

배관 강성을 고려한 소형 공정열교환기 시제품에 대한 탄성 고온구조해석

송기남[†] · 강지호* · 홍성덕* · 박홍윤**

Elastic High-temperature Structural Analysis on the Small Scale PHE Prototype Considering the Pipeline Stiffness

Kee-nam Song[†], J-H Kang*, S-D Hong* and H-Y Park**

(Received 28 JUL 2011, Accepted 8 AUG 2011)

ABSTRACT

A PHE (Process Heat Exchanger) is a key component required to transfer heat energy of 950°C generated in a VHTR (Very High Temperature Reactor) to the chemical reaction that yields a large quantity of hydrogen. A small-scale PHE prototype made of Hastelloy-X is being tested in a small-scale gas loop at Korea Atomic Energy Research Institute. In this study, as a part of the evaluation on the high-temperature structural integrity of the small-scale PHE prototype, we carried out macroscopic high-temperature structural analysis of the small-scale PHE prototype under the gas loop test conditions considering the pipeline stiffness.

Key Words : High-temperature Structural Analysis(고온구조해석), Nuclear Hydrogen System(원자력 수소 시스템), Process Heat Exchanger(PHE; 공정열교환기), Very High Temperature Reactor(VHTR; 초고온 가스로)

기호설명

k = spring stiffness
 A = pipe cross-section area
 E = elastic constant
 L = pipe length
 I = inertia moment

1. 서론

초고온가스(로(Very High Temperature gas cooled Reactor; VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 수

소를 대량 및 경제적으로 생산하려는 연구가 우리나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서 수행되고 있다¹⁻⁵⁾. 우리나라의 원자력수소생산 시스템에서는 VHTR에서 얻어진 초고온(약 950°C) 헬륨기체의 열에너지와 열 화학적 황산-요오드 공정을 이용하여 물을 분해함으로써 청정에너지인 수소를 대량으로 생산하는 개념을 고려하고 있는데⁵⁻⁷⁾, 이 시스템에서는 Fig. 1에서 보듯이 초고온가스의 이동 통로인 고온가스덕트(Hot Gas Duct; HGD)^{8,9)}, 초고온열을 전달하는 중간 열교환기(Intermediate Heat Exchanger; IHX) 및 물을 분해하기 위한 열교환기로서 공정열 교환기(Process Heat Exchanger; PHE) 등으로 구성된 중간루프가 반드시 필요하다.

한국원자력연구원에서는 근래에 최대 설계온도 1000°C인 소형가스루프를 구축하였고 Hastelloy-X로 제작된 PHE 소형 시제품과 SUS 및 Inconel800HT로 제작된 소형 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) 시제품 그

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : knsong@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2254 FAX : (042)868-2066

* 한국원자력연구원

** AD Solution

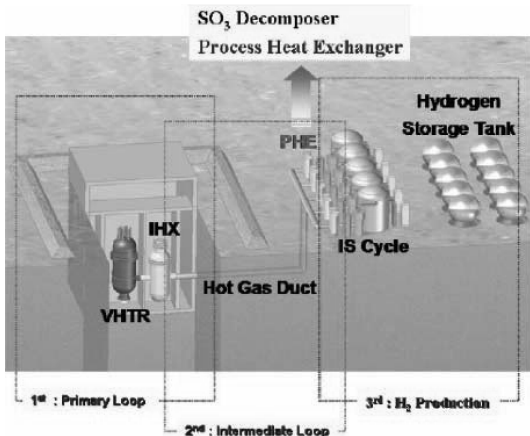


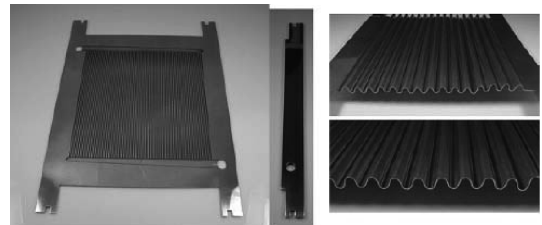
Fig. 1 Nuclear hydrogen system

리고 HGD 시제품 등과 같은 원자력수소생산 시스템의 핵심기기에 대한 성능시험을 수행하여 관련 시험기술을 축적하려 하고 있다.

