2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고온가스로의 고온기기용 재료기술 현황

Materials for High Temperature Gas Cooled Reactors

류우석, 김대환, 김성호, 박지연, 김원주, 장종화
한국원자력연구소

W.S. Ryu, D.W Kim, S.H. Kim, J.Y. Park, W.J. Kim, C.H. Chang
Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

고온가스로의 운전온도는 현재까지 국내에서 운전 중이거나 계획되었던 원자로보다 훨씬 높은 온도이다. 고온가스로용 재료는 고온특성이 특히 중요하기 때문에 기존 원자력용 재료로서 사용한 경험이 거의 없는 새로운 재료를 사용한다. 고온가스로를 건설하기 위한 연구를 시작하기 위하여, 해외의 고온가스로에서 사용 중이거나 연구 중인 고온기기용 금속재료의 기술현황을 분석하였다. 후보재료의 운전경험 자료는 해외의 HTGR 시험로 등으로부터 일부 확보할 수 있다. Peach Bottom 및 FSV, AVR 등의 경험에 의하면 전체적으로 근원적인 사용문제는 없었다고 보고되어 있다. He 시험시설에서 수행한 Fe-합금 및 Ni-합금의 내열재료의 성능시험은 900℃ 이상까지 대체로 만족스러운 결과를 보였으며, 앞으로 현장의 경험을 조금 더 축적하면 HTGR 재료로서 검증을 받을 수 있다. 새롭게 시작하는 우리는 해외의 기술현황을 분석하여 경제성과 안전성이 있는 고온가스로의 고온기기용 금속재료로서 최적의 재료를 선정하여야 할 것이며, 시스템 설계에 필요한 재료물성의 기본적 자료를 확보하여야 할 것이다.

Abstract

Operating temperature of HTGR is much higher than the current nuclear power plants in operation or under planning. The materials for HTGR request very high temperature properties, so new materials will be applied. The state-of-art review, thus, of materials for HTGR components is needed in order to plan the study of HTGR in the country. Information of field experience of HTGR materials has partially collected from foreign HTGR pilot plant. Peach Bottom, FSV and AVR reported the materials showed basically good performance. He loop facilities also proofed that Fe-superalloy and Ni-superalloy can be used up to 900℃. More information of irradiation behavior and long-term test data of the superalloys have to be accumulated in order to verify the performance for very high temperature condition. In order to select the optimum materials for domestic HTGR with efficiency and safety, the review of worldwide material technology and R&D status is a starting point of research.

1. 서론

고온가스로는 원자로용기에 따라 pre-stressed concrete vessel (PSCV)의 일체형과 steel reactor pressure vessel (RPV)의 모듈형으로 대별되어 개발하고 있다. 일체형의 THTR은 5.6mm 직경, 5.1m 높이의 원통형에 들어 있는 구형 핵연료에서 핵분열 에너지를 생산하여 He 냉각재가 노심의 상부에서 하부 쪽으로 하향으로 흐르며 250℃에서 750℃으로 열을 뽑아낸다. 증기발생기는 이 열을 이용하여 545℃, 190 기압의 과열증기를 만든다. 이러한 일차계통의 기기는 40 기압의 운전조건 하에 있는 pre-stressed concrete vessel 내에 모두 배열되어 있다.

모듈형의 HTR은 전기 생산 혹은 공정열 생산을 목적으로 설계되었다. pebble bed core는 3m 직경, 9.4m 높이이며, He 냉각재 온도는 전기생산의 경우 250℃/700℃이며, 공정열 생산의 경우 950℃까지 높인다. 정지계통은 반사체 내에서 작동하며, core와 증기발생기 혹은 열교환기 등은 steel pressure vessel 내에서 coaxial duct에 의하여 횡으로 연결되어 있다. Pressure vessel은 이들 기기를 어느 조건에서든지 안정적인 구조를 형성할 수 있도록 한다.

HTGR의 대표적 계통개념도는 그림 1과 같으며, 고온기기 중 금속재료로 구성되어 있는 대표적인 것은 증기발생기, He/He 열교환기, 증기 재생기, 제어 및 정지봉 등이다. 이들 기기들이 노출되어 있는 환경조건은 ① 고온에서 장시간 정하중에 노출, ② 가동중에 주기적인 열하중과 기계적 하중에 노출, ③ 불시정지에 따른 단시간 열하중 및 기계적 하중에 노출, ④ 냉각재 내의 불순물에 의한 부식환경에 노출, ⑤ 고온에서 금속과 금속의 접촉면에서 발생하는 마모환경에 노출, ⑥ 열 및 고속 중성자 환경에 노출 등이다.

