생시킬 수 있다. 이 원자로는 TRISO(Tristructural-Isotropic) 라는 특수한 입자형 연료를 사용한다. TRISO 연료는 우라늄 핵연료를 여러 겹의 탄화규소(SiC) 및 탄소 피복층으로 감싸 제작되며, 1600 °C 이상의 고온에서도 구조적 안정성을 유지할 뿐만 아니라 방사성 물질의 누출을 극히 낮은 수준으로 억제할 수 있다. 이로 인해 HTGR은 기존 원자로보다 안전성이 매우 우수하다. 또한, HTGR에서는 흑연이 감속재로 사용된다. 흑연은 중성자의 속도를 효과적으로 낮춰 핵분열 반응이 지나치게 빠르게 진행되지 않도록 제어하며, 안정적인 연쇄 반응 유지에 중요한 역할을 한다. 냉각재로는 헬륨(He)이 사용되는데, 헬륨은 화학적으로 비활성이며 방사능 오염이 거의 없어, 반응기 내부의 열을 외부로 효율적이고 안전하게 전달하는 냉각 매개체 역할을 한다. HTGR와 S-I(황-요오드) 사이클이 결합된 수소생산 시스템은 850-950 °C의 고온에서 운전되며, 그 내부에는 황산(H₂SO₄), 요오드(I₂), 황산염(SO₂) 등 고부식성 화학종이 공존한다. 이러한 조건에서 구조재에 심각한 열응력과 부식, 변형이 일어나기 때문에 HTGR의 실용화를 위해서 고온 환경에 견딜 수 있는 신소재, 세라믹 코팅과 산화막, 내피, 모니터링 센서로 이루어진 내식 설계 기술들이 필요하다.

2. VHTR 열교환기용 니켈계 초합금의 내구성 한계

니켈계 초합금(Ni-based superalloy)은 1000 °C 이상의 고온에서도 높은 강도, 내산화성, 내식성, 피로 수명을 유지하는 재료로, 항공·에너지·원자력 분야에서 핵심적으로 사용된다. 이러한 합금은 특히 고온가스로의 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger, IHX) 구조재로 주목받고 있다. 대표적인 예로 Alloy 617(Ni-Cr-Co-Mo계

합금)은 탁월한 고온 강도와 크리프(고온에서 장시간 하중 작용 시 변형) 저항성을 가지고 있다. 이러한 특성 덕분에 VHTR의 900 °C급 운전 조건에서도 구조적 안정성을 확보할 수 있는 후보 소재로 연구되고 있다. 그러나 최근 연구에서는 장시간 고온 노출 시 연신을 감소와 파단 시간 단축이 보고되었다. 즉, Alloy 617은 초기에는 우수한 기계적 성질을 보이지만, 장기 운전 환경에서는 미세조직이 변형되어 연성(ductility)이 저하되고, 입계에서 균열이 빠르게 진행되는 한계를 가진다. 유사한 합금으로는 Hastelloy XR과 Haynes 230이 있다. Hastelloy XR은 산화 저항성과 가공성이 우수하여 제작상의 이점이 크고, Haynes 230은 Mo-W 첨가로 인한 높은 강도와 열적 안정성이 특징이다. 그러나 이들 합금 역시 헬륨 냉각 환경에서의 장기 내구성과 침탄(Carburization) 저항성이 충분히 확보되지 않아, VHTR용 구조재로 완전한 해결책이 되기 어렵다.

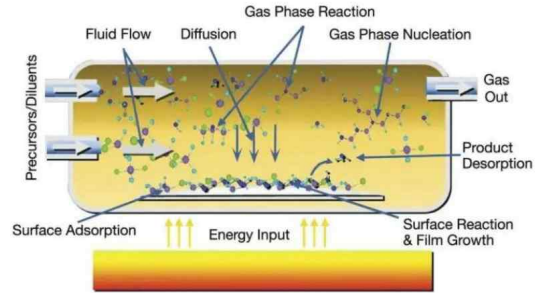


(그림2: 니켈계 초합금)열적 안정성과 내식성을 확보하기 위해서는 단일 재료의 내열성만으로는 불충분하다. 따라서 세라믹 코팅-산화막-내피(라이너)-모니터링 센서로 이어지는 다층 방호 체계를 갖춘 종합적인 내식 설계가 필수적이다.

