

소형 PCHE 에 대한 거시적 고온 구조 해석 모델링 (I)

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

* 한국원자력연구원, ** AD Solution

Macroscopic High-Temperature Structural Analysis Model for a Small-Scale PCHE Prototype (I)

Kee Nam Song^{*†}, Heong Yeon Lee^{*}, Chan Soo Kim^{*}, Sung Duk Hong^{*} and Hong Yoon Park^{**}

* Korea Atomic Energy Research Institute,
** AD Solution

(Received March 15, 2011 ; Revised August 9, 2011 ; Accepted August 10, 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: 초고온가스로로부터 생성된 950°C 정도의 초고온 열을 이용하여 수소를 경제적이며 또한 대량으로 생산 하려는 원자력수소생산시스템에서 중간열교환기는 원자로에서 생산된 초고온 열을 수소생산 공장으로 전달하는 핵심 기기중의 하나이다. 한국원자력연구원에서는 초고온가스로에 사용될 핵심 기기에 대한 성능시험을 위해 소형가스루프를 구축하였고 중간열교환기의 유력한 형태로 고려되고 있는 인쇄기판형 열교환기의 소형 시제품을 제작하였다. 본 연구는 인쇄기판형 열교환기 소형 시제품을 소형가스루프에서 시험하기 전에 루프 시험조건하에서 인쇄기판형 열교환기 소형 시제품의 고온 구조건전성을 미리 평가하기 위한 작업의 일환으로 수행한 결과, 즉 고온 구조해석 모델링, 거시적 열 해석 및 구조 해석 결과 등을 정리한 것이다. 해석 결과는 인쇄기판형 열교환기 소형 시제품 성능시험결과와 비교하고 향후 제작될 중형 시제품 설계/제작에 반영할 것이다.

Abstract: The IHX (intermediate heat exchanger) is a key component of nuclear hydrogen systems for the production of massive amounts hydrogen. The IHX transfers the 950°C heat generated by the VHTR (very high temperature reactor) to a hydrogen production plant. The Korea Atomic Energy Research Institute established a small-scale gas loop to test the performance of key VHTR components and manufactured a small-scale PCHE (printed circuit heat exchanger) prototype, which is being considered as a candidate for the IHX, for testing in the small-scale gas loop. In this study, as a part of the high-temperature structural integrity evaluation of the small-scale PCHE prototype, we carried out high-temperature structural analysis modeling and macroscopic thermal and structural analysis for the small-scale PCHE prototype under the small-scale gas loop test conditions. This analysis serves as a precedent study to scheduled PCHE 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 and then used to design the medium-scale PCHE prototype.

1. 서 론

초고온가스로(Very High Temperature Reactor; VHTR)에서 생산된 초고온 열을 이용하여 청정 에너지 원(source)인 수소를 대량 및 경제적으로 생산하려는 연구가 우리 나라를 비롯하여 세계 여

러 나라에서 수행되고 있다.^(1~5) 한국원자력 연구원(KAERI)에서 연구하고 있는 원자력수소 생산시스템에서는 VHTR 에서 얻어진 초고온(약 950°C)의 헬륨 기체와 요오드-황산(Iodine-Sulfur) Cycle 을 이용하여 물을 분해함으로써 수소를 대량으로 생산하는 개념(Fig. 1 참조)을 고려하고 있다.^(5~7) 이 시스템에서는 Fig. 1 에서 보듯이 고온가스덕트(Hot Gas Duct; HGD),^(8,9) 중간열교환기 (Intermediate Heat Exchanger; IHX) 및 공정 열교환기(Process Heat Exchanger; PHE) 등으로 구성된 중간루프가 반드시

† Corresponding Author, knsong@kaeri.re.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

필요하다. 특히 IHX 는 원자로에서 생산된 초고온 열을 수소생산 공장으로 전달하는 핵심 기기로서 약 900℃ 정도의 초고온하에서 작동되고 있다.

KAERI 에서는 최대 1000℃까지 작동할 수 있는 소형가스루프를 구축하였고⁽¹⁰⁾ 이 가스루프에서는 소형 PHE 시제품^(11~13) 및 소형 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) 시제품에 대하여 성능시험을 수행할 예정이다. PCHE 는 유체가 통과하는 채널을 화학적 에칭(etching) 처리하여 제작된 유로관을 확산 접합공정(diffusion bonding process)을 이용하여 적층한 열교환기로서(Fig. 2 참조), 용량대비 부피가 작고 열교환 효율이 우수한 콤팩트형 열교환기의 형태로 알려져 있다.

소형가스루프를 본격적으로 시운전하기 전에 SS304, SS316 및 Inconel800HT 등의 재질로 설계/제작된 소형 PCHE 시제품⁽¹⁴⁾에 대한 거시적인 고온 구조 특성 및 거동을 파악할 필요가 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 소형 PCHE 시제품에 대한 고온 구조해석을 위한 유한요소 모델링과 거시적

인 열 및 구조 해석을 수행하고 그 결과를 정리하여 요약한 것이다. 해석결과는 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

제작된 소형 PCHE 시제품을 구성하는 부품들과 개략도는 Fig. 3 과 같다. 화학적 etching 처리된 A형 유로관 (Fig. 4 참조)과 B형 유로관(Fig. 5 참조)이 B-A-B 순서로 적층되어 1 개의 유로관 세트를 이루며 적층된 총 30 개 유로관 sets 의 상·하부에는 5mm 두께의 판으로 덧씌워져 있다.⁽¹⁵⁾ 고온의 유체(가스)가 흐르는 A-type 유로관은 유로폭 1.0 mm, 유로와 유로 사이의 리브폭 1.0 mm, 유로길이 187 mm 인 유로가 한 유로관당 40 개 etching 되어 있다. 저온의 유체(물)가 흐르는 B-type 유로관은 유로폭 1.4 mm, 유로와 유로 사이의 리브폭 0.6 mm, 유로길이 185 mm 인 유로가 한 유로관당 40 개 etching 되어 있다. Figure 6 은 이해를 돕기 위해 A-type 및 B-type 유로관이 교대로 적층되고 Flange 들로 연결되어 있는 소형 PCHE 시제품 구조를 나타낸 것이다.

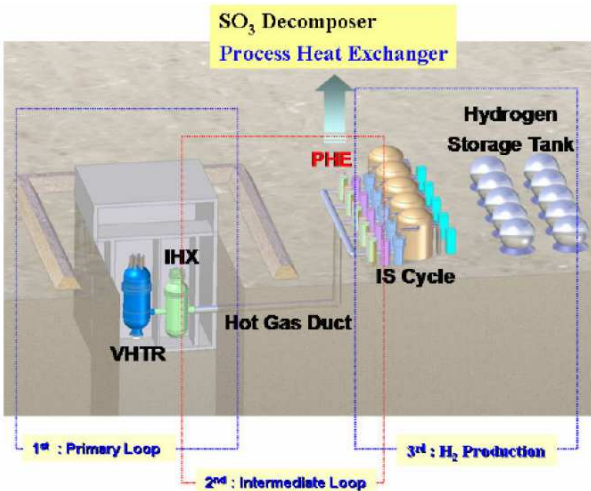


Fig. 1 Nuclear hydrogen system

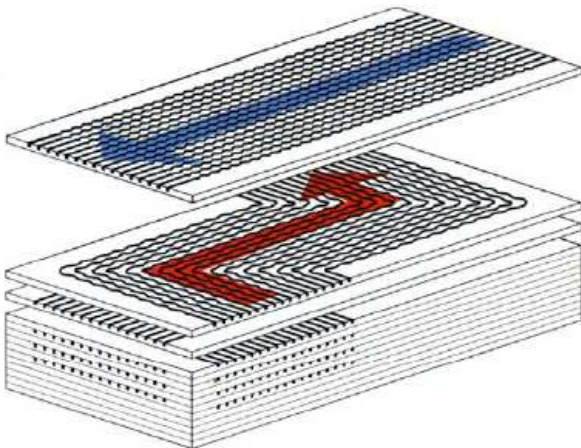


Fig. 2 Inside of PCHE and flow path

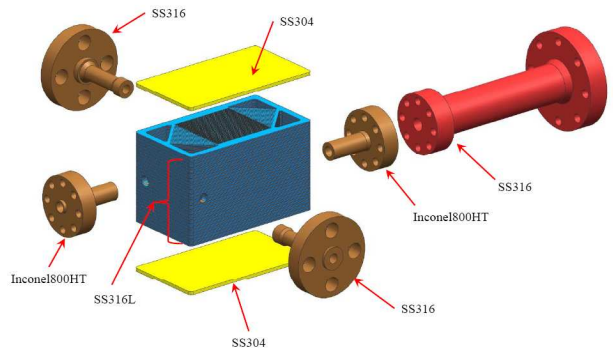


Fig. 3 Schematic view of PCHE prototype

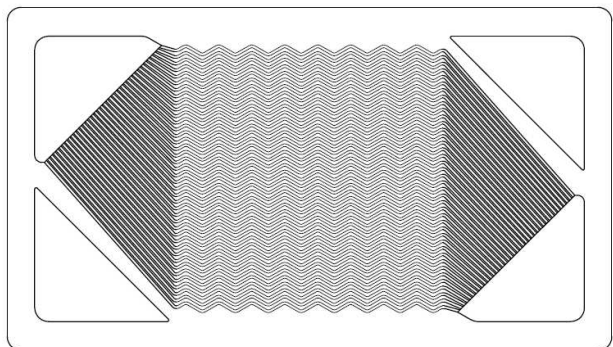


Fig. 4 Flow plate (A-type) for high-temperature gas

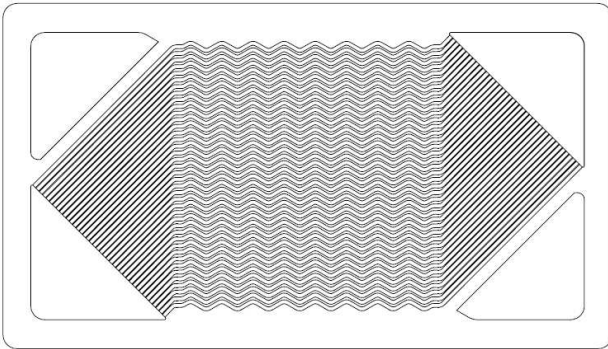


Fig. 5 Flow plate (B-type) for low-temperature water

2.2 FE 모델링을 위한 유로판 형상의 단순화

A-type 및 B-type 유로판에서 실제 유로 형상을 살펴보면(Figs. 4 및 5 참조) 유로가 zig-zag 형태로 형성되어 있는데 이 형상을 그대로 유한요소(FE) 모델링할 경우 열 및 구조 해석이 곤란할 정도로 유한요소의 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.⁽¹⁶⁾

2.3 유한요소(FE) 모델링

유로형상을 단순화하고 B-A-B 적층된 유로판 set 30 개, 상·하부에 덧씌워진 5mm 판, 유체 유입/유출 파이프라인 및 플랜지들을 조립한 소형 PCHE 시제품의 유한요소(FE) 모델은 Fig. 9 와 같다. 본 FE 모델에서 총 절점수는 1,978,586 이다. 1 차 및 2 차측 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.

2.4 유로판에 유입되는 유체온도분포

Figures 10 및 11 은 정상상태에서 소형 PCHE 시제품으로 유입/유출되는 유체의 계통 온도분포 자료⁽¹⁶⁾를 참조하여 Fig. 7 및 Fig. 8 의 단순화된 유로판 형상에 맞도록 작성한 1 차(A-type) 및 2 차(B-type) 유로판 유로에서의 유체 온도분포를 나타낸 것이다. 부연하여 설명하면 정상상태 에서의 소형 PCHE 시제품의 계통 온도분포 자료⁽¹⁶⁾는 단순화된 유로판 및 유로판 유한요소 모델의 절점좌표와

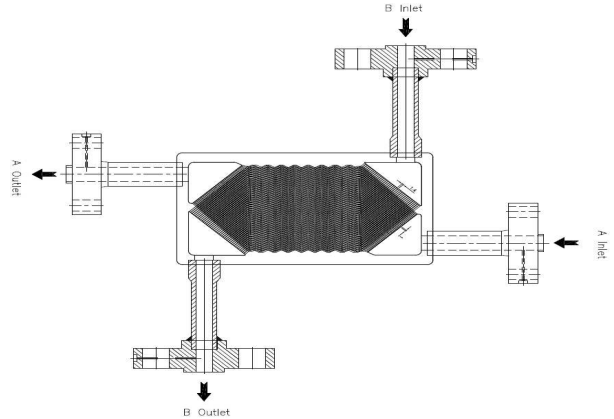


Fig. 6 Design drawing of small-scale PCHE prototype

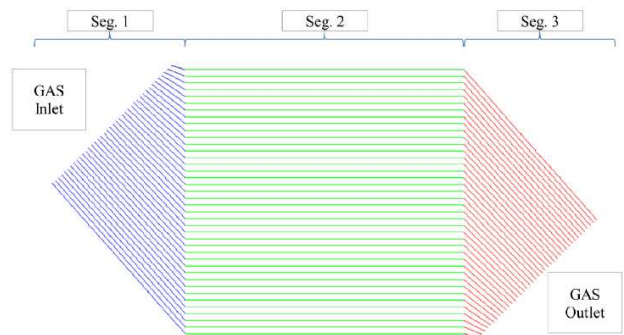


Fig. 7 Flow plate modeling for A-type

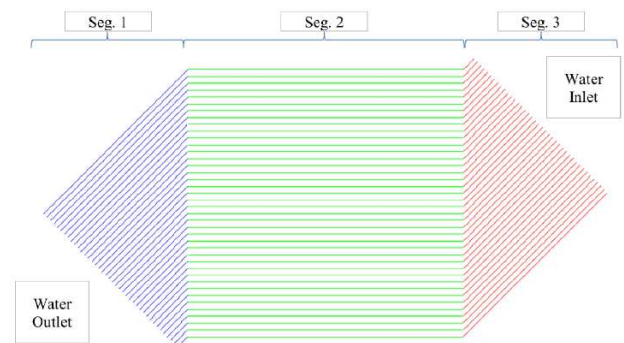


Fig. 8 Flow plate modeling for B-type

일치하지 않게 작성되었기 때문에 이를 열해석을 위한 유한요소모델에 맞도록 온도분포를 mapping 한 것이다. 소형 PCHE 시제품으로 유입되는 1 차 유체(가스)의 유입온도는 830℃이며 2 차 유체(물)의 유입온도는 20℃이다.

2.5 구성 부품들의 물성치

소형 PCHE 시제품을 구성하는 부품(Fig. 3 참조)들은 4 종류의 재질을 사용하였는데 구성 부품들의 물성치는 Table 1~4 에 나타나 있다.⁽¹⁷⁾ 이들 물성치들은 소형 PCHE 시제품의 열해석, 열팽창

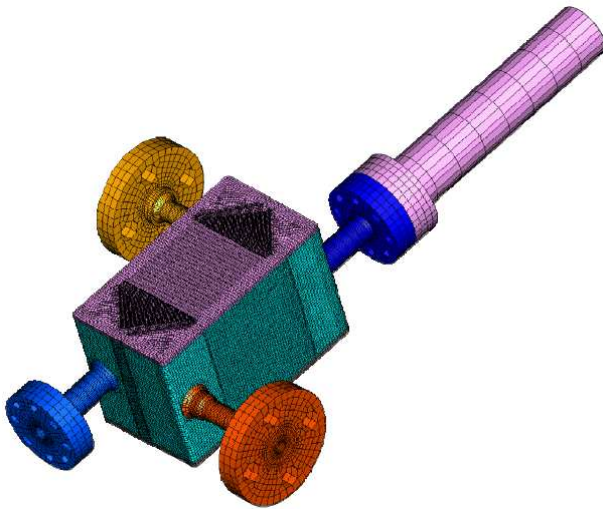


Fig. 9 FE model of small-scale PCHE prototype

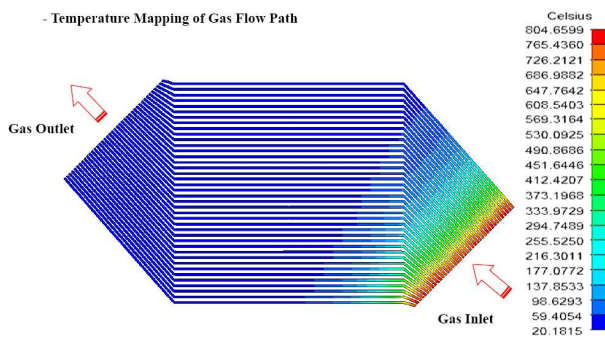


Fig. 10 Temperature mapping of gas flow path (A-type)

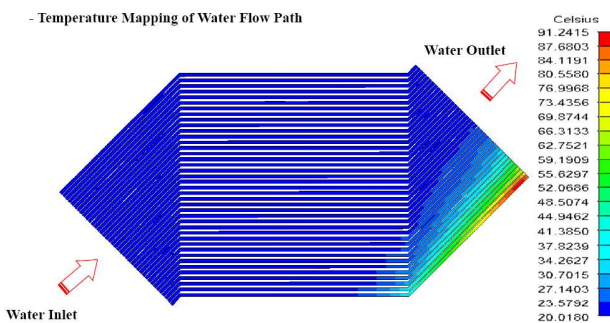


Fig. 11 Temperature mapping of water flow path (B-type)

및 구조해석을 위한 입력자료로 사용된다. 예비 시험 결과에 의하면 1 차 유로관에 유입되는 유체의 온도가 600℃ 일 때 1 차 유로관에서의 측정 최고 온도가 250℃ 정도이므로 상기 2.4 절의 소형 PCHE 시제품의 시험온도조건을 적용할 경우에도 Table 1~3 의 SS 재료의 물성치들은 유효한 것으로 판단되며 아울러 600℃ 이후의 Inconel800HT에서의 물성치는 Table 4 의 600℃ 값을 사용하였다.

Table 1 Material properties of SS316L

Temperature (℃)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson Ratio	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/mK)	Heat Capacity (J/kgK)	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /℃)
20	192	0.3	7966	13.94	470	15.9
100	186	0.3	7932	15.08	486	16.4
200	178	0.3	7889	16.52	508	17.0
300	170	0.3	7846	17.95	529	17.5
400	161	0.3	7803	19.39	550	17.9
500	153	0.3	7760	20.82	571	18.3
600	145	0.3	7717	22.25	592	18.7
700	137	0.3	7674	23.69	613	19.0

Table 2 Material properties of SS316

Temperature (℃)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson Ratio	Conductivity (W/mK)	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /℃)	Temperature (℃)	Density (kg/m ³)	Heat Capacity (J/kgK)
21.1	195.1	0.29	14.18	15.30	20	7930	472
93.3	190.3	0.29	15.22	16.02	50	7919	485
148.9	186.2	0.29	16.08	16.56	100	7899	501
204.4	182.7	0.29	16.95	17.10	150	7879	512
260	177.9	0.29	17.64	17.46	200	7858	522
315.6	174.4	0.29	18.51	17.64	250	7837	530
371.1	171.0	0.29	19.37	18.00	300	7815	538
426.7	166.2	0.29	20.06	18.18	350	7793	546
482.2	162.0	0.29	20.93	18.36	400	7770	556
537.8	157.2	0.29	21.62	18.54	450	7747	567
593.3	152.4	0.29	22.48	18.90	500	7724	578
648.9	146.2	0.29	23.18	19.08	550	7701	590
-	-	-	-	-	600	7677	601
-	-	-	-	-	650	7654	610
-	-	-	-	-	700	7630	615

Table 3 Material properties of SS304

Temperature (℃)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson Ratio	Conductivity (W/mK)	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /℃)	Temperature (℃)	Density (kg/m ³)	Heat Capacity (J/kgK)
21.1	195.1	0.29	14.87	15.30	20	7930	472
93.3	190.3	0.29	16.08	16.74	50	7919	485
148.9	186.2	0.29	16.95	17.64	100	7899	501
204.4	182.7	0.29	17.99	18.36	150	7879	512
260	177.9	0.29	18.85	18.72	200	7858	522
315.6	174.4	0.29	19.54	19.26	250	7837	530
371.1	171.0	0.29	20.41	19.62	300	7815	538
426.7	166.2	0.29	21.10	19.98	350	7793	546
482.2	162.0	0.29	21.96	20.16	400	7770	556
537.8	157.2	0.29	22.83	20.52	450	7747	567
593.3	152.4	0.29	23.52	20.88	500	7724	578
648.9	146.2	0.29	24.21	21.06	550	7701	590
-	-	-	-	-	600	7677	601

3. 열해석

3.1 챔버에서 자연 대류계수 경계조건

1 차 유로관의 가스(Gas) 유동 챔버(chamber) 및 2 차 유로관의 물(Water) 유동 챔버에서의 자연 대류계수는 해석의 신뢰성을 위해 매우 중요한

Table 4 Material properties of Inconel800HT

Temperature (°C)	Conductivity (W/m·K)	Temperature (°C)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson Ratio	Density (kg/m ³)	Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C)	Heat Capacity (J/kg·K)
21.1	11.60	20	191	0.35	7730	-	500
93.3	12.89	100	185	0.35	7710	-	-
148.9	13.85	150	182	0.35	-	-	-
204.4	14.71	200	179	0.35	7680	15.8	-
315.6	16.62	250	175	0.35	-	16.0	-
371.1	17.50	300	172	0.35	7650	16.2	-
426.7	18.35	350	169	0.35	-	16.3	-
482.2	19.21	400	165	0.35	7610	16.5	-
537.8	20.05	450	162	0.35	-	16.6	-
593.3	20.94	500	159	0.35	7580	16.8	-
648.9	22.00	550	155	0.35	-	17.0	-
-	-	600	152	0.35	7540	17.1	640

- Boundary Condition of Gas Flow Chamber

No.	Area	Temperature (°C)	Convection Coefficient (W/m ² ·°C)
1	Gas Inlet Tube Inner Wall	830	83.5
2	Gas Inlet Tube Inner Wall	830	835
3	Gas Inlet Chamber Inner Wall	830	36.2
4	Gas Inlet Chamber Inner Wall	830	3619
5	Gas Outlet Chamber Inner Wall	20.3	23.1
6	Gas Outlet Chamber Inner Wall	20.3	2306
7	Gas Outlet Tube Inner Wall	20.3	717

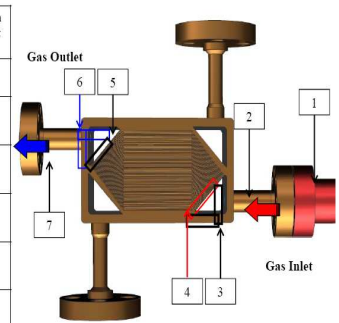


Fig. 13 Free convection boundary condition for water flow chamber

- Boundary Condition of Water Flow Chamber

No.	Area	Temperature (°C)	Convection Coefficient (W/m ² ·°C)
1	Water Inlet Tube Inner Wall	20	6880
2	Water Inlet Chamber Inner Wall	20	306
3	Water Inlet Chamber Inner Wall	20	30640
4	Water Outlet Chamber Inner Wall	30.9	465
5	Water Outlet Chamber Inner Wall	30.9	46530
6	Water Outlet Tube Inner Wall	30.9	8689

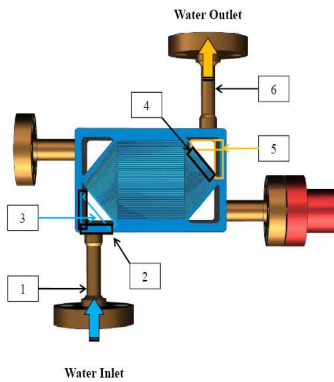


Fig. 12 Free convection boundary condition for gas flow chamber

- Temperature Contour of PCHE

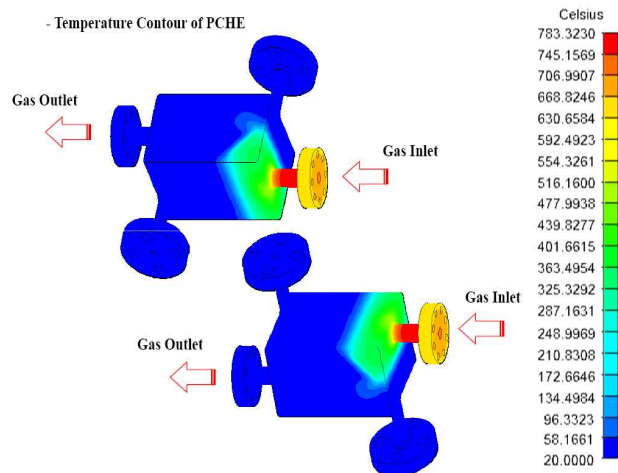


Fig. 14 Temperature contour of PCHE prototype

값이다. 본 연구에서는 챔버에서 자연 대류계수 경계조건을 해당 분야 전문가로부터 받은 자료 (Figs. 12 및 13 참조)⁽¹⁸⁾를 적용하였다.

한편 소형 PCHE 시제품 표면에 대해서는 직경 5.0 m 의 구(sphere)형 공간을 가정하였고 중력을 고려한 자연대류 열전달 조건을 적용하였다.⁽¹⁵⁾

3.2 열해석 결과

앞에서 언급한 자연대류 경계조건과 유로판의 온도 mapping 값을 이용하여 소형 PCHE 시제품에 대한 열해석을 I-DEAS TMG v.6.1⁽¹⁹⁾을 이용하여 수행하였다. 해석 결과 소형 PCHE 시제품의 전반적인 열해석 결과는 Fig. 14 에 나타나 있으며 최고온도가 발생한 영역에 대한 상세 온도분포는 Fig. 15 에 나타나 있다. Figures 14 및 15 에서 살펴보면 소형 PCHE 시제품의 압력경계(파이프 라인 제외)에서 최고 온도는 약 620°C 정도이고 고온 가스 유입관과 인접한 영역에서 발생하였다. 한편 유입 챔버(chamber)부위에서는 약 300-500°C 정도의 온도분포를 나타내고 있으나 그 외 부위에서는

- Temperature Contour of Pressure Boundary

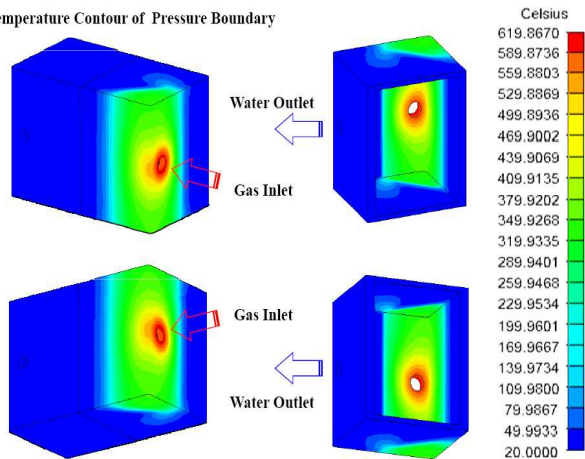


Fig. 15 Temperature contour around gas inlet chamber

100°C 미만의 비교적 낮은 온도분포를 나타내고 있다. 이러한 온도 분포는 소형 PCHE 시제품에 대한 예비 시험에서 측정된 온도분포와 유사한 것으로 알려지고 있어서 본 열해석 모델은 어느 정도 타당성이 있다고 보여진다.⁽¹⁶⁾ 또한 Fig. 15 에서

Gas inlet 부위의 온도분포를 살펴보면 상·하 방향으로서는 거의 대칭적 분포를 보이고 있으나 좌·우 방향으로 보면 비대칭적 분포를 보이고 있다. 부연하여 설명하면 좌측 방향으로의 온도강하는 완만하나 우측 방향으로는 온도강하가 급격함으로써 높은 열응력이 발생할 가능성이 높다. 이는 본 연구의 구조해석 결과에서 좀더 상세히 살펴볼 것이다.

4. 탄성구조해석

4.1 변위 경계조건

구조해석을 위한 변위 경계조건으로는 Fig. 16 과 같이 Gas inlet pipe 끝단에서 완전구속조건을 적용하였으며, 그 외의 Flange 들은 매우 유연한 (flexible) 파이프로 연결되어 있어서 모든 변위를 구속하지 않

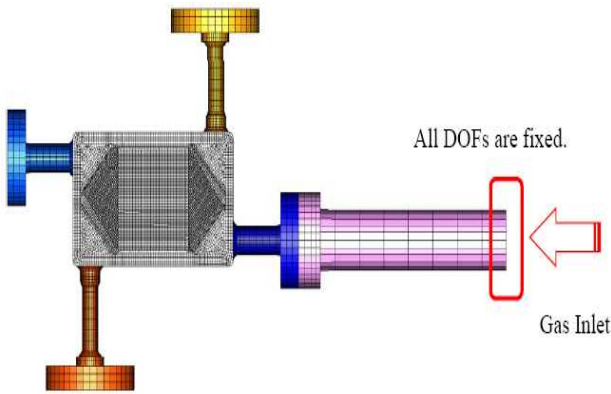


Fig. 16 Structural boundary condition

는 자유단으로 가정하였다. 소형 PCHE 시제품의 유체 압력으로는 Gas flow 영역에서 4.0MPa, Water flow 영역에서 0.1MPa 으로 설정되어 있으나 예전 연구결과들^(11~13) 참조할 때 열응력에 비해 압력의 영향이 미미하기 때문에 본 해석에서는 이를 무시하였다. 압력의 영향을 무시한 이유는 3.2 절의 온도분포와 유체압력을 동시에 본 유한요소해석모델에 적용할 경우 해석용 hardware 인 workstation 이 작동하지 않음이 주된 이유였다.

4.1 탄성구조해석 결과 분석

PCHE 시제품에 대한 FE 모델에 앞의 4. 1 절에서 언급한 변위 경계조건과 열해석 결과(각 요소 및 절점에서의 온도분포)를 적용하고 ABAQUS v.6.9-1⁽²⁰⁾을 이용하여 소형 PCHE 시제품에 대한 탄성구조해석을 수행하였다. 본 연구에서는 PCHE 시제품에 대한 거시적인 고온 구조건전성을 파악하기 위해 탄성구조해석 등을 수행하였다.

해석 결과 소형 PCHE 시제품의 전반적인 탄성구조해석 결과는 Fig. 17 에 나타나 있고 시제품의 압력 경계에서 689.7MPa 정도의 높은 응력이 발생한 상부 판(하부 판도 유사)에서의 응력분포는 Fig. 18 에 나타나 있다. Figures 17 및 18 에서 응력분포를 살펴보면 600MPa 이상의 높은 응력이 고온 가스 유입 챔버와 유로가 시작되는 상부 판 부위의 넓은 영역에서 발생하였고 이 부위에서 최대응력은 약 689.7MPa 정도이다. 이 부위의 넓은 영역에서 발생한 높은 응력은 소형 PCHE 시제품

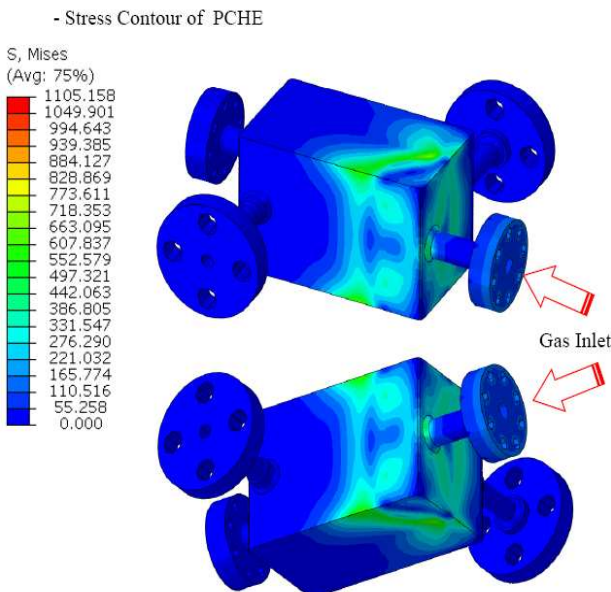


Fig. 17 Stress contour of PCHE prototype

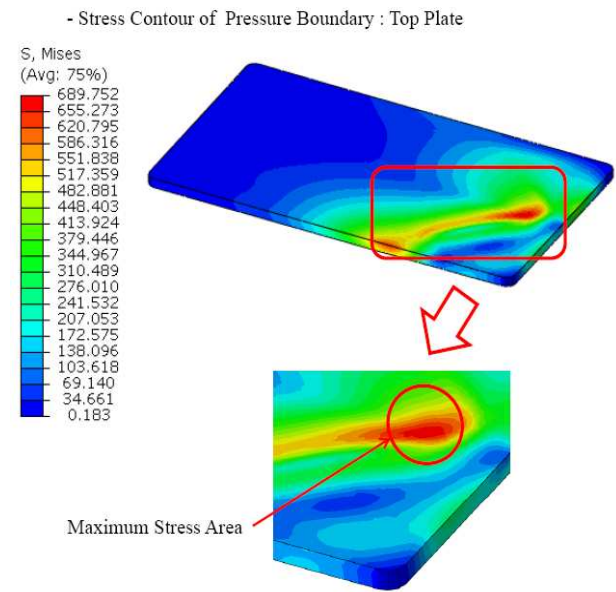


Fig. 18 Stress contour of top plate

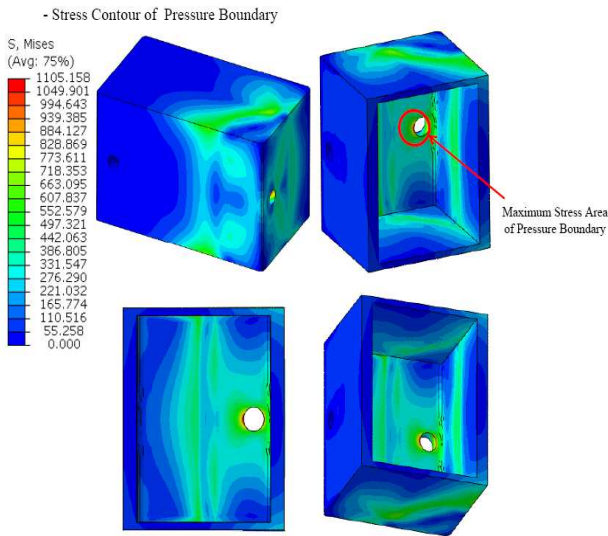


Fig. 19 Stress contour around gas inlet chamber

구조물의 구조건전성을 저해할 수 있으므로 설계 개선이 필요한 부위로 판단된다.

한편 최대 응력이 발생한 부위인 고온 가스 유입 챔버 주변에서의 응력분포가 Fig. 19 에 나타나 있다. Figure 19 에서 살펴보면 약 1,105MPa 정도의 상당히 높은 응력이 고온 가스 유입관과 소형 PCHE 시제품이 만나는 압력경계 부위에서 국부적으로 발생하였다. 이 부위는 Fig. 15 에서 보듯이 높은 온도가 발생한 부위이다가 온도 분포가 상·하 방향으로는 비교적 대칭인 반면 좌·우 방향으로는 비 대칭적 분포를 보이고 있는 부위이며 국부적인 영역에서 높은 응력이 발생한 것은 비대칭 온도 분포에 의한 변형에 기인하는 것으로 보인다.

4.2 구조건전성 향상을 위한 설계개선 방향

상(하)부 판의 넓은 영역에서 발생한 높은 응력 분포는(Fig. 18 참조) 구조건전성에 직접 영향을 줄 수 있으며 이를 개선하기 위한 설계개선방향은 이 부위에 대한 변형 형상을 살펴보면 실마리를 찾을 수 있을 것으로 보여진다. 부연하여 설명하면 Fig. 20 의 변형 양상에서 보듯이(5 배로 변형량을 확대한 것) 고온가스 유입 챔버 부위를 구성하는 상(하)부 판, 측면 판, 앞면 판의 변형과 관련이 있다. 즉, Fig. 20 에서 보면 측면 판(Front view)과 앞면 판(Right view)이 맞닿는 부위에서 판이 늘어나면서($a1=a2$ 이었던 $a2$ 가 b 크기로 늘어남) 상부 판(Top view)이 챔버 부위에서 부풀어 오른 형상으로 되어 꺾이게 되고 따라서 상부 판의 사선 방향으로 높은 응력이 발생한 것으로 보인다. 따라서 이렇게 발생한 높은 응력을 완화시키기

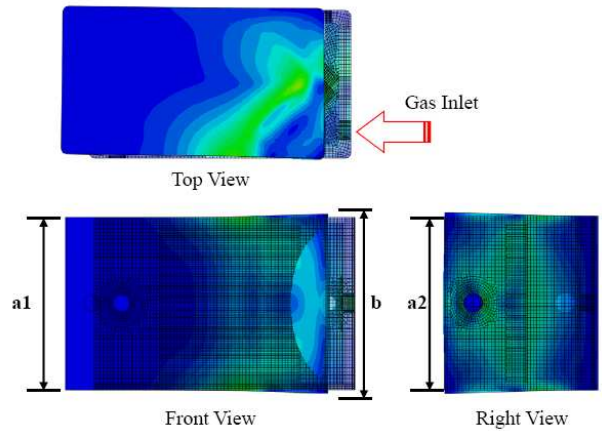


Fig. 20 Undeformed/deformed shape of PCHE plates

위해서는 측면 판과 앞면 판이 맞닿는 부위의 판 너비($a2$)를 열팽창을 고려하여 $a1$ 보다 약간 작게 제작하는 방안이 고려될 수 있다.

한편 Fig. 19 에서 보여진 고온 가스 유입관과 소형 PCHE 시제품이 만나는 부위에서 발생한 국부적인 높은 응력은 구조건전성 관점에서 볼 때 상(하)부 판에 비해 더 우려할 만한 사항은 아닌 것으로 판단된다. 왜냐하면 이 부위에서의 과대한 응력이 국부적으로 발생했을 뿐만 아니라 국부적인 침투 응력을 감소시키기 위해서는 고온 가스 유입관과 소형 PCHE 시제품이 접하는 연결부위를 모서리 가공(혹은 라운딩 처리)하는 방안과 고온 가스 유입관의 두께를 강도가 허용하는 범위 내로 줄여 줌으로서 열팽창에 좀더 유연하게 하는 것이다. 이러한 방안은 참고문헌 13 에서 시도된 바가 있다.

5. 결 언

소형가스루프에서 시험예정인 소형 PCHE 시제품에 대하여 거시적인 고온 구조건전성을 파악하기 위한 유한요소 모델링, 열 해석 및 탄성구조 해석 등을 수행하였다. 해석결과 다음과 같은 관찰사항을 얻었다.

(1) 열해석 모델을 단순화했음에도 불구하고 예비 시험결과와 비교적 일치하는 것으로 알려져서 어느 정도 모델의 타당성은 있는 것으로 보인다. 단, 본격적인 시험에서 측정할 온도분포와 비교하여 열해석 모델의 일부 자료, 예를 들면 챔버에서의 자연대류 조건에 대한 조정 등이 이루어져야 할 것이다.

(2) 탄성구조 해석 결과 소형 PCHE 시제품의 고온 가스 유입 챔버 부위의 상(하)부판에서는 전

반적인 영역에서 높은 응력이 발생하였는데 소형 PCHE 시제품의 고온 구조건전성이 유지되지 않을 가능성이 높다. 따라서 이 부위의 높은 응력을 완화시키기 위해서는 PCHE 시제품의 외곽 판들에 대하여 열팽창을 고려한 좀 더 정밀한 치수 설계가 요구된다.

(3) 열 해석 결과 소형 PCHE 시제품의 고온 가스 유입 챔버에서 높은 온도분포를 나타내고 있으며 특히 고온 가스 유입 파이프와 소형 PCHE 시제품이 접하는 압력경계 주변에서 최대온도 발생 및 비대칭적인 온도 분포를 보임으로서 국부적인 과대응력이 발생한 것으로 보인다.

(4) 고온 가스 유입 파이프와 소형 PCHE 시제품이 접하는 부위에서 국부적으로 발생한 높은 응력을 완화시키기 위해서는 이 부위를 모서리 가공하는 방안과 고온 가스 유입관의 두께를 강도가 허용하는 범위 내로 줄여 줌으로서 열팽창에 좀더 유연하게 하는 것이 고려될 수 있다.

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*, NNGP 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*, NNGP-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) Hong, S. D., 2006, "Basic Design of the Small-scale High-temperature High-pressure Gas Loop," Calculation note No. NHDD-KA06-TL-001, Rev.00.
- (11) Song, K. N. *et al.*, 2010, "High-Temperature Structural-Analysis Model of Process Heat Exchanger for Helium Gas Loop(I)," *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 9, pp. 1241 ~ 1248.
- (12) Song, K. N. *et al.*, 2010, "High-Temperature Structural-Analysis Model of Process Heat Exchanger for Helium Gas Loop(II)," *Trans. A of KSME*, Vol. 34, No. 10, pp. 1455 ~ 1462.
- (13) Song, K. N. *et al.*, 2011, "High-Temperature Structural-Analysis Model of Process Heat Exchanger for Small-scale Gas Loop(III)," *Trans. A of KSME*, Vol. 35, No. 2, pp. 191 ~ 200.
- (14) Hong, S. D., 2009, "Design of the Small-scale PCHE," Calculation note No. NHDD-KA07-TL-002, Rev.00.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) ASME Sec. II Part D Material Edition 2001.
- (18) Private communication with Dr. Kim, C. S.
- (19) I-DEAS/TMG ver.6.1, 2009.
- (20) ABAQUS ver.6.9-1, 2009.