

인쇄기판형열교환기 핵심치수 구조설계

김용원[†]·강지호^{*}·사인진^{*}·김응선^{*}

Structural Design for Key Dimensions of Printed Circuit Heat Exchanger

Yong Wan Kim[†], Ji Ho Kang^{*}, In Jin Sah^{*} and Eung Seon Kim^{*}

(Received 15 April 2018, Revised 15 June 2018, Accepted 18 June 2018)

ABSTRACT

The mechanical design procedure is studied for the PCHE(printed circuit heat exchanger) with electrochemical etched flow channels. The effective heat transfer plates of PCHE are assembled by diffusion bonding to make a module. PCHE is widely used for industrial applications due to its compactness, cost efficiency, and serviceability at high pressure and/or temperature conditions. The limitations and technical barriers of PCHE are investigated for application to nuclear components. Rules for design and fabrication of PCHE are specified in ASME Section VIII but not in ASME Section III of nuclear components. Therefore, the calculation procedure of key dimensions of PCHE is defined based on ASME section VIII. The effective heat transfer region of PCHE is defined by several key dimensions such as the flow channel radius, edge width, wall thickness, and ridge width. The mechanical design procedure of key dimensions was incorporated into a program for easy use in the PCHE design. The effect of assumptions used in the key dimension calculation on stress values is numerically investigated. A comparative analysis is done by comparing finite element analysis results for the semi-circular flow channels with the formula based sizing calculation assuming rectangular cross sections.

Key Words : Printed circuit heat exchanger (인쇄기판형열교환기), Effective heat transfer region (유효전열지역), Flow path (유로), Diffusion bonding(확산접합), Etching(에칭), Allowable design stress (허용설계응력), Membrane stress (막응력), Bending stress(굽힘응력)

1. 서 론

최근에 다양한 분야에서 사용하기 시작한 컴팩트 열교환기 중의 한 가지 형태인 인쇄기판형열교환기(printed circuit heat exchanger)는 화학적인 에칭방법으로 제작된 매우 작은 유로를 갖는 열교환기로서 확산접합으로 제작된다^(1,2). 전열성능대비 부피가 다른 형태의 열교환기에 비해 매우 작고, 매우 작은 유로로 설계 되므로 튜브형에 비해 고압

이나 고온에서 사용이 유리한 것이 큰 장점이다. 이미 산업용에서는 간단한 에어쿨러를 비롯해 수소열교환기나 천연가스의 열전달용 열교환기 등 용도가 계속 확장되고 있다⁽³⁾.

운전온도가 900°C에 달하는 초고온가스로는 일차냉각재의 열을 이차냉각재로 전달하기 위한 중간열교환기(intermediate heat exchanger), 증기발생기(steam generator), 브레이튼 전기생산사이클에 활용되는 재열기(recuperator), 산업용열을 이용하기 위한 공정열교환기(process heat exchanger) 등의 열교환기가 사용된다^(4,5). 초고온에서는 재료의 허용강도가 낮으므로 기존의 튜브형 열교환기로 설계하는 경우에는 제약이 많다. 이에 비해 인쇄기판형

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : ywkim@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8981 FAX : (042)868-8767

^{*} 한국원자력연구원

열교환기는 공간이 작고 치밀한 구조로 인해 원자력분야에서 고압고온의 요건에 부합하는 열교환기로 사용할 수 있다.

인쇄기판형열교환기는 화학적에칭으로 유로를 가공하기 때문에 유로의 형상이 반원이나 타원에 가까운 형태가 되며 유로의 크기도 통상 3mm를 넘지 않는다. 반원형의 형상이므로 강도 측면에서 치수를 결정하는 간단한 수식을 유도하거나 경험식을 제시하는 것이 어려우므로 적절한 가정이 필요하다. 확산접합공정은 장비의 제약으로 제작이 가능한 최대 단위열교환기의 크기가 한정되므로 대용량의 열교환기는 인쇄기판형열교환기 모듈을 여러 개 연결하여 설계할 수 있다.

