

수소생산용 원자로에서 동심축 이중관형 1차 고온가스덕트의 예비 구조정산

송기남[†] · 김용원^{*}

Preliminary Structural Sizing of the Co-axial Double-tube Type Primary Hot Gas Duct for the Nuclear Hydrogen Reactor

Kee-nam Song[†] and Y-W Kim^{*}

ABSTRACT

Very High Temperature Gas Cooled Reactor (VHTR) has been selected as a high energy heat source for nuclear hydrogen generation. The VHTR can produce hydrogen from heat and water by using a thermo-chemical process or from heat, water, and natural gas by steam reformer technology. A co-axial double-tube primary hot gas duct (HGD) is a key component connecting the reactor pressure vessel and the intermediate heat exchanger (IHx) for the VHTR. In this study, a preliminary design analysis for the primary HGD of the nuclear hydrogen system was carried out. These preliminary design activities include a determination of the size, a strength evaluation and an appropriate material selection. The determination of the size was undertaken based on various engineering concepts, such as a constant flow velocity model, a constant flow rate model, a constant hydraulic head model, and finally a heat balanced model.

Key Words : Nuclear Hydrogen System(원자력 수소 시스템), Hot Gas Duct(고온가스덕트), VHTR(초고온 가스로), Structural Sizing(구조정산)

1. 서 론

초고온가스로(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 원자력수소시스템에서는 VHTR에서 얻어진 초고온(약 950℃) 헬륨기체의 열에너지와 열화학적 요오드 황산(iodine-sulfur; I-S) 공정 방법으로 물을 분해함으로써 청정에너지인 수소를 경제적으로 생산하는 개념을 고려하고 있다. 헬륨기체는 화학적 및 핵적으로 안정적인 물질이어서

정상운전 중에 원자력수소시스템의 1차 루프에 방사능 전달을 최소화 시키는 장점이 있으며 기체 상태에서 상변화 및 물-금속간의 반응과 관련된 문제가 발생되지 않아서 시스템의 안전성을 향상시키는 장점이 있다.

본 연구에서는 열출력 200 MWt급 원자력수소 시스템에서 원자로와 중간열교환기(IHX; Intermediate Heat Exchanger) 사이를 연결하는 핵심 부품인 1차 고온가스덕트(HGD; Hot Gas Duct)의 구조를 동심축 이중관형으로 고려할 경우 1차 HGD를 구성하는 부품들의 치수를 4가지 공학적 개념을 이용하여 선정된 뒤 상호 비교하였다. 또한 상기 1차 HGD를 구성하는 부품들의 재질 후보를 예비 선정한 후 현재 중국에서 성공적으로 운전되고 있는 10 MWt급 고온가스로인 HTR-10의 HGD 설계개념¹⁾에 참조하여 200 MWt급 원자력수소시

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : knsong@kaeri.re.kr

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

* 한국원자력연구원

스텝의 1차 HGD에 대한 강도 및 열팽창 평가 등을 수행하였다.

2. 원자력 수소 시스템의 개념

원자력수소시스템에서는 Figs. 1, 2에서 보듯이 최소 두 개의 HGD와 한 개의 IHX가 필요하다²⁾. 1차 HGD는 원자로와 IHX사이에서 위치하며 2차 HGD는 IHX와 SO₃ 분해기(decomposer) 사이에 위치해 있다. 원자력수소시스템에서 추구하는 HGD의 구조는 초고온(약 950℃)의 헬륨기체와 상대적으로 저온(약 490℃)의 헬륨기체가 수평 동심축(co-axial) 이중관 내로 흐르는 구조를 고려하고 있는데 초고온 헬륨기체 및 상대적으로 저온 헬륨기체의 통로 역할을 한다. Fig. 1에서 보듯이 원자력수소시스템에서 원자로심을 통과한 초고온 헬륨기체는 1차 HGD의 라이너관(liner tube) 내부를 통해 IHX로 이송되며, IHX에서 열교환이 이루어진 저온 헬륨기체는 HGD 압력관(HGD pressure tube)과 내부관(inner tube) 사이의 환형 공간(annulus)을 통해 원자로로 되돌아온다(Fig. 3 참조; Fig. 3은 HTR-10의 HGD 기본구조를 인용한 것이며 원자력 수소 시스템에서는 이 구조를 후보 중의 하나로 고려하고 있음). IHX와 SO₃ 분해기 사이에 있는 2차 HGD는 1차 HGD와 동일한 구조로 설계하는 것을 고려하고 있는데 IHX에서 열교환된 초고온(약 920℃)의 헬륨기체는 SO₃ 분해기에서 물을 분해하여 수소를 생산하기 위한 열원을 공급하면서 냉각되고(약 420℃ 정도) 다시 IHX로 유입된다. Table 1에는 원자력수소시스템의 전체적인 사양이 나타나있다³⁾.

