

소형 공정열교환기 시제품에 대한 탄소성 고온구조해석

송기남[†] · 이형연^{*} · 홍성덕^{*} · 박흥윤^{**}

Elastic/Plastic High-temperature Structural Analysis on the Small Scale PHE Prototype

Kee-nam Song[†], H-Y Lee^{*}, S-D Hong^{*} and H-Y Park^{**}

(Received 22 JAN 2011, Accepted 16 MAY 2011)

ABSTRACT

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. Korea Atomic Energy Research Institute established a small-scale gas loop for the performance test of components, which are used in the VHTR, and they manufactured a PHE prototype made of Hastelloy-X to be tested in the small-scale gas loop. Results from the elastic structural analysis on the PHE prototype were reported in the previous article. In order to investigate the macroscopic structural characteristics and behavior of the PHE prototype under the test condition of the small-scale gas loop far more in detail, elastic-plastic high-temperature structural-analysis of the PHE prototype was carried out in this study.

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)

1. 서 론

초고온가스로(Very High Temperature gas cooled Reactor; VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 수소를 대량 및 경제적으로 생산하려는 연구가 우리나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서 수행되고 있다.¹⁻⁵⁾ 우리나라의 원자력수소생산 시스템에서는 VHTR에서 얻어진 초고온(약 950°C) 헬륨기체의 열에너지와 열화학적 황산-요오드 공정을 이용하여 물을 분해함으로써 청정에너지인 수소를 대량으로 생산하는 개념을 고려하고 있는데,⁵⁻⁷⁾ 이 시스템에서는 물을 분해하기 위한 열교환기로서 공정열교환기(Process Heat

Exchanger; PHE)가 반드시 필요하다.

한국원자력연구원에서는 근래에 원자력수소 생산용 PHE 소형 시제품을 고온재료인 Hastelloy-X로 제작하였고,⁸⁾ 최대 설계온도 1000°C인 소형 가스루프에서 성능시험을 수행할 예정이다. 성능시험을 본격적으로 수행하기 전의 선행연구로서 소형 가스루프 운전조건 하에서⁹⁾ PHE 시제품에 대한 고온 구조해석을 통해 PHE 시제품의 거시적 구조특성 뿐만 아니라 좀 더 상세한 구조특성을 파악할 필요가 있다. 예전 연구결과-PHE 시제품에 대한 탄성 고온구조해석에 따르면¹⁰⁾ PHE 소형 시제품 재료인 Hastelloy-X의 항복응력보다 3배 이상의 매우 큰 응력이 PHE 소형 시제품 압력경계에서 국부적으로 발생하였는데 이는 탄성 고온 구조해석의 특성 및 한계이므로 좀 더 의미있는 응력크기 및 최대 응력의 발생위치를 파악하기 위해서는 고온 탄소성 구조해석이 필요하다.

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : knsong@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2254 FAX : (042)868-2206

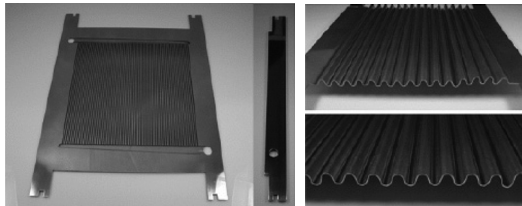
* 한국원자력연구원

** AD Solution

본 연구에서는 예전 연구¹⁰⁾를 확장하여 PHE 시제품에 대한 소형 가스루프 시험조건 하에서 탄소성 해석을 수행하였고 탄성 및 탄소성 고온해석결과와의 차이점을 분석하고 정리한 것이다. 해석결과는 PHE 시제품을 소형 가스루프에서 시험하기 위해 PHE 시제품과 배관을 설계/설치할 때 반영할 예정이다.