지금까지 건설된 고온가스로의 중간열교환기 혹은 증기발생기에는 나선형전열관 열교환기가 주로 사용되었는데 큰 부피를 줄이는 것과 고압에서 건전성을 유지하는 것이 중요한 문제였다. 인쇄기판형열교환기는 미국의 차세대원자로인 NGNP(Next Generation Nuclear Plant)에서 미래원자로시스템에 사용하기 위해 주로 열적 성능측면에서 다양한 연구가 수행되었다⁽⁵⁾. 또한, 초고온가스로나 수소생산 시스템을 연결하는 공정열교환기에 인쇄기판형열교환기를 사용하기 위한 연구가 수행되었다⁽⁶⁾. 수소생산계통에서 인쇄기판형열교환기의 기초적인 열수력실험과 실험수행에 필요한 구조해석이 수행되었으나 치수결정을 위한 절차나 기법은 연구되지 않았다. 수소생산을 위한 공정열교환기는 초고온가스로의 고온고압 조건과 더불어 부식에 대한 저항성이 필요하여 초고온합금에 이온빔으로 탄화규소 코팅을 하여 내식성을 향상 시킨 연구가 병행하여 수행되었다.

본 연구에서는 인쇄기판형열교환기의 단위모듈 치수설계를 수행하기 위해서 표준화된 치수결정 계산절차를 확립하였다. 열교환기의 설계압력에 대해 설계온도에서 재료의 허용응력값을 기준으로 ASME 절차에 준해 유효전열지역의 피치결정, 두께결정 등의 핵심치수를 결정하였다. 치수설계는 여러 가지의 비선형수식으로 연계되어 있으므로 되풀이반복계산으로 설계 값을 결정하였다. 유효전열지역과 함께 여러 가지 형상의 원형 혹은 사각형의 헤더부위에 대한 치수결정도 할 수 있도록 프로그램에 추가하였다. 수식으로 치수를 결정하는 과정에서 사용되는 가정에 대해 비교계산을 수행하였다. 유효전열지역의 단면

은 반원형이나 실제 수식에서는 사각형 단면으로 강도를 계산하므로 유한요소해석법으로 두가지방법에 대해 계산을 수행하여 형상적 가정이 응력값에 미치는 영향에 대해 평가 하였다. 본 절차와 방법은 여러 가지의 인쇄기판형열교환기의 치수설계로 활용할 수 있다.

2. 인쇄기판형열교환기 치수결정

2.1 인쇄기판형열교환기 관련 기술기준

인쇄기판형열교환기를 설계하는 방법과 가이드라인에 대해서 아직 ASME Section III 원자력기기기술기준에는 등재되지 않았으나 ASME Section VIII에 일부 기준과 코드케이스로 등재되어 있다^(7,8). ASME Section VIII 코드케이스 2437의 범위는 SA-240 Type 316L 스테인레스강으로 제작된 미세유로 판형열교환기의 제작, 설계 검사에 대한 내용으로서 코드케이스에는 두께제한, 최대허용압력 확산접합 규정, 제작 후 수압시험에 대한 규정을 언급하고 있다. ASME Section VIII 코드케이스 2621-1은 미세유로열교환기 제조 시 확산접합에 대한 검사 규정으로서 다음과 같이 명시하고 있다. 헬륨누설검사, 초음파검사, 액상침투검사, 육안검사의 수행방법을 명시하고 있으며 접합되지 않은 부위가 없어야 한다고 한다. 또한, ASME Section VIII에 준한 수압 및 공압 시험을 명시하고 있다. 그러나 인쇄기판형열교환기의 확산접합부분에 대한 전체 비파괴검사를 수행하는 것이 현실적으로 어렵다.