고온가스로 구조물에 사용되는 재료는 경수로 혹은 고속로용 재료와는 다르게 고온특성을 특별히 요구한다. 그리고 He 가스 냉각재는 미량의 불순물을 함유하고 있으며, 따라서 구조물의 사용수명을 제한할 가능성이 높다. 고온가스로의 안전성과 경제성을 높이기 위해서는 핵연료 수명연장, 배관 및 열교환기 내구성 향상, 연료 블록 및 반사체의 수명연장, 단열성능 향상, 구조물 형상의 단순화와 소형화 등이 요구된다. 이러한 목표를 달성하기 위하여, 재료의 개발과 응용이 매우 효과적이다.

고온고압에서 사용되는 고온기기의 재료개발은 많은 실증적 실험을 통한 많은 데이터가 필요하므로 여러 시설과 긴 시간이 요구되며, 최적 내열재료의 선정은 매우 중요하며 어려운 결정이다. 기초적 실험을 통하여 고온기기 재료의 성능을 검증하고 기술기반을 확립하기 위하여 기기 시험용 대형 He gas loop이 필요하다. 세계적으로 KVK (interatom사)는 중간열교환기 등의 열이용 기기와 고온배관 등의 HTR 모듈용 기기의 시험에 활용되어 왔다. 그리고 HENDEL (JAERI)은 HTTR의 핵연료체와 노내구조물의 실증시험과 고온배관 등의 데이터 축적에 활용되어 왔다.

고온가스로 연구를 시작하고 있는 우리는 현재 운전중이거나 계획중인 고온가스로의 주요 구조물에 사용하고 있는 재료를 검토하고, 개발중인 신소재를 살펴보는 것은 매우 중요한 작업이다. 본 논문은 고온가스로의 고온기기들의 요구조건을 분석하고, 사용하고 있는 금속재료의 성능을 검토하였다. 그리고 운전온도를 높이기 위하여 개발중이거나 고려중인 새로운 후보재료들을 수집하고 그 특성을 요약하였다.