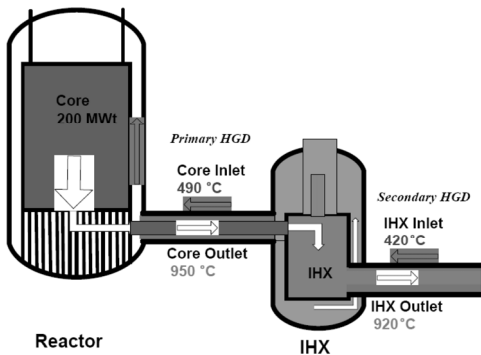


Fig. 1 Nuclear Hydrogen System

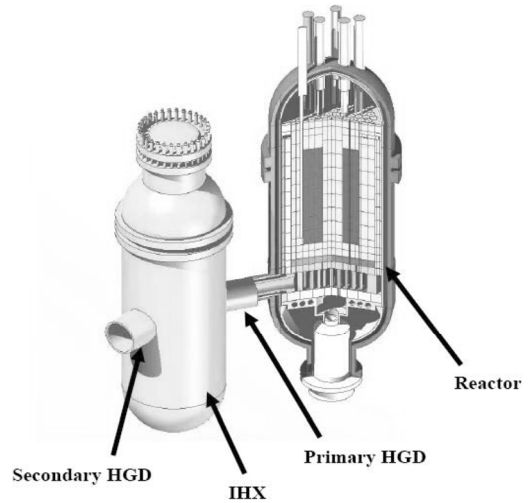


Fig. 2 Position of the HGD

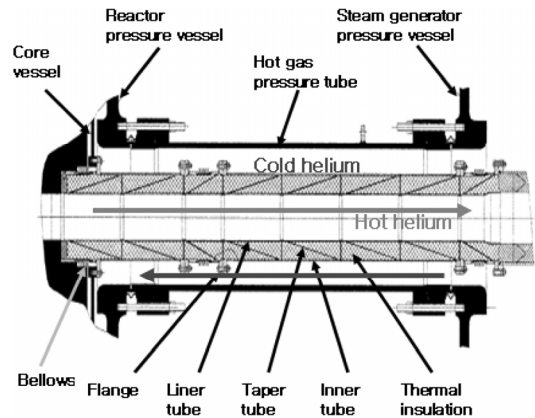


Fig. 3 Structure of the HGD

Table 1 Tentative design configuration

	Design Options
Power [MWt]	~ 200
Fuel Type	Prismatic or Pebble
Pressure Boundary [MPa] - Primary/Secondary loop	~ 7.0/4.0
Inlet/Outlet Temperature [°C] - Primary loop - Secondary loop	~ 490/950 ~ 420/920

3. 1차 HGD의 예비구조정산 및 강도평가

원자력수소시스템의 1차 HGD는 장기간 동안 초고온의 중압(7.0 MPa)조건에서 운전되며 초고온 및 저온의 헬륨기체 유동에 의한 열팽창과 온

도 및 압력주기 등에 견딜 수 있는 구조로 설계되어야 한다.

1차 HGD를 구성하는 구조부품들에 대한 강도 평가 및 열팽창 평가는 잠정적으로 HTR-10 설계 개념에 입각하여 수행하였고 다음과 같이 가정하였다.

1) 원자로 압력용기와 IHX 사이의 중심축 거리는 약 8,855 mm이다(HGD 길이 약 3,200 mm, 원자로 압력용기 직경 약 6,660 mm, IHX 용기 직경 약 4,650 mm).

2) 사고조건에서 1차 루프 경계에서 기기의 온도상승은 250℃ 이다.

3) 사고조건에서 내부관의 온도상승은 400℃ 이다.

4) HGD 압력관의 재질 후보로는 Mod. 9Cr-1Mo 이고 열팽창 계수는 $1.25 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 이다.

5) 내부관의 재질후보로는 Alloy 800H이며 열팽창 계수는 $1.68 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 이다.

6) 열차폐 재료 후보로는 HTR-10의 경험을 준용하여 Al_2O_3 이 고려되었다.