2. 소형 공정열교환기 시제품의 구조

제작된 PHE 시제품에서 1차 측 초고온 열매체(He 기체)가 흐르는 유로판의 표면에는 직경 1.0mm의 그루브가 기계가공으로 형성되어 있으며, 2차 측 저온 냉각재(SO₃ 기체)가 흐르는 유로 채널은 물결모양의 유로가 굽힘 가공에 의해 형성되어 있다(Fig. 1 참조).^{8,11)} 이 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. 2는 PHE 시제품의 전반적인 치수와 PHE 시제품을 구성하는 각 부품들의 형상과 조립내역 등



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

Fig. 1 Flow plates

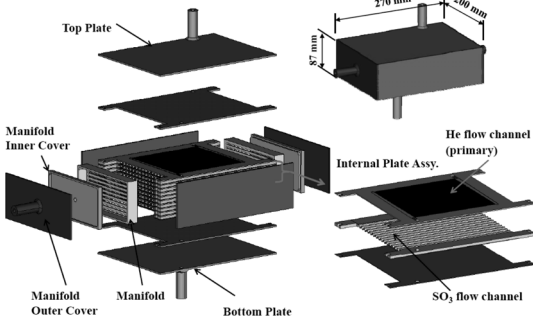


Fig. 2 Parts of Inside of the Process Heat Exchanger

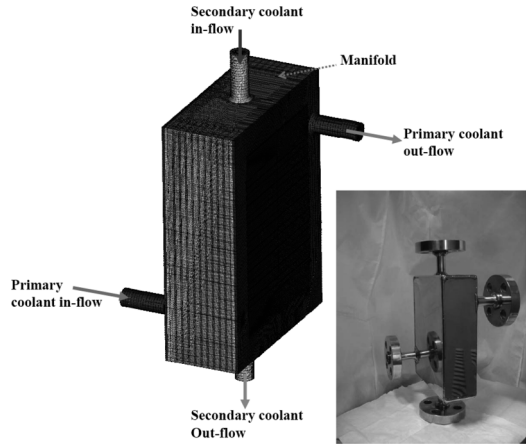


Fig. 3 Process Heat Exchanger Prototype

을 3차원 CAD로 나타낸 것이며 Fig. 3은 PHE 시제품의 3차원 CAD 형상과 실제 시제품 사진 및 조립된 PHE 시제품 형상에서 1차 및 2차 유체의 유입/유출 경로 등을 나타낸 것이다.

3. 열해석

PHE 시제품에 대한 구조해석용 FE 모델링, 1차 및 2차 유체의 유입/유출구 모델링 및 열 해석 및 고온 구조해석을 위한 경계조건과 고온 탄성구조해석결과 등에 대한 상세한 사항은 예전 연구¹⁰⁾에 기술되어 있지만 본 논문의 이해를 돕기 위해 아래의 3.1, 3.2 및 4.2에 간략히 요약하여 기술하였다.

3.1 유한요소(FE) 모델링

FE 모델링 및 열 해석은 I-DEAS/TMG Ver. 6.1¹²⁾을 사용하였으며 구조해석은 ABAQUS Ver. 6.9-1¹³⁾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

가스루프에서 PHE 시제품 성능시험조건으로 1차

열매체의 유입 온도가 850°C로 설정되었다.⁹⁾ Fig. 4는 1차 및 2차 유로판의 열 해석을 위한 입력 자료인 유체 온도 및 대류상수 값을 나타낸 것이다.

Table 1은 열 해석에 사용된 1차 및 2차 유로판 입구 및 출구에서의 유체의 온도 및 대류상수를 정리한 것이다. 한편 1차 및 2차 유체의 유입/유출 파이프 라인(내경 6.0mm, 외경 20.0mm)에서 유입/유출 유체의 온도 및 대류상수는 Table 2의 값⁹⁾을 적용하였다.

Fig. 5는 PHE 시제품 전체 구조에 대한 열 해석 결과를 나타낸 것으로 PHE 시제품 외표면의 최대온도는 837.15°C 정도로 나타났다. 열 해석 결과는 PHE

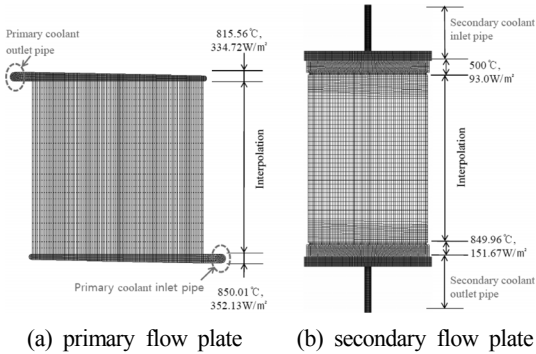


Fig. 4 Input data for thermal analysis

Table 1 Thermal boundary conditions for heat transfer analysis on the primary and secondary flow plate

| Test condition | Location | Primary flow plate | Secondary flow plate |
|----------------|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 850°C | X=0 (inlet) | 850°C 352.13 W/m ² | 500°C 38.82 W/m ² |
| | X=L (outlet) | 815.56°C 334.72 W/m ² | 849.96°C 63.70 W/m ² |

