

소형 공정열교환기 시제품 고온구조해석[§] - 용접부 물성치를 고려한 해석 -

송기남^{*†} · 홍성덕^{*} · 박홍윤^{**}

* 한국원자력연구원 수소생산원자기술개발부, ** 에이디 솔루션

High-Temperature Structural Analysis of a Small-Scale PHE Prototype - Analysis Considering Material Properties in Weld Zone -

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

* Korea Atomic Energy Research Institute,
** AD Solution

(Received March 2, 2012 ; Revised June 28, 2012 ; Accepted June 29, 2012)

Key Words: Process Heat Exchanger(공정열교환기), High-temperature Structural Analysis(고온 구조해석), Fusion Zone(용융부), Heat Affected Zone(HAZ: 열영향부)

초록: 수소를 대량으로 생산하기 위한 원자력수소생산시스템에서 공정열교환기는 초고온가스로부터 생성된 초고온 열을 화학반응공정으로 전달하는 핵심기기이다. 한국원자력연구원에 구축되어 있는 소형가스루프에서 Hastelloy-X 로 제작된 소형 공정열교환기(PHE) 시제품에 대한 성능시험이 수행되고 있다. 그동안 소형 PHE 시제품에 대한 고온구조해석은 용접부의 기계적 물성변화를 고려하지 않은 해석이 주로 수행되었다. 본 연구에서는 계장화 압입시험으로부터 얻은 용접부 기계적 물성치를 이용하여 고온구조해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

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 small-scale PHE prototype made of Hastelloy-X is underway in a small-scale gas loop at the Korea Atomic Energy Research Institute. Previous research on the high-temperature structural analysis of the small-scale PHE prototype had been performed using base material properties. In this study, a high-temperature structural analysis considering the mechanical properties in the weld zone was performed, and the obtained results were compared with those of the previous research.

1. 서 론

초고온가스(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 열에너지와 열화학적 황산-요오드 공정을 이용

하여 물을 분해함으로써 청정에너지인 수소를 대량으로 생산하는 개념을 고려하고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이 시스템에서는 Fig. 1 에서 보듯이 초고온가스의 이동 통로인 고온가스덕트(Hot Gas Duct; HGD),^(8,9) 초고온열을 전달하는 중간 열교환기(Intermediate Heat Exchanger; IHX) 및 물을 분해하기 위한 열교환기로서 공정열 교환기(Process Heat Exchanger; PHE) 등의 기기로 구성된 중간루프가 반드시 필요하다.

한국원자력연구원(KAERI)에서는 근래에 최대 설계온도 1000℃인 소형가스루프를 구축하였고 Hastelloy-X 로 제작된 PHE 소형 시제품과 SUS 및 Inconel800HT 로 제작된 소형 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) 시제품 그리고 HGD 시제품 등과

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

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

같은 원자력수소생산 시스템의 핵심기기에 대한 성능시험을 수행하여 관련 시험기술을 축적하려 하고 있다.

통상적으로 용접된 구조물에 풀림(annealing)과 같은 열처리를 하지 않으면 용융부(Fusion zone) 및 열영향부(Heat Affected Zone: HAZ)에서는 금속 미세조직이 Fig. 2 에서 보듯이 모재의 그것과 다른 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 모재의 미세 조직과 다르게 되면 기계적 물성치들도 다르게 되며 이에 따라 구조물의 구조적 거동이 다르며 또한 구조건전성 평가의 척도도 다르게 된다. 그동안 소형 PHE 시제품에 대한 일련의 고온구조특성 해석연구결과에 의하면 용접부에 대한 기계적 물성치의 부재로 인해 용접부 기계적 물성치를 고려하지 않은 고온구조해석이 수행되었고⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 최대응력이 소형 PHE 시제품 용접부 주변에서 발생한 것으로 알려졌다.⁽¹⁴⁾ 그런데 근래에 계장화 압입시험법⁽¹⁵⁾에 의해 Hastelloy-X 판재에서 용융부, 열영향부 및 모재 부위에 대한 기계적 물성치를 얻게 되었다.⁽¹⁶⁾

본 연구에서는 계장화 압입시험법에 의해 얻은 Hastelloy-X 판재의 용접부 기계적 물성치를 이용한 소형 PHE 시제품의 고온구조해석을 수행하여 얻은 결과와 모재만의 물성치로 얻은 결과를 비교하여 용접부의 기계적 물성치 변화가 소형 PHE 시제품의 고온구조해석에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 소형 PHE 시제품의 구조 및 고온구조 해석

2.1 소형 PHE 시제품의 구조

제작된 소형 PHE 시제품에서 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(Fig. 3 참조).^(17,18) 이 소형 PHE 시제품의 내부는 1 차 측 초고온 열매체용 유로판 10 개와 2 차 측 저온 냉각재용 유로판 10 개가 교대로 적층되고 적층된 유로판들의 모서리는 확산접합(diffusion bonding)되며 적층 및 확산접합된 유로판 외부는 두께 3.0 mm 의 Hastelloy-X 판으로 감싸여서(모서리는 TiG 용접) 압력경계를 이루고 있다.

논문의 이해를 돕기 위해 Fig. 4 은 소형 PHE 시제품의 전반적인 치수와 소형 PHE 시제품을 구성하는 각 부품들의 형상과 조립내역 등을 3 차원

CAD 로 나타낸 것이며 Fig. 5 는 소형 PHE 시제품의 3 차원 CAD 형상에 근거하여 구성한 3 차원 유한요소(Finite Element: FE) 모델과 실제 시제품 사진을 나타낸 것이다.

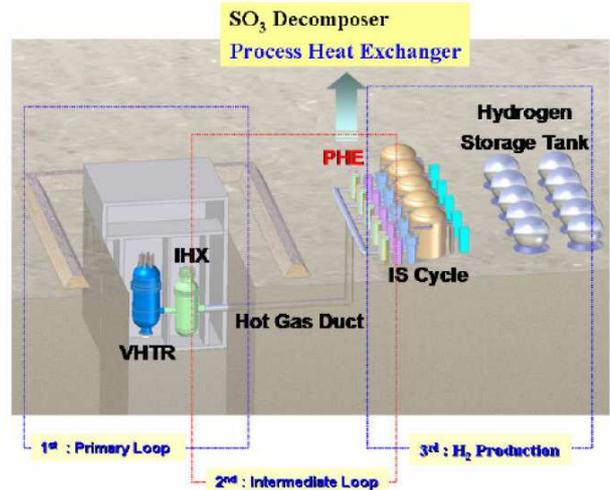


Fig. 1 Nuclear hydrogen system

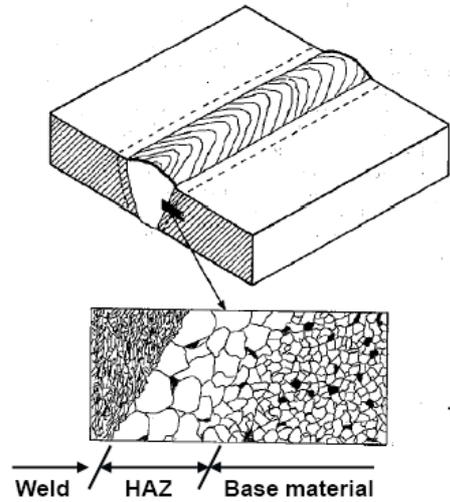


Fig. 2 Microstructure near the weld

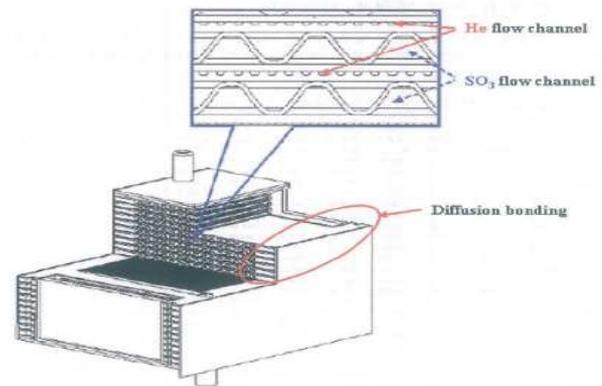


Fig. 3 Inside of KAERI's PHE

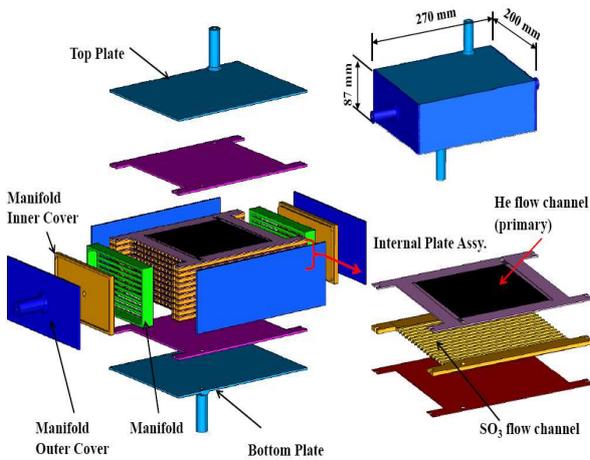


Fig. 4 Parts of small-scale PHE prototype

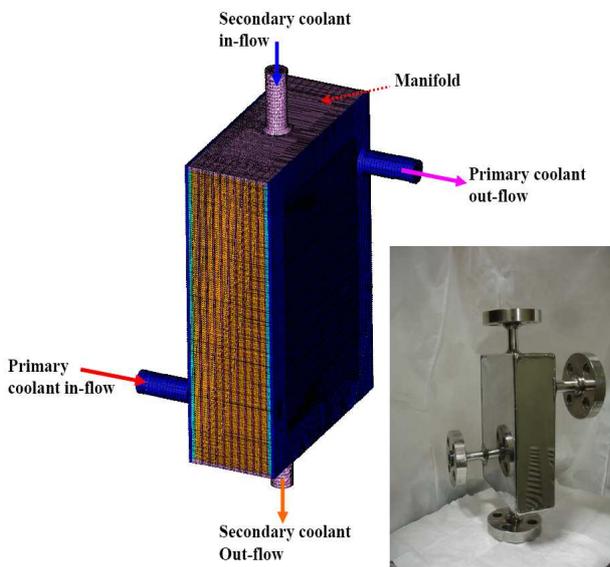


Fig. 5 Small-Scale PHE prototype and its 3-D FE model

2.2 유한요소(FE) 모델링

열해석 및 구조해석용 FE 모델링은 다음과 같다. FE 모델링 및 열 해석은 I-DEAS/TMG Ver. 6.1 을 사용하였으며 구조해석은 ABAQUS Ver. 6.9-1 을 사용하였다. 1 차 및 2 차 측 유동의 열적 접촉조건⁽¹¹⁾과 시제품 외부로의 열전달을 부여하기 위해 FE 모델에서는 546,764 개의 2 차원 선형 사각형 쉘(null shell) 요소가 사용되었다. 한편 고온 구조해석을 위한 FE 모델은 911,012 개의 3 차원 선형 체적 요소로 구성되어 있으며 총 절점 수는 1,102,822 이다. 3 차원 선형 체적요소로는 육면체 요소 830,304 개가 사용되었고, 해석의 정확도는 떨어지나 복잡한 형상을 용이하게 구현하기 위해 부분적으로 오면체 요소 80,348 개 및 사면체 요소 360 개가 사용되었다.

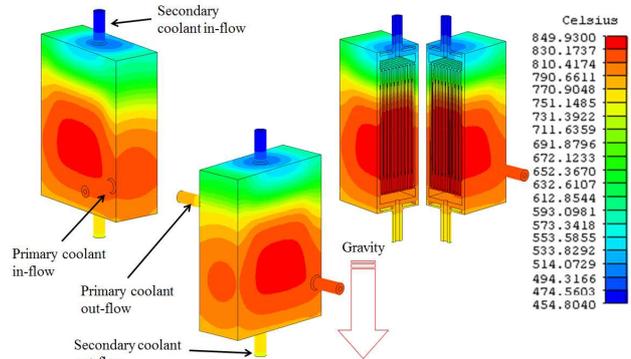


Fig. 6 Temperature distribution of PHE outside

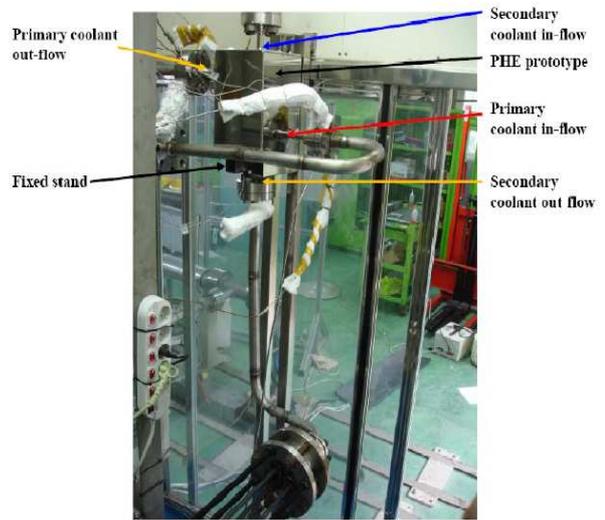


Fig. 7 Set-up of PHE prototype in the gas loop

2.3 열 해석

소형가스루프에서 소형 PHE 시제품의 성능시험 조건(1 차 열매체의 유입 및 유출 온도는 850℃, 815.56℃이며 2 차 열매체의 유입 및 유출 온도는 500℃, 849.96℃)에서 소형 PHE 시제품 전체 구조에 대한 열 해석 결과는 Fig. 6 에 나타나 있다. 소형 PHE 시제품 외표면의 최대온도는 837.15℃ 정도로 나타났으며 Fig. 6 의 온도분포는 소형 PHE 시제품의 고온구조해석에서 입력 자료로 이용된다.

2.4 구조해석용 경계조건

Fig. 7 은 소형가스루프에 설치된 소형 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 저온 냉각재 유출관이 부착되어 있는 소형 PHE 시제품 밑면은 고정된 받침대(fixed stand) 위에 놓여져 있다.

Table 1 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

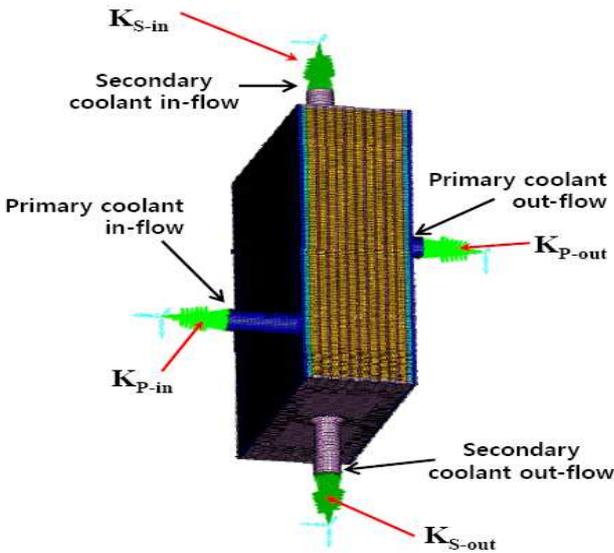


Fig. 8 Displacement constraint conditions

1 차 측 열매체 유입/유출구 및 2 차 측 저온 냉각재 유입구 파이프 라인과 연결된 배관들의 형상 및 치수를 이용하여 구한 등가 스프링 강성과 받침대 위에 놓여 있는 소형 PHE 시제품 하단부의 변위를 구속한 경계조건은 Fig. 8 에 나타나 있다. 즉, 유입(유출)구 파이프라인 끝단에 구속점을 설정하고 Table 1 에서와 같은 등가 스프링 강성을 파이프라인 길이방향으로만 적용하였다. 고정된 받침대위에 놓여있는 소형 PHE 시제품 하단부는 접촉요소를 이용한 접촉조건을 적용해야 하나 현재 구성된 모델에서 접촉조건을 적용할 경우 해석 모델이 work-station 에서 작동되지 않아서 부득이 시제품 하단부의 2 차 유체 유출구 파이프라인에 접촉조건과 유사할 것으로 판단되는 구속조건을 적용하였다. 이 경계/구속조건은 이전 연구결과에⁽¹⁴⁾ 상세히 기술되어 있다.

3. 고온구조해석 결과 및 고찰

3.1 모재 물성치만을 사용한 탄성 고온구조해석
Fig. 6 의 열 해석 결과와 소형 PHE 시제품 내부의 압력 조건(1 차 측 3.0 MPa, 2 차 측 0.1 MPa)을

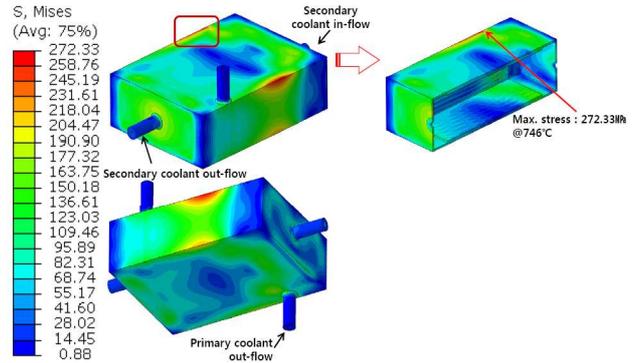


Fig. 9 Stress distribution in elastic analysis of small-scale PHE prototype

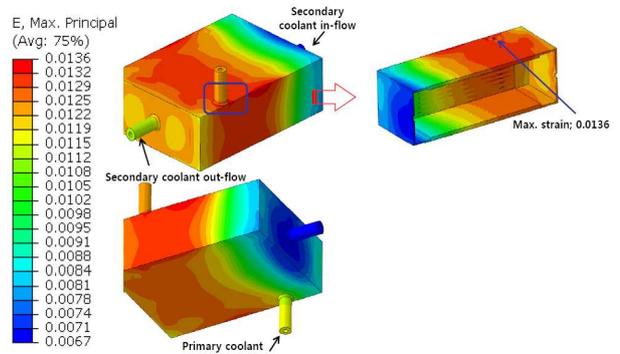


Fig. 10 Strain distribution in elastic analysis of small-scale PHE prototype

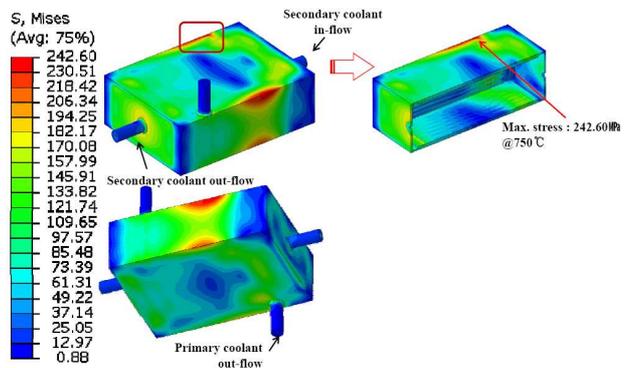


Fig. 11 Stress distribution in elastic-plastic analysis of small-scale PHE prototype with base material properties

고려하여 수행한 탄성 고온구조해석 결과는 Figs. 9, 및 10 에 나타나 있다. Fig. 9 는 소형 PHE 시제품 압력경계에서 응력분포와 최대응력이 발생 한 위치 등을 나타낸 것인데 Fig. 9 에서 보면 상부판의 모서리 부위에서 최대 응력(272.33 MPa)이 발생하였고 이는 모재의 항복응력(239.7 MPa at 746°C)⁽¹⁹⁾보다 약 13.6% 큰 값이다. 최대 응력이 발생한 부위는 유로관들이 적층되고 확산접합된 부위이어서 실제 시제품 제조시에는 구조적으로

취약한 부위 주변이 될 수 있다. Fig. 10 은 변형률 분포를 나타낸 것인데 Fig. 10 에서 보면 소형 PHE 시제품 압력경계에서 최대 변형률은 1 차 유체 유입구와 시제품의 압력경계가 맞닿는 부위에서 발생하였고 그 값은 0.0136 이다. Fig. 11 은 소형 PHE 시제품의 고온 구조건전성을 좀더 상세히 평가하기 위해 고온 탄소성 해석을 수행하여 얻은 응력 분포이다. 최대 응력은 242.60 MPa 이며 이는 모재의 항복응력(237.63 MPa at 750°C)⁽¹⁹⁾보다 약간(약 2.09%) 상회하고 있다. 한편 Figs. 9 와 11 에서 살펴보면 최대응력이 발생한 부위의 위치가 약간 이동되었는데(온도가 상이함으로부터 추정할 때) 이는 탄소성 해석에서의 응력 재분배로 인한 것으로 추정된다.

3.2 용접부 모델링 및 기계적 물성치 측정

Fig. 12 는 소형 PHE 시제품의 FE 모델에서 용융부와 HAZ 를 나타낸 것이다. Fig. 13 은 용접된 Hastelloy-X 판재 시편에서 계장형 압입 시험법으로 기계적 물성치를 측정할 위치를 나타낸 것이며 Fig. 14 는 측정위치(영역)에 따른 기계적 물성치(항복응력 및 인장강도)의 변화를 나타낸 것이다. 측정된 기계적 물성치는 통계적인 처리를 하여 영역별 95% 하한 신뢰도 평균값을 구하였고 용융부 및 HAZ 영역의 값을 모재 영역의 값으로 Table 2 와 같이 정규화하였다.

3.3 용접부 물성치를 사용한 고온구조해석

Table 2 의 값들은 상온에서의 기계적 물성치에 근거한 것이므로 고온구조해석에 바로 적용하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 이와 같이 제한된 정보를 고온구조해석에 이용하기 위해 참고문헌 19 에 나와 있는 Hastelloy-X 모재의 고온 물성치 자료와 Table 2 의 자료를 결합하여 용접부의 기계적 물성치 변화를 감안한 고온구조 해석을 수행하고자 한다. 즉 고온구조해석에서 모재의 고온 물성치 자료에 Table 2 의 값을 곱하여 추정된 응력-변형률 선도를 용접부 영역의 적용하였다.

탄성계수가 변하지 않으므로 탄성 고온구조 해석에서의 해석 결과는 Figs. 9 및 10 과 동일하다. 그러나 구조건전성 평가시에 Table 2 의 용접부의 기계적 물성치를 사용할 경우에는 용융부에서 항복응력 및 인장강도가 모재의 그것과 다르므로 3.1 절과 다르게 평가할 수 있다. 즉, 상부판의 모서리 부위에서 발생한 최대응력(272.33 MPa)은 fusion zone 에서 용융부 항복 응력(269.5 MPa at 746°C)보다 단지 1.05% 큰 값이다.

Fig. 15 는 소형 PHE 시제품의 고온 구조건전성을 좀더 상세히 평가하기 위해 고온 탄소성 해석을 수행하여 얻은 응력분포이다. 최대 응력은

Table 2 Normalized mechanical properties in weld zone

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

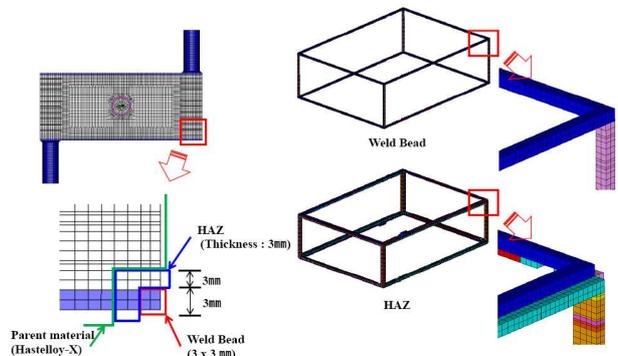


Fig. 12 FE model including weld zone

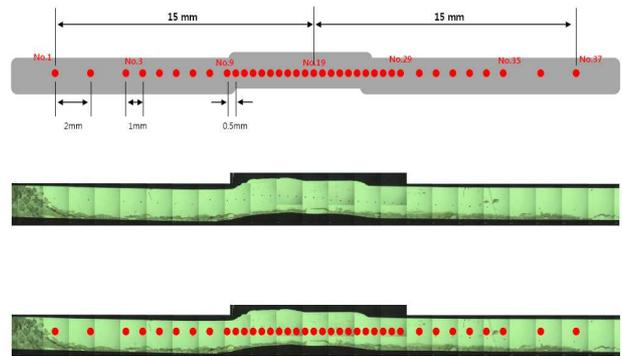


Fig. 13 Indented position in Hastelloy-X specimen

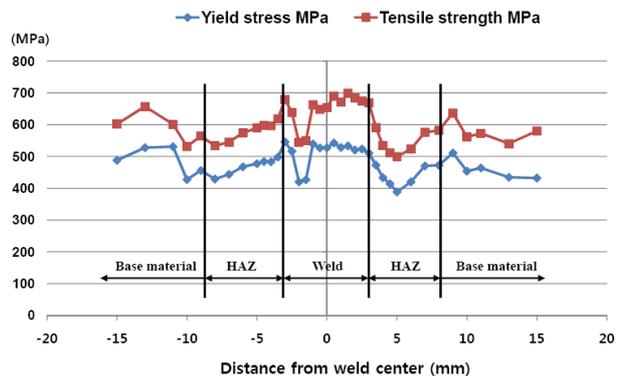


Fig. 14 Variations of mechanical properties

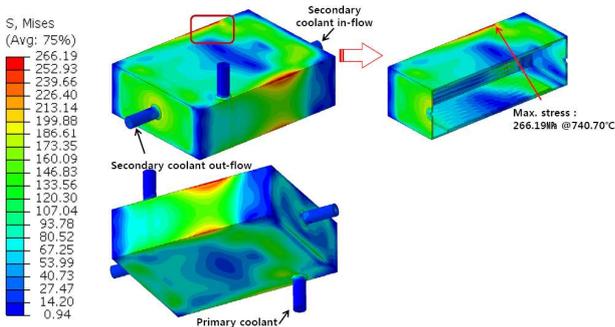


Fig. 15 Stress distribution in elastic-plastic analysis of small-scale PHE prototype considering weld material properties

266.19MPa 이며 이는 용융부의 항복응력(263.23 MPa at 740.7°C)⁽¹⁹⁾보다 약간(약 1.12%) 상회하고 있다. 한편 Figs. 11 과 15 에서 살펴보면 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. 결론

용접부 물성치를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 소형 PHE 시제품의 고온구조 해석 평가를 수행하여 다음과 같은 관찰사항과 결론을 얻었다.

(1) 최대응력은 시제품 상부판과 측면판이 맞닿는 모서리 용융부 주변에서 발생하였다.

(2) 탄성 해석결과에 의하면 모재의 기계적 물성치만으로 평가할 경우 최대 응력은 항복응력을 약 13.6% 초과하고 있는 반면 용접부의 기계적 물성치로 평가할 경우 항복 응력을 단지 1.05% 만 초과하고 있다. 한편 탄소성 해석결과에서는 모재의 기계적 물성치만으로 평가할 경우 최대 응력은 항복응력을 약 2.09% 초과하고 있는 반면 용접부의 기계적 물성치로 평가할 경우에는 최대 응력이 항복응력을 약 1.12% 초과하고 있다.

(3) 용접부 물성치를 고려할 경우 용접부에서 항복 응력/인장강도가 모재의 그것에 비해 다르기 때문에 항복응력을 벗어나는 정도가 다를 수 있다. 즉, 안전계수를 설정할 때 상이한 결과가 나올 수 있다.

(4) 용접에 의해 기계적 물성치가 변하는 경우 구조물의 구조건전성을 좀더 신뢰성있게 평가하기 위해서는 용접부 기계적 물성치를 고려한 평가가 필요하다.

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., 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) Song, K. N., Kim, Y. W. and Park, S. C., 2010, "Investigation of FIV Characteristics of a Coaxial Double-Tube-Type Cross Vessel for a VHTR," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 47, No. 6, pp. 542~549.
- (9) Lee, H. Y., Kim, Y. W. and Song, K. N., 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) Linnert, G. E., 1965, "Welding Metallurgy," Vol. 1, American Welding Society, NY.
- (11) Song, K. N., Lee, H. Y., Kim, C. S., Hong, S. D. and Park, H. W., 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.
- (12) Song, K. N., Hong, S. D. and Park, H. W., 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.
- (13) 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,” *Trans. of KPVP*, Vol. 7, No. 2, pp. 1~6.
- (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,” *Trans. of KPVP*, Vol. 7, No. 3, pp. 48~53.
- (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) ISO TR29381, 2008, “Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties.”
- (17) Kim, Y. W., *et al.*, 2009, “Development of Essential Technology,” KAERR/RR-2992/2008.
- (18) 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.
- (19) Hastelloy®-X alloy, Retrieved June 26, 2012, from <http://www.haynesintl.com/pdf/h3009.pdf>.