

## 중형 공정열교환기 시제품 고온구조해석<sup>§</sup>

송기남<sup>\*†</sup> · 홍성덕<sup>\*</sup> · 박홍윤<sup>\*\*</sup>

\* 한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부, \*\* 에이디 솔루션

### High-Temperature Structural Analysis of a Medium-Scale Process Heat Exchanger Prototype

Kee-Nam Song<sup>\*†</sup>, Sung-Deok Hong<sup>\*</sup> and Hong-Yoon Park<sup>\*\*</sup>

\* Korea Atomic Energy Research Institute,  
\*\* AD Solution

(Received March 2, 2012 ; Revised August 8, 2012 ; Accepted August 9, 2012)

**Key Words:** Process Heat Exchanger(공정열교환기), High-Temperature Structural Analysis(고온 구조해석), Very High Temperature Reactor(VHTR; 초고온가스로)

**초록:** 수소를 대량으로 생산하기 위한 원자력수소생산시스템에서 공정열교환기는 초고온가스로로부터 생성된 초고온 열을 화학반응공정으로 전달하는 핵심기기이다. 한국원자력연구원에 구축되어 있는 소형 가스루프에서 Hastelloy<sup>®</sup>-X 로 제작된 중형 공정열교환기 시제품에 대한 성능시험이 계획되어 있다. 본 연구에서는 중형 공정열교환기의 고온구조건전성을 파악하기 위한 선행 연구로서 소형가스루프 시험조 건하에서 중형 공정열교환기 시제품의 고온구조해석을 이전 연구에서 확립된 경계조건을 적용하여 수행 하였다. 해석결과는 소형가스루프에서의 중형 공정열교환기 시제품에 대한 성능시험 결과와 비교할 예정이다.

**Abstract:** A process heat exchanger (PHE) in a nuclear hydrogen system is a key component for transferring the considerable heat generated in a very high temperature reactor (VHTR) to a chemical reaction that yields a large quantity of hydrogen. A performance test on a medium-scale PHE prototype made of Hastelloy<sup>®</sup>-X is scheduled in a small-scale gas loop at the Korea Atomic Energy Research Institute. In this study, as a preliminary study before carrying out the performance test in the gas loop, high-temperature structural analysis modeling and macroscopic thermal and structural analysis of the medium-scale PHE prototype by imposing the established displacement boundary constraints were carried out under the gas loop test condition. The results obtained in this study will be compared with the performance test results of the medium-scale PHE prototype in the gas loop.

### 1. 서 론

화석연료에 의한 CO<sub>2</sub> 배출을 완화하기 위한 노력의 일환으로 대체에너지원 개발이 전 세계로 가속화되고 있는 시점에 초고온가스로 (Very High Temperature Reactor; VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 청정 에너지원인 수소를 대량 및 경제적으로 생산하려는 연구가 우리 나라를 비롯

하여 세계 여러 나라에서 수행되고 있다.<sup>(1~5)</sup> 우리나라에서는 원자력을 이용하여 수소 가스를 생산하기 위한 원자력수소생산시스템을 도출하였는데 이는 초고온가스로에서 생산된 높은 온도의 열(약 950℃), 헬륨(He) 가스, 요오드-황산 공정 (Iodine-Sulfur cycle; I-S cycle) 등을 이용하여 물을 분해함으로써 친환경적인 방법으로 수소를 대량으로 생산하는 개념이다.<sup>(5~7)</sup> Fig. 1은 원자력 수소생산시스템의 개략도를 나타낸 것으로 고온가스덕트(Hot Gas Duct; HGD), 중간 열교환기 (Intermediate Heat Exchanger; IHX) 및 공정 열교환기(Process Heat Exchanger; PHE) 등의 기기로 구성된 중간 루프가 반드시 필요하다. 특히

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2012. 2. 16.-17., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, [knsong@kaeri.re.kr](mailto:knsong@kaeri.re.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

PHE 는 원자력 증기 개질(nuclear steam reforming), 원자력 메탄올(nuclear methanol), 원자력 제철(nuclear steel), 원자력 원유 정제(nuclear oil refinery) 및 원자력 증기(nuclear steam) 등과 같은 곳에서도 널리 이용되고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