원자력 기기설계에 사용되는 ASME Section III에 인쇄기판형열교환기 관련내용이 없으므로 원자력기기로 사용하기 위해서는 기술기준에 포함시키는 것이 선행되어야 한다. 사전 작업으로 인쇄기판형열교환기를 원자력부분에 적용하기 위해서 미국 ORNL에서 검토한바가 있다⁽⁹⁾. ASME Section III에서 장기적으로 인쇄기판형열교환기에 대한 설계기준 수립을 계획하고 있지만, 잠정적으로 원자력급 인쇄기판형열교환기의 설계에는 ASME Section VIII의 인쇄기판형열교환기 해당부분과 ASME Section III Div. 5 Subsection HB, Subpart B Design for Class A Service의 평가절차를 준용하는 방안을 사용하였다. 하중에 의한 허용응력을 만족해야 할 뿐만 아니라 막응력(membrane stress)과 선형화된 굽힘응력(bending stress)은 운전조건을 만족해야 한다. 더불어 초고온에

사용되는 인쇄기관형열교환기는 전체변형율, 누적 크리프, 크리프라체팅, 열라체팅, 좌굴과 사이클릭 피로에 영향을 주는 일차/이차응력과 변형한계에 대한 해석과 평가를 수행해야 한다.

2.2 치수결정

인쇄기관형열교환기의 유효전열지역은 반원형 형태의 유로로 구성된 일차측 전열지역이다. 구조적인 치수결정계산에서 판의 두께와 피치를 결정한다. 인쇄기관형열교환기의 설계압력과 설계온도를 입력하여 기술기준의 질차에 따라 계산한다. 반원형형상의 유로단면에 대한 응력은 수식적으로 계산할 수 없으므로 Fig. 1과 같이 직사각형으로 가정하여 계산한다.

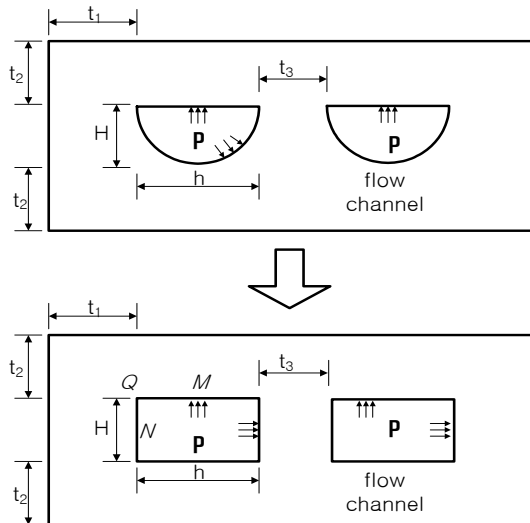


Fig. 1 Assumption of flow channel cross section

핵심치수 중 측면두께 t_1 은 단면의 막응력인 수식(1)과 Fig.2의 N과 Q위치에서의 전체응력인 수식(2), 수식(3)을 만족해야 한다. 마찬가지로 판의 아래두께 t_2 는 단면의 막응력인 수식(4)와 Fig.2의 Q와 M위치에서의 전체응력인 수식(5), 수식(6)을 만족해야 한다. 수식들은 결정되어야 할 t_1 , t_2 의 함수로 되어 있다. 따라서 t_1 과 t_2 를 결정하기 위해서는 수식(1)~(6)을 연립으로 풀어야 한다. 비선형연립방정식이 되므로 이를 구하기 위해서 초기 값으로 예상하고 수식을 풀어서 t_1 과 t_2 를 구한다. 구한 t_1 과 t_2 를 이용하여 K를 평가한 후 새로 구한 값을

입력하여 다시 수식을 푼다. 이렇게 반복 계산하여 수식에 사용한 값과 계산 후에 평가된 값이 일정한 범위(0.1% 오차)이내에 들면 수렴된 값으로 결정한다.

$$S_m = \frac{Ph}{2t_1} \left\{ 3 - \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \right\} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } K = \frac{I_2}{I_1} \alpha$$

$$\alpha = \frac{H}{h}$$

$$I_1 = \frac{t_1^3}{12}$$

$$I_2 = \frac{t_2^3}{12}$$

$$(S_T)_N = \frac{Ph}{2t_1} \left\{ 3 - \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \right\} + \frac{Pc}{24I_1} \left[-3H^2 + 2h^2 \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \right] \quad (2)$$

$$(S_T)_Q = \frac{Ph}{2t_1} \left\{ 3 - \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \right\} + \frac{Ph^2c}{12I_1} \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \quad (3)$$

