

미래형원전 핵심기기용 구조재료 연구

미래형원전은 2030년 이후 본격적인 상업화를 목표로 우리나라를 포함한 세계 각국이 경쟁적으로 개발하고 있는 원자로이다. 이 글에서는 우리나라가 중점 추진하는 미래형원전인 소듐냉각고속로(SFR) 및 초고온가스로(VHTR)의 운전특성과 핵심기기에 사용될 후보재료를 소개하고 이와 관련하여 국내에서 수행 중인 연구 현황을 소개하였다.

장창희 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과, 부교수

e-mail : chjang@kaist.ac.kr

머리말

통칭 미래형원전은 기존의 상업용 원자로 대비 안전성, 핵확산 저항성, 경제성, 그리고 지속가능성이 크게 개선된 제4세대원전(Generation-IV Reactor)을 지칭한다. 우리나라를 포함한 원전선진국이 주축이 된 Gen-IV 국제포럼(GIF)은 2002년에 이들 미래형원전의 기술경로도(Technology Road map) 보고서를 발간하고 노형에 따라 2020~2030년 정도에 실증가능할 것으로 전망하였다. 미래형원전 가운데 우리나라는 소듐냉각고속로(SFR) 및 초고온가스로(VHTR) 개발에 일차적인 관심을 표명하고 원자력연구원을 중심으로 관련 국제공동연구에 적극 참여하고 있다. 아울러 우리 정부가 2008년 말 확정된 '미래원자력시스템 개발의 장기추진계획'에는 2020년대 초반에 초고온가스로 실증로, 2020년대 후반에는 소듐냉각고속로 실증로의 건설을 목표로 한 로드맵의 제시되어 있다.

기존 상업용 원전에 비해 미래형원전들이 가지는 공통적인 특징은 가동온도가 경수로의 320℃에 비해 매우 높다는 것이다. 따라서 기존 경수로에 사용되는 재료와는 매우 다른 재료들이 사용될 것으로 예상되며 가혹한 원전 운전조건에서 이들 재료들의 거동 및 장기전선성이 미래형원전 개발의 핵심 이슈로 거론되고 있다. 이 글에서는 미래형원전인 소듐냉각고속로 및 초고온가스로의 주요기기를 이루는 구조재료들과 관련

된 기술적인 이슈 및 국내외 연구 현황을 살펴보고 향후 연구개발 방향을 제시하고자 하였다.

미래형 원전의 설계 및 운전 특성

소듐냉각고속로

그림 1에는 소듐냉각고속로의 개략도가 나타나 있다. 냉각재로 사용되는 소듐(Na)은 녹는점이 98℃, 끓는점이 883℃이므로 운전조건인 550℃에서는 액체 상태로 존재한다. 따라서 액체소듐이 흐르는 1차 및 중간루프는 대기압조건에서 운전되어 원자로용기 및 배관 등 주요기기의 두께가 상대적으로 얇게 제작될 수 있다. 또한 그림 1에서와 같이 중간 소듐루프를 두어 방사성을 띄는 1차측 소듐을 증기시스템과 분리하여 안전