7) 열차폐 재료로 채워진 부위에서 최대 밀봉압력은 0.03 MPa이고 압력손실 사고시 최대 압력차는 0.2 MPa 이하이다.

8) 라이너관, 테이퍼관(taper tube)의 재질 후보로는 Alloy 617 이다.

원자력수소시스템에서 잠정적으로 고려하고 있는 1차 HGD의 구조는 HTR-10과 유사한데 이는 HTR-10의 성공적인 운전경험과 HTR-10의 HGD 구조의 간편성을 감안하여 고려한 것이다. 원자력수소시스템의 1차 HGD는 Figs. 3 및 4에서 보듯이 라이너관, 내부관, 단열재 및 테이퍼관, 고온가스 압력관 등으로 구성되어 있고 내부관은 내부관과 단열재를 지지하는 구조물 역할을 한다. 내부관 양단은 열팽창을 수용하기 위해 팽창 벨로스(bellows)를 사용한다. 1차 HGD는 설치를 용이하게 하기 위해 8개의 부분으로 나뉘어 있으며 각 부분은 활절 이음(slide joint)으로 연결되어 있다. 1차 HGD의 기능은 첫째, 노심으로부터 IHX까지 초고온의 헬륨기체를 이송하며 둘째, IHX에서 원자로심으로 저온의 헬륨기체를 이송하며 셋째, 여러 운전조건하에서 열팽창을 수용하도록 하며 큰 열응력이 발생하지 않도록 하는 것이다. 이상의 가정된 자료들을 이용하여 1차 HGD의 열팽창을

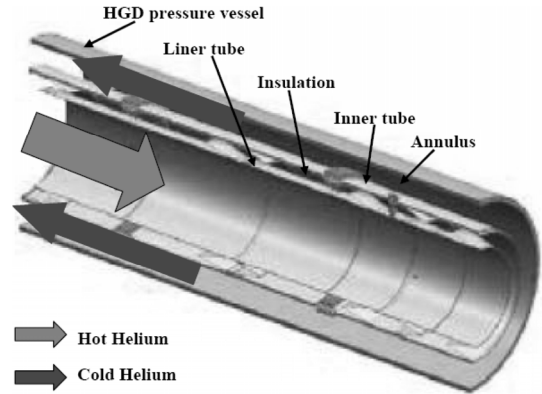


Fig. 4 Internal structure of the coaxial double-tube type HGD

구하면 약 31.83 mm인데 ripple 당 3 mm의 열팽창을 수용할 수 있는 벨로스를 HGD 양단에 사용하고 20%의 여유도를 고려할 경우 각각의 벨로스가 수용해야할 열팽창은 약 19.10 mm 이다. 따라서 원자력 수소 시스템의 1차 HGD에 사용될 벨로스에는 최소 7개의 ripple이 필요할 것으로 평가되었다^{2,4)}.

현재까지 성공적으로 운전되고 있는 HTR-10의 설계개념을 준용하면(향후 원자력수소시스템에서는 우리 실정에 맞게 변경될 가능성이 있지만) 1차 HGD는 Safety Class 3과 Seismic Class 1에 따라 설계되며 플랜지, 벨로스, 라이너관, 분리용 테이퍼관 및 열차단 화이버(fiber) 등이 이 범주에 속한다¹⁾. 200 MWt급 원자력수소시스템에서 1차 HGD의 예비 치수는 다음과 같은 방법과 절차에 따라 결정하였다.

1) 미국 Gernal Atomics사의 600MWt급 GT-MHR(Gas Turbine Modular Helium Reactor)의 열출력(\dot{Q}), 비열(C_p) 및 온도차(ΔT) 자료를^{4,5)} 이용하여 헬륨기체의 유동질량(\dot{m})을 구하고 밀도(ρ), 라이너관의 내부 단면적(A) 등을 이용하고 다음의 관계식으로부터 200MWt급 원자력수소시스템에서 초고온 헬륨기체의 유동질량(\dot{m})을 구한다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T & (1) \\ \dot{m} &= \rho \cdot V \cdot A \end{aligned}$$

본 예비 개념설계에서는 원자력수소시스템의 1

차 HGD를 따라 흐르는 초고온 헬륨기체의 유속이 GT-MHR에서 HGD를 따라 흐르는 초고온 헬륨기체의 최대유속을 넘지 않도록 하였다.

2) 따라서 원자력수소시스템의 초고온 헬륨기체의 유속은 65.43 m/s로 정하였고 유동질량은 Eq. (1)으로부터 83.767 kg/s가 되며 라이너관의 내경 및 두께는 각각 772 mm, 7 mm로 정하였다.