여기서 c 는 중립축에서 최외곽까지 거리로서 수식(2)와 (3)에서는 두께 t_1 의 절반이다. 수식(1)에서 구한 막응력 S_m 은 ASME Section II Part D의 S(allowable design stress)보다 작아야 한다⁽¹⁰⁾. 또한, $(S_T)_N$ 과 $(S_T)_Q$ 는 각각 위치 N과 Q에서 막응력과 굽힘응력을 더한 전체응력(total stress)으로 ASME Section II Part D의 S에 1.5를 곱한 값보다 작아야 한다. 여기에 확산접합의 이음효율(joint efficiency) 0.7을 곱해야 한다. 판의 아래 두께 t_2 를 결정하기 위해서는 수식(4), (5), (6)을 만족해야 한다. 이들도 수식(1), (2), (3)과 연계되어 있다.

$$S_m = \frac{PH}{2t_2} \quad (4)$$

$$(S_T)_M = \frac{PH}{2t_2} + \frac{Ph^2c}{12I_2} \left[\frac{3 + K(6 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (5)$$

$$(S_T)_Q = \frac{PH}{2t_2} + \frac{Ph^2c}{12I_2} \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \quad (6)$$

여기서도 마찬가지로 방법으로 수식(4)에서 구한 막응력 S_m 은 ASME Section II Part D의 S보다 작아야한다. 또한, $(S_T)_M$ 과 $(S_T)_Q$ 는 ASME Section II Part D의 S에 1.5를 곱한 값보다 작아야한다.

유로와 유로사이의 간극 t_3 는 t_1 과 t_2 를 결정하기 위한 수식을 구할 때 사용한 수렴된 값을 사용하여 수식(7)과 (8)을 이용하여 두께를 결정한다. 실제로 여기서 굽힘응력은 무시할 수 있는 값으로 영으로 가정할 수 있다.

$$S_m = \frac{Ph}{2t_3} \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (7)$$

$$S_T = S_m + S_b \quad (8)$$

실제 프로그램을 통한 계산절차에서는 수식 (1)~(6)을 동시에 풀어 t_1 과 t_2 를 결정한다. 결정된 치수를 수식에 적용하여 응력의 만족여부를 검산할 수 있도록 프로그램에서 포함하였다. 인쇄기판형열교환기의 일이차측 유로가 모이는 입출구의 헤더는 반원형으로 설계하여 외부에 용접하는 경우가 많다. 그러나 설계압력이 매우 고압인 경우에는 두꺼운 외부형상으로 제작과 용접이 어려우므로 유효전열지역과 같이 확산접합을 하는 형태의 내장형헤더로 설계할 수 있다. 이러한 헤더의 치수결정도 마찬가지로 수식적으로 치수를 결정하는 절차에 대한 자세한 내용은 참고문헌에 제시되었다⁽¹¹⁾.

2.3 원자력기기로 잠정 적용

일반 기계의 경우 2.2의 수식과 ASME Section VIII Division 1의 절차로 설계하면 되지만 고온원자로에 적용하는 기기의 경우 ASME Section III Division 5의 절차를 따라야한다. 그러나 현재까지 확산접합을 원자력압력경계에 적용하는 기준은 없다. 잠정적으로, ASME Section III Division 5의 class A 기기로서 검토하면 유한요소해석을 수행한 후 다음과 같이 치수를 결정하는 방안이 제시된다.

$$P_m < S_o \quad (9)$$

$$P_L + P_b < 1.5S_o \quad (10)$$

초고온가스로의 기기로 사용하기 위해서는 크리프를 고려해야한다. 따라서 응력 비교 기준 S_o 는 10

만 시간의 크립파손응력에 기초한 허용응력(stress allowable in ASME BPV Section II, Part D. So is temperature dependent and based on 100,000-hr creep rupture data)을 사용할 수 있다. 원자력 기기의 운전 조건 A와 B에서는 다음의 ASME Section III Division 5기준을 만족해야 할 것이다.