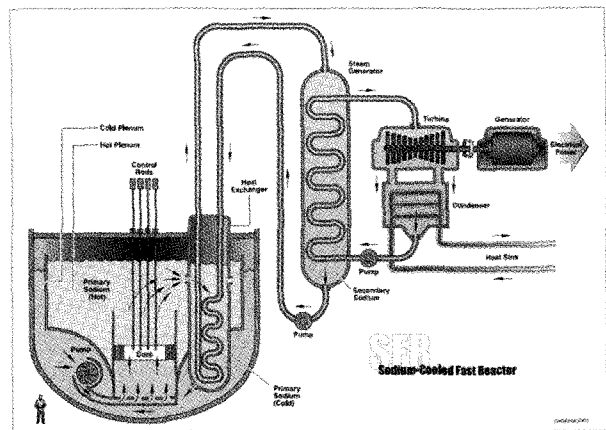


그림 1 소듐냉각고속로의 개략도

성을 도모하였다. 다른 미래형원전에 비해 소듐냉각고속로는 여러 가지 장점을 가지고 있다. 즉, 기술적으로 매우 성숙되었다는 것 이외에도 원자로심의 출력밀도가 높아 매우 집적된 노심에서 높은 열출력을 얻을 수 있으면서도 내재적인 안전성이 우수하다는 점이다. 핵연료 주기 측면에서는 고속중성자 반응을 이용하여 핵분열의 결과로 발생하는 장반감기 핵분열생성물을 제거하는 동시에 핵연료 물질의 증식을 통한 우라늄 자원의 활용도를 극대화할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 소듐이 가지는 산소 및 습기에 대한 높은 반응성을 제어하는 것이 숙제이다. 최근에는 소듐의 폭발안전성을 제고하기 위해 액체소듐-증기 열교환기에 이중세관을 적용한다든지 증기시스템 대신 초임계-이산화탄소시스템을 도입하는 방안들이 국내외적으로 검토되고 있다.

초고온가스로

그림 2에는 초고온가스로의 개략도가 나타나 있다. 초고온가스로에서는 높은 계통온도를 얻기 위해 헬륨기체를 냉각재로 사용하고 있다. 시스템의 열전달 성능을 높이기 위해 5~9MPa 정도로 가압된 헬륨냉각재가 노심을 통과하면서 최대 1,000℃까지 가열되는 것으로 생각되고 있다. 초고온가스로는 소듐냉각고속로와 달리 저농축우라늄 핵연료와 열중성자간의 핵분열 연쇄반응을 이용한다. 따라서 핵분열에 의해 발생하는 고속중성자를 열중성자로 감속하여 핵분열 연쇄반응을 유지하기 위해 원자로심에 감속재로서 흑연을 대량으로 사용하여야 하므로 열출력 밀도를 높게 유지해야 하는 단점이 있다. 그러나 초고온가스로의 노심을 구성하는 흑연이 가지는 높은 전도도 등으로 인해 높은 내재적인 안전성을 가지게 된다. 아울러 재료문제를 제외하고는 헬륨냉각재의 온도를 제한하는 요인이 크게 제한받지 않으므로 냉각재온도를 최대 1,000℃까지 올릴 수 있어 시스템 효율을 50% 이상으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