Table 2 Thermal boundary conditions for heat transfer analysis on the primary and secondary flow pipeline

| Test condition | Location | Primary flow pipeline | Secondary flow pipeline |
|----------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 850°C | Inlet | 850°C 836.0 W/m ² | 500°C 93 W/m ² |
| | Outlet | 815.56°C 829.11 W/m ² | 849.96°C 151.67 W/m ² |

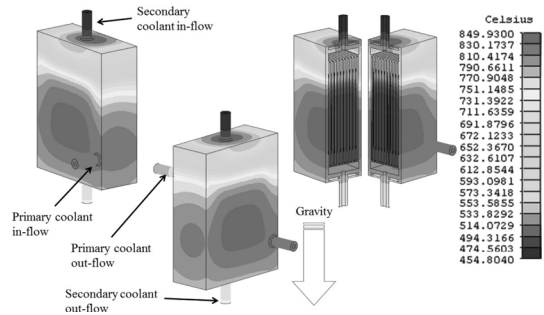


Fig. 5 Temperature distribution of PHE outside

시제품의 탄소성 고온구조 해석에 이용된다. 상세한 사항은 참고문헌 10에 나타나 있다.

4. 탄소성 고온구조해석

4.1 물성치 및 경계조건

열 해석 결과를 이용하여 PHE 시제품 전체 구조에 대한 구조해석을 수행한다. Hastelloy-X의 물성치는 참고문헌 14의 값을 사용하였다. Fig. 6은 1차 및 2차 유체 유입/유출 파이프 라인 끝단에서의 변위 경계조건으로 스프링 구속조건을 적용한 것을 나타낸 것으로 상세한 사항은 참고문헌 10에 나타나 있다.

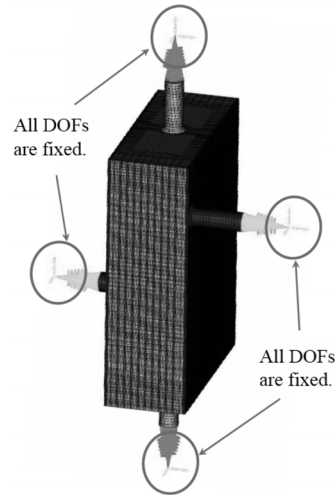


Fig. 6 Boundary condition with spring stiffness

4.2 탄성 고온구조해석 결과

온도조건 및 압력경계 조건(1차측 3.0MPa, 2차측 0.1MPa) 모두를 고려한 탄성 고온구조해석 결과¹⁰⁾에

의하면 국부적으로 매우 큰 응력(1,009.8 MPa)이 2차 유체 유출구와 PHE 시제품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 발생하였고 이 부위를 응력 선형화를 하면 937.4 MPa 정도로서 재료의 항복응력(291 MPa at 500°C)¹⁴⁾보다 훨씬 큰 것으로 평가되었다. 좀 더 상세한 사항은 참고문헌 10에 나타나 있다.

탄성 고온구조해석결과를 살펴보면 재료의 항복응력을 훨씬 상회하는 응력이 발생하였는데 좀 더 상세한 응력의 크기 및 분포를 파악하기 위해서는 탄소성 고온구조해석이 필요한 것으로 보인다.

4.3 탄소성 고온구조해석 결과

Fig. 7은 Hastelloy-X의 응력-변형도 곡선¹⁴⁾을 나타내고 있으며 본 연구의 탄소성 고온구조해석에서는 Fig. 7과 같은 탄선형 경화소성을 고려하였다.

