

공정열교환기 소형 시제품에 대한 고온구조해석(IV) - 거시적 고온 탄·소성 구조해석을 중심으로 -

송기남^{*†} · 홍성덕^{*} · 박홍운^{**}

* 한국원자력연구원, ** AD Solution

High-Temperature Structural Analysis of a Small-Scale Prototype of a Process Heat Exchanger (IV) - Macroscopic High-Temperature Elastic-Plastic Analysis -

Kee Nam Song^{*†}, Sung Deok Hong^{*} and Hong Yoon Park^{**}

* Korea Atomic Energy Research Institute,

** AD Solution

(Received April 8, 2011 ; Revised June 7, 2011 ; Accepted June 13, 2011)

Key Words : Process Heat Exchanger(공정열교환기), High-Temperature Structural Analysis(고온 구조해석), Small-Scale Gas Loop(소형가스루프), Very High Temperature Reactor(VHTR; 초고온가스로)

초록: 공정열교환기는 초고온가스로로부터 생성된 950℃ 정도의 초고온 열을 대량의 수소를 생산하기 위한 화학반응공정으로 전달하는데 필요한 핵심기기이다. Hastelloy-X 로 제작된 소형 공정열교환기 시제품이 한국원자력연구원에 있는 소형가스루프에서 성능시험이 계획되어 있다. 본 연구에서는 소형가스루프 시험조건하에서 소형 공정열교환기 시제품의 고온 구조건전성을 사전에 평가하기 위한 작업의 일환으로 소형 공정열교환기 시제품에 대한 고온 구조해석 모델링, 거시적 열 해석 및 탄·소성 구조 해석을 수행하고 그 결과들을 정리한 것이다. 해석 결과는 공정열교환기 수정 시제품 성능시험 장치 설계에 반영할 것이다.

Abstract: A PHE (Process Heat Exchanger) is a key component required to transfer heat energy of 950℃ generated in a VHTR (Very High Temperature Reactor) to a chemical reaction that yields a large quantity of hydrogen. A small-scale PHE prototype made of Hastelloy-X was scheduled for testing in a small-scale gas loop at the Korea Atomic Energy Research Institute. In this study, as a part of the evaluation of the high-temperature structural integrity of the PHE prototype, high-temperature structural analysis modeling, and macroscopic thermal and elastic-plastic structural analysis of the PHE prototype were carried out under the gas-loop test conditions as a preliminary study before carrying out the performance test in the gas loop. The results obtained in this study will be used to design the performance test setup for the modified PHE prototype.

1. 서 론

초고온가스로(VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 수소를 대량 및 경제적으로 생산하려는 연구가 우리 나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서

수행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 우리나라의 원자력수소생산 시스템에서는 VHTR 에서 얻어진 초고온(약 950℃)의 헬륨 기체와 황산-요오드 공정을 이용하여 물을 분해함으로써 수소를 대량으로 생산하는 개념을 고려하고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이 시스템에서는 고온가스덕트,^(8,9) 중간열교환기 및 공정열교환기(PHE) 등으로 구성된 중간루프가 반드시 필요하다. 특히 PHE 는 원자력수소생산이외에도 원자력 증기 개질, 원자력 메탄올, 원자력 제철, 원자력 원유 정제 및 원자력 증기 등과 같은 곳에

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2011. 4. 14.-15., SETEC) 발표논문임

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

널리 이용되고 있는 것으로 알려져 있다.

한국원자력연구원에서는 원자력수소생산용 PHE 소형 시제품을 설계/제작하여(PHE 시제품의 내부 구조는 Fig. 1 참조) 최대 1000℃까지 작동할 수 있는 소형가스루프에서 소형 PHE 시제품 성능 시험을 수행할 예정이다. 본 연구에서는 초기 설계부터 최종 설계 및 제작된 소형 PHE 시제품에 대한 고온 구조해석을 위한 유한요소 모델링과 거시적인 열 및 구조 해석을 수행하고 경위 및 결과들을 정리하여 요약한 것이다. 특히 고온 탄·소성 구조해석을 추가로 수행하여 예전의 고온 탄성해석결과와⁽¹⁰⁻¹²⁾ 비교/분석 하였다. 최종 해석결과는 루프의 시험장치 설계에 반영할 예정이다.