소형 PHE 시제품에 대한 일련의 고온구조특성 해석연구결과에 의하면 소형 PHE 시제품과 연결된 배관의 특성이 소형 PHE 시제품의 구조 건전성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려졌다¹⁰⁻¹². 본 연구에서는 소형가스루프에 설치된 소형 PHE 시제품의 배관의 특성을 고려하여 소형가스루프 시험조건 하에서 고온탄성구조해석을 수행하였고 그 결과를 분석하여 제시하였다.

2. 소형 공정열교환기 시제품의 구조

제작된 소형 PHE 시제품에서 1차 측 초고온 열매체(He 기체)가 흐르는 유로판의 표면에는 직경 1.0mm의 그루브(groove)가 기계가공으로 형성되어 있으며, 2차 측 저온 냉각재(SO₂ 기체)가 흐르는 유로 채널은 물결 모양의 유로가 굽힘 가공에 의해 형성되어 있다(Fig. 2 및 3 참조)^{13,14}. 이 소형 PHE 시제품의 내부는 1차 측 고온 열매체용 유로판 10개와 2차 측 저온 냉각재용 유로판 10개가 교대로 적층되고 적층된 유로판들의 모서리는 확산접합(diffusion bonding)되며 적층 및 확산접합된 유로판 외부는 두께 3.0mm의 Hastelloy-X 판으로 감싸여서 압력경계를 이루고 있다. 논문의 이해를 돕기 위해 Fig. 4는 소형 PHE 시제품의 전반적인 치수와 소형 PHE 시제품을 구성하는 각 부품들의 형상과 조립내역 등을 3차원 CAD로 나타낸 것이며 Fig.



(a) primary flow plate (b) secondary flow plate

Fig. 2 Flow plates

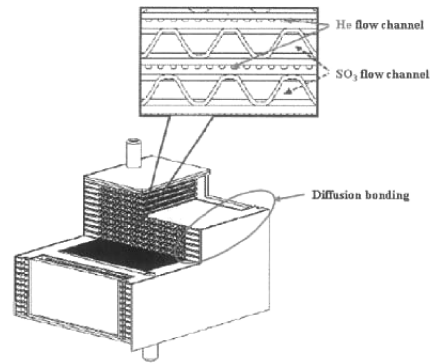


Fig. 3 Inside of PHE

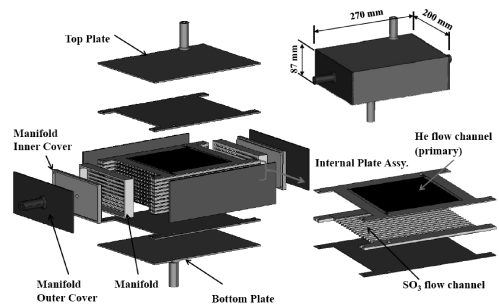


Fig. 4 Parts of inside of PHE prototype

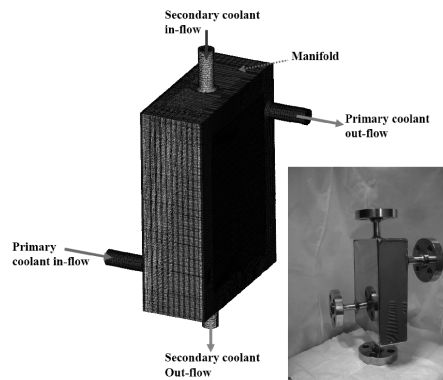


Fig. 5 Small-scale PHE prototype

5는 소형 PHE 시제품의 3차원 CAD 형상과 실제 시제품 사진 및 조립된 소형 PHE 시제품 형상에서 1차 및 2차 유체의 유입/유출 경로 등을 나타낸 것이다.

3. 열해석

소형 PHE 시제품에 대한 구조해석용 FE 모델링, 1차 및 2차 유체의 유입/유출구 모델링 및 열 해석 및 고온 구조해석을 위한 경계조건과 고온 탄성/탄소성 구조해석결과 등에 대한 상세한 사항은 예전 연구¹¹⁾에 기술되어 있지만 본 논문의 이해를 돕기 위해 아래의 3.1, 3.2에 간략히 요약하여 기술하였다.