3. 표면 보호층: CVD/세라믹 코팅 기술

니켈계 초합금의 고온 내구성을 향상시키기 위한 가장 대표적인 방법 중 하나는 세라믹 코팅층을 이용한 표면 보호 기술이다. 이 기술은 CVD(Chemical Vapor Deposition)나 PVD(Physical Vapor Deposition) 공정을 통해 금속 표면에 치밀한 세라믹층을 형성함으로써, 금속 기판이 부식성 화학종과 직접 반응하는 것을 방지한다. 이를 통해 산화, 황화, 요오드화 등의 반응이 크게 억제되며, 장기 운전 환경에서도 금속의 성능을 안정적으로 유지할 수 있다. 대표적인 코팅 재료는 SiC(실리콘 카바이드)와 Al₂O₃(알루미나)로, 각각 탁월한 내열성과 내화학성을 가진다. 코팅 과정은 표면 전처리, 접착층 형성, 세라믹 증착, 후열처리의 순서로 진행된다. 먼저 금속 기판을 연마, 세정, 건조하여 불순물과 수분을 완전히 제거하고, 열팽창계수 차이를 완화하기 위해 Ni계 얇은 박막 접착층을 형성한다. 이후 900-1300°C의 고온에서 SiC 코팅(두께 10-150 μm) 또는 700-1100°C에서 Al₂O₃ 코팅(두께 1-20 μm)을 증착한다. 마지막으로 후열처리(annealing)를 실시해 코팅 응력을 완화하고, 코팅층과 기판 사이의 결합력을 높인다. 형성된 코팅층의 품질은 균열, 박리, 조성 균일성, 그리고 열사이클 내구성(1000회 이상)을 기준으로 평가된다. 접착력은 25 MPa 이상이 이상적이며, 미세균열이 발생하면 화학종 침투로 급격한 열화가 일어날 수 있다. 따라서 주기적으로 광학 및 전자현미경 검사를 수행해 결함을 조기 탐지하고, 이상이 발견되면 국부 보수나 모듈 교체를 통해 내구성을 유지한다. 이러한 세라믹 코팅 기술은 고온 헬륨 환경에서 금속 재료의 안정성을 보장하는 핵심적인 1차 방어층으로

기능한다.



(그림4: CVD/세라믹 코팅 기술) 4. 고온 알루미나(Al₂O₃) 보호층 형성

세라믹 코팅과 함께, 금속 기판 자체에 안정적인 산화막을 형성하는 방법도 중요한 내열·내식성 향상 기술로 활용된다. 특히 알루미나(Al₂O₃) 보호층은 고온·고부식 환경에서 뛰어난 화학적 안정성을 보여준다. 이 방법은 Ni 기반 합금에 소량의 Al을 첨가하거나 표면에 알루미늄 도금을 실시한 후, 제어된 산화 분위기에서 가열함으로써 자연적으로 치밀한 Al₂O₃ 스케일을 형성하는 원리를 이용한다. 형성된 알루미나층은 황산, 요오드, 산소 등의 화학종에 대해 매우 안정하며, 외부로부터의 산소나 황의 확산을 효과적으로 차단해 내부 금속의 부식을 억제한다. 보호층의 두께는 일반적으로 1-5 μm 수준이 가장 이상적이다. 너무 얇으면 보호 효과가 부족하고, 너무 두꺼우면 열응력으로 인해 박리가 발생할 위험이 있기 때문이다. 시운전 단계에서는 일정한 온도와 산소 농도를 유지하며 베이킹(baking) 처리를 통해 보호층을 안정화시키고, 이후 정기 점검 시 주사전자현미경(SEM)과 에너지 분산 분광분석(EDS)을 이용해 연속성과 조성을 분석한다. 만약 균열이나 박리가 발견되면 냉각 및 국부 보수를 실시하거나, 심할 경우 내부 라이너를 교체한다. 이러한 자연 형성형 보호층은 별도의 두꺼운 코팅 없이도 재료 내부에서 자가 안정화를 이루기 때문에, 장기 신뢰성과 유지보수 측면에서 매우 유리하다.