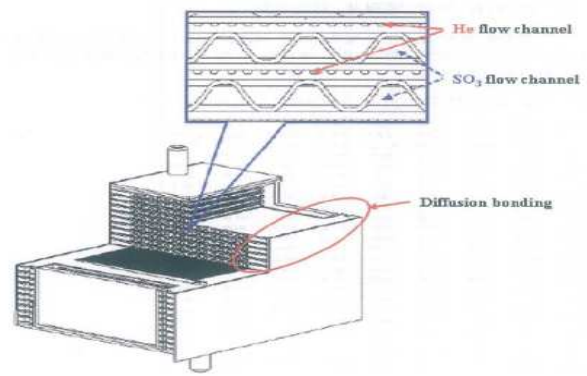


Fig. 1 Inside of process heat exchanger

2. 고온구조해석용 FE 모델링

2.1 초기 설계된 소형 PHE 형상 및 구조해석

초기 설계된 PHE 형상은 Fig. 2 에서 보듯이 1 차 및 2 차 유체의 유입/유출 파이프 라인이 같은 면에 배치된 형상이었다.⁽¹⁰⁾ 초기 설계된 PHE 형상에 대한 해석에서는 열팽창에 의한 PHE 압력경계에서의 응력을 감소시키기 위해 1 차 및 2 차 유체 유입/유출 파이프 라인 양 끝단에서의 적절한 변위경계조건을 찾는 연구 즉, 여러 가지의 경계조건에 대한 탄성구조해석을 수행하고 PHE 압력경계에서 낮은 응력을 발생시킬 수 있는 변위 경계조건을 조사하였다. 결과적으로 1 차 및 2 차 유체 유입/유출 파이프 라인 양 끝단에 스프링 강성 구속조건을 부여하는 것이 PHE 압력경계에서 열팽창에 의한 응력을 상당히 완화시킬 수 있음을 발견하였고 시제품을 소형가스루프에 설치할 때의 조건을 유사하게 모사할 수 있는 조건으로 선정하였다.

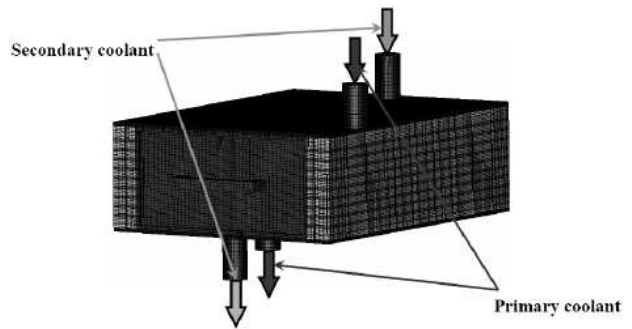


Fig. 2 Initial design of process heat exchanger

2.1 설계 변경된 PHE 형상 및 구조해석

초기 설계된 소형 PHE 형상에 대한 고온구조 해석결과, 1 차 및 2 차 유체 유입/유출 파이프라인이 Fig. 2 와 같이 같은 면에 배치됨으로써 발생한 온도분포의 비대칭적 구조로 인한 구조물의 뒤틀림과 열팽창을 완화할 필요성이 대두되어 1 차 및 2 차 유체 유입/유출 파이프 라인의 배치가 Fig. 3 과 같이 좀더 대칭적이 되도록 설계가 변경되었다. 설계 변경된 구조에 대하여 열 및 탄성구조해석을 수행한 결과⁽¹¹⁾ 온도분포는 어느 정도 대칭적 분포를 보여주고 있으나 2 차 유체 유출파이프라인과 인접한 PHE 압력경계 부위에서 재료의

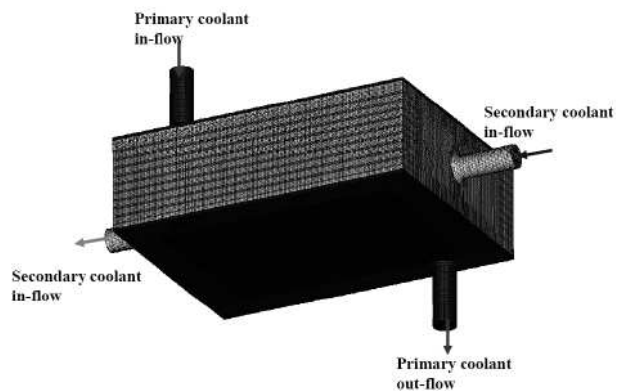


Fig. 3 Modified design of process heat exchanger

항복응력을 크게 초과하였다.

2.2 최종 설계된 PHE 시제품 형상 및 구조해석

2.2 절에서 논의된 설계 변경된 형상에 대한 구조해석결과를 살펴볼 때 2 차 유체 유입/유출 파이프라인과 소형 PHE 가 연결되는 부위에서 높은 응력이 발생하였고, 이는 연결되는 부위에서 소형

PHE 구조에 기인하는 것으로 판단되었다. 따라서 이 부위에서 소형 PHE 를 구성하는 부품을 보강하고 배치를 변경하였다.⁽¹²⁾ Figures 4 및 5 는 설계 변경된 PHE 와 최종 설계된 PHE 를 구성하는 부품들의 배치 및 조립(assembly)을 나타낸 것이다. 최종 설계된 PHE 는 Fig. 5 에서 보듯이 설계 변경된 PHE 형상(Fig. 4 참조)에 비해 Manifold cover 와 Manifold 사이에 Manifold inner cover 를 추가한 것이다.

2.3.1 유한요소(FE) 모델링

FE 모델링 및 열 해석은 I-DEAS/TMG Ver. 6.1⁽¹³⁾ 을 사용하였으며 구조 해석은 ABAQUS Ver. 6.9-1⁽¹⁴⁾을 사용하였다. 1 차 및 2 차 측 유동의 열적 접촉조건을 부여하기 위해 FE 모델에서는 546,764 개의 2-D Linear Quadrilateral Shell Elements 와 911,012 개의 3-D Linear Solid Elements 로 구성되어 있으며 총 node 수는 1,102,822 이다. ABAQUS 를 이용한 구조 해석에 사용된 3-D Linear Solid Elements 로는 Brick Elements (C3D8) 830,304 개가 사용되었고, 해석의 정확도는 떨어지나 복잡한 형상을 용이하게 구현하기 위해 부분적으로 Wedge Elements (C3D6) 80,348 개 및 Tetrahedron Elements (C3D4) 360 개가 사용되었다.

2.3.2 유체 유입 및 유출부 모델링

1 차 유체 유입 파이프 라인을 통하여 PHE 시제품 내부로 들어간 고온의 1 차 유체(primary coolant; He 기체)는 Fig. 6 에서와 같이 2 개의 유로판사이의 폭 방향 공간으로 퍼지게 되고 길이 방향의 groove 를 따라 흘러가게 되며, groove 를 통해 열교환이 이루어진다. 열교환이 이루어진 뒤 온도가 낮아진 1 차 유체는 Fig. 7 에서와 같이 다시 유로판 사이의 공간을 통해 1 차 유체 유출 파이프 라인을 통해 흘러나가게 된다.

Figure 3 에서와 같이 상부 manifold cover 에 있는 2 차 유체 유입 파이프 라인을 통하여 PHE 시제품 내부로 들어간 저온의 2 차 유체(secondary coolant; SO₃ 기체)는 Fig. 8 와 같이 manifold 내부 공간으로 퍼지게 되고 길이 방향의 물결 모양 유로를 따라 PHE 내부로 흘러 들어가서 열교환이 이루어진다. 열교환이 이루어진 뒤 온도가 높아진 2 차 유체는 Fig. 9 에서와 같이 다시 하단의 manifold 내부공간을 통해 하부 manifold cover 에 있는 2 차 유체 유출 파이프 라인으로 통해 흘러나가게 된다.

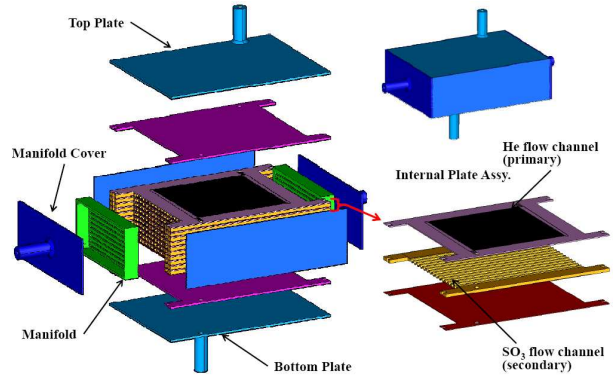


Fig. 4 Parts of a modified design of PHE and their assembly

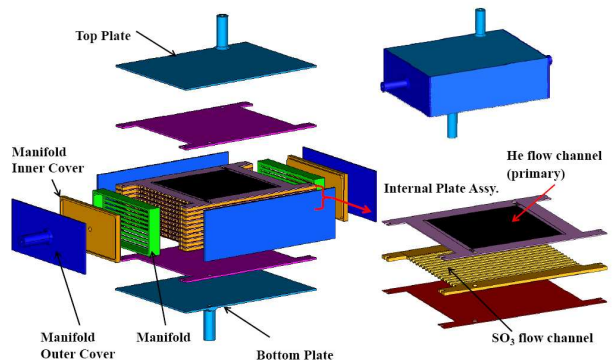


Fig. 5 Parts of a final design of PHE and their assembly

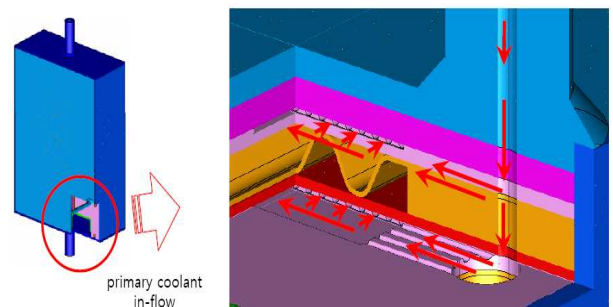


Fig. 6 In-flow of primary coolant

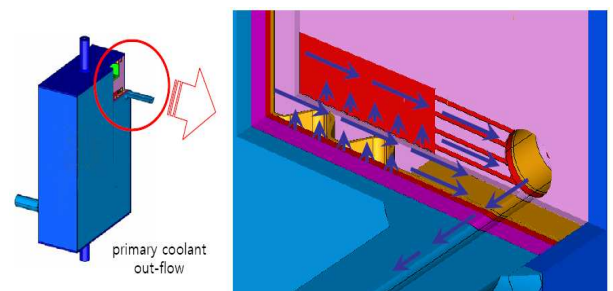


Fig. 7 Out-flow of primary coolant

2.3.3 열해석

Figure 10 은 1 차 유체 유입온도 조건(850°C)에서 소형 PHE 시제품에서의 온도분포를 나타낸 것으로 소형 PHE 시제품에서의 최고온도는 837.15°C이며 수직 축(2 차 유체 유입/유출 파이프 라인을 연결한 축)을 기준으로 비교적 좌우 대칭인 분포를 나타내고 있다.

2.3.4 탄성 구조해석

Figures 11 은 온도 및 압력경계 조건 모두를 고려한 열 해석 및 구조해석을 수행하여 PHE 수정 시제품의 압력경계면에서 최대응력이 발생한 부위를 나타낸 것으로 국부적으로 매우 큰 응력(1,009.8 MPa)이 2 차 유체 유입구 주변에서 발생하였고 이 부위를 응력 선형화를 하면 937.4 MPa 정도이다. 응력 선형화로 평가한 응력은 재료의 항복응력(291 MPa at 500°C)⁽¹⁵⁾보다 큰 것으로 평가되었다. Figure 12 는 온도 조건만을 고려한 열 및 구조해석을 수행하여 PHE 수정 시제품의 압력경계면에서 최대응력이 발생한 부위는 나타낸 것으로 국부적으로 매우 큰 응력(1,011.3 MPa)이 2 차 유체 유입구 주변에서 발생하였고 이를 응력 선형화를 하면 938.8 MPa 정도이다. 응력 선형화로 평가한 응력은 재료의 항복응력(291 MPa at 500°C) 보다 큰 것으로 평가되었다.

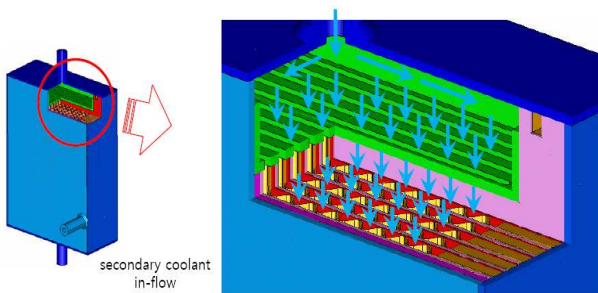


Fig. 8 In-flow of secondary coolant

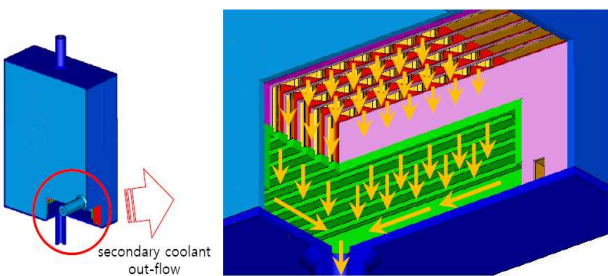


Fig. 9 Out-flow of secondary coolant

국부적이긴 하나 매우 높은 응력이 발생한 것은 1 차 유체 유입/유출 파이프라인의 비 대칭성으로 인한 뒤틀림 변형과 파이프라인 양단에서의 경계 조건으로 인해 구조물의 열팽창을 충분히 수용하지 못함에 기인하는 것으로 보여진다.

Figure 13 는 압력경계 조건만을 고려한 열 및 구조해석을 수행하여 PHE 수정 시제품의 압력경계에서 최대응력이 발생한 부위는 나타낸 것으로 국부적으로 비교적 작은 응력(9.65 MPa)이 2 차 유체 유입구 주변에서 발생하였고 이를 응력 선형화

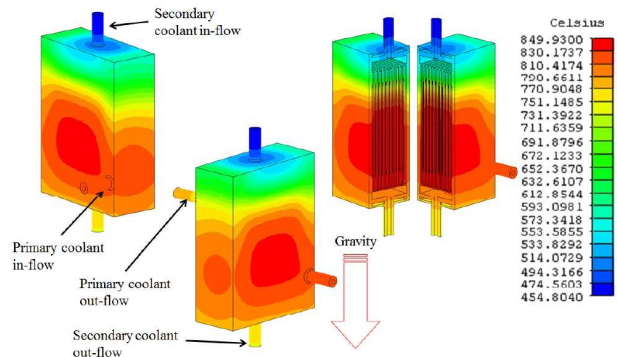


Fig. 10 Temperature distribution of PHE outside

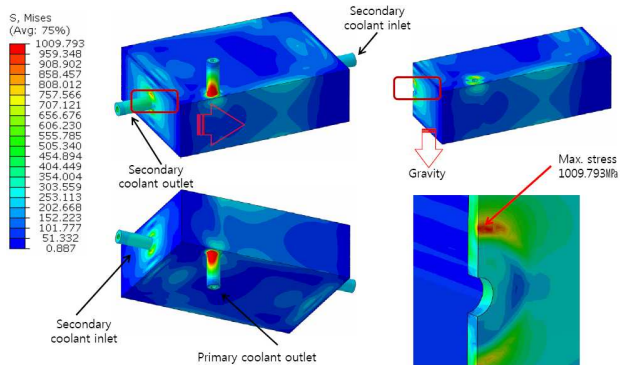


Fig. 11 Structural analysis results under temperature and pressure condition

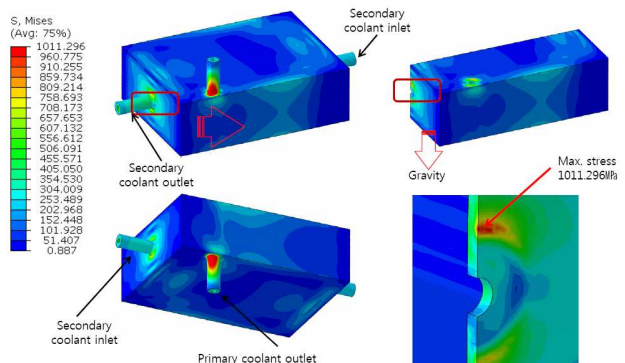


Fig. 12 Structural analysis results under temperature condition

를 하면 0.67 MPa 정도이다. Figure 13 에서 A 로 표시된 부위는 온도 및 압력경계 조건 모두를 적용한 경우에 최대 응력이 발생한(1,009.793 MPa) 곳으로(Fig. 11 참조) 압력만을 고려할 경우에는 약 0.451 MPa 의 응력이 발생하였다. 이것은 본 PHE 수정 시제품의 압력경계면에서 고온 구조조건성(응력 및 변형)에 영향을 주는 주요 요인은 압력경계 조건보다는 온도 조건에 의한 열팽창이 지배적임을 시사해주고 있다. 따라서 PHE 시제품의 파이프 라인을 소형가스루프와 연결할 때 열팽창에 의한 응력을 완화하기 위한 방안, 예를 들면 1 차 및 2 차 유체 유입/유출 파이프라인과 가스루프 배관과의 연결에서 열팽창을 완화하기 위한 배관 설계 등이 강구되어야 하며 연결부에 대한 세심한 주위를 요구하고 있다고 본다.

2.3.5 탄·소성 구조해석

소형 PHE 시제품의 거시적 고온 구조조건성을 파악하기 위해 편의상 탄성해석을 수행했으나 좀더 상세한 응력분포 및 응력크기를 파악하기 위해서는 향후 탄·소성 해석을 수행해야 할 필요가 있다.

Figure 14 는 탄·소성 고온 구조해석을 위한 Hastelloy-X 의 bi-linear 응력-변형도 곡선을⁽¹⁵⁾ 나타내고 있다. Figure 15 는 온도 조건 및 압력경계 조건(1 차측 3.0MPa, 2 차측 0.1MPa) 모두를 고려한 경우에 탄·소성 고온구조해석을 수행하여 얻은 PHE 시제품의 압력경계면에서 응력분포를 나타낸 것이다.

Figure 15 에서 보면 국부적으로 최대 응력은 2 차 유체 유입구와 PHE 시제품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 발생하였는데 그 값은 약 393.7 MPa 정도이다. 탄·소성 고온 구조해석 에서 최대 응력(393.7 MPa)의 크기는 탄성 고온 구조해석에서의 최대 응력(1009.8 MPa)에 비해 크게 줄어들었으며 또한 최대응력의 발생부위가 변경되었다. 즉, 탄성 고온구조해석의 경우 2 차 유체 유출구와 PHE 시제품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 국부적으로 발생하였는데 반해, 탄·소성 고온구조해석의 경우에는 2 차 유체 유입구와 PHE 시제품 연결부 근처의 PHE 시제품 압력경계 내면에서 국부적으로 발생하였다. 또한 탄성 고온구조해석에서는 1 차 유체 유출 파이프라인에서 발생한 매우 높은 응력(약 1,400 MPa 정도)이 탄·소성 고온구조해석 결과(Fig. 15 참조)에서는 약 260 MPa 정도의 수준으로 크게 낮

아졌다. 이와 같이 탄·소성 고온구조해석에서 PHE 시제품 압력경계에서의 최대 응력 값의 감소 및 발생 위치의 변동 그리고 비록 압력경계는 아니지만 1 차 유체 유출 파이프라인에서의 매우 높은 응력의 감소 등은 소형변형 및 변형도 경화로 인한 응력 및 변형도의 재분배에 기인하는 것으로 보인다.

Figure 16 은 PHE 시제품의 압력경계에서 등가 소성 변형도를 나타낸 것이다. Figure 16 에서 보면 PHE 시제품 압력경계의 대부분 영역이 탄성영역에 머무르고 있으나 국부적으로 PHE 시제품의 압력경계 부위(즉 2 차 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^(16,17)로 판단할 때, PHE 시제품을 소형가스루프에서 장시간 시험할 경우에는 크립-피로 손상 가능성이 높으므로 이를 완화시킬 수 있는 조치가 고려되어야 할 것이다. 한편 탄·소성 고온구조해석결과인 Fig. 13 과 Fig. 15

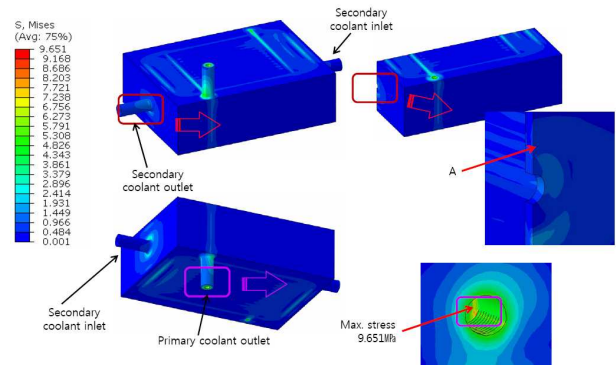


Fig. 13 Structural analysis results under pressure condition (elastic analysis)

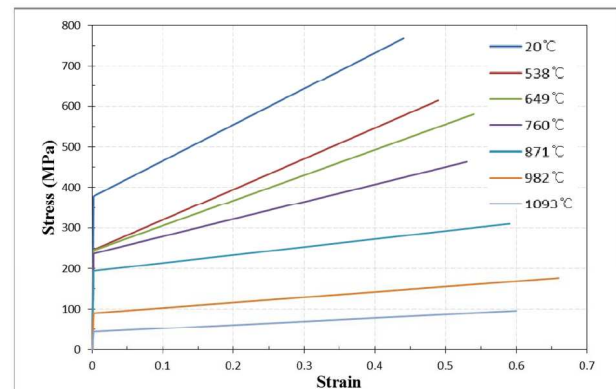


Fig. 14 Bilinear stress-strain curve for elastic-plastic analysis

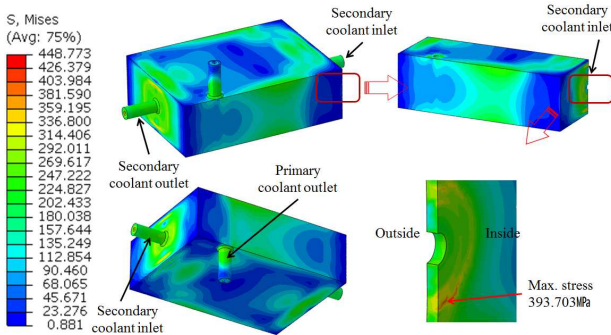


Fig. 15 Structural analysis results under temperature and pressure condition (elastic-plastic analysis)

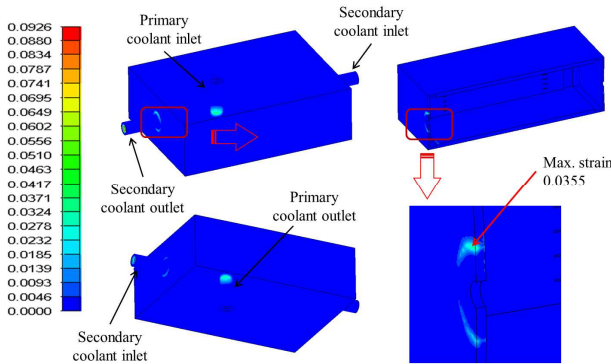


Fig. 16 Equivalent plastic strain distribution under temperature and pressure condition (elastic-plastic analysis)

를 비교해보면 흥미로운 사항이 관찰되었다. 즉, 최대응력의 발생 위치는 2 차 유체 유출구와 PHE 시제품 연결부 근처의 압력경계 부위의 내면 하단인데 비해 최대 등가 소성 변형도가 발생한 위치는 동일부위의 외면 상단부위이다.

3. 결 언

원자력수소생산시스템에서 수소를 생산하기 위한 중요한 기기 중에 하나인 PHE의 소형 시제품에 대하여 소형가스루프 운전조건하에서 거시적인 고온 구조건전성을 파악하기 위한 유한요소 모델링, 열 해석 및 탄·소성 고온 구조 해석 등을 추가로 수행하였고 예전의 탄성 고온 구조해석결과와 비교/분석하여 얻은 관찰사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) 고온 탄성 구조해석 결과에 의하면 온도 조건이 압력경계 조건에 비해 소형 PHE 시제품 압력경계면에서의 고온 구조건전성에 훨씬 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

(2) 탄·소성 고온구조해석결과, 최대응력의 크기가 탄성 고온구조해석에 비해 크게 줄어들었으며

또한 최대응력의 발생부위도 변동되었다. 이것은 탄·소성 고온구조해석에서는 소성 변형, 변형도 경화 및 응력 재분배 등에 기인하여 나타난 현상으로 추정된다.

(3) 탄·소성 고온구조해석결과 소형 PHE 시제품의 압력경계에서 재료의 최대 항복응력을 초과하고 있으나 선형화된 응력으로 판단할 때 이는 국부적인 응력으로 보여서 소형 PHE 시제품의 구조적인 건전성은 유지될 것으로 보인다. 그러나 응력을 유발하는 주요 요인이 온도에 의한 것이므로 가능하면 열팽창을 완화할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.

(4) 탄·소성 고온구조해석결과 소형 PHE 시제품의 압력경계 대부분 영역이 탄성영역에 머무르고 있으나 국부적으로 발생한 재료의 최대 등가 소성 변형도는 상당히 높기 때문에 소형 PHE 시제품을 장시간 시험할 경우에는 크리프-피로 손상 가능성을 완화할 수 있는 조치가 마련되어야 할 것으로 보인다.

(5) 본 연구 결과, 열팽창에 의한 뒤틀림을 완화시킬 수 있도록 1 차 유체 유입/유출 파이프라인의 위치를 변경하는 설계개선이 도출되었고 이를 검증하기 위한 추가 해석이 수행될 예정이다. 또한 이미 제작된 형상의 PHE 시제품을 가스루프에 설치하여 시험할 때에는 열팽창을 완화하기 위한 배관 설계 및 배관 연결이 필요한 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 원자력연구개발프로그램의 지원하에 수행되고 있는 원자력수소 핵심기술 개발(대과제) 초고온가스로 요소기술개발(세부과제)의 일환으로 수행되었다.

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 1.
- (5) Chang, J. H, *et al.*, 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. *et al.*, 2009, "Perspectives of Nuclear Heat and Hydrogen," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41, No. 4, pp. 413~426.
- (7) Shin, Y. J. *et al.*, 2009, "A Dynamic Simulation of the Sulfuric Acid Decomposition Process in a Sulfuriodine Nuclear Hydrogen Production Plant," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41, No. 6, pp. 831~840.
- (8) Song, K. N. *et al.*, 2009, "Investigation of FIV Characteristics on a Coaxial Double-tube Structure," *Trans. A of KSME*, Vol. 33, No. 10, pp. 1108~1118.
- (9) Lee, H. Y. *et al.*, 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. *et al.*, 2010, "High-temperature Structural Analysis Model on the Process Heat Exchanger for Helium Gas Loop (I)," *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 09, pp. 1241~1248.
- (11) Song, K. N. *et al.*, 2010, "High-temperature Structural Analysis Model on the Process Heat Exchanger for Helium Gas Loop(II)," *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 10, pp. 1453~1460.
- (12) Song, K. N. *et al.*, 2011, "High-temperature Structural Analysis of Small-scale Prototype of Process Heat Exchanger (III)," *Trans. A of KSME*, Vol. 35, No. 2, pp. 191~200.
- (13) I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
- (14) ABAQUS ver.6.9-1, 2009.
- (15) Hastelloy-X Alloy website, www.haynesintl.com.
- (16) 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.
- (17) Lee, H-Y *et al.*, 2010, "An Evaluation of Creep-fatigue Damage for Prototype Process Heat Exchanger of the NHDD Plant, To be appeared in *Journal of Pressure Vessel Technology* Vol. 133, No. 1.