3) 정해진 라이너관의 내경(d_2)과 두께(δ_2)를 이용하고 HTR-10의 설계방법과 기준을 이용하여 강도 평가를 수행하였다. 즉, 라이너관의 원주응력은 열차단재의 압력(P_o : 약 0.03 MPa)에 견디어야 한다.

$$\sigma_1 = \frac{P_o d_2}{2\delta_2} = 1.65 \text{ MPa} \quad (2)$$

여기서 σ_1 의 S_3 보다 작아야 한다^{1,6)}(ASME B&PV Code, Section III, Subsection ND, 1993 참조). 또한 1차 loop의 헬륨기체 손실 사고시에 압력차가 최대 0.2 MPa를 넘지 않는다는 HTR-10 설계방법을 이용하여 라이너관의 원주응력을 평가하였는데 이 값은 1.5 S_3 보다 작아야 한다. 이것은 압력손실 사고가 Level C에 해당되기 때문이다¹⁾.

$$\sigma^{acc_1} = \frac{0.2 d_2}{2\delta_2} = 11.03 \text{ MPa} \quad (3)$$

4) 열차폐재의 두께, 재료 및 테이퍼관의 구조 등은 HTR-10의 설계방법과 구조를 준용하였고 전체 두께는 120 mm로 정하였다.

5) 내부관의 응력은 라이너관의 응력평가와 같은 방법으로 평가하였으며 두께와 내경을 정하였다.

6) HGD 압력관의 내경은 다음과 같이 3가지 공학적 방법과 열평형모델로부터 구하여 비교하였다. 3가지 공학적 방법은 치수결정 절차가 비교적 간단하면서도 HGD 구조물의 유동기인진동(Flow-induced vibration: FIV) 가능성을 감소시키기 위하여 제안된 것이다⁷⁾.

Case1: 라이너관을 따라 흐르는 초고온 헬륨기체의 유속(V)과 환형 공간(annulus)을 따라 흐르는

저온 헬륨기체의 유속을 같게 한 경우이다.

Case 2: 라이너관을 따라 흐르는 초고온 헬륨기체의 유량(ρV)과 환형 공간(annulus)을 따라 흐르는 저온 헬륨기체의 유량을 같게 한 경우로서 통상적인 계통설계시에 널리 사용되고 있다.

Case 3: 라이너관을 따라 흐르는 초고온 헬륨기체의 압력수두($p + \frac{\rho V^2}{2}$)와 환형 공간(annulus)을 따라 흐르는 저온 헬륨기체의 압력수두를 같게 한 경우이다.

Case 4: HGD의 반경방향으로 열손실을 고려한 열평형모델(Heat balance model)⁸⁾과 HGD 구성부품의 열전도도,⁹⁻¹¹⁾ 이용하여 HGD 구성부품의 치수와 온도를 결정할 수 있는데 아래의 열평형식(4)와 열전달 계수 식(5)를 이용한다. Fig. 5는 열평형 모델에 사용된 각 구성부품의 치수와 온도에 대한 변수를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} Q &= q \cdot \pi \cdot D_7 \\ &= h_{He-Hot} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (T_0 - T_1) \\ &= \frac{2\pi k_{Liner\ tube}}{\ln(D_2/D_1)} \cdot (T_1 - T_2) \\ &= \frac{2\pi k_{Insulation-1}}{\ln(D_3/D_2)} \cdot (T_2 - T_3) \\ &= \frac{2\pi k_{Inner\ tube}}{\ln(D_4/D_3)} \cdot (T_3 - T_4) \\ &= h_{He-Cold} \cdot \pi \cdot D_4 \cdot (T_4 - T_5) \\ &= \frac{2\pi k_{HGD\ press.\ tube}}{\ln(D_6/D_5)} \cdot (T_5 - T_6) \\ &= \frac{2\pi k_{Insulation-2}}{\ln(D_7/D_6)} \cdot (T_6 - T_7) \\ &= h_{air} \cdot \pi \cdot D_7 \cdot (T_7 - T_{air}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

Q : 단위길이당 열속(heat flux)

h_{He-Hot} : 라이너관 내면에서 열전달 계수

$h_{He-Cold}$: 내부관 외면에서 열전달 계수

h_{air} : 열차폐재-2의 외면에서 열전달 계수

$k_{Liner\ tube}$: 라이너관의 열전도도

$k_{Insulation-1}$: 열차폐재-1의 유효 열전도도

$k_{Inner\ tube}$: 내부관의 열전도도

$k_{HGD\ press.\ tube}$: HGD 압력관의 열전도도

$k_{Insulation-2}$: 열차폐재-2의 유효 열전도도

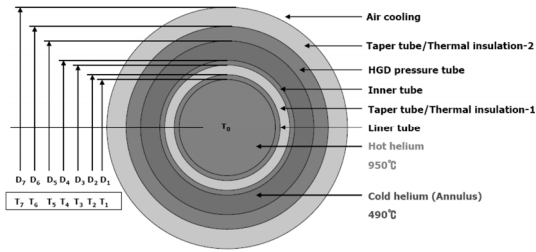


Fig. 5 Cross-section of the primary HGD and its design parameters for the heat balance model

환형 공간에서의 헬륨기체의 열전달 계수($h_{He-cold}$)는 환형공간에서의 수력직경(D_H) 및 헬륨기체의 열전도도(k)와 아래의 수정된 Dittus-Boelter model¹²⁾로부터 구할 수 있다.

$$Nu = \frac{h_{He-cold} D_H}{k} = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

여기서 Nu 는 Nusselt number, Re 는 Reynolds number, Pr 은 Prandtl number 이다.

200 MWt급 원자력수소시스템의 1차 HGD에서 단위길이당 반경방향으로의 열속(Q)은 HTR-10의 열속과 HTR-10의 HGD 라이너관 직경¹⁾ 그리고 200 MWt 원자력수소시스템의 라이너관 직경(772 mm)을 이용하여 구하였으며 그 값은 25.53 kW/m로 가정하였다. 또한 열평형 식(4)와 HTR-10의 열전도도에 대한 경험식¹⁾으로부터 열차폐재(Thermal insulation)의 두께를 구할 수 있으나 열차폐재의 두께가 실제 HTR-10에 사용된 열차폐재 구조부품 전체의 두께보다 작아서 본 연구에서는 HTR-10에서와 같이 열차폐재 구조부품의 전체 두께를 120 mm로 가정하였다.

Case 4의 개념을 이용하여 얻은 1차 HGD 구성 부품들의 치수와 온도는 Table 2에 나타나 있고 HTR-10의 구조평가 방법¹⁾에 의거한 예비강도 평가결과는 Table 3에 나타나 있는데 설계요구사항을 만족하는 것으로 보인다. 그러나 향후 950°C의 초고온 영역에 대한 설계평가방법이 ASME 규격 등 다른 규격에서 확정될 경우 상세평가는 확정된 방법에 따라 다시 평가되어야 할 것이며 본 연구에서는 현재의 참조방법에 따라 예비로 평가한 것이다. 한편 Case 1, Case 2 및Case 3으로부터 얻

Table 2 Preliminary design values of the primary HGD using heat balance model

i	T _i (°C)	D _i (m)	Thickness (mm)	Remark
1	950	0.772		
2	947	0.786	7	Liner tube
3	497	1.026	120	Thermal insulation-1
4	493	1.046	10	Inner tube
5	488	1.315	135	Annulus
6	473	1.446	65	HGD pressure tube
7	50	1.686	120	Thermal insulation-2

Table 3 Strength evaluation of the primary HGD using heat balance model

Item	Design Options	Results
Strength evaluation of the liner tube	14.0 MPa	11.0
Strength evaluation of the inner tube	165.0 MPa	10.3
Taper tube (small dia. end)		
- Max. nominal stress	14 MPa	0.46
- Mean shear stress	7.4 MPa	0.29
Taper tube(large dia. end)		
- Max. nominal stress	14 MPa	0.43
- mean shear stress	7.4 MPa	0.18
HGD pressure vessel tube		
- Max. nominal stress	72 MPa	70.9

Table 4 Geometric dimensions for each model (mm)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Material
Liner tube					Alloy 617
ID	772	772	772	772	
OD	786	786	786	786	
Insulation-1	120	120	120	120	Al ₂ O ₃
Inner tube					Alloy 800H
ID	1026	1026	1026	1026	
OD	1046	1046	1046	1046	
HGD PV					Mod.9Cr1Mo
ID	1211	1300	1252	1315	
Thickness	60	65	65	65	
Insulation-2	120	120	120	120	Al ₂ O ₃

은 1차 HGD 구성부품들의 치수로부터 구한 강도 평가결과는 참고문헌 2에 나타나 있다.

Case 1, Case 2, Case 3, Case 4의 방법으로부터 구한 1차 HGD의 기하학적 치수는 Table 4에 나타나 있는데 네 가지 모델로부터 구한 HGD 압력관의 내경은 약 1200-1300 mm 정도가 될 것으로 보인다. 주목할 점은 라이너관을 따라 흐르는

초고온 헬륨기체의 유량(ρV)과 환형 공간(annulus)을 따라 흐르는 저온 헬륨기체의 유량을 같게 한 경우(Case 2)로부터 구한 치수와 열평형모델을 이용하여 구한 치수를 비교할 때 큰 차이가 없다는 것이다. 이는 향후 동심축 이중관형 HGD의 환형 공간에 대한 치수 결정시에 다소 복잡한 열평형모델을 이용하는 대신에 비교적 간편한 방법을 이용해도 예비설계 치수 결정이 어느 정도 가능함을 시사해 준다고 볼 수 있다.

4. 결론

한국원자력연구원에서 추진중인 원자력수소시스템에서는 950℃의 초고온 헬륨기체를 생산할 수 있는 간접주기 가스냉각로를 고려하고 있는데 이러한 간접방식의 가스냉각로에서 동심축 이중관형 1차 HGD는 원자로 용기와 중간열교환기를 연결하는 핵심 기기로 고려되고 있다. 본 연구에서는 미국 GA사의 600 MWt급 GT-MHR 및 H2-MHR 설계자료와 중국의 HTR-10의 설계자료를 참조하여 200 MWt급 원자력수소시스템의 동심축 이중관형 1차 HGD 구조에 대한 치수를 4가지 공학적 개념에 입각하여 예비적으로 결정하였으며 아울러 열팽창 평가 및 강도평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. HGD 구조물의 열팽창 평가 결과 1차 HGD에 사용될 벨로스에는 최소 7개의 ripple이 필요할 것으로 평가되었다.

2. 3가지 공학적 방법과 열평형모델을 이용하여 HGD 구성부품의 치수를 결정한 결과 HGD 압력관 내경은 약 1211-1316 mm 정도이다.

3. 초고온 영역과 저온 영역의 헬륨기체 유량을 같게 한 경우와 열평형 모델을 이용한 경우로부터 얻는 HGD 치수는 큰 차이가 없다. 따라서 예비치수 결정시에 비교적 간편한 방법으로 1차 HGD의 치수를 결정할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Z.Y. Huang, Z.M. Zhang, M.S. Yao, and S.Y. He, 2002, "Design and experiment of hot gas duct for the HTR-10," *Nuclear Engineering and Design*, **218**, 137-145.
2. 송기남, 김용완, 2008, "수소생산용 원자로에서 동심축 이중관형 고온가스덕트의 예비설계," *Transaction of KPVP* Vol. 4, No. 1, (pp. 8-13).
3. J.H. Chang, Y.W. Kim, K.Y. Lee, Y.W. Lee, W.J. Lee, J.M. Noh, M.H. Kim, H.S. Lim, Y.J. Shin, K.K. Bae, and K.D. Jung, 2007, "A Study of a Nuclear Hydrogen Production Demonstration Plant," *Nuclear Engineering and Technology*, **39**, 111-122.
4. NIST, Thermo-physical Properties of Fluid System, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
5. 탁남일, 2007, 원자력수소 핵심기술 개발 업무처리전, NHDD-KA-07-RD-BT-001,
6. ASME B&P Vessel Code, Section III, Subsection ND, 1993.
7. 송기남, 2007, "Hot Gas Duct 예비치수 결정 및 열팽창/강도 평가 계산서," Calc. Note No. NHDD-KA07-ME-002 Rev.02, 한국원자력연구원.
8. J.P. Holman, 1963, *Heat Transfer*, 3rd ed. McGraw-Hill.
9. 김우곤, 2006, "Alloy 617의 열물성자료," 원자력 수소핵심기술개발업무처리전. NHDD-KA-06-MA-BT-002.
10. 김성호, 2006, "압력용기 후보재료(SA508-Gr.3 and Modified 9Cr-1Mo) 물성값," 원자력수소 핵심기술 개발 업무처리전. NHDD-KA-06-MA-BT-003.
11. 김대환, 2006, "노심배럴 후보재료 Alloy 800의 열물성치," 원자력수소 핵심기술 개발 업무처리전. NHDD-KA-06-MA-BT-001.
12. McEligot D. M., Ormand L. W., and Perkins H. C., 1966, "Internal Low Reynolds Number Turbulent and Transitional Gas Flow with Heat Transfer", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 88, pp. 239-245.