

수소생산용 원자로에서 주요기기의 예비개념설계

송기남[†]·이수범*·김용완*

Pre-conceptual Design of the Main Components for the NHDD Program

Kee-nam Song, S-B Lee, Y-W Kim

Key Words: NHDD program(원자력수소개발 및 실증 프로그램), Hot Gas Duct(고온가스덕트), Intermediate Heat Exchanger(중간열교환기)

Abstract

KAERI is in the process of carrying out the Nuclear Hydrogen Development and Demonstration (NHDD) Program. The indirect cycle gas cooled reactors that produce heat at temperatures in the order of 950°C are being considered in the NHDD program. For the indirect gas cooled reactors, the intermediate heat exchanger (IHX) and hot gas duct (HGD) are the main components. For the NHDD program we are in the process of establishing a conceptual design of the IHX and HGD. The pre-conceptual design activities in this study dealt with a preliminary design of the IHX and the HGD including strength and thermal expansion evaluation of the main components.

1. 서 론

초고온가스(Very High Temperature gas cooled Reactor; VHTR)의 초고온 열을 이용하여 수소를 생산하는 연구가 우리나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서 수행되고 있다. 우리나라의 수소생산 연구 프로그램인 NHDD(Nuclear Hydrogen Development and Demonstration; 원자력수소 생산 및 실증) 프로그램에서는 VHTR에서 얻어진 초고온 헬륨가스(약 950°C)를 열화학적 요오드 황산(iodine-sulfur; I-S) 공정을 이용하여 물로부터 수소를 생산하는 개념을 고려하고 있다. 헬륨가스는 화학적 및 핵적으로 안정적

이어서 정상운전중에 1차 circuit 내에 방사능 전달을 최소화 시키는 장점이 있으며 가스상태에서 상변화 및 물-금속간의 반응과 관련된 문제가 발생되지 않아서 시스템의 안전성을 향상시키는 장점이 있다. 또한 Brayton cycle이 가능함으로서 열효율과 경제성을 증가시킬 수 있는데 Brayton cycle 설계에서는 1차 및 2차 circuit사이의 연계를 제공하는 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger; IHX)에 의한 간접방식의 열교환이 가능하다. 원자력 수소응용을 위해서는 초고온의 1차 헬륨가스에서 중간열교환 유체로 열전달하기 위해서 IHX가 필요하게 된다. NHDD 프로그램의 주요 기기(component)로는 IHX와 고온가스덕트(Hot Gas Duct; HGD)로 볼 수 있다. 본 연구에서는 중국의 HTR-10 설계개념에 입각하여 NHDD 프로그램의 HGD 강도 및 열팽창 평가를 수행하였으며 또한 NHDD 프로그램의 IHX에 대한 예비개념설계를 수행하였다.

† 한국원자력연구원

E-mail : knsong@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2254 FAX : (042)868-4717

* 한국원자력연구원

2. NHDD 프로그램의 개념

NHDD 프로그램의 개략도(Fig. 1)에서 보듯이 2개의 HGD와 한 개의 IHX가 필요하다. 1차 HGD은 원자로와 IHX사이에 위치하며 2차 HGD은 IHX와 SO₃ 분해기 사이에 위치해 있다. 1차 HGD은 수평 동축(co-axial) 튜브로 되어 있는데 초고온 및 상대적으로 저온 헬륨기체의 통로 역할을 한다. 본 연구에서는 HTR-10의 설계개념(Fig. 2 및 3 참조)에 입각하여 1차 HGD을 설계하였는데 이는 HTR-10의 HGD이 성공적인 운전 경험과 간편성 및 최신기술이 접목되어 설계된 것을 감안한 것이다. NHDD 프로그램에서 원자로심을 통과한 초고온 헬륨가스는 수평의 1차 HGD의 liner tube를 통해 IHX로 이송되며, IHX에서 냉각된 저온 헬륨가스를 HGD의 압력용기와 inner tube 사이의 공간을 통해 원자로로 되돌아온다. IHX와 SO₃ 분해기 사이에 있는 2차 HGD은 1차 HGD과 동일한 구조로 설계된다. IHX를 통과한 초고온의 헬륨가스(약 930 °C)는 수평의 2차 HGD의 liner tube를 통해 SO₃ 분해기로 이송되며 SO₃ 분해기에서 냉각된 저온의 헬륨가스는 동축의 2차 HGD의 압력용기와 inner tube 사이의 공간을 통해 IHX로 되돌아온다. 비록 많은 종류의 IHX, 즉 plate-fin형이나 printed circuit 형의 compact heat exchanger나 tube 형태 열교환기가 사용되고 있지만 NHDD 프로그램의 IHX 형태는 아직 확정되지 않았고 내부적으로는 여러 연구가 진행되어 왔다[3,4]. IHX의 설계에는 열전달 성능, 구조재의 재료 선정 및 구조 건전성 평가 등과 같은 분야에 많은 연구와 실험이 수행되어야 한다. Table 1은 NHDD 프로그램의 설계지침을 개략적으로 정리한 것이다.