$$P_m \leq S_{mt} \quad (11)$$

$$P_L + P_b \leq KS_m \quad (12)$$

$$P_L + P_b/K_t \leq S_t \quad (13)$$

$$K_t = \frac{K+1}{2}$$

여기서 P_m 은 주막응력(primary membrane stress), P_L 은 국부막응력(local primary membrane stress), 그리고 P_b 는 굽힘응력이다. S_{mt} 는 응력강도 S_m 과 시간과 온도의 함수 응력강도 S_t 중 낮은 값이다. K_t 는 크리프 영향으로 인한 최외각부(extreme fiber)의 굽힘응력 감소 효과를 나타내는 값이며, K는 단면계수로서 ASME에 여러 가지 형상에 대해 나와 있으며 직사각형 단면의 경우 1.5이다. 초고온에서의 라체트변형에 대한 요건도 마찬가지로 아래와 같이 만족해야 한다.

$$X + Y \leq 1 \quad (14)$$

$$\text{여기서 } X = \frac{P_L + P_b}{S_y}, \text{ or } X = \frac{P_m}{S_y}$$

$$Y = \frac{Q}{S_y}$$

초고온원자로계통의 중간열교환기로 사용하기 위해서는 설계치수를 2.2절의 방법으로 결정한 후 실제 하중을 가하여 유한요소해석을 수행한 후 ASME 응력을 분류하여 수식 (11)~(14)를 적용하는 것이 ASME Section III에서 원자력에 인쇄기판형열교환기를 사용하기 위한 기술기준 제정 이전에 잠정적인 방안으로 설계에 사용할 수 있다. 크리프가 발생하지 않는 영역에 적용하기 위해서는 기준의 ASME Section III Division 1에서 기기설계에 사용하는 방법을 적용하면된다. 확산접합에 의한 이음효율을 ASME Section VIII에서는 0.7을 사용하고 있는데 고온의 크리프 영역이나 피로에 대해서 확

산점합 이음효율효과에 대해 향후 개발될 기술기준에 제시되어야한다.

3. 가정에 대한 분석

3.1 형상가정 분석

전술한 바와 같이 수식에서는 반원형형상은 수식적으로 계산할 수 없으므로 직사각형으로 가정하여 계산하였다. 반원형태의 유로를 사각형으로 가정한 것에 대한 타당성을 유한요소해석으로 비교평가하였다. 형상비교는 Table 1에서 보는 것과 같이 세 가지 모델에 대해 비교하였는데 모델 1은 판의 두께와 유로 사이의 간극이 두꺼운 고압용에 사용되는 인첸기관형열교환기 치수이며, 모델 3은 판이 얇고 유로 간극도 좁은 형태의 모델이며, 모델 2는 중간 형상이다. 유한요소해석은 상용 구조해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다⁽¹²⁾. 해석에 사용한 탄성계수는 206GPa이며, 포와송비는 0.3이다. 탄성해석이므로 단위압력을 가하여 응력해석을 수행하였다. 본 계산은 형상 가정에 의한 상호비교를 조사하기 위해 수행한 내용으로서 ABAQUS의 3차원 요소인 C3D8을 사용하여 계산을 하였다.

유한요소해석을 수행한 결과에서 ASME 응력성분은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 단면을 따라 선형화 하였다.

Table 1 Models for cross section shape comparisons

기호	모델 1	모델 2	모델 3
h(mm)	0.5	0.5	0.5
H(mm)	1.0	1.0	1.0
t ₁ (mm)	2.75	1.25	0.9
t ₂ (mm)	0.5	0.5	0.2
t ₃ (mm)	1.5	0.5	0.2

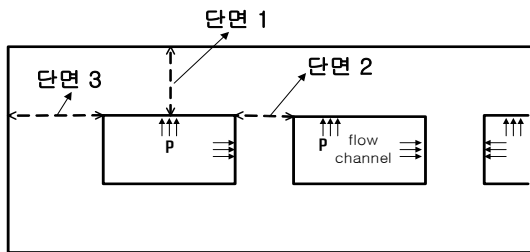


Fig. 2 Section definition for ASME stress category classification

세 가지 모델에 대해 막응력과 전체응력을 비교해 한 결과는 Table 2,3,4와 같다. 유로단면의 형상이 반원형인 경우와 사각형인 경우의 선형화된 응력값의 최대 차이는 고압용으로 설계된 모델 1에서는 13%, 모델 2에서는 8%, 그리고 모델 3에서는 15%로 계산되었다.

