

SUS316L 로 제작된 실험실 수준 인쇄기판형 열교환기 시제품의 고온구조건전성 평가[§]

송기남^{*†} · 홍성덕^{*}

* 한국원자력연구원

Evaluation of High-Temperature Structural Integrity Using Lab-Scale PCHE Prototype

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

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received April 12, 2013 ; Revised June 14, 2013 ; Accepted June 14, 2013)

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 실험실 수준 시제품을 제작하였다. 본 연구는 초고온헬륨루프 시험조건하에서 SUS316L 로 제작된 실험실 수준 인쇄기판형 열교환기 시제품의 고온구조건전성을 미리 평가하기 위한 작업의 일환으로 인쇄기판형 열교환기 실험실 수준 시제품에 대한 고온 구조해석 모델링, 거시적 열 해석 및 구조 해석을 수행하고 그 결과들을 정리한 것이다.

Abstract: The Intermediate Heat Exchanger (IHx) of a Very High Temperature Reactor (VHTR) is a core component that transfers the high heat of 950°C generated in the VHTR to a hydrogen production plant. The Korea Atomic Energy Research Institute manufactured a lab-scale prototype of a Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE) as a candidate for an IHx. In this study, as a part of a high-temperature structural integrity evaluation of the lab-scale PCHE prototype made of SUS316L, we carried out high temperature structural analysis modeling and macroscopic thermal and elastic structural analysis for the lab-scale PCHE prototype under helium experimental loop (HELP) test conditions as a precedent study prior to the performance test in HELP.

1. 서론

초고온가스로(Very High Temperature Reactor; VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 수소를 대량으로 생산하려는 연구가 우리 나라를 비롯하여 세계 여러 나라에서 수행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 우리나라의 원자력수소생산시스템에서는 VHTR 에서 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.⁽⁵⁻⁷⁾ 이 시스템에서는 Fig. 1 에서와 같이 고온가스덕트(Hot Gas Duct), 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger; IHx) 및 공정열교환기(Process Heat Exchanger) 등으로 구성된 중간루프가 반드시 필요한데 특히 IHx 는 원자로에서 생산된 초고온 열을 수소 생산 공장으로 전달하는 핵심 기기로서 약 900°C 정도의 초고온하에서 작동하고 있다.

인쇄기판형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger; PCHE)는 유체가 통과하는 미세한 유로를 화학적 etching 방법으로 형성하고, 유로들이 형성된 유로판

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 확산접합공정(diffusion bonding process)을 이용하여 적층 및 접합된 열교환기의 한 형태로서 열교환 용량 대비 열교환기의 용적(부피)이 작고 열교환 효율이 매우 우수한(~98%) 콤팩트형 열교환기의 형태로 알려져 있다.⁽⁸⁾ Figures 2는 영국의 Heatrix사에서 출시한 PCHE의 내부 유로에서 유체의 경로[Fig. 2(a)]와 유로판들이 확산 접합된 부위, 조직 및 유로 등[Fig. 2(b)]을 조직을 나타낸 것이다.⁽⁹⁾

한국원자력연구원(KAERI)에서는 2012년 중반에 950°C, 9.0 MPa까지 작동될 수 있는 초고온 헬륨 루프(Helium Experimental Loop; HELP)를 구축하여(Fig. 3 참조) VHTR에 필요한 여러 핵심 기기 및 부품들에 대한 주요 성능시험을 수행하려 계획하고 있으며, 성능시험에 앞서 PHE 및 PCHE 시제품

의 고온구조건전성 평가를 위한 선행해석을 수행하였다.⁽¹⁰⁻¹³⁾ 한편 KAERI에서는 근래에 실험실 수준의 PCHE 시제품을 SUS316L로 제작하여 성능시험을 준비하고 있다.

본 연구는 KAERI의 HELP에서 SUS316L로 제작된 실험실 수준 PCHE 시제품에 대한 본격적인 성능시험을 수행하기에 앞서 실험실 수준 PCHE 시제품의 고온구조건전성을 미리 파악하기 위한 선행연구의 일환으로 수행한 유한요소 모델링과 거시적 열 및 탄성구조 해석결과를 정리하여 요약한 것이다.

2. 고온구조해석용 FE 모델링

2.1 실험실 수준 PCHE 시제품 구조

SUS316L로 제작된 실험실 수준 PCHE 시제품 내부는 Fig. 4와 같은 유로형상을 갖는 2종의 유로판들이 교대로 적층되고 적층된 유로판들의 모서리는 확산 접합(diffusion bonding)되어 있다. Fig. 5는 실험실 수준 PCHE 시제품의 제작공정도를 나타낸 것이다. 부연하여 설명하면 화학적 에칭된 유로판(1)들을 적층하고 확산 접합방법으로 열교환기 본체(2 및 3)를 만든 다음 유체 유입/유출구가 부착된 플랜지 챔버를 용접(4)한 다음 압력 누설시험을 시행하였다. 본 연구의 대상인 실험실 수준 PCHE 시제품에는 1차측 열매체용 유로판(A형)과 2차측 열매체용 유로판(B형) 그리고 분리판(P형)이 A-P-B의 형태로 1개 set를 이루며 총 40 sets개로 구성되어 있다. 또한 1차 및 2차 유체 유입/유출구가 부착된 플랜지 챔버는 PCHE 본체와 TIG 용접되어 있다.

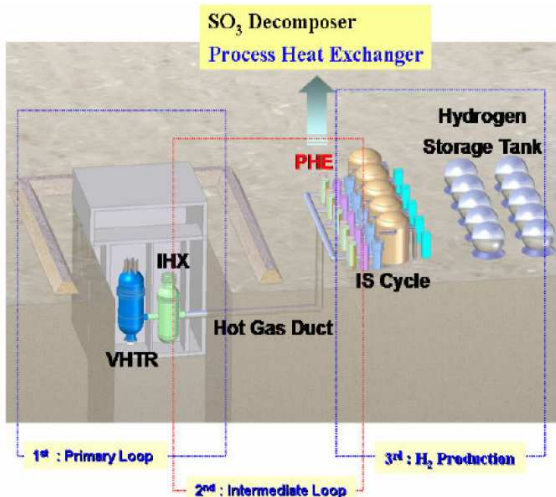


Fig. 1 Nuclear hydrogen system

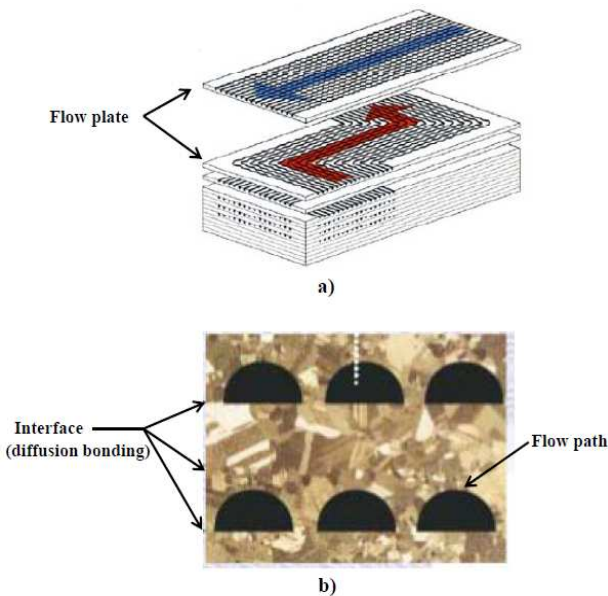


Fig. 2 Inside of Heatrix's PCHE: a) flow path on the flow plates b) metallographic view on the interfaces of flow plates

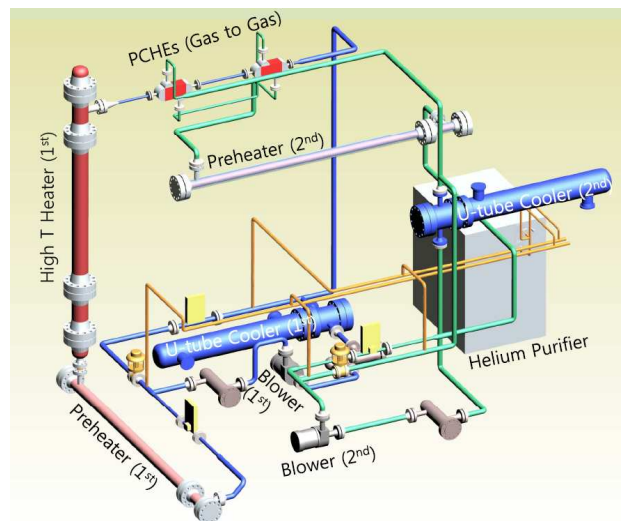


Fig. 3 Schematic view of KAERI's helium experimental loop (HELP)

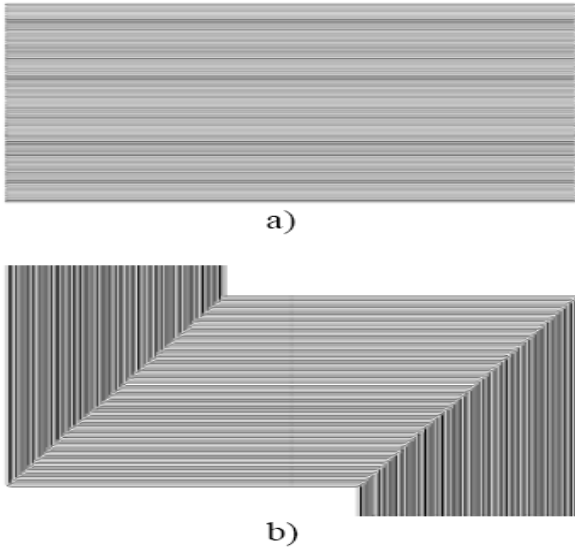


Fig. 4 Flow plates of a lab-scale PCHE prototype: a) plate for primary flow b) plate for secondary flow

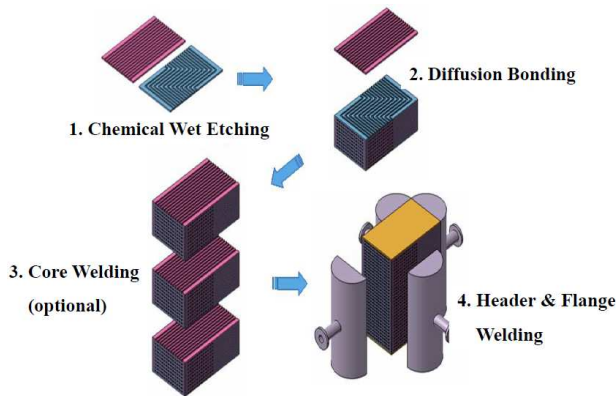


Fig. 5 Manufacturing process of a lab-scale PCHE prototype

2.1 유한요소(FE) 모델링

실험실 수준 PCHE 시제품의 유한요소(Finite Element: FE) 모델링은 3 차원 선형 유한요소 3,392,172 개로 구성되어 있는데 유한요소 모델 구성의 편의상 사면체 요소 34,276 개가 사용되었다. 실험실 수준 PCHE 시제품의 유한요소 모델에서 총 절점수는 4,355,684 개이다. 구성된 유한요소 모델이 Fig. 6 에 나타나 있고 유한요소 모델링은 상용 코드 I-DEAS⁽¹⁴⁾를 사용하였다.

2.2 구성 부품들의 물성치

실험실 수준 PCHE 시제품을 구성하는 모든 부품들은 SUS316L 로 제작되었고 SUS316L 의 재료 물성치가 Table 1 나타나 있다.⁽¹⁵⁾ 이 재료 물성치들은 실험실 수준 PCHE 시제품의 열해석, 열팽창 및 고온구조해석을 위한 입력자료로 사용된다.

Table 1 Material Properties of SUS316L

Temperature (°C)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Conductivity (W/m·°C)	Specific Heat (J/kg·K)	Coefficient of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C)
20	192	0.3	13.94	470	15.9
100	186	0.3	15.08	486	16.4
200	178	0.3	16.52	508	17.0
300	170	0.3	17.95	529	17.5
400	161	0.3	19.39	550	17.9
500	153	0.3	20.82	571	18.3
600	145	0.3	22.25	592	18.7
700	137	0.3	23.69	613	19.0

Table 2 Parameters of Primary/Secondary Coolants

	Primary Coolant	Secondary Coolant
Fluid	He	He
Inlet Temperature (°C)	550	300
Outlet Temperature (°C)	411	438
Pressure (MPa)	6.0	4.0

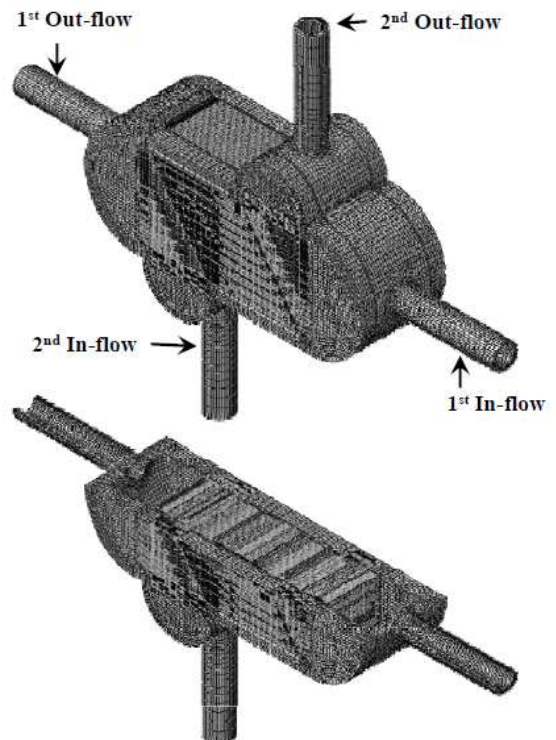


Fig. 6 Finite element model of a lab-scale PCHE prototype

3. 열해석

3.1 열해석용 경계조건

Table 2 는 실험실 수준 PCHE 시제품의 성능해

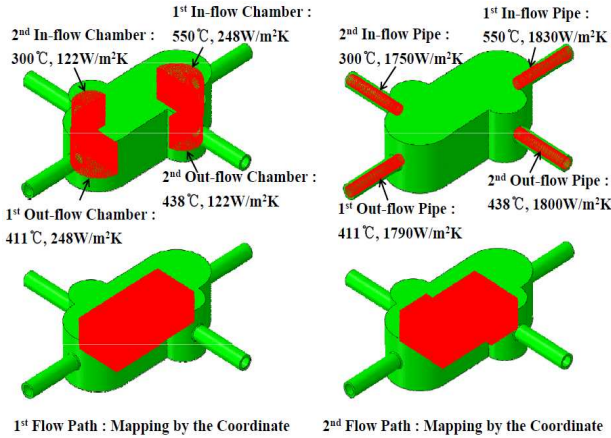


Fig. 7 Thermal boundary conditions

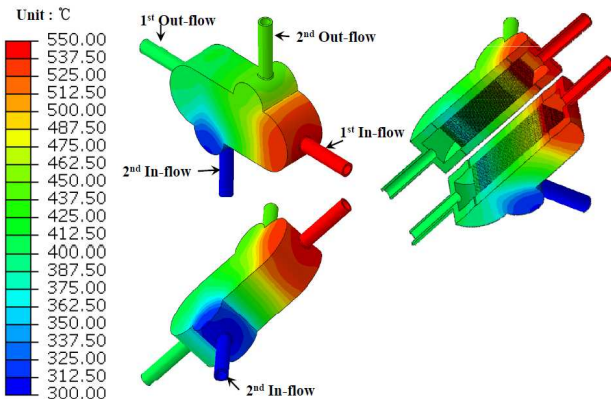


Fig. 8 Temperature contours

석을 위한 1차 및 2차 유체의 유입/유출 조건이다. Table 2의 유체 유입/유출 조건을 고려하여 실험실 수준 PCHE 시제품의 1차 및 2차 유체 유입/유출 파이프 및 헤더부 챔버에서의 경계조건을 Fig. 7과 같이 적용하였다.

3.2 열해석 결과

HELP에서 실험실 수준 PCHE 시제품에 대한 성능시험은 단열된 상태에서 수행할 예정이다. 따라서 실험실 수준 PCHE 시제품에 대한 열해석은 단열로 가정하여 해석하였고 상용 코드 I-DEAS/TMG⁽¹⁴⁾를 사용하였다.

Fig. 8은 열해석 결과로서 실험실 수준 PCHE 시제품 외면에서의 온도분포를 전반적으로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보면 1차 유체의 유입 파이프와 챔버 주위에서 비교적 높은 온도(약 530°C 정도) 분포를 나타내고 있으며 2차 유체의 유입 파이프 및 챔버 주위에서는 비교적 낮은 온도(약 310-320°C 정도) 분포를 나타내고 있다.

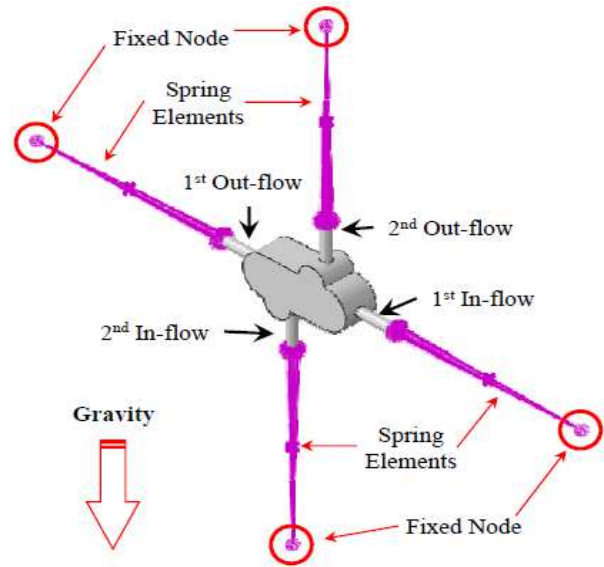


Fig. 9 Structural boundary conditions

4. 고온구조해석

4.1 구조해석용 경계조건

실험실 규모 PCHE 시제품 내부를 흐르는 1차 및 2차 유체의 압력조건은 Table 2에서 보듯이 1차 유체는 6.0 MPa, 2차 유체는 4.0 MPa이다. 실험실 수준 PCHE 시제품에서 유체의 유입/유출 파이프 라인에서 변위 구속조건은 연결된 파이프 라인의 치수와 구조를 고려하여 PCHE 시제품과 연결된 파이프 라인의 길이방향으로 열팽창을 수용할 수 있도록 Fig. 9와 같이 스프링 요소를 적용하였고 스프링 요소의 끝단의 모든 자유도는 구속하였다.

스프링 요소의 등가 스프링 강성을 구하기 위한 과정은 PCHE 시제품이 연결된 HELP의 배관들에서 길이 방향의 열팽창을 수용할 수 있는 부위의 스프링 강성(k_{ex})과 굽힘 변형에 의해 열팽창을 수용할 수 있는 부위의 스프링 강성(k_b)을 아래 식 (1)과 (2)에서 구한 다음 식 (3)에 의해 등가 스프링 강성(k_{eq})을 구한다.⁽¹⁶⁾

$$k_{ex} = \frac{AE}{L_{ex}} \tag{1}$$

$$k_b = \frac{3EI_b}{L_b^3} \tag{2}$$

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_{ex}} + \frac{1}{k_b} \tag{3}$$

여기서

Table 3 Equivalent spring stiffness at pipelines

Position	K (N/mm)
1 st Inlet	82925.3
1 st Outlet	194.2
2 nd Inlet	277.6
2 nd Outlet	2395.6

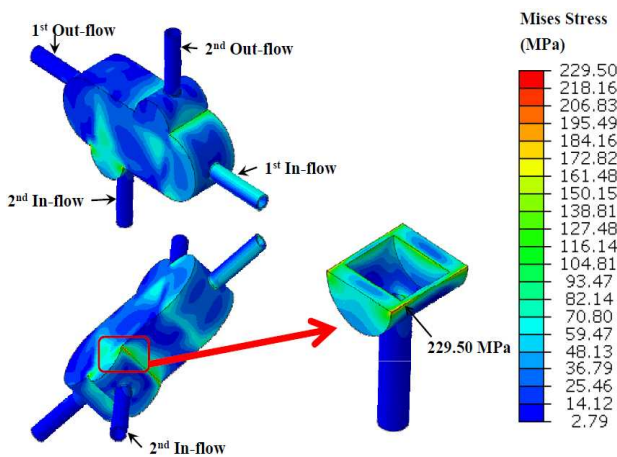


Fig. 10 Stress contours

- A : 배관의 단면적
- E : 배관 재료의 탄성계수
- L_{ex} : 직관 배관의 길이
- L_b : U-tube 및 엘보우 곡관에서 굽힘 모멘트를 유발하는 팔 길이
- I_b : 굽힘 관성 모멘트

실험실 수준 PCHE 시제품이 연결된 HELP 의 배관 구조 및 치수를 고려하고 상기 식 (3) 으로부터 얻은 등가 스프링 강성이 Table 3 에 나타나 있다.

4.2 고온 구조해석 결과

Fig. 8 의 열해석 결과와 Fig. 9 의 구조경계조건을 적용하여 실험실 수준 PCHE 시제품의 고온구조해석을 상용 코드 ABAQUS⁽¹⁷⁾를 사용하여 수행하였다. 실험실 수준 PCHE 시제품의 고온구조해석 결과로서 PCHE 시제품의 압력경계에서 Von Mises 등가 응력분포가 Fig. 10 에 나타나 있다.

Fig. 10 에서 보면 229.5 MPa 정도의 등가 최대응력이 2 차 유체의 유입 플랜지 챔버와 PCHE 본체가 맞닿는 모서리부위인 용접부위에서 발생하였고 이 응력을 Tresca stress 으로 환산하면 약 221.8 MPa 에 해당된다. 이 값은 peak stress 를 내재한 응

력이므로 ASME code Sec. III T-1300, NB-3222⁽¹⁸⁾의 평가기준에 따라 평가할 때 허용응력($3 S_m$)의 약 78.3%에 해당되므로 고온구조건전성 평가 측면에서는 약 21.7%정도의 여유가 있다. 한편 Fig. 10 에서 등가 최대응력이 발생한 부위는 플랜지 챔버와 PCHE 본체를 연결하기 위해 TIG 용접된 부위인데 SUS316L 의 TIG 용접부위에서 항복응력이 모재에 비해 약 7.1% 정도 작아지는 연구결과를⁽¹⁹⁾ 감안하더라도 고온구조건전성 평가 측면에서는 약 18.7% 정도의 여유가 있다. 따라서 HELP 운전조건하에서 실험실 수준의 PCHE 시제품의 고온구조건전성은 peak stress 관점에서 보면 유지될 것으로 판단된다.

한편 상세한 구조건전성 평가를 위해서는 상용 소프트웨어와 같이 열교환기 시제품의 각 단면에서 막응력 그리고 막응력 및 굽힘응력이 결합된 응력기준의 만족여부를 평가하고 또한 고온영역에서의 피로-크립 관점에서 고온구조 건전성을 평가해야 할 것이다. 이러한 연구는 향후 상세 구조건전성 평가에서 다루어야 할 것이다.

5. 결 언

HELP 운전조건에서 SUS316L 로 제작된 실험실 수준 PCHE 시제품의 고온구조해석을 수행하여 고온구조건전성을 평가하였다.

- (1) 최대응력은 1 차 유체의 유입 플랜지 챔버와 PCHE 본체를 용접한 부위에서 국부적으로 발생하였다.
- (2) ASME code 에 따라 평가할 경우 발생한 최대 국부 응력은 peak stress 를 고려한 허용응력의 약 80% 수준이다.
- (3) HELP 운전조건하에서 실험실 수준의 PCHE 시제품의 고온구조건전성은 peak stress 관점에서 보면 유지될 것으로 판단된다.

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., 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, J. 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) Stephen J. Dewson and Bernard Thonon, 2003, "The Development of High Efficiency Heat Exchangers for Helium Gas Cooled Reactors," *ICAPP 2003*, Paper No. 3213.
- (9) Heatic broacher on PCHEs.
- (10) Song, K. N., Lee, H. Y., Kim, C. S., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2011, "Macroscopic High-Temperature Structural Analysis Model for a Small-Scale PCHE Prototype (I)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1499~1506.
- (11) Song, K. N., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2011, "High-Temperature Structural Analysis of a Small-Scale Prototype of a Process Heat Exchanger (IV)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1249~1255.
- (12) Song, K. N., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2012, "Macroscopic High-Temperature Structural Analysis of PHE Prototypes Considering Weld Material Properties," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 9, pp. 1095~1101.
- (13) Song, K. N., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2012, "High-Temperature Structural Analysis of a Medium-Scale Process Heat Exchanger Prototype," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 10, pp. 1283~1288.
- (14) I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
- (15) ASME Material Edition 2001.
- (16) Song, K. N., Kang, J. H., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2011, "Elastic High-Temperature Structural Analysis on the Small-Scale PHE Prototype Considering the Pipeline Stiffness," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 7, No. 3, pp. 48~53.
- (17) ASME code Section III T-1300, NB-3222, 2012.
- (18) ABAQUS ver.6.9-1, 2009.
- (19) Song, K. N., Hong, S. D. and Ro, D. S., 2013, "Measurement of Weld Mechanical Properties of SUS316L Plate Using an Instrumented Indentation Technique," *Journal of the Korean Welding & Joining Society*, Vol. 31, No. 2, pp. 43~50.