미래형 원전을 위한 재료연구

페리틱-마르텐시틱강 관련 연구

소듐냉각고속로의 전형적인 운전온도인 약 550℃에서는 통상 9~12% 정도의 크롬이 함유된 페리틱-

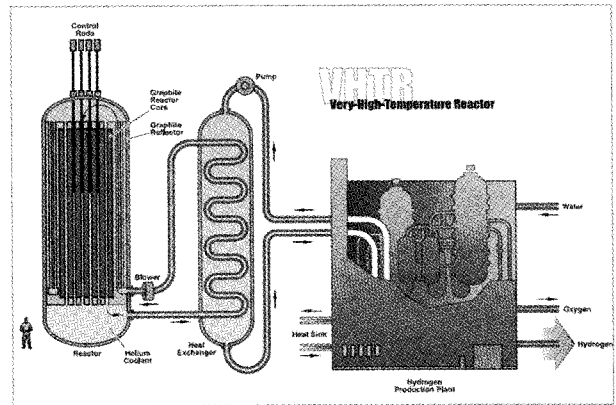


그림 2 초고온가스로의 개략도

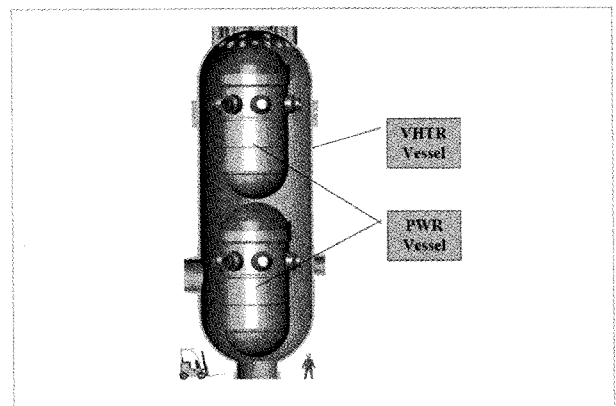


그림 3 경수로와 초고온가스로의 원자로 압력용기 크기 비교

마르텐시틱(FMS)강이나 스테인리스강이 적절한 크리프 강도를 가지는 것으로 보고되고 있다. 두 종류의 재료를 비교해 보면 크리프 강도 이외에 강도 측면에서는 FMS강이 우수하고, 스테인리스강은 부식이나 중성자 조사취화 측면에서는 좋은 특성을 보이고 있으나 중성자조사로 인한 팽윤(swelling)에 매우 취약한 것으로 알려져 있다. 따라서 원자로용기, 중간열교환기 등 대부분의 소듐냉각고속로 주요기기는 FMS강으로 제작될 것으로 예상되고 있어 이들 합금의 제작성 및 용접성에 대한 평가와 장기간 크리프 강도 및 크리프-피로수명 예측이 매우 중요하다. 국내에서는 원자력연구원을 중심으로 소듐냉각고속로 주요기기의 고온구조설계 방법론 개발을 위한 실험 및 해석연구, 그리고 9Cr-1Mo강 모재 및 용접부의 크리프수명평가를 위한 실험연구가 수행 중이다.

현재 대부분의 초고온가스로는 열차폐 및 냉각을 통해 원자로용기의 온도를 낮게 유지하는 cooled-vessel 개념을 설계에 도입함으로써 기존의 경수로에

사용되고 있는 저합금강을 사용하려고 하고 있다. 그러나 그림 3에서 보듯이 현재 거론되고 있는 고온가스로 (HTGR) 혹은 초고온가스로의 경우 기존 경수로에 비해 원자로용기의 크기가 두 배 이상이 될 것으로 예상된다. 따라서 FMS강과 같은 고강도재료를 사용함으로써 무게를 줄이는 방안이 제시되고 있다. 이 경우 FMS강의 용접 그리고 모재 및 용접부의 중성자조사취화에 저항성을 평가하여야 한다.

초고온가스로 중간열교환기용 니켈기 초합금

헬륨가스를 냉각재로 사용하는 고온가스로 혹은 초고온가스로는 800℃ 이상의 높은 운전온도로 인해 사용할 수 있는 구조재료들의 선택의 폭이 넓지 않다. 표 1에는 초고온가스로의 각종 핵심기기에 사용될 수 있는 구조재료의 목록이 제시되어 있다. 표에서 가장 고

온에 노출되는 헬륨냉각재의 중간열교환기(IHX) 및 고온가스관에는 고온산화와 고온크리프 특성이 우수한 니켈기 초합금(Ni-base superalloy) 이외에는 별 다른 대안이 없는 실정이다. 현재 ASME에서는 Inconel 617(Alloy 617)에 대한 draft code case를 1989년에 발간한 바 있으며 현재 이를 바탕으로 ASME 정식 코드에 등재하려는 노력이 Gen-IV 국제공동연구로 진행되고 있다. Haynes 230의 경우 프랑스에서 다소 높은 관심을 보이고 있으며 역시 ASME 코드 등재를 위한 노력이 Gen-IV 국제공동연구로 진행 중에 있으며 국내에서는 원자력연구원이 이에 참여하고 있다.

초고온가스로에 사용될 중간열교환기 형태는 헬륨냉각재의 열교환 성능을 향상시키기 위해 수 mm 크기의 미세 채널을 형태가 될 것으로 예상되고 있다. 이 경우 냉각 채널의 벽 두께도 mm 정도로 얇아질 것으로 예상되어 초고온가스로 운전조건에서 산화로 인한 두께 감소 및 크리프 변형이 주요 문제로 제시되고 있다. 이들 손상이 장기간 누적되는 경우 구조건전성에 장애가 발생하여 초고온가스로의 안전성 및 운전성 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 이들 손상기구에 대한 정확한 평가 및 수명예측이 초고온가스로의 설계 및 건설에 앞서 수행되어야 하며 국내에서도 원자력연구원과 KAIST에서 관련 연구들이 수행되고 있다.

표 1 초고온가스로의 주요 기기별 후보재료 비교

기기	후보재료	분류	최대사용 온도(℃)	비고
원자로용기	SA533	저합금강	380	경수로 원자로압력 용기
	Mod.9Cr-MoW	패러탁-마텐시틱 강(FMS)	580	비 원자력
증기발생기	2¼Cr-1Mo	패러탁강	500	비 원자력
	12Cr-1Mo-V (HT-9)	패러탁-마텐시틱 강(FMS)	550	비 원자력
He/He 중간열 교환기 및 고온 가스관	Alloy 800 (32Ni-20Cr)	Ni-Cr-Fe 합금강	850	중수로 증기발생기 세관
	Hastelloy X (22Cr-18Fe-9Mo)	니켈기 초합금	900	항공산업, 실험용 HTTR
재어봉	IN 617 (22Cr-9Mo-12Co)	니켈기 초합금	950	항공산업, 화학공장
	Haynes 230 (22Cr-14W)	니켈기 초합금	950	항공산업, 화학공장
재어봉	Alloy 800H	Ni-Cr-Fe 합금강	850	
	C/C Composite	복합재료	1000	

초고온가스로 중간열교환기용 니켈기 초합금의 고온산화

초고온가스로 헬륨냉각재에는 수~수십 ppm 정도의 불순물가스(H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O...)가 포함될 것으로 예상되며 온도 및 불순물의 조성에 따라 니켈기 초합금에서는 산화(oxidizing), 탈탄(decarburizing), 침탄(carburizing) 등과 같은 고온산화현상이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 다양한 조건에서의 고온산화 거동을 평가하기 위해 불순물을 제어하여 초고온가스로 환경을 모사할 수 있는 헬륨루프를 KAIST에 제작하여 실험에 사용하고 있다. 그림 4에서 보듯이 전체

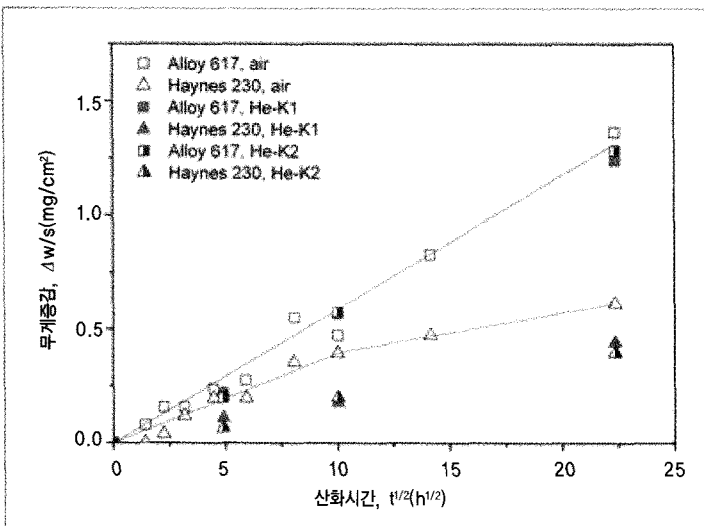


그림 4 환경에 따른 Alloy 617의 고온산화 거동 비교

적으로 Haynes 230이 Alloy 617에 비해 산화저항성이 우수한 것으로 평가 되었으며 이는 미세구조 분석 및 산화기구 분석을 통해서도 확인되었다. 이들 재료의 고온산화 저항성에는 소량 합금원소의 영향이 큰 것으로 나타났으며 특히 Haynes 230에 0.5% 정도 포함된 Mn이 안정적인 외부 보호피막 형성에 크게 기여하는 것으로 확인되었다.

그림 5에는 고온대기 조건에서 산화된 Alloy 617 시험편의 단면을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 표면의 크롬산화막 아래 내부 산화물이 길게 생성되어 있으며 그 아래에는 입계탄화물이 사라진 carbide free zone이 형성되어 있다. 이는 표면에 형성되는 크롬산화막이 산소의 확산을 충분히 막아주지 못한다는 것을 보여주는 것이다. 또한 미량의 산소 및 습분(약 1ppm 정도)이 포함된 순수 헬륨조건에서도 그림 5와 유사한 산화 단면이 관찰되었다. 반면 진공조건에서 수행된 산화시험에서는 표면산화막이 거의 형성되지 않았으며 내부 산화물이나 carbide free zone 이 관찰되지 않아 내부 구조의 변화가 산화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

환경에 따른 니켈기 초합금의 크리프 특성

환경에 따른 니켈기 초합금의 크리프 수명 변화는 그림 6에 잘 나타나 있다. 고온대기 조건의 경우 환경의 산소반응도가 높아 상대적으로 치밀한 표면산화막이 형성되고 고온헬륨 조건의 경우 상대적으로 낮은 산소반응도로 인해 표면산화막의 안정성 및 치밀도가 떨어지게 되어 내부산화물 및 carbide free zone 이 깊어 생성된다. 즉, 산화막의 구조적 차이로 인해 고온대기 조건에 비해 고온헬륨 조건에서 Alloy 617의 크리프 수명이 감소되는 것으로 평가되었다. 이와 같이 초고온가스로 환경 및 표면산화막의 특성에 따라 니켈기 초내열합금의 크리프 특성이 크게 영향을 받게 되므로 최적의 초고온가스로 환경을 결정하기 위한 연구가 국내외적으로 수행되고 있다.

원자력수소와 관련된 니켈기 초합금 연구

열화학공정의 일종인 IS 공정(Iodine-Sulfur Process)은 초고온가스로에서 발생하는 고온열을 이용

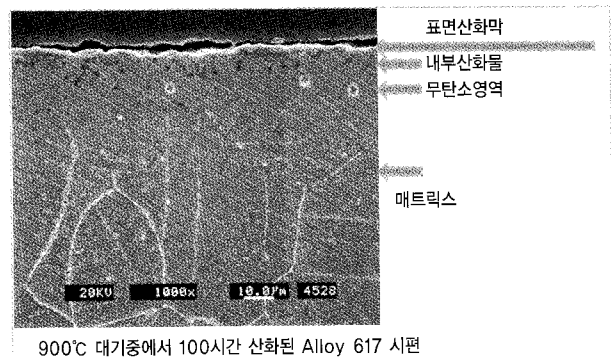


그림 5 고온 대기에 노출된 후보합금의 미세조직 변화

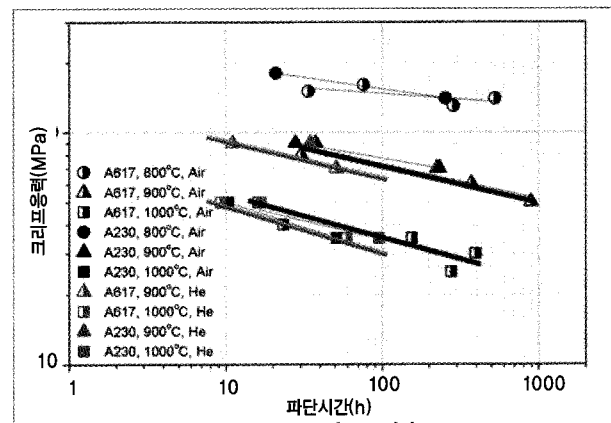


그림 6 환경에 따른 니켈기 초합금의 크리프 특성 비교

하여 물을 분해하여 수소와 산소를 만드는 방법이다. 그러나 IS 공정에는 유독성이면서 부식성이 극심한 황산 및 요오드산이 사용되어 이들에 의한 열교환기 및 배관의 부식이 심각한 문제이며 이에 대한 연구가 일부 원자력연구원에서 수행되었다. 이외에도 KAIST에서는 원자력수소 생산 방법의 하나인 고온증기전기분해 (HTSE) 조건에서 니켈기 합금에 대한 산화시험을 수행하고 있다. 고온증기전기분해 시스템의 고온증기에는 수십 %의 수소가 포함된 상태에서 운전될 것으로 예상되어 환원성분위기로 인해 고온산화 문제가 저감될 것으로 예상하고 있으나 증기 및 수소가스로 인해 불안정한 산화막이 생성될 우려가 있어 이에 대한 정확한 평가가 필요하다.

맺음말

미래원전의 공통적인 특징은 기존 경수로에 비해 고온에서 운전된다는 점이며 노형에 따라 다양한 냉

각재가 사용되므로 성공적인 재료기술의 개발 및 확보가 미래형원전의 성패를 좌우하는 중요한 요소로 인식되고 있다. 이 글에서는 여러 가지 재료 관련 연구 가운데 압력용기 재료인 FMS강, 초고온가스로의 중간열교환기 재료인 니켈기 초내열합금의 고온산화 및 크리프와 관련된 연구를 중심으로 소개하였다. 소듐냉각고속로 및 초고온가스소에 사용되는 구조재료의 고온 기계적 특성과 환경과의 상관관계를 밝히는 것이 미래형원전의 핵심기공의 건전성과 안전성을 확보하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 생각된다.

참고자료

1. Generation IV International Forum, A technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF-002-00, Dec. 2002
2. Generation IV International Forum, Generation IV Roadmap Crosscutting Fuels and Materials R&D Scope Report, GIF-010-00, December 2002.
3. 장창희 외, Long-term integrity of Ni-base superalloys for advanced nuclear system application-environment and materials interaction, presented at KNS WS 2009, 미래원자력시스템용 구조재료개발, 2009. 10. 28, 경주교육문화회관.
4. Daejong Kim, Changheui Jang, and Woo Seog Ryu, "Oxidation characteristics and oxide layer evolution of Alloy 617 and Haynes 230 at 900°C and 1100°C," Oxidation of Metals, Vol. 71, No. 5, pp.271, 2009.
5. USNRC, Review and Assessment of Codes and Procedures for HTGR Components, NUREG/CR-6816, June 2003.
6. USNRC, Materials Behavior in HTGR Environments, NUREG/CR-6824, July 2003.
7. Steve Zinkle, presented at the 23rd Symp. On Fusion Technology, Venice, Italy, Sept. 20-24, 2004.
8. OECD/NEA, proceeding on the Structural Materials for Innovative Nuclear System (SMINS) workshop, Karlsruhe, Germany, June 4-6, 2007.
9. INEEL, Next Generation Nuclear Plant Research and Development Program Plan, INEEL/EXT-05-0258, January 2005.

기계용어해설

포토 다이오드(Photo Diode)

광원용 다이오드가 순방향으로 바이어스되는 데 대하여 역 바이어스 되어서, 빛에 닿으면 전류가 흐르고 빛의 강도에 거의 비례한 출력전압을 발생하는 것.

점식(Pitting; 點蝕)

부식 또는 과하중, 이물질 입자의 압입 등 기계적 원인으로 모재 표면에 생기는 작고 불규칙하면서 모나지 않게 오목하게 들어간 자국.

피스톤 속도(Piston Speed)

피스톤의 순간속도는 연접봉의 길이와 크랭크 반지름과의 비율에 의하여 단현진동에서 조금 벗어난 주기적 변화가 되며, 일반적으로는 회전속도와 함께 기관의 고속성을 나타내는 지수가 되는 평균 피스톤 속도.

피스톤 수량계(Piston Water Meter)

실린더 속에 장치된 피스톤의 왕복횟수를 나타내는 적산계의 지시로 수량을 측정하는 유량계의 일종.