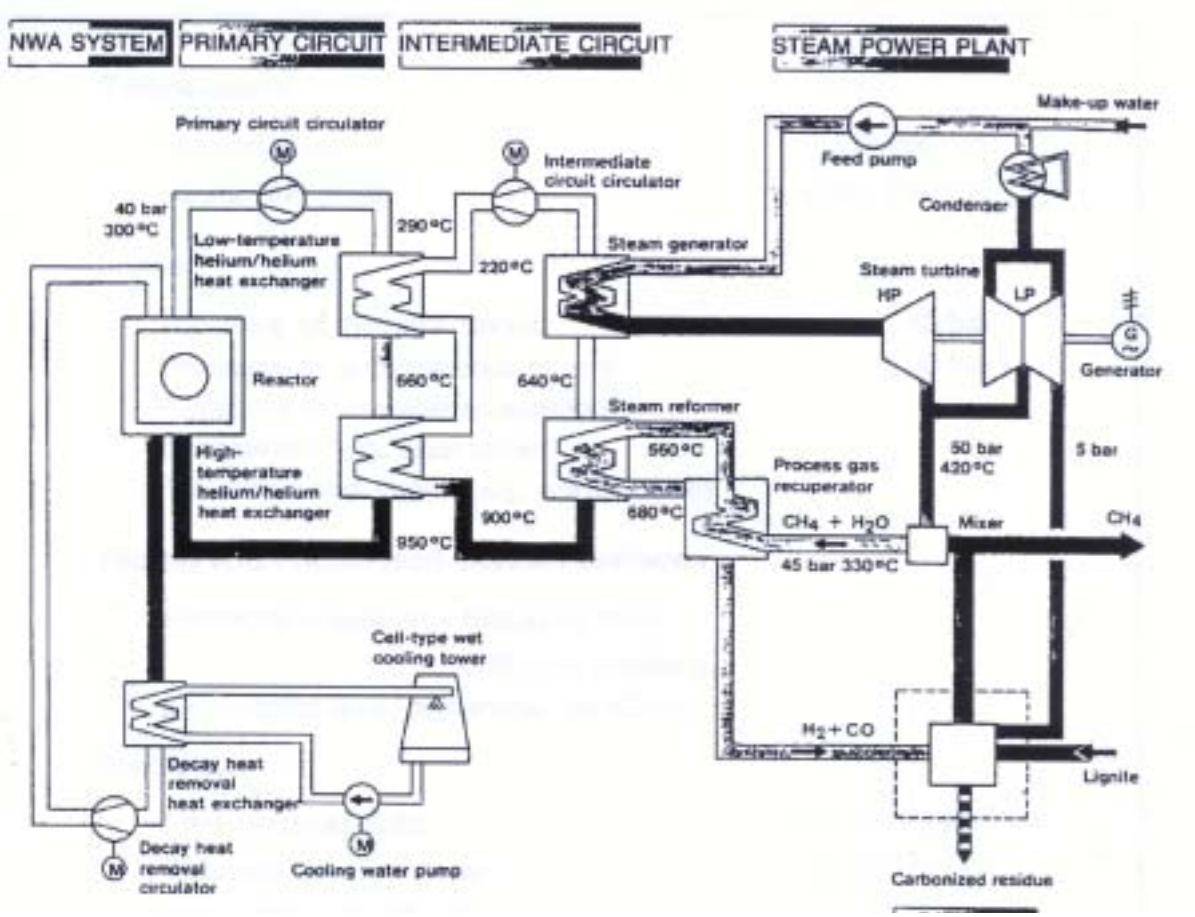

그림 1. VHTR의 계통개념도

2. 고온기기의 재료 설계 조건

원자로 시스템의 설계를 위한 재료 선정에서 설계 코드에 부합되는 검증된 재료를 사용하는 것은 매우 중요한 일이다. 그러나 고온에서 가동하는 고온가스로의 경우는 LWR과 같은 ASME 코드 등의 일반적 근거가 확실하지 않다. 최근에 미국 ASME에서는 Alloy 800H의 경우 760℃까지 고온 물성 데이터를 제공하고 있다. Alloy 617은 427 982℃ 온도범위에서 사용가능한 것으로 알려져 있는 등, 고온에서의 재료 연구가 활발히 이루어지고 있다. 독일은 HTGR을 위한 고온구조물 설계 기준 및 방법에 대한 연구가 다방면에서 이루어져 설계코드, KTA 3221의 draft가 작성되었다.

HTGR용 재료 선정에서 주요한 기준은 LMR 재료 기준과 매우 유사하나, 1000℃에 이르는 고온 때문에 재료 안정성과 변형속도, 크리프 손상 등의 인자가 특히 중요한 재료변수이다. 시간 의존성 재료손상을 설계에 반영하기 위해서는 다음과 같은 항목을 고려하여야 한다: ① 단기간 및 장기간 하중 상태에서의 파손, ② 피로 및 크리프-피로 손상, ③ 크리프 라체팅에 의한 크리프 변형, ④ 중성자 조사 혹은 부식 등에 의한 환경 영향 등의 평가가 반영되어야 한다.

독일은 HTGR 구조 건전성에 대한 원칙을 개발하여 각각의 기기를 다음과 같이 분류하였다: ① 핵분열 생성물 차폐 기능을 갖는 기기 (예, 원자로용기), ② 핵분열 생성물을 차폐하는 기능을 저해할 수 있는 기기 (예, 노내구조물), ③ 물이나 증기와 같은 환경물질을 1차계통에 침투시킬 수 있는 기기 (예, 열교환기, 증기발생기).

재료의 선정에 필요한 주요한 인자는 재료의 제조성과 용접성이다. 관심의 대상이 되는 상용재료를 고온의 원자력 재료로서 적용하기 위해서는 재료특성을 평가하기 위한 R&D 프로그램이 구성되어야 하며, 재료의 screening test에서 장시간 재료물성 데이터를 공급하는데 일반적으로 15년 정도의 기간이 소요된다. 재료 선정의 근본 방향은 Ni-Cr(Fe)를 기준으로 한 고용강화합금이 주요 근간을 이루고 있다. 고온용 재료개발은 다음과 같은 두 가지 방향에서 진행해 왔다. 첫째, 가능한 상용 재료를 미소원소 조정으로 최적화하고 원자력용으로 검증시험을 수행하는 방법과 둘째, 크리프 특성과 부식 저항성을 고려한 새로운 재료를 개발하는 방법이다.