5. 교체 가능한 내피(라이너)-카트리지 구조 설계

고온·부식 환경에서 금속 부품의 장기 내구성을 확보하기 위해, 구조적 보호층 역할을 하는 교체 가능한 세라믹 내피(라이너) 또는 카트리지형 구조 설계가 적용된다. 이 방식은 화학 반응기나 열교환기 내부 벽면에 세라믹 라이너를 설치하여, 부식성 화학종이 직접 금속 표면과 접촉하는 것을 원천적으로 차단한다. 또한, 손상 시 전체 장비를 해체하지 않고도 모듈 단위로 신속히 교체할 수 있도록 설계되어 운전 효율과 유지보수성을 크게 향상시킨다. 교체성 측면에서는 라이너를 카트리지형 모듈로 제작하여, 보통 50-200 kg 단위로 설계함으로써 현장 크레인이나 간단한 장비로도 손쉽게 교체할 수 있다. 라이너 접합부나 열응력이 집중되는 부위에는 점검 포트를 설치하여, 운전 중에도 균열, 박리, 열응력 상태를 확인할 수 있다. 교체 주기는 가속부식 시험 결과와 운전 조건을 바탕으로 1~3년 단위로 설정되며, 필요 시 교체·보수가 용이하도록 설계된다. 또한, 고온에서 기체 누출을 방지하기 위해 SiC 기반 가스켓이나 내열 금속 가스켓을 사용하고, 구조적 안정성을 위해 금속 클램프로 체결한다. 일부 시스템에서는 열팽창 차이에 따른 변형을 흡수하기 위해 유연한 스프링 클램프나 인터레이어(완충층)를 적용하기도 한다. 이러한 설계는 장기 운전 시 부식, 열충격, 침식 등의 손상 위험을 최소화하면서도, 시스템 가동률을 극대화할 수

6. HTGR-S-I 수소 생산 시스템의 AI 기반 지능형 모니터링 및 유지보수
고온가스로(HTGR)-S-I 수소 생산 시스템은 850-950 °C의 극한 온도와 부식성 화학물(H_2SO_4 , I_2 등)이 공존하는 환경에서 운전되므로, 장비 내구성과 안정성을 확보하기 위한 지능형 모니터링 기술이 필수적이다. 최근에는 기존 감시·경보 시스템을 넘어, AI(인공지능) 기반 예측적 유지보수(Predictive Maintenance) 체계가 주목받고 있다. AI 모니터링은 전기저항, 임피던스, 적외선, 초음파 센서 등에서 온도, 압력, 열유속, 냉각재 흐름 데이터를 실시간으로 수집하고, 이를 학습해 정상·이상 상태를 구분하며 미세한 부식이나 균열 신호를 조기에 탐지한다. AI는 과거 운전 데이터와 실시간 센서 정보를 바탕으로 열·응력 분포를 예측하고, 온도 구배가 큰 HTGR-S-I 공정에서 국부 과열이나 응력 집중 구간을 사전에 경고한다. 나아가 헬륨 유량 조절이나 반응 온도 변경과 같은 자율 제어를 수행해 시스템을 안정화하며, 정비 시점도 최적화한다. 이러한 예측 기능은 디지털 트윈(Digital Twin)과 결합할 때 더욱 강력해져, 실제 운전 전에 다양한 시나리오를 시험하고 잠재 문제를 사전에 확인할 수 있다. 고온·부식 환경에서 손상 부품의 유지보수는 퍼지 → 냉각 → 교체 → 재밀봉 → 재가동 절차로 진행된다. 퍼지 단계에서는 헬륨이나 질소 등 불활성 기체를 주입해 내부를 청정화하고, 냉각 단계에서는 온도를 서서히 낮춰 열충격을 방지한다. 이후 손상된 내피(라이너)나 카트리지를 교체하고 필요 시 세라믹 코팅을 재도포하며, 재밀봉 단계에서 기밀성을 확보한 뒤 재가동 단계에서 정상 운전 조건으로 복귀한다. 이러한 체계적 절차와 AI 기반 모니터링은 HTGR-S-I 시스템의 안전한 유지보수와 장기 안정 운영을 보장한다.