Table 2 Stress comparison between semi-circular and rectangular cross section (model 1)

	응력종류	반원	사각	차이(%)
σ_x/p (단면1)	막응력	-0.527	-0.516	2.0%
	전체응력	-1.093	-1.092	0.1%
σ_y/p (단면2)	막응력	0.566	0.563	0.6%
	전체응력	1.758	1.526	13.2%
σ_z/p (단면3)	막응력	0.156	0.158	-1.4%
	전체응력	0.612	0.608	0.7%

Table 3 Stress comparison between semi-circular and rectangular cross section (model 2)

	응력종류	반원	사각	차이(%)
σ_x/p (단면1)	막응력	-0.527	-0.523	0.9%
	전체응력	-1.106	-1.100	0.5%
σ_y/p (단면2)	막응력	1.653	1.668	-0.9%
	전체응력	2.606	2.377	8.8%
σ_z/p (단면3)	막응력	0.319	0.322	-0.9%
	전체응력	1.222	1.182	3.3%

Table 4 Stress comparison between semi-circular and rectangular cross section (model 3)

	응력종류	반원	사각	차이(%)
σ_x/p (단면1)	막응력	-0.492	-0.506	-2.7%
	전체응력	-1.020	-1.017	0.3%
σ_y/p (단면2)	막응력	4.058	4.016	1.0%
	전체응력	7.190	7.082	1.5%
σ_z/p (단면3)	막응력	0.462	0.391	15.3%
	전체응력	2.086	1.946	6.7%

유한요소해석결과에서 두께를 결정하는 응력성분의 분포도는 큰 차이가 나지 않았다. Fig. 3은 모델 2에 대해 t₂에 영향을 주는 σ_x 성분에 대해 비교하였다. 윗면에서는 반원형과 사각형 모두 비슷한 형태의 분포를 보이며 아랫면에서는 반원형의 응력이 낮은 형태이다. 두께를 결정하는 단면은 응력값이 큰 윗면이므로 두 가지 모델의 해석결과는

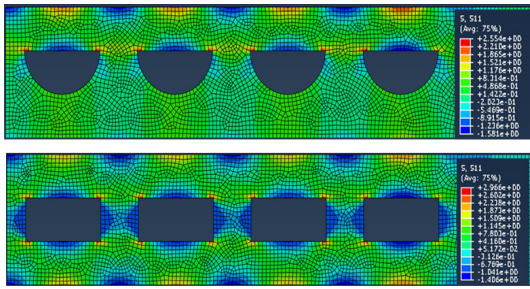


Fig. 3 Stress distribution comparison of σ_x between semi-circular and rectangular cross section

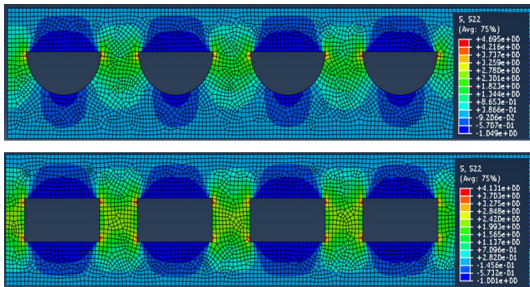


Fig. 4 Stress distribution comparison of σ_y between semi-circular and rectangular cross section

Table 3에서와 같이 큰 차이가 없다. Fig. 4에서는 σ_y 성분에 대해 분포를 비교하였는데 마찬가지로 윗면에서는 비슷한 값이며 아랫면에서 차이가 나므로 두께를 결정하는 선형화된 ASME 응력값은 큰 차이가 나지 않는다.

본 해석에서는 단 세가지 모델에 대해서 평가하였고 형상에 의해서 최대 15%이내의 차이가 발생하였다. ASME Section VIII의 설계여유도를 고려할 때 사각형으로 가정하고 설계를 위한 초기치수결정방법은 타당하다고 판단된다. 원자력급 기기로 사용하는 경우에는 주어진 치수와 형상을 이용하여 인쇄기판형열교환기에 대한 유한요소해석을 수행하여 ASME 응력보고서를 작성하는 과정에서 검증된다.

