

용접 물성치를 고려한 공정열교환기 시제품의 거시적 고온구조해석[§]

송기남^{*†} · 홍성덕^{*} · 박홍윤^{**}

* 한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부, ** 에이디 솔루션

Macroscopic High-Temperature Structural Analysis of PHE Prototypes Considering Weld Material Properties

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

* Korea Atomic Energy Research Institute,

** AD Solution

(Received April 16, 2012 ; Revised May 26, 2012 ; Accepted May 29, 2012)

Key Words: Process Heat Exchanger(공정열교환기), High-Temperature Structural Analysis(고온 구조해석), Weld Zone(용접부), Heat Affected Zone(HAZ: 열영향부)

초록: 수소를 대량으로 생산하기 위한 원자력수소생산시스템에서 공정열교환기(PHE)는 초고온가스로부터 생성된 초고온 열을 화학반응공정으로 전달하는 핵심기기이다. 한국원자력연구원에 구축되어 있는 소형 질소가스루프에서 Hastelloy-X 로 제작된 소형 및 중형 PHE 시제품들에 대한 성능시험이 수행되고 있다. 그동안 PHE 시제품에 대한 거시적 고온구조해석은 용접 물성치의 부재로 인해 모재의 물성치만을 사용한 해석이 주로 수행되었으나 본 연구에서는 계장형 압입시험법으로부터 얻은 용접부 기계적 물성치를 이용하여 거시적 고온구조해석을 수행하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

Abstract: A process heat exchanger (PHE) in a nuclear hydrogen system is a key component that transfers the large amount of 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 small-scale and a medium-scale PHE prototype made of Hastelloy[®]-X is being conducted on in a small-scale nitrogen gas loop at the Korea Atomic Energy Research Institute. Previous research on the macroscopic high-temperature structural analysis of PHE prototypes had been performed using base material properties owing to a lack of weld material properties. In this study, macroscopic high-temperature structural analyses considering the weld material properties were performed and the results were compared with those of a previous study.

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 VHTR 에서 얻어진 초고온(약 950℃) 헬륨기체의 열 에너지와 열화학적 황산-요오드 공정을 이용하여 물

을 분해함으로써 청정에너지인 수소를 대량으로 생산하는 개념을 고려하고 있는데,⁽⁶⁻⁷⁾ 이 시스템에서는 Fig. 1 에서 보듯이 물을 분해하기 위한 열교환기로서 공정열 교환기(Process Heat Exchanger; PHE)가 반드시 필요하다. 한국원자력연구원(KAERI)에서는 근래에 최대 설계온도 1000℃인 소형 질소가스루프를 구축하였고 Hastelloy-X 로 제작된 소형 및 중형 PHE 시제품에 대한 성능시험을 수행하고 있다.

통상적으로 용접된 구조물에 풀림(annealing)과 같은 열처리를 하지 않으면 용융부 및 열영향부(Heat Affected Zone: HAZ)를 포함한 용접부(Weld zone)에서는 금속 미세조직이 모재의 그것과 다른 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁾ 용접부의 미세조직이 모재의 그것과 다르다면 기계적 물성치들도 다르며 이에

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2012. 4. 5.-6., 영남대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

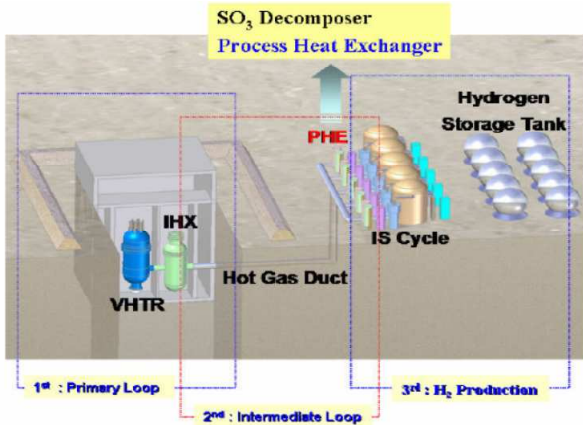


Fig. 1 Nuclear hydrogen system

따라 구조물의 구조적 거동이 다를 수 있다. 그동안 소형 및 중형 PHE 시제품에 대한 일련의 고온구조 특성 해석연구결과에 의하면 용접부에 대한 기계적 물성치의 부재로 인해 용접부 기계적 물성치를 고려하지 않은 거시적 고온구조해석이 수행되었고(9-13) 해석결과에 의하면 최대응력이 소형 PHE 시제품 용접부 주변에서 발생한 것으로 알려졌다.(12,13)

본 연구에서는 계장화 압입시험법(14)으로부터 얻은 Hastelloy-X 판재의 용접부 기계적 물성치(15)를 이용한 소형 및 중형 PHE 시제품의 거시적 고온구조해석 결과와 모재만의 물성치를 이용한 예전결과를(12,13) 비교하고 분석하였다.

2. PHE 시제품의 구조

제작된 PHE 시제품의 내부형상은 Fig. 2 에서 보듯이 1 차 측 초고온 열매체(질소 기체)가 흐르는 유로판의 표면에는 직경 1.0 mm 의 그루브(groove)가 기계가공으로 형성되어 있으며, 2 차 측 저온 냉각재(SO₃ 기체)가 흐르는 유로 채널은 물결 모양의 유로가 굽힘 가공에 의해 형성되어 있다.(16,17)

열전달 용량 약 3kW 급인 소형 PHE 시제품 내부는 1 차 측 유로판 10 개와 2 차 측 유로판 10 개가 교대로 적층되며, 열전달 용량 약 10kW 급인 중형 PHE 시제품의 내부는 1 차 측 유로판 20 개와 2 차 측 유로판 20 개가 교대로 적층된다. 적층된 유로판들의 모서리는 고상접합 방법의 일종인 확산접합(diffusion bonding)방법으로 접합되며 외부는 두께 3.0 mm 의 Hastelloy-X 판으로 감싸여서(모서리는 TiG 용접) 압력경계를 이루고 있다. Figures 3 및 4 는 소형 및 중형 PHE 시제품을 구성하는 부품들의 형상과 전반적인 치수를 나타낸 것이고 Table 1 및 2 는 Hastelloy-X 의 물성치(18)를 나타낸 것이다.

Table 1 Material properties of Hastelloy-X

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	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

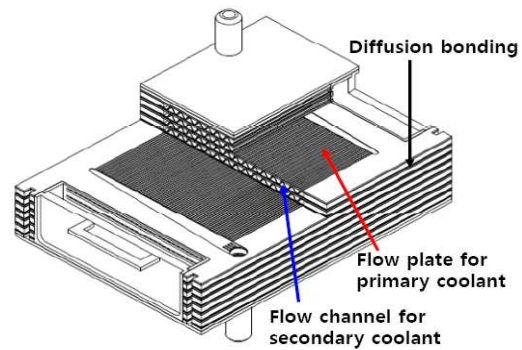


Fig. 2 Inside of KAERI's PHE

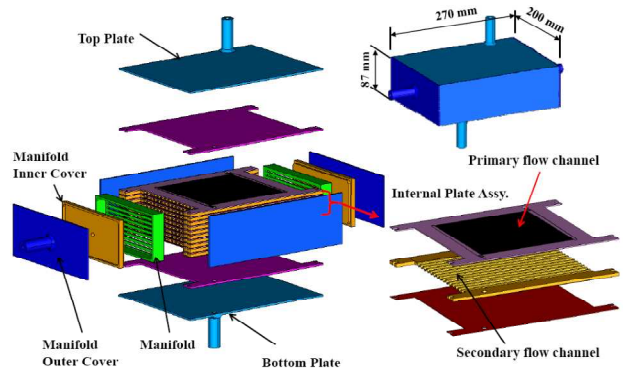


Fig. 3 Parts of a small-scale PHE prototype

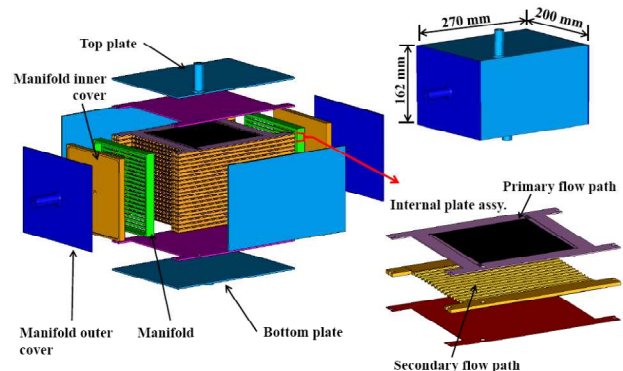


Fig. 4 Parts of a medium-scale PHE prototype

Table 2 Mechanical properties of Hastelloy-X

Temperature (°C)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)
Room	767	379
538	614	245
649	581	244
760	463	237
871	310	174
982	177	91
1093	97	43

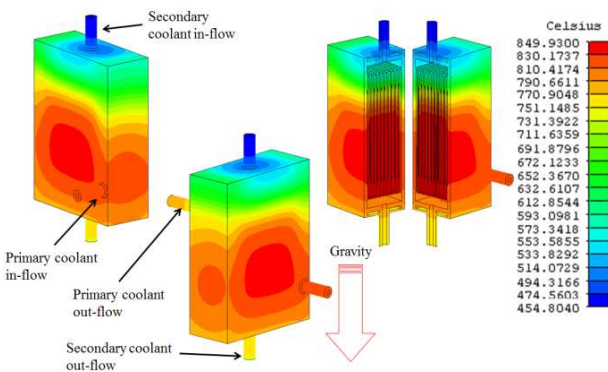


Fig. 5 Temperature contours of a small-scale PHE

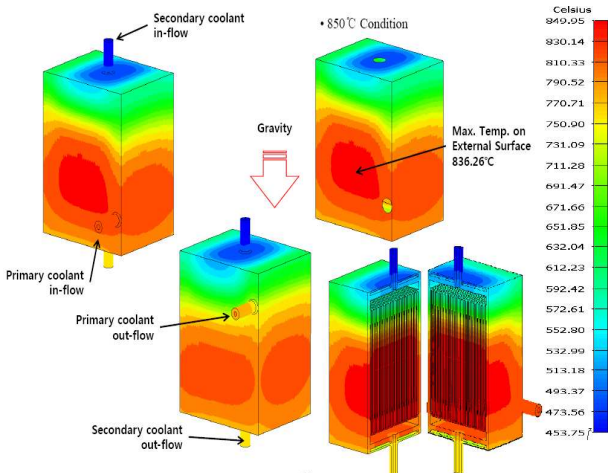


Fig. 6 Temperature contours of a medium-scale PHE

3. 고온구조해석 및 고찰

3.1 유한요소 모델링

열 해석 및 구조해석용 유한요소(Finite Element; FE) 모델링에서 열해석은 온도 경계조건 및 자연 대류에서 중력을 용이하게 적용할 수 있는 열 해석 전문 software 인 I-DEAS/TMG Ver. 6.1⁽¹⁹⁾을 사용하였으며 구조해석은 ABAQUS Ver. 6.9-1⁽²⁰⁾을 사용하였다. 소형 PHE 시제품에서는 1 차 및 2 차

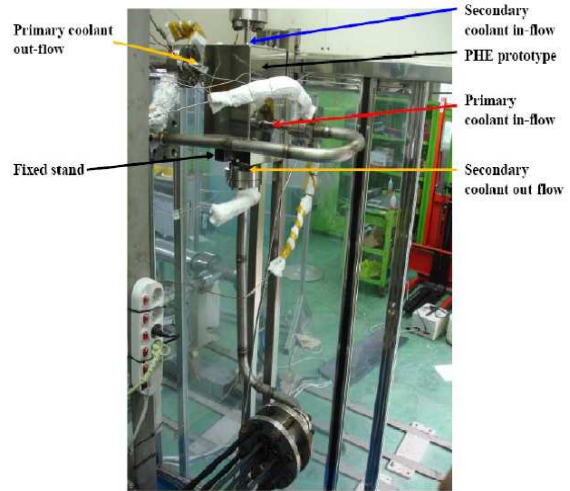


Fig. 7 Set-up of a PHE prototype in the gas loop

측 유동의 열적 접촉조건을 부여하기 위해 FE 모델에서는 546,764 개의 2 차원 선형 사각형 셀 요소와 911,012 개의 3 차원 선형 체적 요소로 구성되어 있으며 총 절점 수는 1,102,822 이다. 한편 중형 PHE 시제품에서는 680, 772 개의 2 차원 선형 사각형 셀 요소, 19,872 개의 2 차원 선형 삼각형 셀 요소, 870,696 개의 3 차원 선형 체적 요소 등으로 구성되어 있으며 총 절점 수는 1,141,423 이다.

3.2 열 해석

소형가스루프에서 PHE 시제품의 정상상태 성능 시험조건(1 차 열매체의 유입 및 유출 온도는 각각 850, 815.56°C이며 2 차 열매체의 유입 및 유출 온도는 각각 500, 849.96°C)에서 소형 및 중형 PHE 시제품 전체 구조에 대한 열 해석 결과는 Figs. 5 및 6 에 나타나 있다. 소형 PHE 시제품 외표면의 최대온도는 837.15°C 정도로 나타났으며⁽¹²⁾ 중형 PHE 시제품 외표면의 최대온도는 836.26°C 정도로 나타났다.⁽¹³⁾ 이 온도분포는 소형 및 중형 PHE 시제품의 고온구조해석에서 입력 자료로 이용된다. Figure 7 은 소형 질소가스루프에 설치된 PHE 시제품과 배관 연결을 나타낸 것으로 열팽창을 수용하기 위해 소형 PHE 시제품은 U-tube 및 엘보우 곡관, 직관(straight tube) 등과 연결되어 있다. 또한 2 차 냉각재 유출관이 부착되어 있는 PHE 시제품 밀면은 고정된 받침대 위에 놓여져 있다.

1 차 측 유입/유출구 및 2 차 측 유입구 파이프 라인과 연결된 배관들의 형상 및 치수를 이용하여 구한 등가 스프링 강성과 받침대 위에 놓여있는 PHE 시제품 하단부의 변위를 구속한 경계조건은 Fig. 8 과 Table 3 에 나타나 있다. 부연하면, 파이프

Table 3 Spring stiffness at each pipeline

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

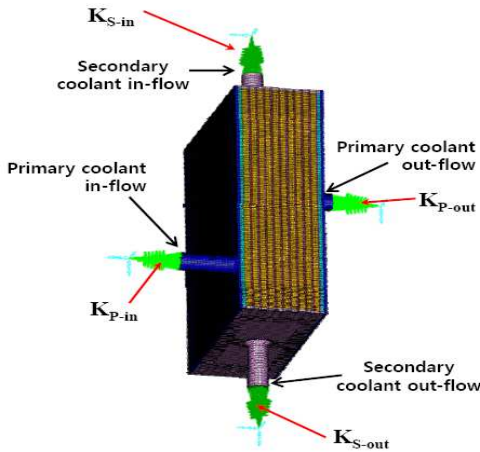


Fig. 8 Displacement constraint conditions

라인 끝단에 구속점을 설정하고 Table 3 에서와 같은 등가 스프링 강성을 파이프라인 길이방향으로만 적용하였다.⁽¹²⁾ 실제 배관에서는 굽어진 배관에 의한 굽힘 변형 및 하중이 PHE 시제품에 작용할 수 있으나 본 해석에서는 배관의 굽힘 변형도 PHE 시제품의 길이방향 열팽창을 수용하는 것으로 가정하고 등가 스프링 강성을 적용하였다.

3.4 모재 물성치 사용한 탄성 고온구조해석

열 해석 결과와 PHE 시제품 내부의 압력 조건(1차 측 3.0 MPa, 2차 측 0.1 MPa)을 고려하여 수행한 탄성 고온구조해석 결과는 Figs. 9 및 10 에 나타나 있다. 소형 PHE 시제품 압력경계에서 최대응력 발생위치는 Fig. 9 에서 보듯이 상부관 모서리 용접된 부위에서 발생하였고 이는 모재의 항복응력(237.9 MPa at 746°C)⁽¹⁸⁾보다 약 14.5% 큰 값이다. 한편 중형 PHE 시제품 압력경계에서 응력분포와 최대응력 발생위치는 Fig. 10 에서 보듯이 상부관 모서리 용접된 부위에서 발생하였고 이는 모재의 항복응력(238.0 MPa at 744.46°C)보다 약 39.2% 큰 값이다.

중형 PHE 시제품의 경우에 최대응력이 소형 PHE 시제품보다 커지는 현상은 시제품의 규모가 2 배정도 커짐에 따라 유발된 큰 열팽창을 동일한 경계조건으로(Fig. 8 및 Table 1 참조) 구속함에 따라 기인된 것으로 판단된다.

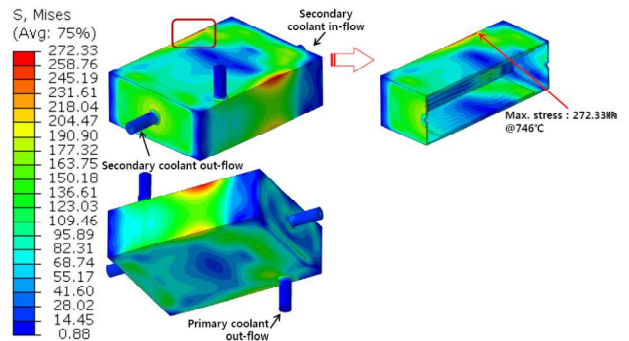


Fig. 9 Stress contours of a small-scale PHE prototype in an elastic analysis

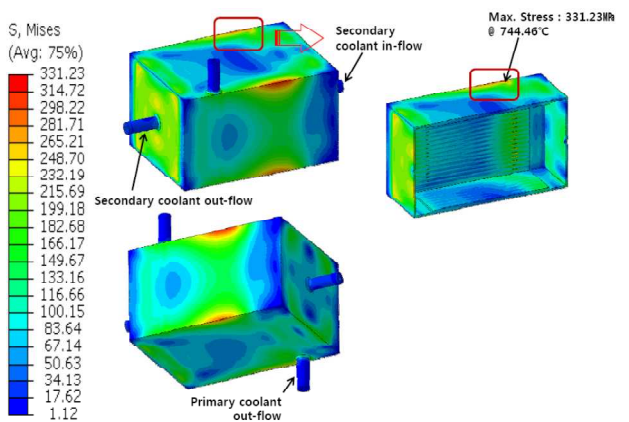


Fig. 10 Stress contours of a medium-scale PHE prototype in an elastic analysis

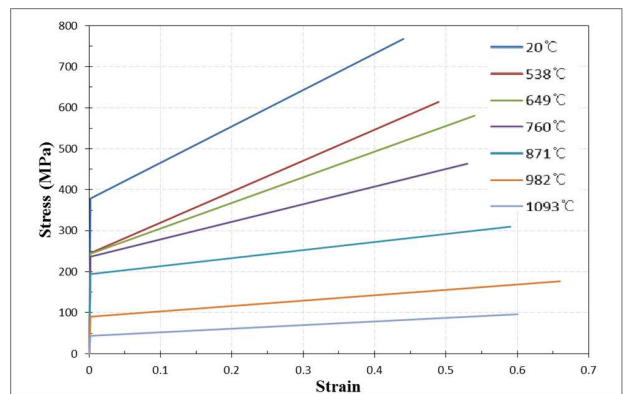


Fig. 11 Bilinear stress-strain curve for elastic-plastic analysis

3.5 모재 물성치 사용한 탄소성 고온구조해석

탄성 고온구조해석 결과 최대응력이 항복응력을 초과함에 따라 좀더 상세한 정보를 얻기 위해 고온 탄소성 해석을 수행하였다. Figure 11 은 해석에 사용한 탄소성 물성치⁽¹⁸⁾를 나타낸 것이고 해석 결과는 Figs. 12 및 13 에 나타나 있다. 소형 PHE 시제품의 경우 최대 응력은 Fig. 12 에서 보듯이 242.60 MPa 이며 이는 모재의 항복응력(237.6 MPa

Table 4 Normalized mechanical properties in weld zone

	Yield stress	Tensile strength
Base material	1.000	1.000
Heat affected zone	0.962	0.998
Weld zone	1.094	1.120

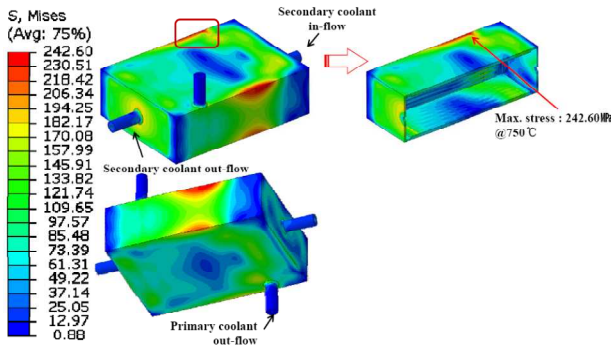


Fig. 12 Stress contours of a small-scale PHE prototype in an elastic-plastic analysis using base material properties

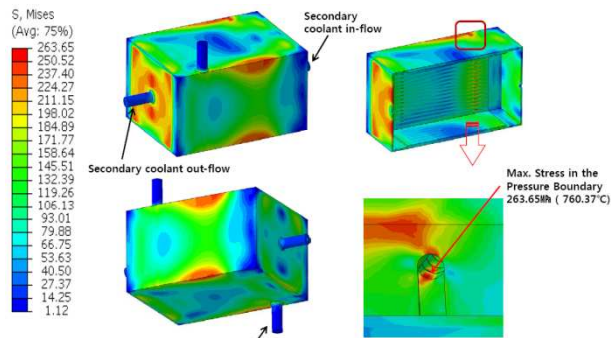


Fig. 13 Stress contours of a medium-scale PHE prototype in an elastic-plastic analysis using base material properties

at 750°C)보다 약간(약 2.1%) 상회하고 있다. 한편 중형 PHE 시제품의 경우 Fig. 13 에서 보듯이 최대 응력은 263.65 MPa 이며 이는 모재의 항복응력 (236.9 MPa at 760.37°C)을 11.3% 상회하고 있다.

3.6 용접부를 고려한 탄소성 고온구조해석

PHE 시제품의 모서리를 따라 용접부를 모델링한 것이 Figs. 14 및 15 에 나타나 있다. Table 4 는 용접부 기계적 물성치를 모재의 기계적 물성치로 정규화한 것으로,⁽¹⁵⁾ 용접부 기계적 물성치를 고려한 PHE 시제품의 탄소성 고온구조 해석에서는 모재의 기계적 물성치와 Table 4 의 값을 결합한 기계적 물성치를 용접부에 적용하였다.

미세조직이 변해도 물리적 물성치인 탄성계수는 변하지 않으므로 용접 물성치를 고려한 소형 및 중형 PHE 시제품의 탄성 고온구조 해석 결과는

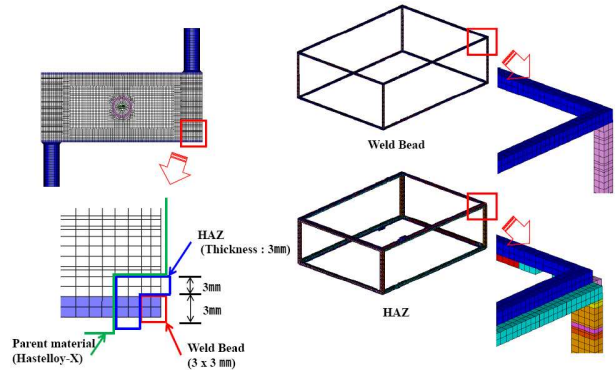


Fig. 14 FE model including weld zone of a small-scale PHE prototype

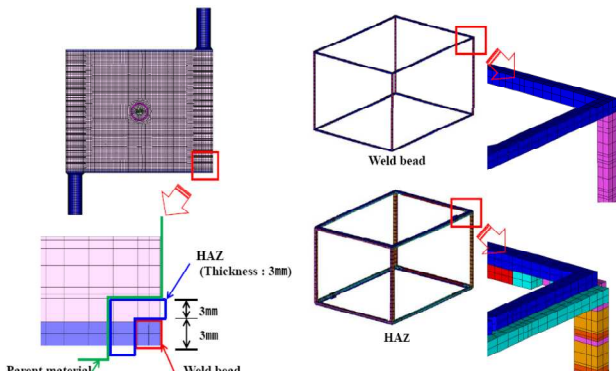


Fig. 15 FE model including weld zone of a medium-scale PHE prototype

Figs. 9 및 10 과 동일하다. 그러나 해석결과 평가시에 Table 4 의 용접부의 기계적 물성치를 사용할 경우에는 용융부에서 항복응력 및 인장강도가 모재의 그것과 다르므로 3.4 절과는 다르게 평가될 수 있다. 즉, 소형 PHE 시제품의 경우 상부판의 모서리 용융부에서 발생한 최대응력(272.33 MPa)은 용융부의 항복응력(262.9 MPa at 746°C)보다 단지 3.6% 큰 값이며 중형 PHE 시제품의 경우에도 상부판의 모서리 용융부에서 발생한 최대응력 (331.23 MPa)은 용융부의 항복응력(263.0 MPa at 744.46°C)보다 25.9% 큰 값이다.

용접부 물성치를 사용한 소형 및 중형 PHE 시제품의 탄소성 고온구조해석 결과가 Figs. 16 및 17 에 나타나 있다. 소형 PHE 시제품의 경우 최대 응력은 Fig. 16 에서 보듯이 266.19 MPa 이며 이는 용융부의 항복응력(263.2 MPa at 740.7°C)보다 약간(약 1.14%) 상회하고 있다. 한편 중형 PHE 시제품의 경우 최대 응력은 Fig. 17 에서 보듯이 267.60 MPa 이며 이는 용융부의 항복응력(263.1 MPa at 742.23°C)보다 약간(약 1.7%) 상회하고 있다.

이상의 탄성 및 탄소성 해석결과를 분석한 결과, 한가지 흥미있는 관찰사항을 볼 수 있다. 즉, 용접

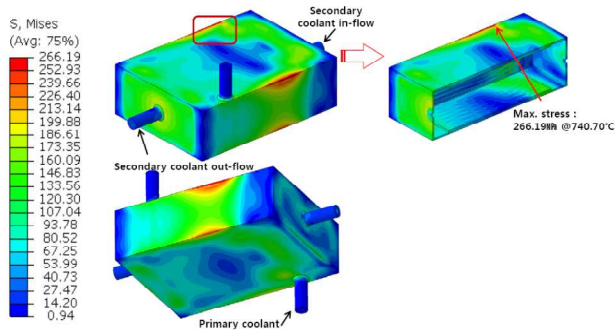


Fig. 16 Stress contours of a small-scale PHE prototype in an elastic-plastic analysis considering weld material properties

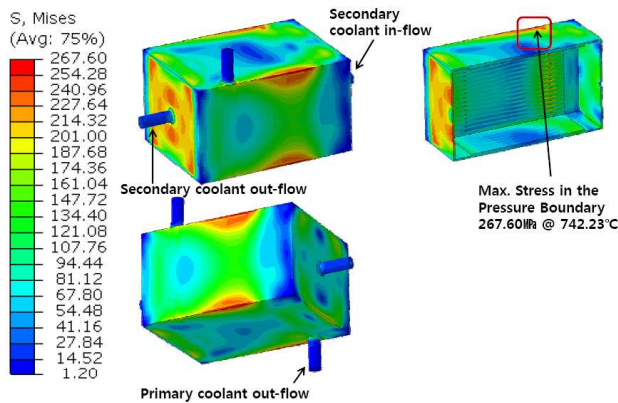


Fig. 17 Stress contours of a medium-scale PHE prototype in an elastic-plastic analysis considering weld material properties

부 기계적 물성치를 고려할 경우에는 용접부에서 항복응력 및 인장강도가 모재의 그것과 다르기 때문에 모재의 물성치만을 사용한 해석결과에 비해 항복응력을 벗어나는 정도가 다를 수 있다. 따라서 구조건전성의 평가나 안전계수를 설정할 때 상이한 결과가 나올 수 있기 때문에 좀더 신뢰성있는 구조해석을 위해서는 용접부 기계적 물성치를 고려한 구조 해석이 필요한 것으로 사료된다. 한편 최대응력이 발생한 부위는 실제 시제품에서 용접에 의해 어느 정도 곡면화되어 있음에 반해 해석 모델에서는 이를 고려하지 않았기 때문에 곡면 효과를 고려하면 모서리에서의 발생한 첨두 응력의 크기는 어느 정도 감소할 것으로 보인다. 따라서 소형 및 중형 PHE 시제품들은 소형가스루프 정상운전 시험조건에서 구조건전성은 유지될 수 있을 것으로 보이나 안전을 위해 성능시험시에 세심한 주의가 요구된다.

용접부 물성치를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우에 있어서 탄소성 해석결과를 살펴보면 소형 PHE 시제품의 경우(Figs. 12 및 16) 및 중형 PHE

시제품의 경우(Figs. 13 및 17) 모두에서 최대응력이 발생한 부위의 위치가 약간 이동되었는데(온도가 상이함으로부터 추정할 때) 이는 재료의 용접부에서 기계적 물성치가 모재의 그것과 상이함으로 인해 응력 재분배가 발생한 것으로 추정된다.

4. 결 언

용접부 물성치를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 소형 및 중형 PHE 시제품의 거시적 고온 구조해석을 수행하여 다음과 같은 관찰사항과 결론을 얻었다.

- (1) 최대응력 발생 위치는 모두 상부판 모서리 용융부 주변에서 발생하였다.
- (2) 탄성 및 탄소성 고온구조해석 결과에 의하면 모재의 기계적 물성치만으로 평가할 경우에 비해 용접부 기계적 물성치를 고려하여 평가할 경우의 최대 응력이 항복 응력을 초과하는 정도가 다르게 나타나고 있다. 즉, 용접부 물성치를 고려할 경우 용접부에서 항복 응력/인장강도가 모재의 그것에 비해 다르기 때문에 항복응력을 벗어나는 정도가 다를 수 있다.

(3) 용접된 PHE 시제품의 구조강도 평가시에 응력 평가기준이 바뀔 수 있으므로 좀더 신뢰성있는 평가를 위해서는 용접부 기계적 물성치를 고려한 해석 및 평가가 필요하다.

(4) 시제품의 모서리는 실제로 용접에 의해 곡면화되어 있어서 모서리 부위에서 발생한 국부 첨두 응력은 상당부분 감소할 것이다. 이를 감안하면 소형가스루프 정상운전조건에서 단시간 성능시험이 예정되어 있는 PHE 시제품의 구조적 건전성은 유지될 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. *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 Sulfur-iodine Nuclear Hydrogen Production Plant," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41, No. 6, pp. 831~840.
- (8) Linnert, G. E., 1965, "Welding Metallurgy," Vol. 1, American Welding Society, NY.
- (9) Song, K. N. *et al.*, 2011, "High-Temperature Structural Analysis Model on the Process Heat Exchanger for Helium Gas Loop (III)," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 35, No. 2, pp. 191~200.
- (10) Song, K. N. *et al.*, 2011, "High-Temperature Structural Analysis Model on the Process Heat Exchanger for Helium Gas Loop(IV)," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 35, No. 10, pp. 1249~1255.
- (11) Song, K. N. *et al.*, 2011, "Elastic/Plastic High-Temperature Structural Analysis on the Small-Scale PHE Prototype," *Trans. of KPVP*, Vol. 7, No. 2, pp. 1~6.
- (12) Song, K. N. *et al.*, 2011, "Elastic High-Temperature Structural Analysis on the Small-Scale PHE Prototype Considering the Pipeline Stiffness," *Trans. of KPVP*, Vol. 7, No. 3, pp. 48~53.
- (13) Song, K. N. *et al.*, 2012, "High-Temperature Structural Analysis on a Medium-Scale PHE Prototype," *Proc. of KSME Material and Fracture Division*.
- (14) ISO TR29381, 2008, "Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties,".
- (15) Song, K. N. and Ro D. S., 2011, "Measurement of Mechanical Properties in Weld Zone of Nuclear Material by Instrumented Indentation Technique," Proc. of the KWS 2011 Fall Annual Meeting.
- (16) Kim, Y. W. *et al.*, 2009, "Development of Essential Technology," KAERR/RR-2992/2008.
- (17) 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.
- (18) Hastelloy-X Alloy website, www.haynesintl.com
- (19) I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
- (20) ABAQUS ver.6.9-1, 2009.