3.1 유한요소(FE) 모델링

FE 모델링 및 열 해석은 I-DEAS/TMG Ver. 6.1¹⁵⁾을 사용하였으며 구조해석은 ABAQUS Ver. 6.9-1¹⁶⁾을 사용하였다. 1차 및 2차 측 유동의 열적 접촉조건을 부여하기 위해 FE 모델에서는 546,764개의 2차원 선형 사각형 쉘 요소와 911,012개의 3차원 선형 체적 요소로 구성되어 있으며 총 절점 수는 1,102,822이다. 3차원 선형 체적요소로는 육면체 요소 830,304개가 사용되었고, 해석의 정확도는 떨어지나 복잡한 형상을 용이하게 구현하기 위해 부분적으로 오면체 요소 80,348개 및 사면체 요소 360개가 사용되었다.

3.2 열 해석용 경계조건

소형가스루프에서 소형 PHE 시제품의 성능시험조건 (1차 열매체의 유입 온도가 850°C)에서 소형 PHE 시제품 전체 구조에 대한 열 해석 결과는 Fig. 6에 나타나 있고 소형 PHE 시제품 외표면의 최대온도는 837.15°C 정도이다. 이 해석 결과는 PHE 시제품의 탄성 고온구조해석에 이용된다.

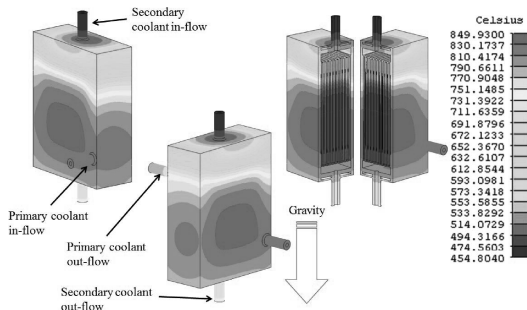


Fig. 6 Temperature distribution of PHE outside

4. 탄성 고온구조해석

4.1 물성치 및 경계조건

열 해석 결과를 이용하여 소형 PHE 시제품 전체 구조에 대한 탄성 고온구조해석을 수행하였다. Hastelloy-X의 물성치는 참고문헌 18의 값을 사용하였다. Fig. 7은 소형가스루프에 설치된 소형 PHE 시제품과 배관을 나타낸 것으로 열팽창을 수용하기 위해 소형 PHE 시제품은 U-tube 및 엘보우 곡관, 직관(straight tube) 등과 연결되어 있다. 또한 2차 유체 유출관이 부착되어 있는 소형 PHE 시제품 밑면은 고정된 받침대(fixed shelf) 위에 놓여 있다.

소형가스루프에 설치된 소형 PHE 시제품의 구조 건전성을 적절하게 평가하기 위해서는 소형 PHE 시제품과 연결된 배관들의 특성을 적절하게 모사한 구속조건을 소형 PHE 시제품 구조해석 모델에 적용하는 것이다. 소형 PHE 시제품과 연결된 U-tube 및 엘보우 곡관, 직관 등의 배관 들은 길이 방향으로 열팽창을 수용하는 부분과 굽힘 변형으로 열팽창을 수용하는 부분으로 나누어 질 수 있으며 본 연구에서는 이를 구조해석 모델의 구속조건으로 적용하기 위해 열팽창을 수용할 수 있는 등가 스프링 강성 개념을 도입하였다. 부연하여 설명하면 소형 PHE 시제품의 1차 및 2차 유체 유입/유출 파이프 라인에 연결된 U-tube 및 엘보우 곡관, 직관 등의 실제 치수를 이용하여 길이 방향 변형과 횡 방향 변형을 야기하는 스프링 강성으로부터 등가 스프링 강성을 구하여 이를 소형 PHE 시제품 구조해석 모델의 구속조건으로 적용하는 것이다. 등가 스프링 강성을 구하기 위한 과정은 연결된 배

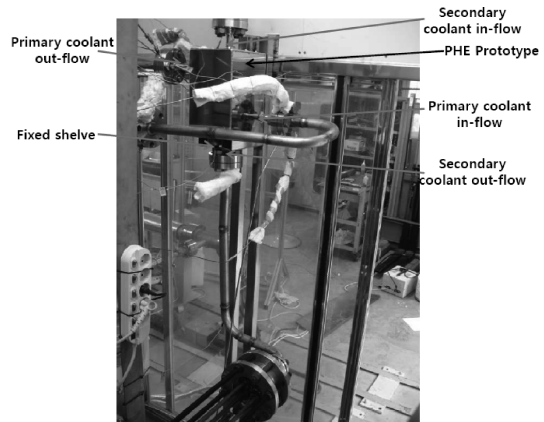


Fig. 7 Set-up of PHE prototype in the gas loop

관에서 길이 방향의 열팽창을 수용할 수 있는 부위의 스프링 강성(k_{ex})과 굽힘 변형에 의한 열팽창을 수용할 수 있는 부위의 스프링 강성(k_b)을 아래 식 (1)~(2)에서 구하고 식 (3)에 의해 등가 스프링 강성(k_{eq})을 구한다.

$$k_{ex} = \frac{AE}{L_{ex}} \quad (1)$$

$$k_b = \frac{3EI_b}{L_b^3} \quad (2)$$

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_{ex}} + \frac{1}{k_b} \quad (3)$$

여기서

A : 배관의 단면적

E : 재료의 탄성계수

L_{ex} : 직관 배관의 길이

L_b : U-tube 및 엘보우 곡관에서 굽힘 모멘트를 유발하는 팔 길이

I_b : 굽힘 관성 모멘트

1차 유체 유입/유출구 및 2차 유체 유입구 파이프라인과 연결된 배관들의 형상 및 치수 그리고 상기 식 (1)~(3)을 이용하여 구한 등가 스프링 강성과 받침대 위 놓여있는 소형 PHE 시제품 하단부의 변위를 구속한 경계조건은 Fig. 8에 나타나 있다. 즉, 유입(유출)구 파이프라인 끝단에 구속점을 설정하고 Fig. 8에서와

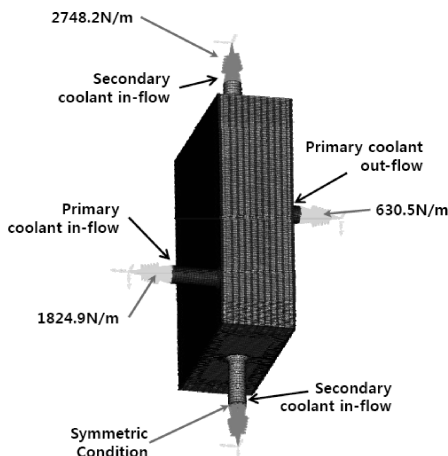


Fig. 8 Boundary conditions

같은 스프링 강성을 파이프라인 길이 방향으로만 적용하였다.

고정된 받침대위에 놓여있는 소형 PHE 시제품 하단부는 접촉요소를 이용한 접촉조건을 적용해야하나 현재 구성된 모델에서 접촉조건을 적용할 경우 해석 모델이 workstation에서 작동되지 않아서 부득이 시제품 하단부의 2차 유체 유출구 파이프라인에 접촉조건과 유사할 것으로 판단되는 구속조건(Fig. 8에서 보듯이 대칭조건-수직방향 변위만을 구속함)을 적용함)을 조사하여 적용하였다. 이 조건은 소형 PHE 시제품 하단부 밑면에 대칭조건을 부여하는 것보다는 더 접촉조건에 근접하는 경계조건으로 알려져 있다¹⁷⁾.

4.2 탄성 고온구조해석 결과

유체의 온도 조건 및 압력 조건(1차 측 3.0 MPa, 2차 측 0.1 MPa)을 고려하여 수행한 탄성 고온구조해석 결과는 Fig. 9 및 10에 나타나 있다. Fig. 8의 구속조건을 적용한 해석에서 2차 유체 유출구가 부착된 소형 PHE 시제품 하단부의 변형 양상을 살펴본 결과 고정된 받침대 속으로의 변형(접촉조건 적용시의 침투가 발생하지 않았고 부분적으로 간극 발생이 가능한 변형이 있음)이 없어서 4.1절 하단에서 언급한 “소형 PHE 시제품 하단부 밑면에 대칭조건을 부여”-간극의 발생을 억제한 다소 과도한 구속조건-보다 실제 접촉요소를 사용한 접촉조건에 더 근접하는 조건임을 확인하였다.

Fig. 9는 소형 PHE 시제품 압력경계에서 응력분포와 최대응력 발생위치를 나타낸 것으로 Fig. 9에서 보면 상부관의 모서리 부위에서 최대응력(272.26 MPa)이 발생하였고 이는 재료의 항복응력(291 MPa at 500°C)¹⁸⁾보다 작은 값이다. 따라서 탄성 고온구조해석에서 얻어진 최대응력이 국부적인 응력인데다 재료의 항복응력보다 작기 때문에 소형 PHE 시제품은 소형가스루프 시험조건하에서 고온 구조 건전성이 저해되는 않을 것으로 보인다. 다만 최대응력이 발생한 부위가 유로관들이 적용되고 확산접합된 부위이어서 실제 시제품 제조시에는 구조적으로 취약한 부위 주변이 될 수 있으므로 양호한 접합품질 및 접합기술을 확보하는 것이 필요하다 하겠다. 그리고 소형 PHE 시제품 압력경계와 2차 유체 유출구와 접하는 부위(Fig. 9의 좌측 상단 그림 참조)에서 발생한 상대적으로 높은 응력은 원래 시제품에서 이 부위는 모서리 가공(rounding or chamfer 가공)되어 있으나 구조해

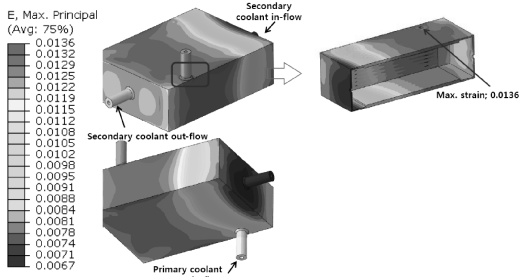


Fig. 9 Stress distribution of the PHE prototype

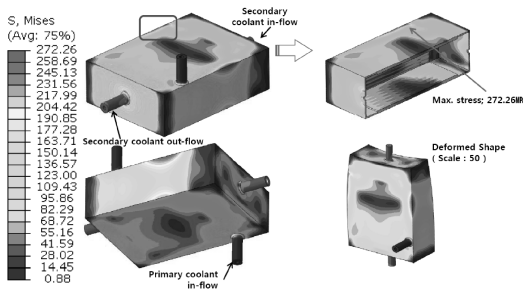


Fig. 10 Strain distribution of the PHE prototype

석모델에서는 이를 고려하지 않았기 때문으로 크게 우려할 사항은 아닌 것으로 판단된다. 한편 50배로 확대된 변형 형상을 살펴보면(Fig. 9의 우측 하단 그림 참조) 소형 PHE 시제품의 변형 양상이 Fig. 6의 온도 분포와 밀접하게 연관되어 있는 것으로 보인다. 즉, 상대적으로 온도가 높은 하단 부위(고온의 1차 유체 유입에 따라 높은 온도 분포 발생)는 많이 팽창하고 온도가 낮은 상단 부위(저온의 차 유체 유입에 따라 낮은 온도 분포 발생)는 덜 팽창하는 양상이다.

Fig. 10은 소형 PHE 시제품 압력경계에서 변형률 분포를 나타낸 것으로 최대 변형률은 1차 유체 유입구와 시제품의 압력경계가 맞닿는 부위에서 발생하였다. 한편 Fig. 10의 변형률 분포를 살펴보면 앞에서 논한 소형 PHE 시제품의 변형 형상(Fig. 9의 우측 하단 그림 참조)에서와 같이 온도분포에 따른 팽창 양상의 차이를 볼 수 있다.

5. 결론

소형가스루프에 설치된 소형 PHE 시제품에 대한 거시적인 고온 구조건전성을 파악하기 위해 소형 PHE 시제품과 연결된 배관들의 특성을 고려한 탄성 고온 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄성 고온구조해석결과, 최대응력의 크기가 재료의 항복응력보다 낮아서 소형가스루프의 실험조건에서 실험할 경우 소형 PHE 시제품의 구조건전성은 유지될 수 있을 것으로 보인다.

2. 그러나 최대응력이 발생한 부위가 유로관들이 확산접합에 의해 접합된 부위이므로 양호한 접합품질 및 접합기술을 확보하는 것이 필요하다.

3. 향후 연구에서는 시제품 하단부에 접촉조건을 부여하는 FE 모델과 기법을 확보하여 해석을 수행하고 1차 및 2차 유로관 20개가 교대로 적층된 중형 PHE 시제품에 대한 고온 구조해석을 수행하여 구조건전성을 평가할 예정이다.

후 기

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

참고문헌

1. US DOE, 2009, *Financial Assistance Funding Opportunity Announcement*, NNGP Program.
2. AREVA, 2007, *NGNP with Hydrogen Production Pre-conceptual Design Studies Report*, Doc. No. 1209052076-000.
3. Idaho National Laboratory, 2007, *NGNP Pre-conceptual Design Report*, INL/EXT-07-12967.
4. Westinghouse, 2007, *NGNP and Hydrogen Production Pre-conceptual Design Report*, NNGP-ESP-RPT-001, Rev.01.
5. Chang, J-H, Kim, Y-W, Lee, K-Y, Lee, Y-W, Lee, W-J, Noh, J-M, Kim, M-H, Lim, H-S, Shin, Y-J, Bae, K-K, and Jung, K-D, 2007, "A study of a nuclear hydrogen production demonstration plant", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 111-122.
6. Lee, W-J, Kim, Y-W, and Chang, J-H, 2009, "Perspectives of nuclear heat and hydrogen", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41, No. 4, pp. 413-426.
7. Shin, Y-J, Chang, K-W, Kim, J-H, Park, B-H, Lee, K-Y, Lee, W-J, and Chang, J-H, 2009, "A dynamic simulation of the sulfuric acid decomposition process in a sulfur-iodine nuclear hydrogen production plant", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41,

- No. 6, pp. 831-840.
8. Song, K-N, Kim, Y-W, and Park, S-C, 2010, "Investigation of FIV characteristics of a coaxial double-tube-type cross vessel for a VHTR", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 47, No. 6, pp. 542-549.
 9. Lee, H-Y, Kim, Y-W, and Song, K-N, 2008, "Preliminary application of the draft code case for alloy 617 for a high temperature component", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp.856-863.
 10. Song, K-N, Lee, H-Y, Kim, Y-W, Hong, S-D, and Park, H-Y, 2010, "High-temperature structural analysis model on the process heat exchanger for helium gas loop(I)," *Trans.A of KSME*, Vol. 34, No. 9, pp. 1241-1248.
 11. Song, K-N, Lee, H-Y, Hong, S-D, and Park, H-Y, 2011, "Elastic/Plastic High-temperature structural analysis on the small-scale PHE prototype", *Transactions of KPVP*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-6.
 12. Song, K-N, 2011, "Analysis on the High-temperature structural characteristics of a small-scale PHE prototype and its suggested design due to the pipeline stiffness", Calculation note No. NHDD-KT-CA-11-010 Rev.00.
 13. Kim, Y-W et al., 2009, "Development of essential technology", KAERR/RR-2992/2008.
 14. Kim, Y. W. et al., 2008, "High temperature and high pressure corrosion resistant process heat exchanger for a nuclear hydrogen production system", R.O.K Patent # 10-0877574.
 15. I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
 16. ABAQUS ver.6.9-1, 2009.
 17. Song, K-N, 2011, "Analysis on the High-temperature structural characteristics of the small-scale PHE prototype due to the pipeline stiffness", Calculation note No. NHDD-KT-CA-11-012 Rev.00.
 18. Hastelloy-X Alloy website, www.haynesintl.com.