2문장이 이상적)이 포함된 캡션을 형식에 따라 작성해야 합니다. (예: "그림 1. 그림에 대한 캡션.") 모든 그림은 순차적으로 참조하고 아라비아 숫자로 순서를 지정해야 합니다. 캡션은 그 자체로 이해할 수 있어야 합니다. 가능하면 캡션이 아닌 그림 안에 기호 설명을 포함하세요. 템플릿에 그림을 삽입할 때는 그림의 크기가 적절한지 확인한 후 그림 캡션 앞에 붙여넣어야 합니다.

(식) : 각각 식마다 오른쪽 정렬로 (1), (2), ... 순서로 레이블을 해주어야 합니다.

[표]: 각 표에는 내용을 설명하는 간단한 제목(한 구절 또는 문장)이 있어야 합니다. 제목은 "표 1. 표 제목" 형식을 따라야 합니다. 제목은 본문을 참조하지 않고도 이해할 수 있어야 합니다. 세부사항은 제목이 아닌 각주에 넣습니다.

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

본 연구에서는 HTGR 기반 S-I 수소 생산 시스템의 산업적 적용을 위해 요구되는 핵심 기술과 해결 과제를 분석하였다. 고온가스로에서 발생하는 700-950 °C의 고온 열과 부식성 화학물 환경은 금속 구조재의 장기 내구성과 안전 운전에 큰 제약을 주며, 단일 재료만으로는 이러한 환경을 견디기 어렵다는 사실이 확인되었다. 따라서 니켈계 초합금의 특성을 보완하기 위해 세라믹 코팅, 알루미늄 산화막, 교체

가능한 내피(라이너), 모니터링 센서를 포함한 다층 방호 설계가 필수적임을 알 수 있었다. 특히, CVD/PVD 세라믹 코팅과 알루미늄은 금속 표면의 부식과 산화로부터 1차 방어를 제공하고, 모듈화된 내피·카트리지 구조는 장기 운전 시 손상 부품을 신속히 교체할 수 있는 유지보수성을 확보한다. 여기에 AI 기반 지능형 모니터링과 디지털 트윈 기술을 결합하면, 실시간 데이터 분석을 통해 국부 과열, 균열, 부식 등의 초기 징후를 조기에 탐지하고, 자율 제어 및 최적화된 정비를 수행할 수 있다. 이를 통해 퍼지 → 냉각 → 교체 → 재밀봉 → 재가동으로 이어지는 정비 절차가 보다 안전하고 효율적으로 수행될 수 있다. 결론적으로, HTGR-S-I 수소 생산 시스템의 실용화와 장기 안정 운영을 위해서는 고온 내구성 재료, 다층 내식 설계, AI 기반 예측 유지보수의 통합적 접근이 필수적이며, 이러한 기술 융합이 확보될 때 수소 생산의 안전성과 효율성을 동시에 달성할 수 있다. 토의 및 결론은 실험 결과 및 문헌에 근거를 두고 도출되어야 합니다. 원리와 연관성, 그리고 일반화를 제시할 수 있습니다. 이때, 결과와 해석이 이전에 언급된 것과 부합하는 것을 보일 수 있습니다. 미 해결점 역시 함께 언급되어야 합니다.

REFERENCES

실험 계획법 및 열역학 계산법을 이용한 초고온가스로용 니켈계 초합금 설계 방법론-본 연구는 고온가스로형 원자로를 활용한 수소생산기술의 산업적 적용을 위해 필요한 기술을 탐구하기 위해 문헌 기반의 분석적 연구 방법을 사용하였다. 국내외 주요 학술논문, 기술보고서, 특허 자료 등을 중심으로 HTGR기술의 원리, 공정 구조, 그리고 수소생산 효율 관련 데이터를 수집하고 분석하였다.