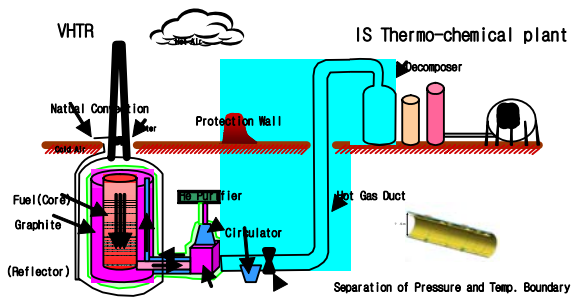


Fig. 1 NHDD Program

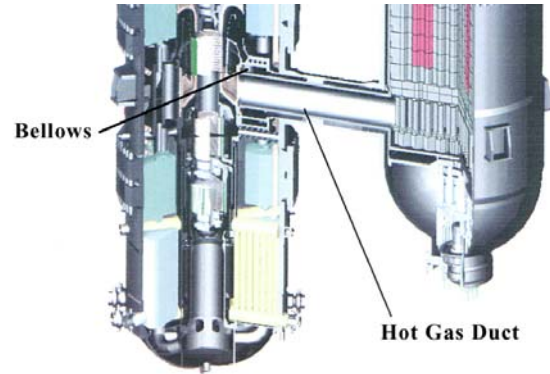


Fig. 2 Position of HGD

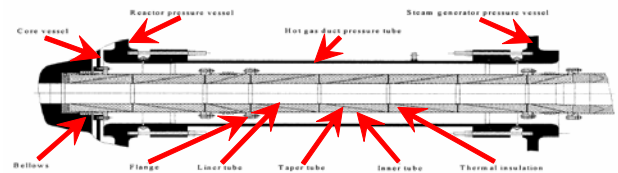


Fig. 3 Structure of the HGD

Table 1 NHDD Design Configuration

Component	Design Options	Remarks
Power	200MWth	Minimum for O&M Cost
Fuel type	Prismatic or Pebble	Both for Feasibility
Pressure Boundary	40-70 bar	Pumping Power
Inlet Temperature	400-590 °C	Core Hotspot
Outlet Temperature	950 °C	
Intermediate Loop	PHE or Tubular HE	Integrated or Separated
RCL	Gas Duct	Concentric or Separated
	IHX and Circulator	Integrated or Separated

3. Hot Gas Duct 개념설계

HTR 모듈개념에 있는 HGD이 NHDD 프로그램의 HGD 개념으로 고려되고 있다. NHDD 프로그램에서 950 °C의 초고온 헬륨가스는 1차 HGD의 liner tube를 통해 IHX로 운반되며 IHX에서 냉각된 헬륨가스(400-590 °C)는 HGD의 압력용기와 inner tube사이의 공간을 통해 원자로로 되돌아온다. 1차 HGD에서 헬륨가스의 압력은 약

3.0 MPa 정도이다. 원자로심은 원자로 압력용기 안에 위치해 있고 열교환 장치와 헬륨순환기는 IHX 내에 위치해 있다. 원자로와 IHX는 Fig. 2에서 보듯이 HGD으로 연결되어 있다. HGD의 구조는 HTR-10와 유사한데, inner tube, outer tube, insulation layer, corundum brick 등으로 구성되어 있고 outer tube는 inner tube와 단열층(insulation layer)을 지지하는 구조물 역할을 한다. Outer tube 양단은 열팽창을 수용하기 위해 주름이 잡힌 파이프(bellows)에 용접되어 있다. 1차 HGD은 설치를 용이하게 하기 위해 5개의 section으로 나뉘어 있으며 각 section은 slide joint로 연결되어 있다. Corundum brick은 단열재로 사용되며 두개의 inner tube 사이에 위치하며 outer tube 에 고정되어 있다. 1차 HGD의 기능은 첫째, 노심으로부터 IHX까지 초고온의 헬륨가스를 이송하며 둘째, IHX에서 원자로심으로 저온의 헬륨가스를 이송하며 셋째, 여러 운전 조건하에서 열팽창을 수용하도록 하며 큰 열응력이 발생하지 않도록 하는 것이다. 2차 HGD의 기능은 첫째, IHX에서 열전달로 되어 초고온이 된 2차 헬륨가스를 IHX에서 SO₃ 분해기로 이송하며 둘째, SO₃ 분해기에서 열전달 되어 저온이 된 2차 헬륨가스를 IHX로 이송하며 셋째, 여러 운전 조건하에서 열팽창을 수용하도록 하며 큰 열응력이 발생하지 않도록 하는 것이다.

1차와 2차 HGD은 Safety Class 3과 Seismic Class 1에 따라 설계되며 flange, bellows, liner tube, separating taper tube 및 열차단 fiber 등이 이 범주에 속한다. 1차 HGD의 설계 파라미터는 Table 2에 따르며 열차단 fiber 의 최대 밀봉압력은 0.03 MPa로 가정한다. 400-590 °C의 저온 헬륨가스는 헬륨순환기를 통해 inner tube와 duct pressure vessel 사이의 환형공간을 통해 들어와서 원자로로 들어간다. 원자로에서 950 °C로 가열된 헬륨가스는 HGD의 liner tube를 통해 IHX로 이송된다. HGD은 장기간 동안 초고온의 중압조건에서 운전되며 초고온 및 저온의 헬륨가스 유동에 의한 열팽창, 온도 및 압력주기에 견딜 수 있는 구조건전성 등이 중요한 설계고려사항이다. NHDD 프로그램에서 HGD의 기초적인 기하학적 치수는 HTR-10의 그것에 비해 20배의 큰 출력용량으로부터 결정하였다. 그리고 NHDD 프로그램의 HGD의 구조건전성 및 강도평가는

HTR-10 개념에 입각하여 수행하였고 다음과 같은 가정하였다[5]. 1) 원자로 압력용기 및 IHX의 중심축 사이 거리는 13,620 mm이다. 2) 사고조건에서 1차 루프 경계에서 기기의 온도상승은 250 °C 이다. 3) 사고조건에서 inner tube의 온도상승은 400 °C 이다. 4) inner tube의 열팽창계수는 $1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 이다. 5) 압력용기 끝단 재료의 열팽창 계수와 그 길이는 각각 $1.7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 와 2,440 mm 이다. 6) 열차폐재료의 물성은 Al₂O₃와 유사하다. 7) 헬륨가스의 질량유동률과 속도는 500 g/s와 25 m/s 이다. 8) 열차단재에서 최대 밀봉압력은 0.03 MPa이고 압력차는 0.2 MPa 이하이다. 9) inner tube, liner tube, steel pressure vessel 및 taper tube의 재질은 HTR-10과 동일하다. 1차 HGD에서 강도평가결과는 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Strength Evaluation Results

Item	Design Options	Results
Thermal compensation of bellows	3 mm/ ripple	more than 7 ripples
Strength evaluation of the liner tube	$\sigma_1^{acc} = 12.3 \text{ MPa}$	$\sigma_1^{acc} > \sigma_1$
Strength evaluation of the inner tube	$\sigma_4^{acc} = 11.97 \text{ MPa}$	$\sigma_4^{acc} > \sigma_4$
Taper tube (small dia. end) - Max. nominal stress (S_1) - mean shear stress (t_1)	$1.5 S_3 = 14 \text{ MPa}$ $1.33 \times 0.6 S_3 = 7.4 \text{ MPa}$	$S_1^{max} < 1.5 S_3$ $t_1 < 7.4 \text{ MPa}$
Taper tube (large dia. end) - Max. nominal stress (S_2) - mean shear stress (t_2)	$1.5 S_3 = 14 \text{ MPa}$ $1.33 \times 0.6 S_3 = 7.4 \text{ MPa}$	$S_2^{max} < 1.5 S_3$ $t_2 < 7.4 \text{ MPa}$

4. IHX 개념설계

간접방식의 VHTR이 차세대원자로에 많이 사용되고 있는데 이는 열원이 수소생산에 사용되어지며 복잡성과 원자력부품에 관련된 위험성을 최소화

화 할 수 있기 때문이다. NHDD 프로그램에서 IHX는 고효율성과 낮은 압력강하가 요구되어 지는데 NHDD 프로그램의 IHX는 1차 및 2차 냉각재 사이에 매우 신뢰성 높은 경계를 이루면서 밀착(Compact)형 및 열효율이 높아야 한다. Printed circuit 열교환기나 plate-fin형 열교환기가 그 크기 및 열효율성 면에서 매우 매력적인 형태이나 shell 및 tube 형 열교환기도 대안이 될 수 있다. Shell 및 tube 형 열교환기는 일반적으로 그 크기가 매우 크며 열효율도 떨어지는 것으로 알려져 있으나 근래에는 제조기술의 발달로 인해 compact 형 열교환기에 비해 부피가 약 1.5배 정도까지 될 수 있는 것으로 알려져 있으며 검증된 운전 및 제조기술을 감안할 때 NHDD 프로그램의 IHX 대안으로 고려될 수 있다. Fig. 4는 Heatric사에서 고려하고 있는 대용량 IHX의 설계 및 제조 개념도[6]로서 200 MWth급 용량인 NHDD 프로그램의 IHX 설계에 참고가 될 수 있다.

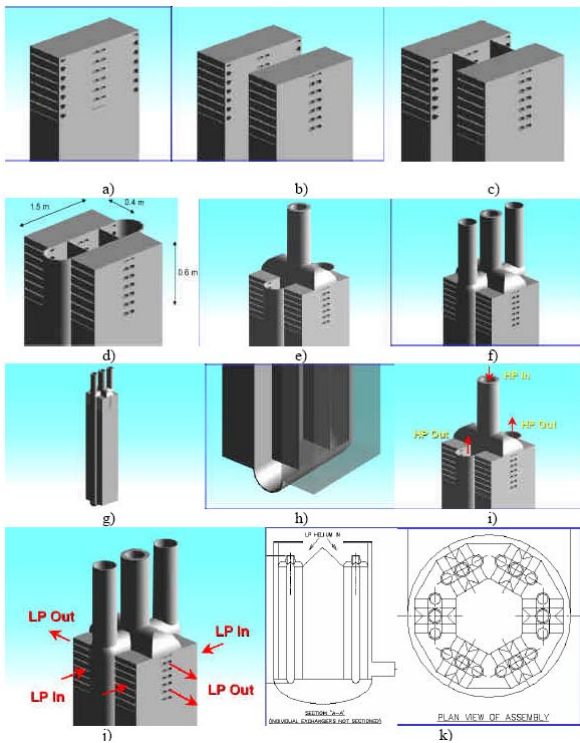


Fig. 4 IHX conceptual design in Heatric Inc.

5. 결 론

한국원자력연구원에서 추진중인 NHDD 프로그램에서는 950 °C의 초고온 가스를 생산할 수 있는 간접주기 가스냉각로를 고려하고 있다. 이러한 간접방식의 가스냉각로에는 IHX 및 HGD이 주요 기기로 고려되고 있으며 본 연구에서는 HTR-10의 설계개념에 입각하여 NHDD 프로그램의 IHX 및 HGD의 sizing 을 결정하고 열팽창 및 강도평가를 수행하였다. 평가결과 선정된 치수에 의거한 HGD 예비개념설계는 강도 및 열팽창 관점에서 타당할 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업인 원자력수소 핵심기술개발(대과제) 초고온가스로 요소기술개발(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Z.Y. HUANG, 2002, Design and experiment of hot gas duct for the HTR-10, *Nuclear Engineering and Design*, **218**, 137-145.
- (2) P. Tochen, 2004, The use of Compact Heat Exchangers technologies for the HTRs recuperator application per proper design, *2nd Int. Topical Meeting on the High Temp. Reactor Technology*, # Paper E09, Beijing, China.
- (3) N.I. Tak and W.J. Lee, 2006, Evaluation of Thermo-fluid Performance of Compact Heat Exchanger with Corrugated Wall Channels, *Trans. Of Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Chuncheon, Korea.
- (4) M.H. Kim, 2006, A CFD Assessment of a Compact High Temperature Heat Exchanger, *Trans. Of Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Chuncheon, Korea.
- (5) J.Y. Kim, 2006, Calculation File of Preliminary Hot Gas Duct Design," NHDD-KA06-ME-005 Rev.00, Nov. 28.
- (6) H. J. Lee. 2006, Design and Fabrication Technology of the Key Components for Very High Temperature Reactor, KAERT/AR-761/2006.