3. 고온기기용 재료의 요구물성

가. 기계적 특성

1) 인장강도

인장강도는 재료물성 중에서 가장 기본이 되는 데이터이다. HTGR 재료의 경우 인장거동은 고온 가동 조건에서의 시효에 의한 경화 효과를 고려하여야 한다. 석출물이 시간이 경과함에 따라 생성되거나 성장하여 인장특성을 변화시킬 수도 있다. Alloy 800 혹은 Alloy 617은 고용화 처리를 한 재료이므로, 가공에 의하여 인장강도가 크게 증가될 수 있으나 800℃ 이상의 고온에서 급격히 회복이 일어난다. 그리고 Alloy 617의 경우 인장강도에 미치는 변형속도 효과가 700℃ 이상에서 크게 영향을 미치므로 비탄성 해석을 수행할 때 반드시 변형속도 효과를 고려하여야 한다.

2) 충격특성

금속재료는 시효에 의한 경화가 고온에서 장시간 노출시 발생하므로 충격시험을 통하여 재료의 건전성을 확인하여야 한다. Alloy 800 혹은 Alloy 617은 운전 온도에서 높은 충격특성을 갖지만, 고온에서의 석출물 생성은 상온에서 취화현상을 초래한다. 특히 Alloy 617은 취화거동을 필히 고려하여야 한다.

3) 크리프 거동

Alloy 800과 Alloy 617의 크리프 및 크리프 수명 데이터는 각각 100,000 시간과 80,000 시간까지 ASME code에 있다. 따라서 설계를 위하여 허용응력과 등시간 크리프 곡선은 활용이 가능하다. Alloy 617이 크리프 강도가 가장 높으며 Alloy 800은 중간이다. 일본에서 HTTR용으로 개발한 Hastelloy XR은 Alloy 800과 유사하다. 그러나 아직까지 데이터의 량이 충분하지 못하기 때문에 100,000 시간에서의 크리프 강도를 신뢰성 있게 외삽하기 위해서는 더욱 많은 데이터가 필요하다. 특히 용접부는 900℃ 이상에서 크리프 강도가 현저하게 나타나므로, 충분한 데이터의 생산이 필수적이다.

4) 피로 및 크리프-피로

구조물에 따라 고주기피로와 저주기피로가 모두 나타날 수 있으며, 고온에서의 피로거동은 저온에서의 피로 거동과 매우 다르게 나타날 수도 있으므로 반드시 확인이 필요하다. LMR 온도조건에서의 피로거동과 비교할 때 HTGR 조건에서는 다음과 같은 피로 특징들을 파악하여야 한다. ① 피로강도는 온도 상승에 따라 400-550℃ 온도범위에서의 피로거동에 비해 낮아진다. ② 저온에서 나타나는 피로한계는 고온에서 크리프 효과 때문에 사라진다. ③ Cyclic hardening 현상이 고온에서 사라진다. ④ 크리프와 피로의 상호작용이 매우 복잡하게 나타난다. ⑤ 크리프-피로 시험에서 유지시간 동안에 나타나느 응력이완 현상가 매우 급격히 나타난다.

5) 파괴역학

결함이 존재하는 구조물의 파괴해석은 액금로 등의 고온 구조물 해석과 유사하게 수행해야 한다. 파괴인성, 피로균열전파, 크리프 균열전파, 그리고 피로-크리프 상호작용 등에 대한 해석을 하기 위하여 1000℃ 정도까지의 데이터를 확보해야 한다. Alloy 800과 Alloy 617에 대한 피로와 크리프 데이터는 최근에 조금씩 보고되고 있다.

나. 조사거동

원자로 용기와 내부구조물 재료에 대한 조사효과를 확인하여야 한다. HTGR 원자로 용기의 경우 설계온도는 200-400℃ 범위이며, HTR module의 경우는 200℃이다. 재료의 조사거동은 온도에 따라 민감하게 변하므로 경수로에서 축적된 많은 데이터를 활용할 때 온도 영향을 고려하여야 한다. HTR module 원자로 용기의 경우 온도가 낮아 조사효과가 크게 나타날 것으로 예측되나, 한편으로 조사량이 10^{18} n/cm^2 수준으로 비교적 낮으므로 조사에 의한 영향이 큰 변수가 될 것 같지는 않다.

일본의 HTTR 프로그램에서 2¼Cr-1Mo 강의 조사거동은 400℃에서 그다지 중요하지 않다고 확인되었다. 중성자 흡수봉과 같은 재료는 높은 중성자속에 노출되며, 온도 또한 높다. 400℃ 정도의 온도에서 조사효과는 그다지 중요하지 않은 것으로 알려져 있으나, 850℃정도의 고온에서는 연성의 저하가 심각한 것으로 알려져 있다. 특히 오스테나이트 스테인리스강과 Ni 합금의 고온취성은 낮은 변형속도에서 심각하게 나타나므로, 설계상에 조사량을 줄일 수 있는 방법을 모색하거나 재료를 최적화하는 방안을 찾아야 할 것이다.