고온가스로형 원자로(HTGR)는 약 700°C, 초고온가스로형 원자로(VHTR)는 950°C 이상의 열을 제공하며, 열화학적 수소 생산에 적합하다. 그러나 이러한 초고온 환경은 구조재에 심각한 열응력과 부식, 변형을 일으킨다. 그리하여 HTGR의 실용화를 위해서는 고온 환경에 견딜 수 있는 신소재 분야에서 바라보았다.

니켈계 초합금은 1000°C 이상의 고온에서도 높은 강도와 내산화성, 내식성, 피로 수명을 유지한다. 대표적인 예로 Al-loy 617은 Ni-Cr-Co-Mo계 합금으로, VHTR의 중간열교환기 구조재 후보로 연구되고 있다. 이 소재는 고온 강도와 크리프 저항성이 우수하지만, 장시간 노출 시 연신율이 낮아지고 파단 시간이 짧아지는 한계가 보고되었다. 유사한 합금인 Hastelloy XR과 Haynes 230도 각각 산화 저항성과 제작성에서는 우수하지만, 헬륨 환경에서의 장기 내구성과 침탄 저항성 측면에서는 완전하지 않다. 한계를 해결하는데에 가능성이 있는 기술들을 알아보았다.

세라믹 기반 열차폐 코팅 기술을 활용하면 표면의 온도를 낮추어 열응력과 크리프 변형을 줄일 수 있다. 복합소재화 접근을 통해 다른 물질과 결합한다면 이를 향상시킬 수 있다.

본 고온가스로형 원자로 900°C 이상의 초고온 열을 이용해 수소를 생산하는 시스템으로, 반응기 내부의 온도, 압력, 유량 등의 변동이 공정 효율과 안전성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 수소 생산 효율을



유지하고 사고를 예방하기 위해서는 정밀한 실시간 제어와 예측 기반 유지관리 기술이 필수적이다. 이를 컴퓨터공학과 인공지능(AI)측면에서 바로보았다.

AI 제어 시스템은 센서 네트워크로부터 온도, 압력, 열유속, 냉각재 흐름 등의 데이터를 실시간으로 수집하고, 이를 기반으로 이상 상태를 조기에 감지한다. 딥러닝 기반 예측 모델을 이용해 과거 운전 데이터를 학습해 온도 분포, 열응력, 크리프 누적 정도 등을 미리 계산함으로써, 구조 손상이나 냉각 불균형을 사전에 방지할 수 있다.

2문장이 이상적)이 포함된 캡션을 형식에 따라 작성해야 합니다. (예: "그림 1. 그림에 대한 캡션.") 모든 그림은 순차적으로 참조하고 아라비아 숫자로 순서를 지정해야 합니다. 캡션은 그 자체로 이해할 수 있어야 합니다. 가능하면 캡션이 아닌 그림 안에 기호 설명을 포함하세요. 템플릿에 그림을 삽입할 때는 그림의 크기가 적절한지 확인한 후 그림 캡션 앞에 붙여넣어야 합니다.

(식) : 각각 식마다 오른쪽 정렬로 (1), (2), ... 순서로 레이블을 해주어야합니다.

[표]: 각 표에는 내용을 설명하는 간단한 제목(한 구절)
한국부식방식학회

원자단위적 고찰을 통한 적층제조된 Ni기 초내열
합금의 크리프 특성 향상 메커니즘

Embodied AI를 위한 LangGraph 기반 계획-도구
통합 제어 시스템- 대한전기학회 학술대회 논문집

LSTM-DQN과 Modbus TCP를 활용한 분산형 AI
기반 실내 온도제어시스템

마찰교반프로세스를 이용한 금속기 복합소재 제조
및 특성- 대한용접 접합학회지

열차폐코팅시스템에서 탑코팅의 물성 및 기공이
내부 열응력 발생에 미치는 영향

F급 가스터빈 1단 Bucket 열차폐 코팅 탈락에
따른 영향 연구