3.2 두께비 가정 분석

수식(1)~(6)에서 측면의 두께 t_1 이 판의 아래두께 t_2 보다 매우 큰 경우 $K=0$ 으로 가정할 수 있다. 이 경우 수식이 단순화되어 별도의 비선형수식을 연계하여 계산할 필요가 없고 단순하게 계산할 수 있다⁽²⁾. 측면의 두께가 판의 아래 두께에 비해 매우 크다는 가정이 없이 계산한 값을 기준으로 가정을 한

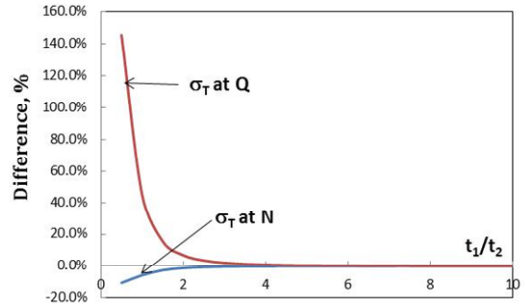


Fig. 5 Effect of $t_1 \gg t_2$ assumption on total stress to determine t_1

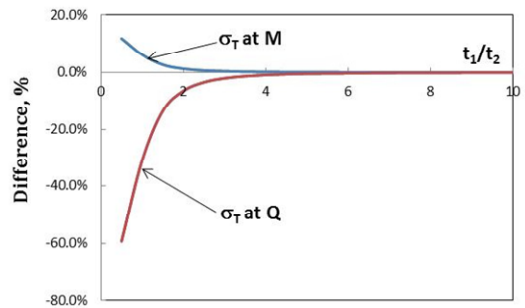


Fig. 6 Effect of $t_1 \gg t_2$ assumption on total stress to determine t_2

경우에 대한 차이 값을 비교하였다. t_1 을 결정하는 전체응력 값을 Q와 N의 위치에서 비교한 것이 Fig. 5이며, t_2 를 결정하는 전체응력 값을 M과 Q의 위치에서 비교한 것이 Fig. 6이다. 계산 결과에 의하면 t_1 이 t_2 의 최소 5배 이상 되는 경우에는 전체응력의 차이를 무시할 수 있다.

3.3 인쇄기판형열교환기 설계

초고압으로 운전하는 일반열교환기의 설계에 전술한 방법을 적용하여 설계압력 100MPa의 초고압으로 설계한 예는 Fig. 7과 같다. 설계재료인 스테인레스강의 허용응력은 97MPa로서 설계압력 100MPa보다 낮아 전열관형태의 열교환기로는 설계가 매우 어려운 경우이나 인쇄기판형열교환기 형태로는 양호한 설계가 가능하다.

초고온가스로의 중간열교환기는 950°C의 초고온에서 8MPa의 압력을 받으면서 운전된다. 초고온재료인 Alloy 617로 인쇄기판형열교환기 형태로 중간열교환기 모듈의 핵심치수를 결정하였다. 설계온도 950°C에서 Alloy 617의 허용응력은 7.91MPa이다.

핵심치수 중 유로반경은 열교환기의 압력강하와 전체적인 크기 등의 영향을 받으므로 열유체설계에서 선정하고 이 값을 바탕으로 각 두께를 결정하는 것이 Table 5와 같다. 설계에서는 열설계와 제작을 고려하여 유로반경은 0.5mm, t_1 은 20mm, t_2 는 1mm, 그리고 t_3 는 1.5mm를 적용하였다.