다. He 부식

시험로와 원형로를 통하여 수집한 경험자료는 He 냉각재는 증기계통에서의 누출, 흑연체의 탈가스, 전열관을 통한 수소 확산 등으로 저농도의 불순물에 오염되며, 이들은 냉각계통으로 제거될 수 있었다. 수소는 흑연과 반응하여 메탄을 생성하기도 한다. 불순물의 종류와 전형적인 함량은 표 1과 같다.

Table 1. Impurities in HTGR helium coolant gas

	H_2	H_2O	CO	CO_2	CH_4	H_2S	NH_3	N_2	He
NPP (μbar)	500	1.5	15	-	20	-	-	<5	bal

HTGR 시험로 내에서의 He 부식은 현재 특별하게 보고된 것이 없으며, 가동 온도범위에서 큰 문제가 없었다. 그러나 실험실에서 HTGR 조건을 모사한 경우, He 부식은 900℃ 이상에서 복잡한 거동을 보였다. 부식현상과 속도는 온도와 He 불순물 조건 (산화/탄화 전위), 합금성분 및 조직, 그리고 열유체 변수 등에 민감하였다. H_2O와 CO, CH_4, H_2 등과 같은 불순물은 표면에서 산화막 혹은 탄화막을 형성하거나, 내부에서 내부산화물 (internal oxidation) 혹은 탄화층 (carburization), 탈탄층 (decarburization) 등을 생성한다.

탄화층 (carburization)은 Cr-계 산화막의 보호막 형성으로 제한할 수 있다. 산화막은 충분한 산화 분위기 조건에서 형성되나 900℃ 이상에서 생성되는 속도는 합금성분에 따라 다르다. 900℃ 이하의 온도에서는 일반적으로 탄화층이 형성된다. Alloy 617은 온도가 올라가면 탈탄층이 나타나는데, 이는 크리프 강도를 낮추어 준다. 탄화현상에서 탈탄현상으로 변하는 것은 합금원소와 가스 분위기에 의해 좌우된다. 탈탄현상은 CO 전위를 충분히 높여줌으로써 방지할 수 있다. 산화/탄화/탈탄 거동은 재료마다 다르기 때문에 앞으로 더 많은 연구가 필요하다. 일반 탄소강의 경우는 탈탄 영향이 크므로 He 분위기에서 400℃ 까지 사용을 제한하고 있다.

HTGR에서 He 부식에 대한 경험을 요약하면 다음과 같은 대안을 제시할 수 있다: ① 부식에 의한 재료의 단면적 감소를 고려하여 설계에서 감소율을 반영한다. ② 산호/탄화 전위 등의 가스 분위기를 조절한다. ③ 확산 방지막 역할의 자체 보호 산화막을 형성해 주기 위한 합금원소를 최적화 한다. ④ 보호피막층을 코팅한다. 현재까지의 연구결과를 종합하면, He 부식에 관하여 매우 민감하게 대응할 필요는 없으며, 현장 경험을 축적해서 사용재료에 대한 신뢰성을 확보해 나가야 할 것이다.

4. 고온기기용 재료 현황

가. 주요 고온기기의 사용재료

독일은 1970년대부터 HTGR 재료 프로그램을 시작하였다. 표 2에서와 같이 8개 재료로부터 screening 하여 4개의 재료 즉, Nimonic 86, Hastelloy X, Alloy 800, 그리고 Alloy 617를 선정하였다. 최종적으로 850℃ 이상까지 적용하기 위하여 Alloy 617 재료에 집중하여 프로그램을 진행시켰다. 그리고 동시에 상용재료를 최적화하는 프로그램을 수행하여 AC 66과 Thermon 합금을 최적 후보재료로 선정하였다.

일본은 중기 프로그램을 수행하여 Hastelloy X를 최적화한 (내부 산화를 방지하기 위하여 Al과 Ti 함량을 줄이고, 유도 방사능을 줄이기 위하여 Co 함량을 제한함) Hastelloy XR을 개발하였다. 동시에 Ni-23Cr-18W의 W 첨가강을 연구하고 있다. 미국은 Alloy 617과 Hastelloy X를 최적 후보재료로 선정하였다. 그리고 Cr 함량을 줄이고 Mo/W 함량을 10% 첨가한 Ni 합금을 연구하고 있다.