한국원자력연구원(KAERI)에서 고려하는 PHE 의 내부구조는 Fig. 2(a)에 나타나 있는데 초고온의 열매체(헬륨 가스)가 흐르는 1 차 유로관에 직경 1.0 mm 의 그루브(groove)로 형성되어 있고 저온의 냉각재(SO<sub>3</sub>)가 흐르는 2 차 유로관은 물결모양으로 굽힘 가공하여 형성되어 있다.<sup>(8)</sup> 한편 2 차 유로관 표면은 이온빔 텍싱기술을 이용하여 표면의 내부식성을 강화시키려 하고 있다.<sup>(9)</sup>

그동안 소형 PHE 시제품의 거시적 고온구조건전성을 파악하기 위한 일련의 연구가 수행되었고<sup>(10-14)</sup> 연구수행결과 PHE 시제품의 고온구조해석에 소형가스루프의 배관 특성을 고려한 변위 구속조건을 적용하는 방법을 확립하였다.<sup>(14)</sup> 그런데 KAERI 에서는 2011 년 중반에 소형 PHE 시제품보다 규모가 2 배 큰 중형 PHE 시제품을 제작하였고 소형가스루프 시험조건하에서 중형 PHE 시제품에 대한 성능 시험을 계획하고 있다.

본 연구는 소형가스루프 시험조건하에서 중형 PHE 시제품의 거시적 고온구조건전성을 파악하기 위한 선행 연구의 일환으로 중형 PHE 시제품에 대한 구조해석용 유한요소 모델링, 거시적 열 해석 및 고온 구조해석을 수행하고 그 결과를 정리한 것이다.

### 2. 중형 PHE 시제품의 구조

제작된 중형 PHE 시제품의 내부는 1 차 측 고온 열매체용 유로관 20 개와 2 차 측 저온 냉각재용 유로관 20 개가 교대로 적층되고, 적층된 1 차 및 2 차 유로관들의 모서리는 확산접합(diffusion bonding)되며, 적층 및 확산접합된 유로관 외부는 두께 3.0 mm 의 Hastelloy<sup>®</sup>-X 판으로 감싸여서 압력 경계를 이루고 있다. Fig. 3 은 중형 PHE 시제품의 전반적인 치수, 중형 PHE 시제품을 구성하는 각 부품들의 형상 및 조립내역을 3 차원 CAD 로 나타낸 것이다.

### 3. 열 해석

중형 PHE 시제품에 대한 구조해석용 유한요소(Finite Element; FE) 모델링, 1 차 측 열매체 및 2 차

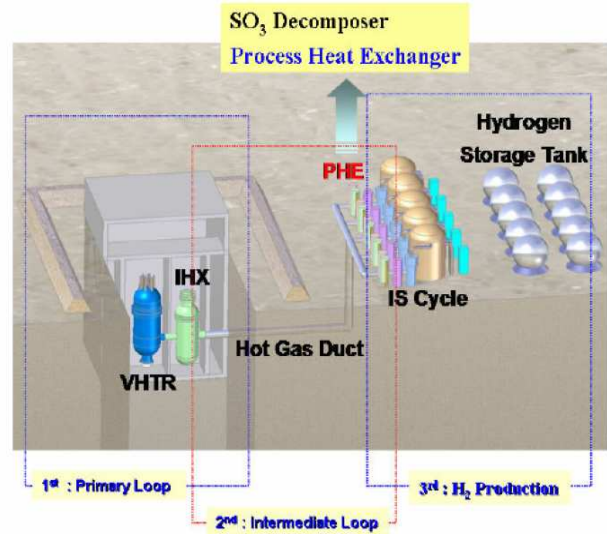
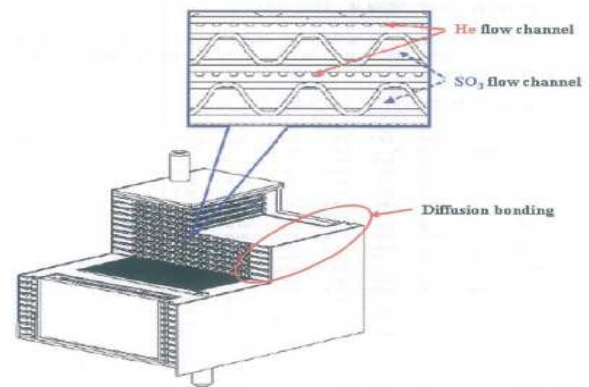