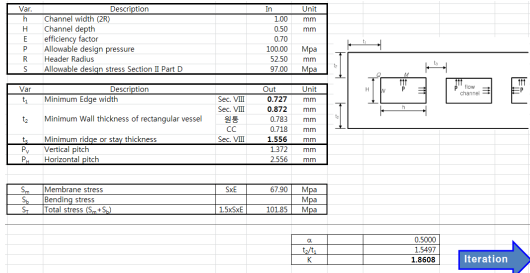


Fig. 7 Example of key dimension calculation results for extreme pressure PCHE

Table 5 Key dimensions for VHTR PCHE module

R, mm	0.15	0.25	0.50	1.00	1.25	2.00
t_1 ,mm	0.25	0.41	0.82	1.65	2.06	3.29
t_2 ,mm	0.26	0.42	0.85	1.70	2.12	3.40
t_3 ,mm	0.45	0.75	1.49	3.00	3.4	5.98

4. 결 론

인쇄기관형열교환기의 핵심치수를 수치적으로 결정하는 절차를 연구하고 이를 프로그램화하여 설계에 사용하였다. 이는 열설계 절차와 연동하여 다양한 인쇄기관형열교환기의 설계에 활용될 수 있다. 원자력기기로 적용할 경우에 대한 설계 및 계산 절차에 대해서도 ASME Section VIII의 인쇄기관형열교환기 설계기준과 Section III division 5에 기초하여 적용성을 분석하였다. 제시된 절차로 초고온가스로의 중간열교환기 모듈 및 초고압용 인쇄기관형열교환기의 핵심치수를 계산하여 설계에 활용하였다. 치수 결정 수식의 가정을 분석하기 위해 유로의 직경은 고정하고 판의 두께와 유로사이의 벽이 두꺼운 경우와 얇은 경우를 중심으로 반원형유로 및 직사각형유로를 가정하여 유한요소해석을 수행하여 비교하였다. 두 가지 모델의 선형화된 응력값의 차이는 크지 않으므로 사각형으로 가정하여 치수를 결정하는 절차는 타당하다. 수식으로

결정된 치수에 대해 여유도가 작은 경우는 추가로 유한요소해석을 활용하여 반원모델의 응력을 평가하여 검증한다.

후 기

This research was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning.

(Grant code: NRF-2012M2A8A2025682)

(Grant code: NRF-2016M2A8A1952772)

참고문헌

- (1) Southall, D., Le Pierres, R., and Dowson, S.J., 2008, "Design Considerations for Compact Heat Exchangers," *Proceedings of ICAPP'08*, Anaheim, USA.
- (2) Le Pierres, R., Southall, D., and Osborne, S., 2011, "Impact of Mechanical Design Issues on Printed Circuit Heat Exchangers," *Proceedings of SCO2 power cycles symposium*.
- (3) Sabharwal, P., Carlk, D.E., Mizia, R.E., Glazoff, M.V., and McKellar, M.G., 2013, "Diffusion-Welded Microchannel Heat Exchanger for Industrial Processes," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, MARCH 2013, Vol. 5 / 011009-1~12.
- (4) Futterer, M.A., Li, F., Sink, S., Groot, S., Pouchon, M., Kim, Y.W., Carre, F., Tachibana, Y., 2014, "Status of the Very High Temperature Reactor System," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.77, pp. 1-16.
- (5) Dostal, V., Driscoll, M.J., Hejzlar, P., 2004, "A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors," *MIT-ANP-TR-100*.
- (6) Kim, Y.W., et al., 2015, "Development of Key Technologies for Nuclear Hydrogen," *KAERI/RR-3936/2014*.
- (7) ASME, 2015, "Rules for Diffusion Bonded, Flat Plate, Microchannel Heat Exchanger," *ASME B&PV Section VIII Code case 2437-1*.
- (8) ASME, 2015, "Diffusion Bonding Section VIII, Division1," *ASME B&PV Section VIII Code case*

- 2621-1.
- (9) Nestell, J., Sham, T.L., 2015, "ASME Code Considerations for the Compact Heat Exchanger," *ORNL/TM-2015/401*.
- (10) ASME, 2015, "Materials," *ASME B&PV Section II Part D*.
- (11) Kim, Y.W., Kim, E.S., 2017, "Mechanical Design of Printed Circuit Heat Exchanger," *KAERI/TR-6898/2017*.
- (12) Dassault Systemes Simula Corp, 2013, "ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual".