

소형 PCHE 시제품에 대한 거시적 고온 구조 해석 모델링 (II) §

송기남^{*†} · 이형연^{*} · 홍성덕^{*} · 박홍윤^{**}

* 한국원자력연구원, ** 에이디솔루션

Macroscopic High-Temperature Structural Analysis Model of Small-Scale PCHE Prototype (II)

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

* Korea Atomic Energy Research Institute,

** AD Solution

(Received April 12, 2011 ; Revised May 17, 2011 ; Accepted May 17, 2011)

Key Words : Printed Circuit Heat Exchanger(PCHE; 인쇄기판형 열교환기), High-temperature Structural Analysis(고온 구조해석), Very High Temperature Reactor(VHTR; 초고온가스로), Intermediate Heat Exchanger(IHX; 중간열교환기)

초록: 초고온가스로의 중간열교환기는 원자로에서 생산된 950°C 정도의 초고온 열을 수소생산 공장으로 전달하는 핵심 기기이다. 한국원자력연구원에서는 중간열교환기의 후보 형태로 고려되고 있는 인쇄기판형 열교환기의 소형 시제품을 제작하였다. 본 연구는 소형가스루프 시험조건하에서 인쇄기판형 열교환기 소형 시제품의 고온 구조건전성을 시험수행 전에 미리 평가하기 위한 작업의 일환으로 인쇄기판형 열교환기 소형 시제품에 대한 고온 구조해석 모델링, 거시적 열 해석 및 구조 해석을 수행하고 그 결과들을 정리한 것이다. 해석 결과는 곧 수행될 인쇄기판형 열교환기 소형 시제품 성능시험결과와 비교하고 또한 향후 제작될 중형 시제품 설계/제작에 반영할 것이다.

Abstract: The IHX (intermediate heat exchanger) of a VHTR (very high-temperature reactor) is a core component that transfers the high heat generated by the VHTR at 950°C to a hydrogen production plant. Korea Atomic Energy Research Institute manufactured a small-scale prototype of a PCHE (printed circuit heat exchanger) that was being considered as a candidate for the IHX. In this study, as a part of high-temperature structural integrity evaluation of the small-scale PCHE prototype, we carried out high-temperature structural analysis modeling and macroscopic thermal and elastic structural analysis for the small-scale PCHE prototype under small-scale gas-loop test conditions. The modeling and analysis were performed as a precedent study prior to the performance test in the small-scale gas loop. The results obtained in this study will be compared with the test results for the small-scale PCHE. Moreover, these results will be used in the design of a medium-scale PCHE prototype.

1. 서 론

초고온가스로(VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 수소를 대량으로 생산하려는 연구가 우리나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서 수행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 우리나라의 원자력수소생산 시스템에서는 VHTR에서

얻어진 초고온(약 950°C)의 헬륨 기체와 요오드-황산 공정(Iodine-Sulfur Process; I-S Cycle)을 이용하여 물을 분해함으로써 수소를 대량으로 생산하는 개념을 고려하고 있다.⁽⁶⁻⁷⁾ 이 시스템에서는 Fig. 1에서와 같이 고온가스덕트(Hot Gas Duct),^(8,9) 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger; IHX) 및 공정열교환기(Process Heat Exchanger) 등으로 구성된 중간루프가 반드시 필요한데 특히 IHX는 원자로에서 생산된 초고온 열을 수소 생산 공장으로 전달하는 핵심 기기로서 약 900°C 정도의 초고온하에서 작동하고 있다.

PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger)는 유체가 통

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

과하는 미세한 유로를 화학적 etching 방법으로 형성하고, 유로들이 형성된 유로판을 확산 접합 공정(diffusion bonding process)을 이용하여 적층 및 금속 결합한 열교환기의 한 형태로서 열교환 용량 대비 열교환기의 용적(부피)이 작고 열교환 효율이 매우 우수함(~98%) 콤팩트형 열교환기의 형태로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ Fig. 2는 영국의 Heatrix사에서 출시한 PCHE의 내부 유로 및 확산 접합된 부위(→로 표시된 부위)의 조직을 나타낸 것이다.⁽¹¹⁾

한국원자력연구원(KAERI)에서는 설계온도 최대 1000℃까지 작동할 수 있는 소형가스루프를 구축하여(Fig. 3 참조)⁽¹²⁾ VHTR에 필요한 여러 핵심 기기 및 부품들에 대한 주요 성능시험을 수행하려 계획하고 있으며, 근래에 VHTR의 핵심 기기들인 PHE 및 PCHE 소형 시제품을 제작하여 성능 시험을 준비하고 있다.

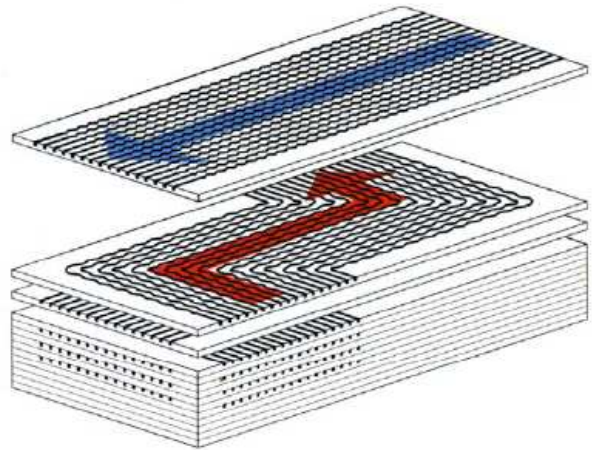
본 연구는 KAERI의 소형가스루프에서 소형 PCHE 시제품에 대한 본격적인 성능시험을 수행하기 전에 소형 PCHE 시제품의 고온 구조 건전성을 미리 파악하기 위한 선행 연구의 일환으로 소형 PCHE 시제품에 대한 유한요소 모델링과 거시적인 열 및 탄성구조 해석을 수행하고 그 결과를 정리하여 요약한 것이다. 해석결과는 곧 수행될 소형 PCHE 시제품에 대한 시험결과와 비교/분석한 뒤 향후에 제작될 중형 PCHE 시제품 설계/제작에 반영할 예정이다.

2. 고온구조해석용 FE 모델링

2.1 소형 PCHE 시제품 구조

금번에 제작된 소형 PCHE 시제품을 구성하는

부품들과 개략도 및 부품의 재질은 Fig. 4와 같다. 소형 PCHE 시제품은 화학적 etching으로 유로가 형성된 A형 유로판(Fig. 5 참조)과 B형 유로판(Fig. 6 참조)이 B-A-B 순서로 적층 및 접합되어 1개의 유로판 set를 이루며, 적층 및 접합된 총 30개 유로판 sets의 상·하부에는 5.0 mm 두께의



(a) Inside of PCHE and flow path



(b) Metallographic view

Fig. 2 Inside of PCHE

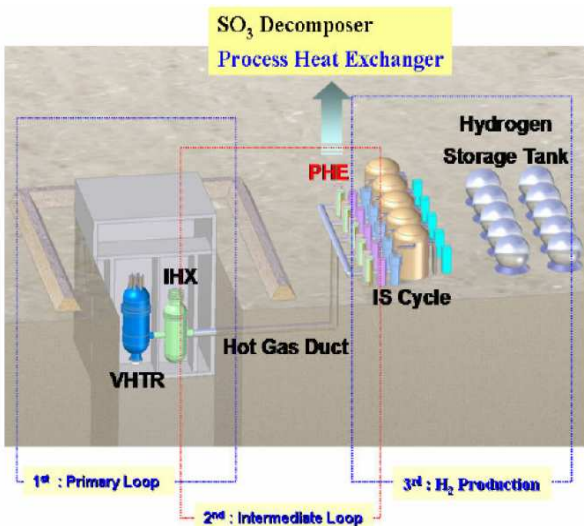


Fig. 1 Nuclear hydrogen system

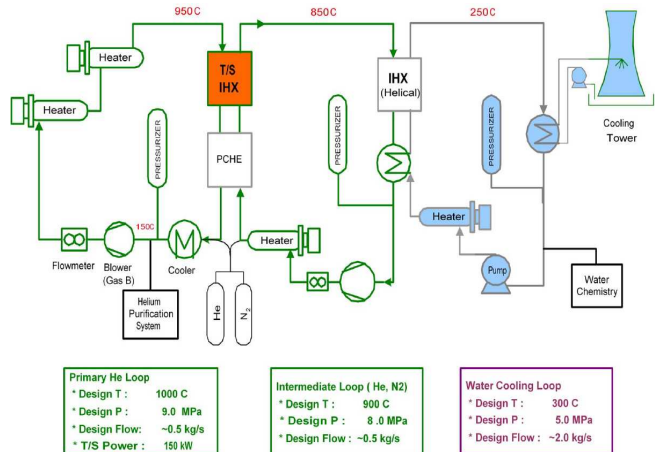


Fig. 3 KAERI's small-scale gas loop

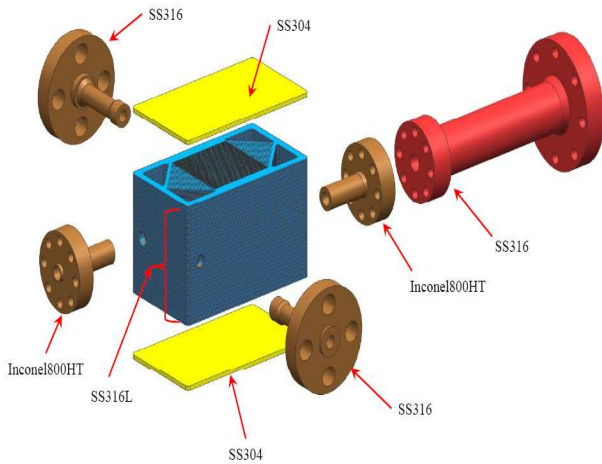


Fig. 4 Schematic view of PCHE prototype

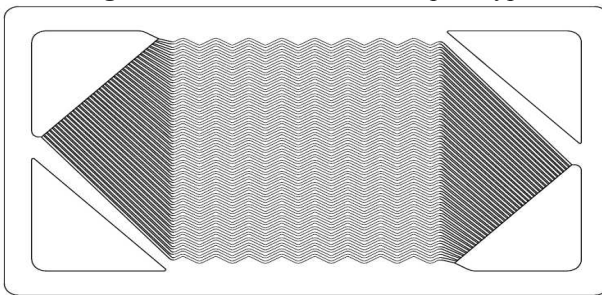


Fig. 5 Flow plate (A-type) for high-temperature gas

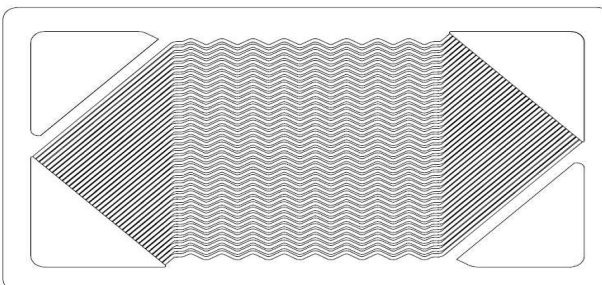


Fig. 6 Flow plate (B-type) for low-temperature water

판으로 덧씌워져 있는 구조로 되어 있다.⁽¹³⁾ 고온의 유체(가스)가 흐르는 A-type 유로판은 유로 폭 1.0 mm, 유로와 유로 사이의 리브 폭 1.0 mm, 길이 187 mm 인 유로가 한 유로판 당 40 개씩 etching 으로 형성되어 있다. 저온의 유체(물)가 흐르는 B-type 유로판은 유로 폭 1.4 mm, 유로와 유로 사이의 리브 폭 0.6 mm, 길이 185 mm 인 유로가 한 유로판 당 40 개씩 etching 으로 형성되어 있다.

2.1 유한요소(FE) 모델링

A-type 및 B-type 유로판에서 실제 유로 형상을 Figs. 5 및 6 에서 살펴보면 유로가 zig-zag 형태로 형성되어 있는데 이 형상을 그대로 유한요소(FE) 모델링할 경우 열 및 구조 해석이 곤란할 정도로

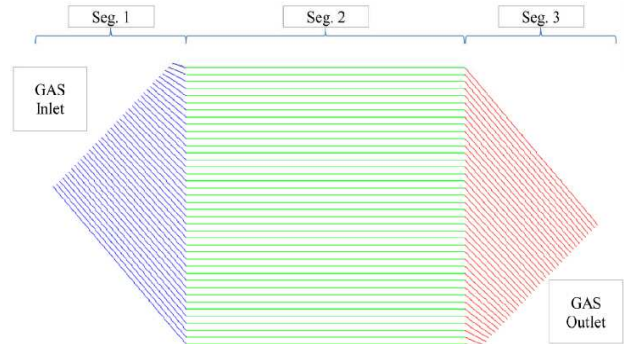


Fig. 7 Flow plate modeling for A-type

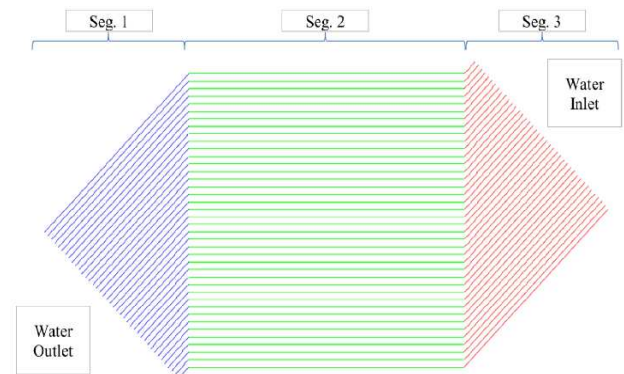


Fig. 8 Flow plate modeling for B-type

유한요소 수가 증가하기 때문에 본 연구의 FE 모델링에서는 zig-zag 유로 구간의 형상을 Fig. 7 및 8 과 같이 직선 유로로 단순화하였으며(seg. 2 참조), 단순화에 의한 영향을 보완하기 위해 등가의 열/유동 경계조건을 적용하였다.⁽¹⁴⁾

적층된 유로판 sets, 상·하부에 덧씌워진 5.0 mm 판, 유체 유입/유출 파이프라인 및 플랜지들을 조립한 PCHE 시제품의 FE 모델은 Fig. 9 와 같다. 본 FE 모델에서 총 절점수는 1,978,586 이다. 1 차 및 2 차 측 유동의 열적 접촉조건을 부여하기 위해 유로판에 사용한 shell 요소는 총 1,811,356 개로, 사용된 shell 요소를 형상별로 살펴보면 2D linear triangle shell 요소가 39,364 개, 2D linear quadrilateral shell 요소가 1,771,992 개이다. 또한 소형 PCHE 시제품 본체 및 연결 Flange 를 구성하는 3D linear solid 요소는 총 1,516,828 개로 3D brick 요소가 1,475,608 개, wedge 요소가 41,220 개로 구성된다.

2.2 구성 부품들의 물성치

Figure 4 에서 보듯이 소형 PCHE 시제품을 구성하는 부품들은 4 종류의 재질을 사용하였는데 구성 부품들의 물성치는 참고문헌 15,16 에 나타나 있다. 이들 물성치들은 PCHE 시제품의 열해석,

열팽창 및 구조해석을 위한 입력자료로 사용된다.

2.3 유로관의 온도 mapping

Figures 10 및 11 은 소형 PCHE 시제품의 정상상태에서의 열해석용 유로관 온도분포 입력자료⁽¹⁴⁾를 참조하여 단순화된 유로관 형상에 맞도록 작성한 유로관에서의 온도 mapping 인데 참고문헌 14의 온도분포 입력자료가 단순화된 유로관 및 유로관 유한요소 모델의 절점좌표와 일치하지 않게 작성되었기 때문에 이를 열해석을 위한 유한요소 모델에 맞도록 온도분포를 mapping 한 것이다. 소형 PCHE 시제품으로 유입되는 1 차 유체(가스)의 유입온도는 830°C이며 2 차 유체 (물)의 유입온도는 20°C이다.

3. 열해석

3.1 자연대류 경계조건

1 차 유로관의 Gas 유동 챔버(chamber) 및 2 차 유로관의 물 유동 챔버에서의 자연대류 경계조건을 적용하였고 소형 PCHE 시제품 표면에 대해서는 직경 5.0 m 의 공간을 가정하고 중력을 고려한 자연대류 열전달 조건을 적용하였다.⁽¹⁷⁾

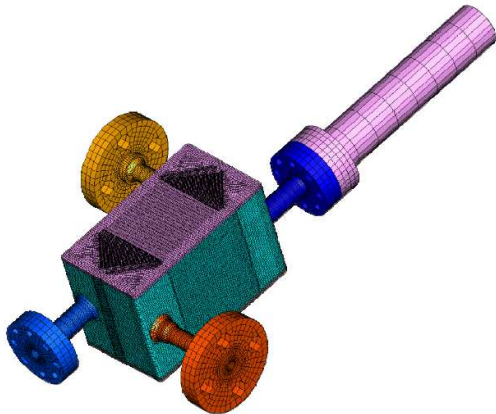


Fig. 9 FE model of small-scale PCHE prototype

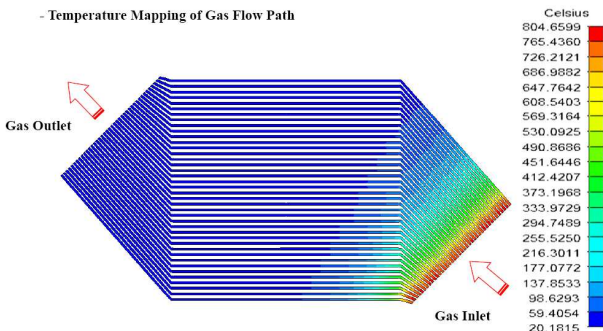


Fig. 10 Temperature mapping of gas flow path (A-type)

3.1 열해석 결과

자연대류 경계조건과 유로관의 온도 mapping 값을 이용하여 소형 PCHE 시제품에 대한 열해석

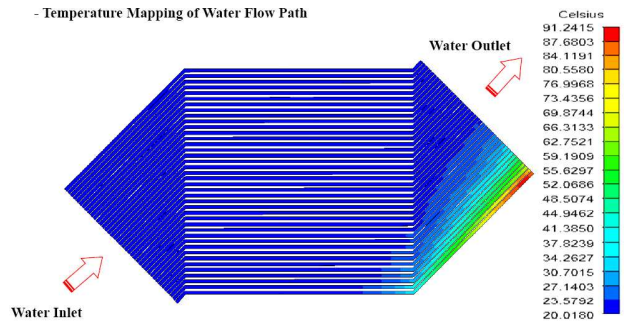


Fig. 11 Temperature mapping of water flow path(B-type)

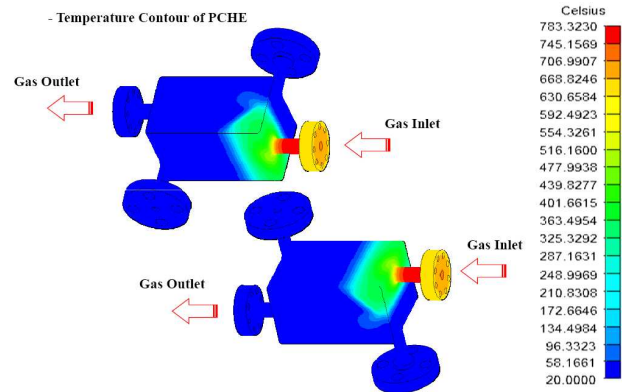


Fig. 12 Temperature contour of PCHE prototype

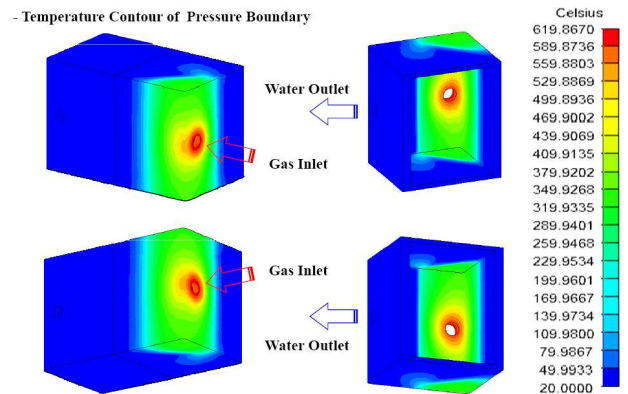


Fig. 13 Temperature contour around gas inlet chamber

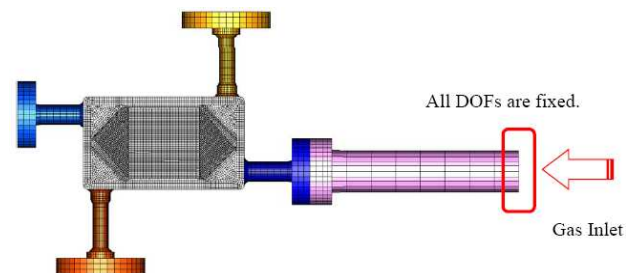


Fig. 14 Structural boundary condition

을 I-DEAS TMG v.6.1⁽¹⁸⁾을 이용하여 수행 하였다. 해석 결과 소형 PCHE 시제품, 유입/유출 파이프라인 및 플랜지들에서의 전반적인 열해석 결과는 Fig. 12 에 나타나 있으며 소형 PCHE 시제품에서의 최고 온도가 발생한 영역에 대한 상세 온도분포는 Fig. 13 에 나타나 있다. Figures 12 및 13 에서 살펴보면 소형 PCHE 시제품의 압력경계에서 최고 온도는 약 620℃ 정도이고 고온 가스 유입관과 인접한 영역에서 발생하였다. 한편 유입 챔버 부위에서는 약 300-500℃ 정도의 온도분포를 나타내고 있으나 그 외 부위에서는 100℃ 미만의 온도분포를 나타내고 있다. 이러한 온도 분포는 소형 PCHE 시제품에 대한 예비 시험에서 측정된 온도분포와 유사한 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁴⁾

4. 구조해석

4.1 변위 경계조건 및 물성치

구조해석을 위한 변위 경계조건으로는 Fig. 14 와 같이 Gas inlet pipe 끝단에서 완전구속조건을 적용하였으며, 그 외의 Flange 들은 매우 유연한 (flexible) 파이프로 연결되어 있어서 모든 변위를 구속하지 않는 자유단으로 가정하였다.

한편 3.2 절에서 기술하였듯이 소형 PCHE 시제품, 유입/유출 파이프라인 및 플랜지들에서 최고온도가 783℃이었고 재료물성치는 참고문헌 15 에서 인용하였다.

4.2 열팽창 및 구조해석 결과

PCHE 시제품에 대한 FE 모델에 앞의 4.1 절에서 언급한 변위 경계조건과 열해석 결과(각

요소 및 절점의 온도분포)를 적용하고 ABAQUS v.6.9-1⁽¹⁹⁾을 이용하여 열팽창 및 탄성구조해석을 수행하였다. 고온 상태의 열응력 해석에서 온도와 응력의 상호 연관성을 고려하는 것이 바람직한 방법이나 본 연구에서는 변형의 정도가 열전달 양상을 변화시킬 정도가 아닌 것으로 판단하고 또한 flow path 를 모두 고려한 mesh 의 양이 일반 workstation 에서 해석 가능한 수준을 벗어나고 있어서 부득이 de-coupled 방법을 사용하였다. 따라서 소형가스루프에서 PCHE 시제품을 시험 하기 전의 선행 연구로서 가스루프 시험조건 하에서 소형 PCHE 시제품의 거시적 거동을 파악하기 위함이 본 연구의 주된 목적이다.

해석 결과 소형 PCHE 시제품의 전반적인 열팽창 및 구조 해석 결과는 Fig. 15 에 나타나 있고 시제품의 압력 경계에서 689.7MPa 정도의 높은 응력이 발생한 상부판(하부판도 유사)에서의

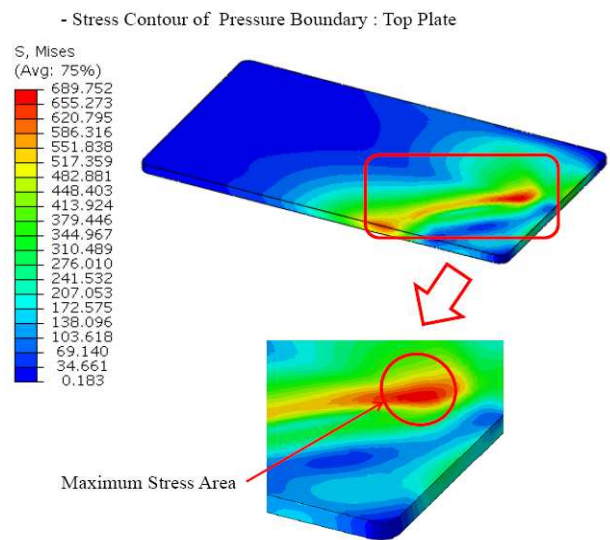


Fig. 16 Stress contour of top plate

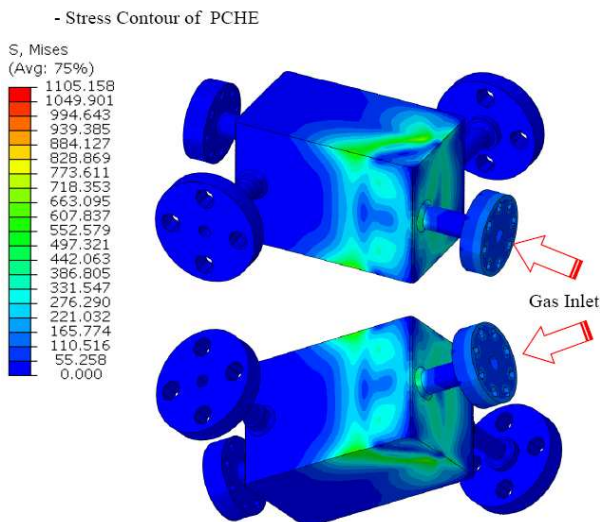


Fig. 15 Stress contour of PCHE prototype

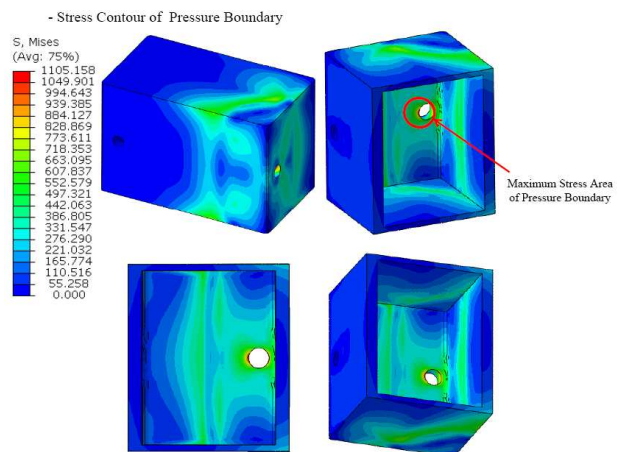


Fig. 17 Stress contour around gas inlet chamber

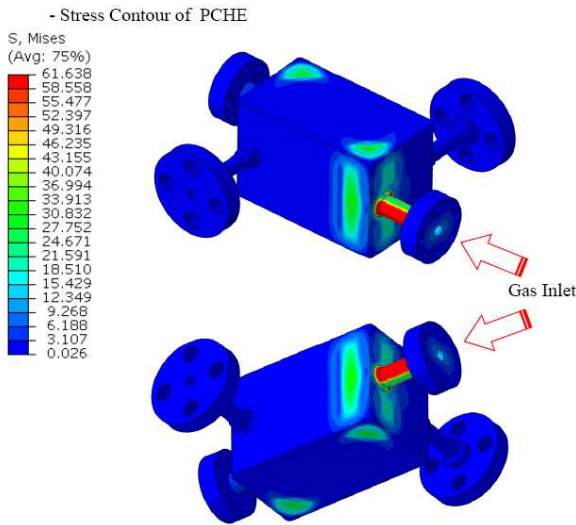


Fig. 18 Stress contour of PCHE prototype

응력분포는 Fig. 16 에 나타나 있다. Figures 15 및 16 에서 응력분포를 살펴보면 전반적으로 높은 응력은 고온가스 유입 챔버와 유로가 시작되는 상부판 부위에서 발생하였는데 이 부위에서 최대 응력은 약 689.7MPa 정도이다. 이 정도의 높은 응력과 온도에서 구조물의 정확한 거동을 파악하기 위해서는 크립의 영향을 고려한 해석이 필요하나 이는 차후에 ASME NH code 를 기준으로 수행할 예정이다.

Figure 17 은 최대응력 발생한 부위인 고온 가스 유입 챔버 주변에서의 응력분포를 나타낸 것으로 약 1,105MPa 정도의 상당히 높은 응력이 고온가스 유입관과 소형 PCHE 시제품이 접하는 압력경계 부위에서 발생하였다. 이 부위는 Fig. 13 에서 보듯이 높은 온도가 발생한 부위인데다 온도 분포가 상·하 방향으로는 비교적 대칭인 반면 좌·방향으로는 비대칭적 분포를 보이는 부위이다. Figure 14 에서와 같이 열팽창을 수용할 수 있도록 3 개 Flange 에서의 변위를 구속하지 않았음에도 불구하고 높은 응력이 발생한 것은 Fig. 13 의 온도분포에서 시사하는 바와 같이 비대칭 온도 분포에 의한 변형에 기인하는 것으로 보인다. 따라서 향후 제작될 중형 PCHE 시제품에 서는 고온 가스 유입 파이프의 위치 및 챔버 위치에 대한 설계변경을 심도있게 고려해 보아야 할 것으로 보인다.

소형 PCHE 시제품의 시험조건으로 유체 압력은 Gas flow 영역에서 4.0 MPa, Water flow 영역에서 0.1 MPa 로 설정되어 있다. 온도와 압력을 동시에 고려하여 본 FE 모델에 적용할 경우 해석용 hardware 인 workstation 이 작동하지

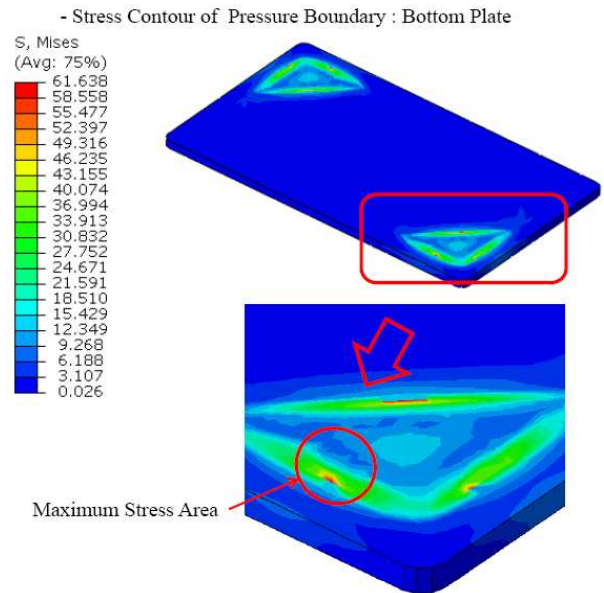


Fig. 19 Stress contour of PCHE prototype at bottom plate

않아서 온도조건과 압력조건을 분리하여 해석하였다. Figure 18 은 압력조건만을 고려한 경우에 PCHE 시제품의 전체적인 응력 분포를 나타낸 것이며 Fig. 19 는 시제품의 압력 경계인 하부판(상부판도 유사)에서의 응력분포를 나타낸 것이다. Figures 18 및 19 에서 보면 온도조건을 고려한 경우(Figs. 15 및 16 참조)에 비해 상당히 낮은 응력분포를 보이고 있다. 이것은 소형 PCHE 시제품의 고온 구조조건전성에 영향을 주는 하중조건이 압력조건보다는 온도조건임을 시사해준다.

5. 결 언

- (1) 열 해석 결과 소형 PCHE 시제품의 고온 가스 유입 챔버에서 높은 온도분포를 나타내고 있고 고온 가스 유입 파이프와 소형 PCHE 시제품이 접하는 압력경계 주변에서 최대온도 발생 및 비대칭적인 온도 분포를 보임으로서 주의를 요하고 있다.
- (2) 탄성구조 해석 결과 소형 PCHE 시제품의 고온 가스 유입 챔버부위, 고온가스 유입 파이프와 소형 PCHE 시제품이 접하는 부위에서 689.7MPa 정도의 높은 응력이 발생하고 있어서 소형 PCHE 시제품의 고온 구조조건전성이 유지되지 않을 가능성이 높을 뿐만 아니라 고온에서의 크립-피로 손상 가능성도 매우 높을 것으로 보인다. 크립-피로 평가는 차후에 수행할 예정이다.
- (3) 소형 PCHE 시제품의 고온 구조조건전성에 영향을 주는 하중조건은 온도조건이다.

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) Dewson, S. J. and Thonon, B., 2003, "The Development of High Efficiency Heat Exchangers for Helium Gas Cooled Reactors," ICAPP 2003, Paper No. 3213.
- (11) Heatric broacher on PCHEs.
- (12) Kim, Y. W. et al., 2009, "Development of Key Technologies for Nuclear Hydrogen," Final Report KAERI/RR-2992/2008.
- (13) Song, K. N. et al., 2011, "Macroscopic High-temperature Structural Analysis Model on the Small-Scale PCHE Prototype (I)," *to be appeared in Trans. A of KSME*, Vol. 35, No. 11.
- (14) Kim, C. S., 2010, "Temperature Distribution of Small-scale PCHE Prototype for Thermal Stress Analysis," Calculation note No. NHDD-KT-CA-10-006 Rev.00.
- (15) ASME Material Edition 2001.
- (16) <http://www.sandmeyerstreet.com/A800-A800H-800AT.html>.
- (17) Song, K. N., 2010, "3D FE Modeling for Thermal/Structural Analysis on Small-scale PCHE," Calculation note No. NHDD-KT-CA-10-005 Rev.00.
- (18) I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
- (19) ABAQUS ver.6.9-1, 2009.