Fig. 1 Nuclear hydrogen system



(a) Inside of KAERI's PHE



(b) Primary flow plate



(c) Secondary flow plate

Fig. 2 Inside of KAERI's PHE and its flow plates

측 냉각재의 유입/유출구 모델링 기법은 소형 PHE 시제품에서와 유사하다.<sup>(12,14)</sup> 중형 PHE 시제품에 대한 FE 모델링 개요, 열 해석 및 고온 구조 해석을 위한 경계조건은 다음과 같다.

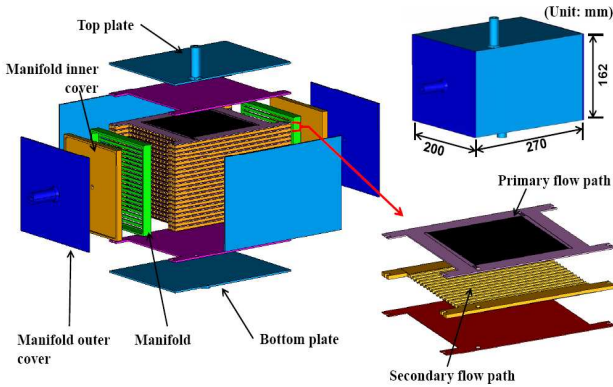


Fig. 3 Parts of medium-scale PHE prototype

3.1 유한요소 모델링

I-DEAS 를 이용하여 중형 PHE 시제품을 FE 모델링하였고 열 해석은 I-DEAS/TMG Ver. 6.1<sup>(15)</sup>을 구조해석은 ABAQUS Ver. 6.9-1<sup>(16)</sup>을 사용하였다. 1 차 및 2 차 측 유동의 열적 접촉조건과 시제품 외 부로의 열전달을 부여하기 위해 2 차원 선형 사각형 쉘요소 680,772 개와 2 차원 선형 삼각형 쉘요소 19,872 개로 구성되어 있다. 사용된 쉘요소는 열 해석만을 위한 즉, null shell 요소로 사용되었다. 한편 고온 구조해석을 위한 FE 모델은 870,696 개의 3 차원 선형 체적 요소로 구성되어 있으며 총 절점 수는 1,141,423 이다. 3 차원 선형 체적요소 중에 해석의 정확도는 떨어지나 복잡한 형상을 용이하게 구현하기 위해 부분적으로 오면체 요소 66,456 개가 사용되었다.

3.2 열 해석 경계조건 및 해석결과

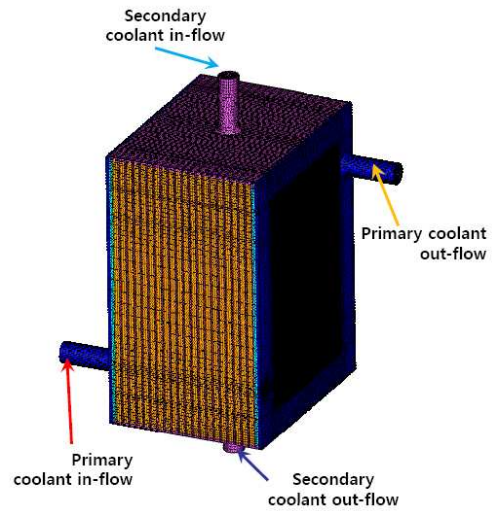
소형가스루프에서 중형 PHE 시제품의 성능시험 조건(1 차 열매체의 유입 온도가 850°C)을 고려하여 1 차 및 2 차 냉각재의 유입경로와 1 차 및 2 차 유로판에서의 열 해석 경계조건은 Fig. 4 에 나타나 있다. 열 해석을 위한 Hastelloy<sup>®</sup>-X 물성치는 Table 1<sup>(17)</sup>에 나타나있다. Fig. 4 의 경계조건을 이용한 중형 PHE 시제품 전체 구조에 대한 열 해석 결과는 Fig. 5 에 나타나 있다.

Fig. 5 의 온도분포를 살펴보면 중형 PHE 시제품 외표면의 온도 분포는 수직축을 기준으로 거의 대칭적인 분포를 나타내고 있으며 최고 온도 (836.26°C)는 상부판(Top plate) 중앙하부에서 발생하였다. 이 온도분포는 중형 PHE 시제품의 탄성 및 탄소성 고온 구조해석에 입력 자료로 이용된다.

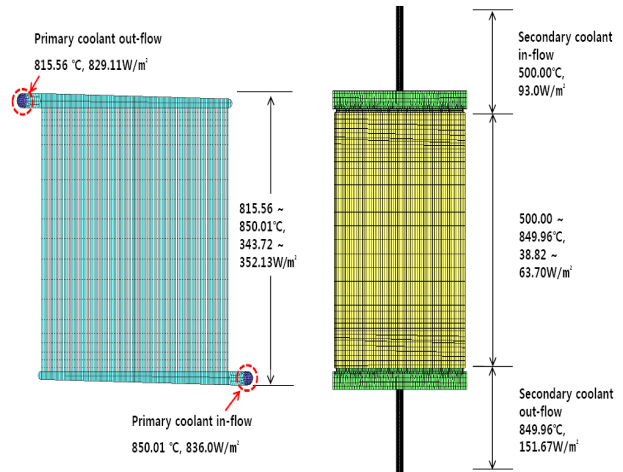
한편 고온구조해석에는 1 차 측 열매체 유로판에 4.0 MPa, 2 차 측 냉각재 유로판에 0.1 MPa 의 압력을 적용하였다.

Table 1 Material properties of Hastelloy<sup>®</sup>-X alloy

Temperature (°C)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Conductivity (W/m·°C)	Specific Heat (J/kg·K)	Coefficient of Thermal Expansion (10 <sup>-6</sup> /°C)
20	211	0.3	13.4	419	-
100	206	0.3	14.7	440	11.6
200	201	0.3	16.3	465	12.6
300	194	0.3	-	-	-
400	188	0.3	19.3	515	13.6
500	181	0.3	-	-	-
600	173	0.3	22.5	561	14.0
700	166	0.3	-	-	-
800	149	0.3	25.5	611	15.4
900	148	0.3	-	-	-
1000	141	0.3	28.7	662	16.3



(a) Medium-scale PHE prototype



(b) Primary flow plate (c) Secondary flow plate

Fig. 4 Thermal boundary condition of PHE prototype

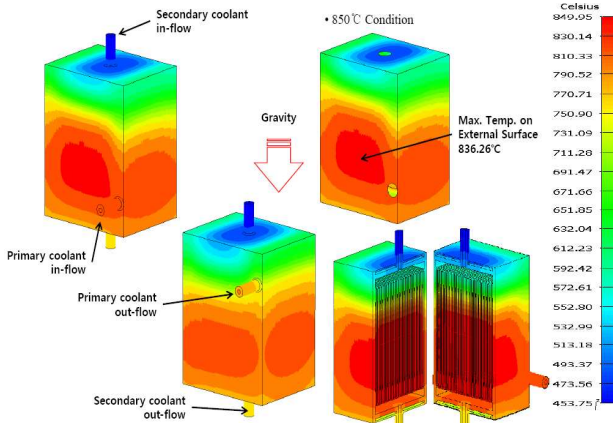
4. 고온구조해석

4.1 경계조건

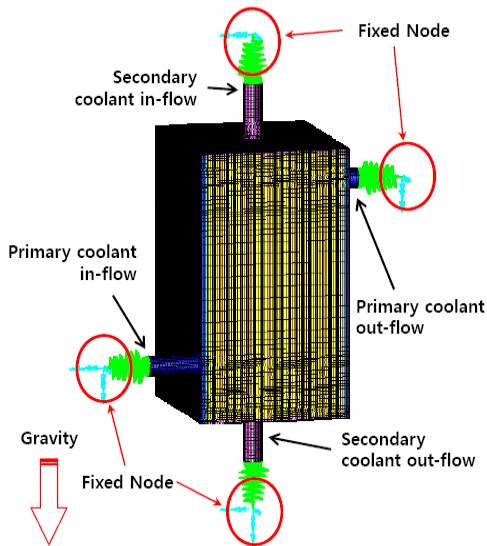
중형 PHE 시제품은 U-tube 및 엘보우 곡 관,

**Table 2** Equivalent spring stiffness at pipelines

Position	$K$ (N/mm)
1 <sup>st</sup> Inlet ( $K_{p-in}$ )	1824.9
1 <sup>st</sup> Outlet ( $K_{p-out}$ )	630.5
2 <sup>nd</sup> Inlet ( $K_{s-in}$ )	2748.2
2 <sup>nd</sup> Outlet ( $K_{s-out}$ )	2748.2

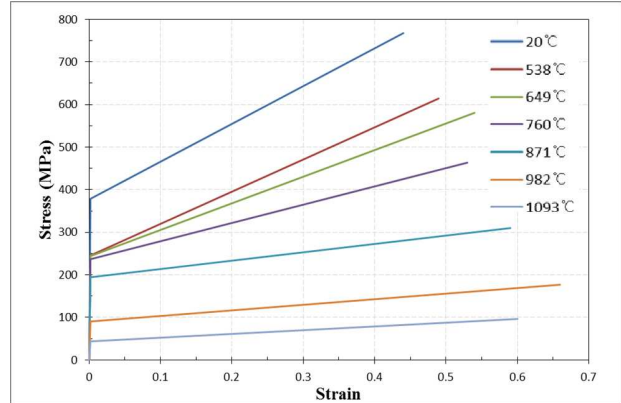


**Fig. 5** Temperature distributions of the outside of PHE

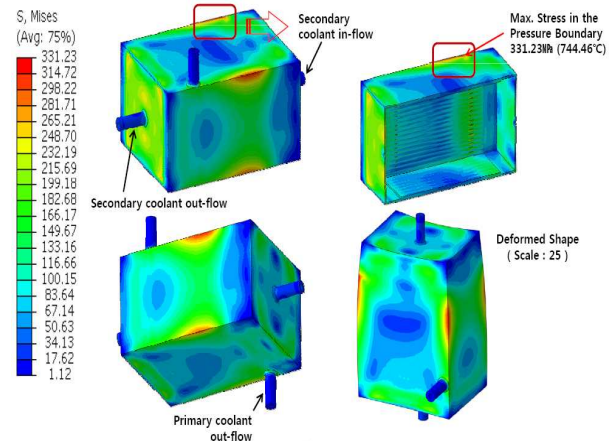


**Fig. 6** Boundary conditions for structural analysis

직관(straight tube) 등과 연결되어 있고 또한 2 차 유체 유출관이 부착되어 있는 소형 PHE 시제품 밀면은 고정된 받침대 (fixed stand) 위에 놓여져 있다. 이와 같이 설치된 PHE 시제품의 경계 조건을 이전의 연구에서<sup>(14)</sup> 확립하였는데 본 연구의 소형가스루프에 설치된 중형 PHE 시제품에 대한 고온 구조해석에서도 이전 연구결과에서 얻은 경



**Fig. 7** Bilinear stress-strain curve for elastic-plastic analysis



**Fig. 8** Stress distributions in elastic analysis of medium-scale PHE prototype

계조건을 동일하게 적용하였다. Fig. 6 은 중형 PHE 시제품의 고온 구조해석에 사용된 경계조건을 나타낸 것이고 Table 2 는 소형가스루프의 배관특성을 고려하여 Fig. 6 의 각 배관 위치에서의 등가 스프링 강성 값을 나타낸 것이다. Table 2 의 스프링 강성은 Fig. 6 에서 각 파이프 라인의 길이방향으로만 적용하고 나머지 DOF 에서는 변위를 구속하였다.

**4.2 해석 결과**

소형가스루프 시험조건에서 중형 PHE 시제품의 전반적인 거동을 파악하기 위해 우선 고온 탄성 구조해석을 수행하였다. Fig. 7 은 해석에 사용한 Hastelloy<sup>®</sup>-X 의 온도에 따른 응력-변형도 선도이다. Fig. 8 은 고온 탄성구조 해석에서 얻은 중형 PHE 시제품 압력 경계에서 응력 분포와 25 배로 확대한 변형 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 8 에서 보면 중형 PHE 시제품 압력 경계에서 최대 응력은 상부판의 모서리 부위에서 발생(331.23

MPa)하였다. 최대 응력이 발생한 부위에서 온도는 744.46°C로서 이 온도에서 Hastelloy<sup>®</sup>-X의 항복응력은 238.0 MPa이다.<sup>(17)</sup> 따라서 중형 PHE 시제품의 고온 탄성 구조 해석에서 최대 응력은 Hastelloy<sup>®</sup>-X의 항복응력을 약 39.4% 정도 초과하고 있다. 소형 PHE 시제품에 대한 해석결과<sup>(13)</sup>와 비교할 때(최대 응력 272.33 MPa) 중형 PHE 시제품에서 최대 응력은 소형 PHE 시제품에서와 거의 동일한 부위에서 발생하였으나 그 크기는 약 21.6% 증가하였다. 이것은 소형가스루프에 연결된 동일한 구속조건 하에서 PHE 시제품의 규모가 커짐에 따라 열팽창이 심화된 즉 size effect가 발생한 것으로 추정된다. 한편 중형 PHE 시제품의 변형 형상은 Fig. 8의 우측 하단에 있는 그림에서 보듯이 시제품 하단은 팽창하고 상단은 수축하는 변형 형상인데 이것은 Fig. 5의 온도분포와 연관되어 있다. 즉, Fig. 5의 온도분포를 살펴보면 중형 PHE 시제품 하단은 고온 영역인데 반해 상단은 저온 영역이어서 열팽창이 상이하게 발생하기 때문으로 보인다.

중형 PHE 시제품의 고온 구조조건전성을 좀 더 상세히 평가하기 위해 고온 탄소성 구조해석을 수행하였다. Fig. 9는 고온 탄소성 구조해석을 수행하여 얻은 중형 PHE 시제품 압력 경계에서 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보면 중형 PHE 시제품 압력경계에서 263.65 MPa 정도의 최대 응력이 상부판의 모서리 부위에 있는 1차 열매체 유입구 주변에서 발생하였다. 고온 탄소성 구조해석에서 발생한 최대 응력은 Hastelloy<sup>®</sup>-X의 항복응력을 약 10.8% 초과하고 있다.

Fig. 10은 소형 PHE 시제품에서의 고온 탄소성 구조해석 결과(응력 분포)를 나타낸 것이다. Figs. 9와 10을 비교할 때 중형 PHE 시제품에서 최대 응력은 소형 PHE 시제품에서와 같이 상부판의 모서리 부근에서 발생하였으나 최대 응력은 그 크기가 약 8.7% 증가하였다. 이와 같이 중형 PHE 시제품에서 최대 응력이 소형 PHE 시제품에서의 최대 응력보다 커지는 것은 앞의 고온 탄성 구조해석 결과에서 논의한 바와 같이 소형 가스루프에 연결된 배관 구속 조건이 동일한데 반해 중형 PHE 시제품에서는 소형 PHE 시제품보다 규모가 2배 증가함에 따라 열팽창이 심화되는 즉, size effect가 발생한 것으로 추정된다.

본 연구의 고온 구조해석에서는 소형가스루프 운전조건에서 중형 PHE 시제품의 거시적 거동을 파악하기 위해 전체응력의 분포에 초점을 맞추었으며 전체응력과 항복응력과의 비교를 통해

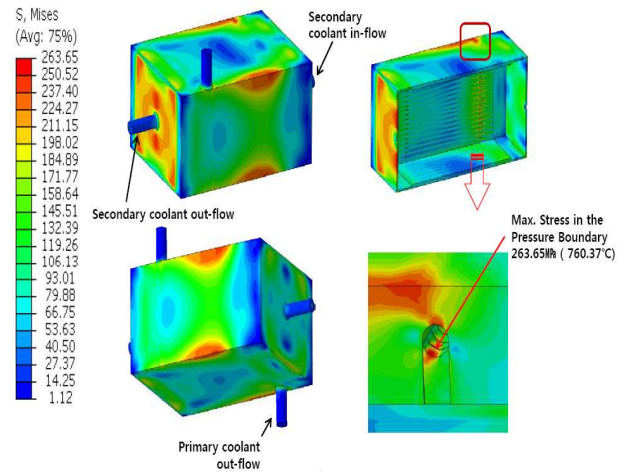


Fig. 9 Stress distributions in elastic-plastic analysis of medium-scale PHE prototype

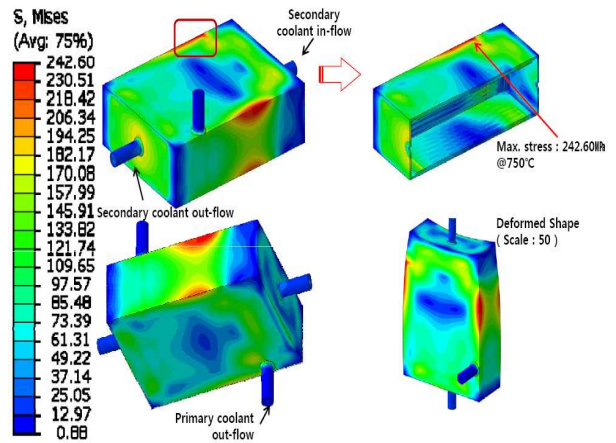


Fig. 10 Stress distributions in elastic-plastic analysis of small-scale PHE prototype

중형 PHE 시제품의 전반적인 거시적 거동을 분석하였다. 그러나 향후 상세한 구조조건전성 해석에서는 피로해석 및 응력성분의 분리 평가 등이 수행되어야 할 것이다.

### 5. 결론

소형가스루프에 설치된 중형 PHE 시제품에 대한 거시적인 고온 구조조건전성을 파악하기 위한 구조해석 모델링과 소형가스루프 시험조건하에서 열 해석, 고온 탄성 및 탄소성 구조해석을 수행하여 다음과 같은 관찰사항과 결론을 얻었다.

- (1) 최대 응력은 상부판의 모서리 부위에서 발생하였고 Hastelloy<sup>®</sup>-X의 항복응력을 39.4% 초과하고 있다.
- (2) 최대 응력이 발생한 부위는 유로판들이 적층되고 확산접합/용접된 부위이어서 실제 시제품

제조시에는 구조적으로 취약한 부위 혹은 주변이 될 수 있다. 따라서 중형 PHE 시제품의 고온 구조건전성 확보를 위해서는 양호한 접합품질 및 접합기술을 확보하는 것이 필수적이다.

(3) 소형 PHE 시제품에 대한 해석결과와 비교할 때 중형 PHE 시제품에 대한 해석에서는 탄성 해석의 경우 최대 응력이 약 21.6% 증가하였고 탄소성 해석에서는 최대 응력이 약 8.7% 증가하였다.

(4) 중형 PHE 시제품에서 최대 응력이 소형 PHE 시제품의 그것보다 증가한 것은 소형가스루프에 연결된 배관 구속조건이 동일한데 반해 시제품의 규모가 커짐에 따른 size effect 로 보인다. 따라서 고온 구조건전성이 악화될 수 있음에 유의하여 열팽창을 완화시킬 수 있는 냉각재 유입/유출 위치에 대한 설계가 필요한 것으로 보인다.

### 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., 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., et al., 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) Kim, Y. W., 2008, "High Temperature and High Pressure Corrosion Resistant Process Heat Exchanger for a Nuclear Hydrogen Production System," R.O.K Patent # 10-0877574.
- (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 the KSME (A)*, Vol. 34, No. 09, 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 the KPVP*, Vol. 7, No. 2, pp. 1~6.
- (12) Song, K.-N., Hong, S.-D. and Park, H.-Y., 2011, "High-Temperature Structural Analysis of a Small-Scale PHE Prototype (IV)-Macroscopic High-Temperature Elastic-Plastic Analysis," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 35, No. 10, pp. 1249~1255.
- (13) Song, K.-N., Hong, S.-D. and Park, H.-Y., 2011, "Designing a PHE and Evaluation of High-Temperature Structural Integrity on Its Small-Scale Prototype," *Proceedings of the KSME 2011 Fall Annual Meeting*.
- (14) 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 KPVP*, Vol. 7, No. 3, pp. 48~53.
- (15) Siemens PLM Software I-DEAS/TMG User Manual Version 6.1, 2009.
- (16) Dassault Systems Simulia ABAQUS User Manual Version 6.9-1, 2009.
- (17) Hastelloy®-X Alloy, Retrieved Jun 26, 2012 from <http://www.haynesintl.com/pdf/h3009.pdf>.