Fig. 8은 온도 조건 및 압력경계 조건(1차측 3.0MPa, 2차측 0.1MPa) 모두를 고려한 경우에 탄소성 고온구조해석을 수행하여 얻은 PHE 시제품의 압력경계면에서 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보면 국부적으로 최대 응력은 2차 유체 유입구와 PHE 시제

품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 발생하였는데 그 값은 약 393.7 MPa 정도이다. 탄소성 고온 구조해석에서 최대 응력(393.7 MPa)의 크기는 탄성 고온 구조해석에서의 최대 응력(1009.8 MPa)¹⁰⁾에 비해 크게 줄어들었으며 또한 최대응력의 발생부위가 변경되었다. 즉, 탄성 고온구조해석의 경우 2차 유체 유출구와 PHE 시제품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 국부적으로 발생하였는데 반해, 탄소성 고온구조해석의 경우에는 2차 유체 유입구와 PHE 시제품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 국부적으로 발생하였다. 또한 탄성 고온구조해석에서는 1차 유체 유출 파이프라인에서 발생한 매우 높은 응력(약 1,400 MPa 정도)¹⁰⁾이 탄소성 고온구조해석 결과(Fig. 8 참조)에서는 약 260 MPa 정도의 수준으로 크게 낮아졌다. 이와 같이 탄소성 고온구조해석에서 PHE 시제품 압력경계에서의 최대 응력 값의 감소 및 발생 위치의 변동 그리고 비록 압력경계는 아니지만 1차 유체 유출 파이프라인에서의 매우 높은 응력의 감소 등은 소성변형 및 변형도 경화로 인한 응력 및 변형도의 재분배에 기인하는 것으로 보인다.

Table 3은 탄소성 고온 구조해석결과 국부 최대 응력이 발생한 부위(Fig. 8의 393.703 MPa)에 대해 두께 방향으로의 응력선형화를 거쳐서 평가한 응력을 나타낸 것이다. 선형화된 최대응력은 약 221.559 MPa 정도로서 재료의 항복응력(291 MPa at 500°C)¹⁴⁾보다는 작은 것으로 평가되었다. 탄소성 고온 구조해석에서의 최대응력 크기(393.703 MPa)가 재료의 항복응력을 상회하고 있으나 선형화된 최대응력이 재료의 항복응력보다 작기 때문에 이 응력은 국부적인 응력으로 보인다. 따라서 PHE 시제품의 구조적 건전성을

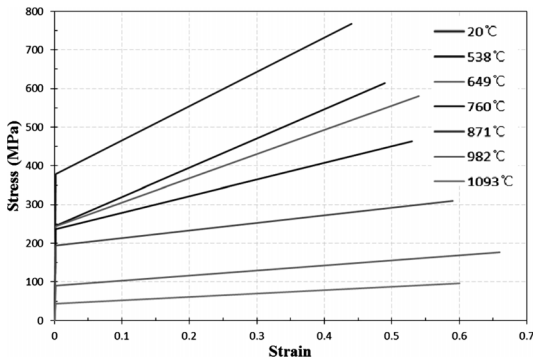


Fig. 7 Stress-strain curve for elastic-plastic analysis

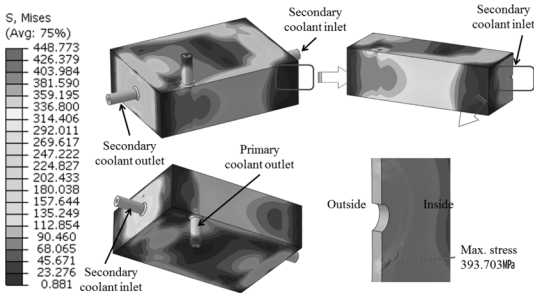


Fig. 8 Structural analysis results under temperature and pressure condition (elastic-plastic analysis)

Table 3 Stress linearization results under temperature and pressure condition (elastic-plastic analysis)

| | Max. Prin. (MPa) | Mid. Prin. (MPa) | Min. Prin. (MPa) | Tresca Stress (MPa) | Mises Stress (MPa) |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| Membrane (Average) Stress | 6.62 | -16.2375 | -143.041 | 149.661 | 139.642 |
| Membrane + Bending | 172.074 | 85.6786 | -79.6664 | 251.741 | 221.559 |
| Peak Stress | 100.842 | -39.2506 | -61.3937 | 162.236 | 152.376 |