He 터빈용 특수재료는 Alloy 713 LC, Molybdenum TZM, Nimonic 80A 그리고 Alloy 100 등을 후보재료로서 개발하고 있다. 그리고 증기발생기용 Alloy 800과 12% Cr강의 이종용접부에서의 크리프 특성 평가를 수행하고 있으며, 12% Cr강 측의 HAZ 부위에서 발생하고 있는 크리프 손상 연구에 초점을 맞추고 있다.

구조물의 미끄름 부위에서의 마모 현상은 고온에서 특별히 고려되어야 한다. 접촉점에서 금속재료는 adhesive wear 혹은 diffusion bonding 현상을 초래한다. 따라서 표면에서의 현상을 방지하기 위하여 세라믹 코팅이 필요하다. 530℃ 이하에서 페라이트계 강은 manganese phosphate 처리를 하고, 700 ℃ 이하에서 chrominm carbide 코팅을 적용하기도 한다. 그리고 고온에서의 확산 작용을 제한하기 위하여 zirconium oxide 코팅 처리를 적용하여 성공적인 결과를 얻기도 하였다.

Table 2. Typical chemical composition of potential materials for HTGR (wt%)

Grade	C	Mn	Si	Fe	Ni	Cr	Co	Al	Nb	Mo	W	Other
AC 66	0.04	1.0	0.30	bal	31	26		0.025	0.6			Ce
Hastelloy X	0.10	05	0.5	18	bal	22	0.04			9	0.6	Ti
Alloy 800H	<0.08	<1.5	<0.7	bal	31	20	<0.02	<1				Ti
Nimonic 86	0.05				bal	25				10		Ce
Thermon	0.10	1.5	1.5	bal	34	20			<0.15		10-1	
Alloy 713LC	0.05				bal	12		6	2	4.5		Ti, Zr
Alloy 617	<0.1	<0.7	<0.7	<2	bal	22	12			9		Ti, Zr

고온가스로 구조물에 사용되는 재료는 경수로 혹은 고속로용 재료와는 다르게 내고온성을 특별히 요구한다. 일반적으로 고온가스로는 700 ℃ 이상의 최고온도에서 He 가스 냉각재를 사용한다. He 가스 냉각재는 미량의 불순물을 함유하고 있으며, 따라서 구조물의 사용수명을 제한할 가능성이 높다. 세계 각국의 고온가스로의 주요기기에 사용되는 재료를 요약하면 표 6-4와 같다.

나. 원자로 용기 재료

원자로 용기는 핵연료와 반응제어 시스템, 노내구조물 등의 기기를 함유하고 있는 용기이다. PSCV의 일체형과 금속 원통용기의 모듈형으로 대별된다. HTTR의 원자로용기는 수직 원통형에 반구의 상부와 하부 구조로 되어 있다. 상부 head에는 사고시 고온에 노출되는 것을 방지하기 위하여 열차폐체가 설치되어 있다. 상부 head 바깥쪽에는 계측장치와 제어봉을 위한 수십개의 안내관들이 설치되어 있다. 금속 원자로용기의 설계에서 요구하는 조건은, 첫째 용기가 400℃에서 운전되므로 재료가 크리프에 강한 고강도를 가져야 하며, 둘째 운전중에 온도변화가 50℃/h 이하가 되도록 제한하여 과도한 열응력이 가해지지 않도록 한다. 그리고 용접부는 철저한 NDT를 수행하여 건전성을 확인하여야 하며, 감시시편을 준비하여 운전에 의한 조사취화와 열취화 정도를 평가할 수 있어야 한다.

HTTR은 가동온도가 400℃이며, 사고시 최고온도가 530℃ 정도로 계산되어 용기의 크리프 문제가 그다지 심각하지 않을 것으로 예상된다. 그리고 중성자 조사량 또한 10^{17} n/cm^2 이하로 추정된다. 따라서 2¼Cr-1Mo 강을 사용한 원자로용기는 수명말기까지 크리프와 조사취화와 관련한 건전성이 충분히 유지될 것으로 예측된다. 상부 head의 열차폐는 수겹의 금속 열반사체를 사용하였다.

다. 열교환기 재료

중간열교환기의 구조는 1차계 He 가스가 동체측으로 흐르고, 2차계 He 가스가 관측으로 흐르게 되어 있다. 전열관은 Helical-coil 형태이다. 1차 He 가스가 원자로에서 연결된 이중원통형 hot gas duct의 내부관으로부터 흘러 들어가 전열관을 통하여 2차계에 열을 전달한다. 열을 전달하고 저온으로 변한 1차 He 가스는 다시 동체의 내부 shell과 외부 shell 사이의 annular space를 따라 흘러 내려 hot gas duct으로 흘러

들어간다. 2차 He 가스는 나선형의 전열관을 통하여 아래쪽으로 흐르며 열을 얻은 후에 중심의 hot gas duct를 따라 상부로 되돌아 간다. 동체의 내부 shell은 열손실을 방지하기 위하여 내부에 단열체가 설치되어 있다. 동체 중앙의 hot gas duct의 내외부는 또한 열효율을 얻기 위하여 단열되어 있다. 전열관을 고정하기 위한 tube support와 중앙의 hot gas duct는 동체의 상부에 매달려 있는 형태를 취함으로써 열팽창 문제를 해결하였다.

열교환기용 재료가 요구하는 특성은 노내환경과 유사한 He 분위기에서 내고온 크리프 특성과 고온 내부식성 등이다. 그리고 노내환경이 허용환경조건에서 벗어나 탈탄성 He 분위기가 되면 재료의 강도저하가 예상되므로, 그 영향을 파악할 필요가 있다. Alloy 800H 재료는 사용경험과 물성데이타가 풍부하여 많이 사용되고 있으나, Hastelloy-XR 재료가 후보재료로서 거론되고 있다. Hastelloy-XR은 Hastelloy-X를 기본으로 Si을 최적화하고 Al 및 Ti를 저감화하여 내식성을 개선하고, 그리고 Co를 낮추어 방사화를 저감화시킨 개량재료이다. 붕소를 40-70 ppm 첨가하여 크리프 파단강도를 향상시킨 Hastelloy-XRII 재료도 개발 중이다. Hastelloy-XR의 크리프 파단특성은 950℃, 50,000 시간에서 약 9 MPa 정도인 것으로 실험실 결과가 나와있다.

고온가스로의 온도가 1000℃ 이상으로 높아질 경우, 고온부에서는 현재의 금속재료로는 사용이 어렵기 때문에 탄화물이나 질화물의 세라믹스를 금속재료 표면에 코팅하여 내고온성을 향상시키는 등 재료를 개량할 필요성이 있다.

라. 고온배관과 단열재료

노심으로부터 열교환기 쪽으로 흘러나오는 고온고압의 He 가스는 단열구조를 갖는 고온배관 (hot gas duct)를 통하여 흐른다. 고온배관은 내압기능을 유지할 수 있는 재료 강도를 지킬 수 있도록 내측에 단열층을 설치하여 특정 온도 이하가 되도록 설계하여야 한다. 고온배관구조는 단관구조와 2중관 구조로 나뉘어진다. 단관 구조는 내압관 내부에 단열층을 넣어 고온 가스로부터 의 열전달을 억제하고, 그 단열층 내면에는 He 가스의 기밀성을 유지하기 위한 liner를 설치한다. 반면에 2중관은 단관 구조의 내압관 외측에 내압관을 하나 더 설치하여 두 내압관 사이의 annular space가 저온의 고압가스가 흐르는 유로를 형성해 주는 2중 배관 구조이다. 2중배관의 중심부는 원자로로부터 흘러나오는 고온 He 가스가 흘러 열교환기로 들어가고, 열교환기로부터 나오는 저온의 He 가스는 내관과 외관사이의 환상부에 흐르는 구조로서, 외관의 압력관이 저온에서 운전되어 재료의 강도를 유지하여 신뢰성을 높일 수 있다.

단열구조는 열전도율이 낮고 장시간에도 체적안정성이 우수하여야 하므로, 세라믹스 섬유질 혹은 적층 금속박판을 사용한다. 적층 금속박판은 세라믹스 섬유질에 비하여 비표면적이 작아 불순물의 흡착에 대한 문제가 적은 반면에, 적층판 상호간에서 생기는 대류 등에 의한 단열효과 저하를 방지하기 위한 노력이 필요하다. 반면에 세라믹스 섬유질은 고온에서 장시간 사용하면 압축에 대한 복원성을 잃기 쉬우므로, 단열재와 liner 사이에 간격이 생겨 단열성능을 현저히 떨어뜨릴 가능성이 있다. 세라믹스 섬유질 재질은 800℃까지는 SiO_2, 그 이상에서는 Al_2O_3를 사용한다. 새로 건설하고 있는 고온가스로에서는 세라믹스 섬유질 단열재가 주류를 이루고 있다.

KVK 시험 loop에서 세라믹스 섬유질을 단열재료로 사용하고 liner를 흑연 및 탄소섬유 복합체를 사용하여 제작한 이중배관을 실험한 결과, 20 m/s 유속으로 흐르는 950℃ 고온 He 가스는 외측 환상부에 293℃의 저온 가스가 흘러도 온도강하가 1℃/m에 불과하였다.

마. 제어봉 피복재 재료

제어봉 피복재의 요구특성은 내열성과 내고온조사손상, 고온내부식성 등이다. 후보재료로는 Hastelloy-X, Alloy 800H 등이며, 현재 사용되고 있는 재료는 Alloy 800H가 주류를 이루고 있다. 제어봉 피복재는 고온에서의 조사안정성과 화학적 상호작용이 특히 중요한데, Hastelloy-X와 Alloy 800H 사이의 특성을 비교하면 다음과 같다.

Hastelloy-X는, 높은 조사조건 (10^{21} n/cm^2) 하에서 $Ni^{58}(n,\gamma)^{56}Fe$, $Ni^{59}(n,\alpha)^{56}Fe$ 반응에 의한 He 생성이 원인이 되어 높은 온도에서 연성저하가 현저하게 나타난다. 그리고 고온 크리프 특성도 Hastelloy-X는 조사전후에 크게 변하여, 조사전에는 Alloy 800H보다 우수하나 조사후에는 크리프 강도가 크게 떨어져 Alloy 800H 보다 못하다.

제어봉 피복관은 중성자 흡수체로 장입되어 있는 B_4C와 접촉을 하고 있으므로 양립성 문제가 있다. 750℃에서 접촉에 의한 금속의 침투깊이를 측정한 결과, Fe-기 합금인 Alloy 800H가 Ni-기 합금인 Hastelloy-X보다 우수한 것으로 나왔다.

고온가스로의 노심 온도가 점점 높아지고 있는 추세에 비추어, 제어봉 피복관은 고온에서 연성과 조사거동이 더욱 우수한 내열재료가 필요하므로, 금속재료를 사용하기에는 한계가 존재한다. 따라서 C/C 복합체 등의 세라믹스 재료의 사용이 검토되고 있다.

5. 재료의 현장사용경험

후보재료의 운전경험은 HTGR 시험로 등으로부터 일부 확보할 수 있다. 전체적으로 근원적인 사용문제는 없었다고 보고되어 있다. Peach Bottom에서 증기발생기의 superheater 튜브로 오스테나이트 스테인리스강을 사용하였으나 Cl에 의한 SCC 손상이 발생하여 Alloy 800 튜브로 교체한 경험이 있다. FSV에서는 Alloy 800 증기발생기 튜브를 사용하였으며 운전상의 문제로 손상이 발생한 보고는 없었다. 다만 제작상의 결함으로 두 개의 튜브 손상이 있었다. AVR은 증기발생기에 화력발전소에서 사용하는 페라이트계 강을 사용하였으며, 한 개의 제작상 원인에 의한 결함 외에는 운전상의 손상은 보고된 바가 없다.

독일은 두 기의 He 시험시설을 건설하여 기술적인 성능시험을 수행하였다. Alloy 800과 Alloy 617, Alloy 519 등의 재료를 사용하여 900℃ 이상까지 성능시험을 수행하여 재료의 건전성을 확인하였다.

고온 환경하에서 장시간 동안 운전한 경험에 따르면 현재 선정된 후보재료들의 거동은 대체로 만족스러운 결과를 보였다. 앞으로 현장의 경험을 조금 더 축적하면 최적의 HTGR 재료가 선정되고 검증을 받을 수 있다.

참고문헌

1. W. Dietz, Structural materials, in Materials Science and Technology, vol. 10B, ed. by B. Frost, VCH (1994) p.150.
2. Design of High Temperature Engineering Test Reactor, JAERI 1332, Japan Atomic Energy Research Institute (1994).
3. E. Bodmann, et al., Service conditions and relevant properties of HTGR metallic materials, in proceedings of a specialists meeting on High Temperature Metallic Materials for Gas-Cooled Reactors, IWGGCR/18, IAEA (1989), p.15.
4. A. Shenoy and W. Betts, Design requirements for high temperature metallic component materials in the US modular HTGR, ibid, p.34.
5. M. Etoh and H. Tsuji, 신형원자로 재료연구의 최전선-고온가스로, 원자력공업, 제39권 8호 (1993), p.16.
6. Y. Miyamoto, 고온가스로의 고온기기, 원자력공업, 제34권 4호 (1990), p.53.
7. T. Oku, 고온가스로용 신재료, 원자력공업, 제34권 10호 (1988), p.29.