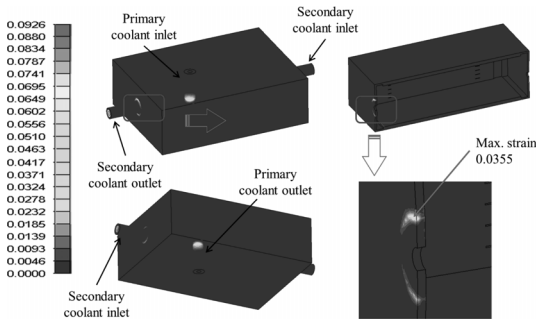


Fig. 9 Equivalent plastic strain distribution under temperature and pressure condition (elastic-plastic analysis)

저해하지는 않을 것으로 보인다. 그러나 응력을 유발하는 주요 요인이 온도에 의한 것이므로¹⁰⁾ 가능하면 열팽창을 완화할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.

Fig. 9는 PHE 시제품의 압력경계에서 등가 소성 변형도를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보면 PHE 시제품 압력경계의 대부분 영역이 탄성영역에 머무르고 있으나 국부적으로 PHE 시제품의 압력경계 부위(즉 2차 유체 유출구와 PHE 시제품 연결부 근처의 압력경계 부위)의 외면에서 약 0.0355 정도의 최대 등가 소성변형도가 발생하였다. 0.0355 정도의 등가 소성 변형도는 비교적 큰 값이므로 예전의 연구결과^{15,16)}로 판단할 때, PHE 시제품을 소형가스루프에서 장시간 시험할 경우에는 크립-피로 손상 가능성이 높으므로 이를 완화시킬 수 있는 조치가 고려되어야 할 것이다.

5. 결론

소형가스루프의 운전조건하에서 PHE 시제품에 대한 거시적인 고온 구조건전성을 좀 더 상세히 파악하기 위해 고온 탄소성 고온구조해석을 수행하였고 예전에 수행된 탄성 고온구조해석 결과와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소성 고온구조해석결과, 최대응력의 크기가 탄성 고온구조해석에 비해 크게 줄어들었으며 또한 최대응력의 발생부위도 변동되었다. 이것은 탄소성 고온구조해석에서는 소성 변형 및 변형도 경화에 의한 응력 재분배에 기인하는 것으로 추정된다.
2. 탄소성 고온구조해석결과 PHE 시제품의 압력경

계에서 재료의 최대 항복응력을 초과하고 있으나 선형화된 응력으로 판단할 때 이는 국부적인 응력으로 보여서 PHE 시제품의 구조적인 건전성은 유지될 것으로 보인다. 그러나 응력을 유발하는 주요 요인이 온도에 의한 것이므로 가능하면 열팽창을 완화할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.

3. 탄소성 고온구조해석결과 PHE 시제품의 압력경계 대부분 영역이 탄성영역에 머무르고 있으나 국부적으로 발생한 재료의 최대 등가 소성 변형도는 상당히 높다. 따라서 PHE 시제품을 장시간 시험할 경우에는 크립-피로 손상 가능성을 완화할 수 있는 조치가 마련되어야 할 것으로 보인다.

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*, NGNP 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*, NGNP-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. Kim, Y-W et al., 2009, "Development of essential technology," KAERR/RR-2992/2008.
 9. Song, K-N, 2010, "Thermal/structural analysis modeling on the small PHE prototype under fixed test conditions," Calculation note No. NHDD-KT-CA-10-003 Rev.00.
 10. Song, K-N, Lee, H-Y, Hong, S-D, and Park, H-Y, 2010, "High-temperature structural analysis on the small-scale PHE prototype," *Transactions of KPVP*, Vol. 6, No. 1, pp. 57-64.
 11. 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.
 12. I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
 13. ABAQUS ver.6.9-1, 2009.
 14. Hastelloy-X Alloy website, www.haynesintl.com.
 15. Lee, H-Y et al., 2010, "Evaluation of creep-fatigue damage for hot gas duct structure of the NHDD plant," *Journal of Pressure Vessel Technology* Vol. 132, No. 6, 031101-1-8.
 16. Lee, H-Y et al., 2010, "An evaluation of creep-fatigue damage for prototype process heat exchanger of the NHDD plant", submitted to *Journal of Pressure Vessel Technology*.