확산접합기술을 이용한 H2 Station용 PCHE형 Compact 열교환기 개발

김정길^{*,†} · 심덕남^{*} · 선철령^{*} · 양기훈^{*} · 박해지^{*} · 김동진^{*}

^{*}두산중공업 신공정기술개발팀

Development of Printed Circuit Heat Exchanger for Hydrogen Station using Diffusion Bonding

Jeong Kil Kim^{*,†}, Deog Nam Shim^{*}, Chil Yeong Seon^{*}, Ki Hoon Yang^{*}, Hae Ji Park^{*}, and Dong Jin Kim^{*}

^{*}Advanced Process Development Team, Doosan Heavy Industries & Construction, Changwon, 51711, Korea

[†]Corresponding author : jeongkill.kim@doosan.com

(Received July 13, 2017 ; Revised July 28, 2017 ; Accepted August 22, 2017)

Abstract

Diffusion bonding was performed on STS316L plate with micro channels to understand the relationship between bonding conditions and mechanical properties of the joints. Various defects such as spot and line defects developed along the joints bonded at various bonding conditions. As the bonding temperature increased, these defects had a tendency to decrease. With experimental results, it was revealed that bonding temperature was the most critical for formation of defects along the joints. Additionally, the sound joint showed coalescence of grains along the joint by migration of the grain boundaries. Tensile test result showed that the sound joint had better mechanical properties than STS316L base metal, and that crack initiated at spot and line defects followed by fracture. Based on experimental results, PCHE was manufactured and it passed hydraulic test under 1200 bar.

Key Words : PCHE, Diffusion bonding, H2 station

1. 서 론

Printed circuit heat exchanger (PCHE)는 화학 적 에칭법으로 가공된 미세유로를 가지는 금속 전열판을 적층하여, 진공의 고온 고압분위기에서 고상확산접합(이하 확산접합)을 통해 제작되는 Compact 열교환기의 일종이다¹⁾. 기존 열교환기 (예, Shell & Tube형 열교환기) 대비하여 전열면적을 획기적으로 증가 시킬 수 있기 때문에, 열교환기의 경량화 및 소형화가 가능 하다^{2,3)}. PCHE는 일반적으로 스테인리스강 및 Ni기 합금과 같은 물성이 우수한 소재로 제작이 되기 사용되기 때문에 기존 열교환기를 사용할 수 없었던 고온, 고압 및 극저온 환경에 사용가능 한 것이 장점이라고 할

수 있다. 따라서 Oil & Gas 산업, 수소스테이션 및 sCO₂ 발전 시스템 등과 같은 다양한 산업분야에 대한 적용 가능성 검토가 활발히 이루어 지고 있다⁴⁻⁶⁾.

최근 국내외적으로 친환경 에너지에 대한 관심과 함께 연료전지 전기 자동차에 대한 수요 및 연구가 증가하는 상황에서, 수소스테이션의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 국내에 경우 현재 24기의 수소스테이션이 건설되어 운영 중에 있으며 2017년 수립된 계획 기준으로 2025년까지 약 300기의 수소스테이션이 건설될 예정이다⁷⁾.

최근 건설되는 수소스테이션의 경우 700bar로 가압된 상온의 기체 수소를 자동차에 주입 직전 -40℃로 냉각하여 주입하는 것으로 알려져 있으며, 이와 같은 저온, 고압의 환경에서의 사용되는 열교환기의 경우 높은 열

교환 성능과 함께 우수한 구조적 내구성이 요구된다^{8,9)}.

수소스테이션 사용된 PCHE의 경우, 최근 일본 Kobelco사에서 개발하여 적용한 사례가 보고되었다¹⁾. 하지만 국내에서는 수소스테이션에 대한 PCHE의 적용 실적이 전무한 상황이며, 다양한 기관에서 관련 연구가 수행되어 왔지만 아직 상업적으로 적용하기 위해서는 관련된 연구가 부족한 실정이다.

한편 최근 수소스테이션에 대한 건설 개념 또한 변화되고 있는 것으로 알려져 있다. 좀 더 자세히 설명하자면, 기존의 주유소와 가스충전소와 같이 지상에 고정식으로 건설되어야 한다는 개념에서 벗어나, 대형 화물차 또는 컨테이너로 운송이 가능한 크기의 이동형 수소스테이션 시스템 개발에 대한 연구 또한 활발하다. 특히 이동형 수소스테이션을 개발하기 위해서는 열교환기를 비롯한 각종 부품들의 경량화 및 소형화가 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 현재까지 국내에서 건설된 수소스테이션에 사용되는 Helically Coiled 및 Shell & Tube 형태의 열교환기의 경우 경량화와 소형화에 한계가 있기 때문에 이와 같은 형태의 열교환기는 이동형 수소스테이션에 사용하기는 어려운 것으로 알려져 있다.

이와 같은 이유로 인해 이동형 수소스테이션의 개발을 위해서는 경량화와 소형화가 가능한 PCHE형 열교환기의 개발이 필수적이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수소스테이션용 PCHE의 개발하여 국내 최초로 상용화 적용 하기 위한 기반기술을 확보하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해, 미세유로가 에칭된 STS316L 판재를 대상으로 확산접합을 실시하여 접합거동 및 접합부 물성에 미치는 접합조건의 영향을 검토한 후 최적 접합조건을 도출하였다. 이후 도출된 접합조건으로 수소스테이션용 PCHE용 Core를 제작하였으며, 가스안전공사 제작 기준에 의거하여 내압시험을 통해 제품의 구조적 건전성을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 화학적 방법으로 유로가 에칭된 1.5mmt의 STS316L판재가 모재(Fe-0.03C-17.5Cr-13Ni-2.5Mo)로 사용되었다. 확산접합은 총 3단계로 실시하였으며, 우선 제 1단계에서는 100×200 mm 크기의 판재를 10층으로 적층한 다음, 1×10^{-2} Pa의 진공분위기에서 Table 1에 나타난 접합조건으로 확산접합을 수행하였다. 유압식 가압장치로 시험편을 가압하였으며, 승온속도는 $7^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 하였고, 접합이 완료되면 로냉하였다. 1단계에서 접합된 시험편에 대하여 접합부의 미세조직에 미치는 접합조건의 영향을 검토하였으며, 그 결과를 바탕으로 최적 접합조건을 도출하였다. 2단계에

Table 1 Bonding conditions

	Temp. (°C)	Holding (min)	Pressure (MPa)
1	700	90	4
2	800	60	4
3		60	8
4		90	4
6		90	8
7	900	60	4
8		60	8
9		90	4
10		90	8

서는 같은 크기의 판재를 100층으로 적층한 후 이전 단계에서 도출된 최적조건으로 확산접합을 수행하였다. 그리고 2단계 접합 시험편을 이용하여 인장시험편을 제작한 후 접합부의 기계적 물성을 평가하여, 최적접합조건을 검증하였다. 마지막 3단계는 수소스테이션용 PCHE Core를 제작하기 위한 단계로써, 1,2 단계에서 검증된 최적접합 조건으로 400×150 mm크기의 판재에 대한 확산 접합을 수행하였다. 이후PCHE core에 대하여 수동 GTAW로 헤더를 조립하여 PCHE 제품 제작을 완료하였다. 완성된 PCHE 제품에 대해서는 한국가스안전공사 KGS AC111에 의거하여 1200bar의 수압 하에서 내압시험을 실시하였다.

Fig. 1은 1, 2단계 확산접합을 위해 사용된 유로가 에칭된 판재 도면을 나타낸 것이며, 판재의 양쪽부분에 직경 1.5 mm의 반원형상의 직선 유로를, 1 mm 간격으로 에칭 하였으며, 판재의 가운데 부분은 인장시험채취를 위해 유로 에칭을 하지 않은 것이 특징이다.

접합부의 미세조직은 1 μm 까지 미세 연마 후 에탄올 + 10 % HNO_3 + 30 % HCl 용액을 사용하여 에칭하였고, 광학현미경(OM), 주사전자현미경 (SEM)을 활용하여 관찰하였다. 또한 접합부 계면 주위 결정립의 결정방위는 Electron Backscatter Diffraction (EBSD)을

Fig. 1 Channel drawing for 1st and 2nd diffusion bonding

활용하여 측정하였다.

접합부의 기계적 물성은 상온과 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 3mm/min 의 Strain rate로 인장시험을 통해 평가였고, 시험편은 ASTM A37에 의거하여 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2은 1단계의 10층 접합 시험편 중 $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ 의 조건으로 접합한 시험편의 외관을 보여준다. 일반적으로 시험편 전체에 대하여 고른 가압력을 부가하는 것이 어렵기 때문에 가장자리 부분에서 미접합 현상이 많이 발생하고, 시험편의 면적이 커질수록 이러한 현상이 명확해 것으로 알려져 있으나, Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 본 연구의 모든 시험편에서는 미접합 현상이 관찰되지 않는 양호한 외관을 관찰할 수 있었다.

접합부의 미세조직 관찰을 하기 위해 모든 1단계 접합시험편을 대상으로 Fig. 1의 "A" ($10 \times 10 \times 15\text{ mm}$)로 표기된 부분을 채취하였다. 우선 에칭하지 않은 (미에칭) 상태로 접합부내의 결함 발생여부를 광학현미경을 통해 관찰하였으며, 그 대표적인 관찰결과를 Fig. 3에 나타내었다. 광학현미경 사진에서 왼쪽의 검은 영역은 유로이며, 화살표로 표시된 부분이 접합부 계면이다.

Fig. 2 Diffusion bonded specimen made at $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ (10 layer)

모든 조건의 접합부를 관찰한 결과, 결함이 관찰되지 않는 양호한 접합부(No defect)와 화살표로 표기된 Spot 성 및 Line성 (Spot and Line defect) 결함이 관찰되는 접합부로 나눌 수 있었다.

접합부에서 발생한 2종류의 결함을 SEM/EDS를 통해 분석한 결과, Spot성 결함은 Ca-Si-Al계 복합 산화물이며, Line성 결함은 접합이 이루어 지지 않은 미접합 계면인 것을 알 수 있었다 (Fig. 4). 특히 Spot 성 결함과 같은 산화물의 경우, 제거되지 못했던 표면의 오염물질로부터 기인한다고 볼 수 있으며, 일반적으로 이러한 산화물은 고온의 진공분위기에서 수행되는 확산접합 도중에 분해된 다음 모재로 고용되어 제거된다고 알려져 있다. 앞선 연구에 따르면 확산접합부에 존재하는 산화물성 결함은 미접합 계면과 함께 주요한 균열의 원인이라고 보고하고 있다^{10,11)}. 따라서 본 연구에도, 접합부에 산화물은 잔류하는 접합조건은 산화물이 제거되기 위해 충분하지 못한 접합조건인 것으로 판단하였으며, 최적조건 선정과정에서 제외하였다.

이와 같은 접합부에서 관찰되는 결함의 발생과 접합 조건간의 상관성을 검토하기 위해, 모든 접합시험편에 대하여 결함율을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 결함율은 Spot성 결함과 Line 성 결함을 구분하지 않고 함께 측정하였다. Fig. 5의 첫번째 사진에서 볼 수 있는 바와 같이, 각각의 접합 시험편에서 채취된 미세조직 관찰용 시험편에는 총 36개의 접합부가 존재 하며, 결함율은 총 접합부 36개 중 Spot성 결함과 Line성 결함이 존재하는 접합부 개수의 비율로 정의하여 계산하였다. 우선 결함율에 미치는 유지시간의 영향을 검토해 보았다. 가압력을 4 MPa 으로 하여 접합한 결과를 살펴보면, 유지시간이 증가될수록 결함율은 감소하는 것을 볼 수 있으며, 가압력 8 MPa 의 접합부에서도 동일한 거동을 볼 수 있다. 하지만 결함율 감소에 대한 유지시간의 효과는 크지 않았다. 결함율에 미치는 가압력의 영향을 관찰하기 위해, 4 MPa 과 8 MPa 의 가압력에서 각각 $800\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min}$ 과 $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min}$ 으로 접합한 시험편의 결함율을 비교해 보면, 가압력이 증가하면 결함

Fig. 3 Typical microstructures of the joints bonded at 1st stage

Fig. 4 SEM/EDS analysis result on spot and line defects. (a) Optical microstructure of spot defect, (b) SEM image of spot defect, (c) EDS result on spot defect, (d) Optical microstructure of line defect and (e) SEM image of line defect

Fig. 5 Relationship between bonding conditions and defects of the joints. (a) The specimen for investigation of defect ratio, (b) Relationship between bonding temperatures, times and defects of the joints at 4 MPa, (c) Relationship between bonding temperatures, times and defects of the joints at 8 MPa

율이 다소 감소하는 경향을 볼 수 있었지만, 4 MPa와 8 MPa의 가압력에서 900 °C × 60min으로 접합한 시험편들을 비교한 경우에는 가압력이 증가하면 결함율이 다소 증가하는 경향을 보였다. 따라서 접합부 결함율에 미치는 가압력의 영향은 명확하게 규명할 수가 없었다.

반면에, 접합온도가 증가하면 접합부의 결함율이 크게 감소하는 것을 알 수 있으며, 모든 유지시간과 가압력 조건에서도 동일한 거동을 보였다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 시험편 보다 상대적으로 작은 크기의 STS316L판재에 대한 확산접합 연구에서 보고된

내용과 잘 일치한다²⁾. 하지만 접합온도를 증가시키는 것은 접합부의 결함제거에는 명확한 효과가 있지만, 온도가 높을수록 모재와 접합부의 기계적 물성이 열화되기 때문에 최적의 접합온도를 도출하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 6은 800 °C × 60 min × 4 MPa의 조건으로 접합한 접합부의 일부 영역의 에칭 전과 후 미세조직을 비교 관찰한 결과이다. 에칭전의 미세조직 관찰결과에서는 Spot성 결함 및 Line성 결함 등의 결함이 관찰되지 않았던 접합부였지만, 에칭에 의해 관찰되지 않았던 Boundary (화살표)가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6 Optical microstructures of the un-etched and the etched joint bonded at 800 °C × 60 min × 4 MPa

관련된 문헌에 따르면, 확산접합은 크게 3단계를 거쳐 완료된다고 알려져 있다^{6,10)}. 즉, 첫 번째 단계는 고온 크리프와 유사한 소성변형의 단계이며, 표면피막의 파괴, 신생면의 노출 및 접촉 면적의 증가가 일어난다. 두 번째는 입계이동 및 Void (미접합부)의 축소과정이며, 지속적인 입계확산에 의해 void가 소실되는 단계이다. 그리고 마지막 3단계에서는 모재 사이의 체확산에 의해 미접합부가 사라지고, 결정립의 성장이나 재결정이 일어남과 동시에 서로 접촉하고 있던 양쪽 모재의 결정

립간의 일체화가 일어나게 된 후 확산접합이 최종적으로 완료된다. 따라서 Fig. 6에서와 같이, 에칭 전에 결함이 관찰되지 않았던 접합부에서 에칭 후에 관찰되는 Boundary는 접촉하고 있던 양쪽 모재의 결정립간의 일체화가 완료되지 않아 존재하는 Boundary라고 생각할 수 있다. 따라서 이러한 Boundary가 존재하는 접합부는 확산접합 단계에서 볼 때, 마지막 3단계가 완료되지 않은 상태의 접합부 (미일체 결정립)라고 볼 수 있으며, 충분한 접합부의 기계적 물성 확보를 위해서는 최소화되어야 한다고 판단된다. 따라서, 결정립 미일체화에 미치는 접합조건의 영향을 검토해 보았다.

Fig. 7 는 접합부 결함 관찰에 사용하였던 미에칭 시험편들을 에칭하여, 미일체 결정립을 관찰한 후 접합조건별로 미일체화를 측정된 결과를 보여준다. 미일체화율은 앞서 결함율에서와 마찬가지로, 총 접합부 개수 36 중 일체화 되지 않은 결정립이 존재하는 접합부 개수의 비율로 정의하여 계산하였다. 그 결과를 살펴보면, 우선 800 °C 이하에서는 유지시간과 가압력의 변화에 따른 미일체화율의 변화가 명확하게 관찰되지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 접합온도를 900 °C 증가시키게 되면, 유지시간의 영향이 증가되는 것을 볼 수 있다. 좀 더 자세히 설명하자면, 900 °C, 4 MPa의 가압력 아래에서, 유지시간이 60 min에서 90 min으로 증가함에 따라 결정립 미일체화율이 약 75 % 에서 약 18 % 수준으로 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 유사한 결과가 8 MPa 조건에서도 관찰된다. 추가적으로, 900 °C × 90 min 에서 각각 4 MPa와 8 MPa로 접합한 접합부의 미일체화율을 비교해서 살펴보면, 가압력의 증가에 의해 미일체화율이 감소되지만, 그 정도는 3 % 수준

Fig. 7 Relationship between bonding conditions and un-coalesced grains of the joints. (a) The specimen for investigation of un-coalesced grains, (b) Relationship between bonding temperatures, times and un-coalesced grains of the joints at 4 MPa, (c) Relationship between bonding temperatures, times and un-coalesced grains of the joints at 8 MPa

로 가압력의 영향은 아주 적은 것을 알 수 있다.

지금까지 1.5 mm 두께의 STS316L 판재를 10층으로 접합한 시험편에 대한 미세조직 분석을 통해 결합을 및 결정립 미일체화에 미치는 접합조건의 영향을 검토하였다. 그 결과 접합부에서는 산화물로 구성된 Spot성결합과 Line성 결합이 관찰되었으며, 이들 결합의 제거를 위해서는 접합온도를 증가시키는 것이 가장 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 예정된 시험편에 대한 관찰을 통해 접합부에 미일체화된 결정립이 존재하는 것을 발견하였고, 이들에 미치는 접합조건의 영향을 검토한 결과, 접합온도가 결정립 미일체화 감소에 가장 절대적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 앞서 설명한 바와 같이, 1단계 접합시험의 목적은 접합부의 미세조직 관찰을 통해 최적 접합 조건을 도출하는 것이며, 지금까지 보고한 결과를 바탕으로 볼 때 최적조건은 $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ 이라고 할 수 있다. Fig. 8은 최적조건으로 도출된 $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ 으로 접합된 접합부를 EBSD를 통해 결정방위를 분석한 결과이며, 중심선을 기준으로 대부분의 결정립들이 같은 방위를 가지는 하나의 결정립으로 일체화된 것을 관찰할 수 있다.

제 2단계에서는 앞선 단계에서 도출된 최적조건을 적용하여 동일 크기의 판재를 100층으로 적층하여 확산접합을 수행하였으며, Fig. 9에 접합 시험편의 외관을 나타내었다. 시험편의 외관을 전체적으로 관찰한 결과

Fig. 8 EBSD orientation map on the joint bonded at $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$

Fig. 9 Diffusion bonded specimen made at $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ (100 layer)

Table 2 Tensile property of the joint bonded at optimum condition

Temp.	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
RT	212	532	67
	204	546	76
	213	543	70
-40 $^{\circ}\text{C}$	248	927	51
	246	930	52
	246	916	48
ASTM Req. (RT)	170	475	40

뒤틀림과 미접합 현상은 발견되지 않았다. 인장 시험편은 유로 에칭을 하지않은 가운데 부위에서 접합부에 수직방향으로 제작하였으며, 각각 3개씩의 시험편을 상온과 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 시험하였다. Table 2는 인장시험 결과와 American society of mechanical engineers (ASME)에서 규정한 STS 316L의 상온 인장값을 함께 나타내었다. 상온 인장특성의 경우, 본 연구에서 제작된 시험편의 인장특성은ASME에서 요구하는 STS316L의 인장특성을 충분히 만족하고 있다. 그리고 시험온도가 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 되면 항복강도와 인장강도는 각각 약 30 MPa와 약370 MPa 정도 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 연신율의 경우 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서도 평균50 % 정도 유지되는 것으로 보아, PCHE의 운전 온도인 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서도 연성저하에 따른 접합부의 물성 저하는 일어나지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 10은 최적조건으로 접합한 인장시험편과 결합율이 약 6 % 정도 관찰되었던 $800\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ 으로 접합한 인장시험편의 시험 후 외관 및 파단부위의 단면 미세조직을 비교, 관찰한 결과이다. 최적조건으로 제작한 인장시험편은 인장방향으로 변형이 상당히 일어난 후 파단 되었으며, 단면 미세조직을 통해서도 동일한 결과를 관찰할 수 있다. 또한 파단이 일어난 위치(접합부 혹은 모재)를 정확히 관찰할 수 없는 것이 특징이다. 하지만 $800\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ 에서 접합한 인장시험편은 최적조건의 인장시험편과 달리 단면 수축이 거의 없이 파단이 일어난 것이 관찰된다. 특히, 단면 미세조직 관찰결과 파단면으로부터 수 mm 떨어진 'A' 부위의 경우, 균열이 시험편의 외부로부터 시작되어 내부로 전파하는 것을 볼 수 있으며, 이 부위에 대한 확대 관찰결과, 결합으로부터 균열이 시작되어 접합부를 따라 전파한다는 것을 알 수 있으며, 파단이 최종적으로 일어난 부위 또한 접합부일 것으로 판단되었다. 단, 균열을 야기할 결합의 종류를 규명하기 위한 분석은 본 연구에서 수행하지 않았다.

Fig. 10 Tensile specimens and cross-sectional microstructures around fracture after the test. Tensile specimen bonded $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ after the test and cross-sectional microstructure around fracture, (b) Tensile specimen bonded $800\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ after the test and cross-sectional microstructure around fracture

2단계 접합시험편 대한 물성평가 결과를 바탕으로, 최적접합조건으로 PCHE 제작이 가능할것으로 판단할 수 있었다. PCHE 제품 제작을 위해서는 우선, Core 제작(3단계 접합)이 필요하다. PCHE Core제작을 위해서 두산중공업이 독자적으로 설계한 유로를 예칭 한 $400 \times 150 \times 1.5\text{ mm}$ 크기의 STS316L판재 100여장이

소요되었다. Fig. 11은 본 연구에서 제작된 PCHE core를 보여주며, 외관 관찰결과 뒤틀림이나 미접합된 부위는 관찰되지 않았다. 이후 STS316로 제작한 헤더를 수동 GTAW를 통해 조립하여 제품을 완성하였다. 완성된 수소스테이션용 PCHE 제품은 Fig. 12에 나타내었으며, H2의 입출구와 냉매의 입출구를 외관사진을 통해 확인 할 수 있다.

Fig. 11 PCHE Core bonded at optimum condition

한국가스안전공사 내압시험 규정 (KGS AC111)에 의하면 내압시험은 일반적으로 수압시험으로 평가하여야 하고, 부가되는 압력은 설계 압력의 1.2배가 되어야 하기 때문에, 본 연구에서 제작된 PCHE 제품은 설계 압력 990 bar의 약 1.2배인 1200 bar에서 수압시험을 실시하여 제품의 내압특성을 검증하였다. 그 결과 Fig. 13에서 확인할 수 있는 것과 같이 약 1200 bar의 압력에서 구조적 건전성이 확인되었으며, 향후 열교환 성능 검증 후 수소스테이션에 적용 할 수 있을 것으로 판단하였다.

Fig. 12 PCHE for hydrogen station

Fig. 13 Hydraulic test result under 1200 bar

4. 결 론

본 연구는 수소스테이션용 PCHE형 Compact 열교환기를 개발하기 위한 기반기술을 확보하는 것을 목적으로 하였다. 접합부의 결합 형성 및 기계적 물성에 미치는 접합조건의 영향에 대한 검토를 통해 도출된 최적접합조건으로 수소스테이션용 PCHE 제품을 제작하여 평가하였으며, 주요한 결과는 아래와 같다.

1) 미에칭 시험편에 대한 관찰을 통해, 접합부에는 산화물로 구성된 Spot성 결합 및 미접합부인 Line성 결합이 발생하는 것을 확인하였으며, 에칭에 의해 나타난 접합부의 Boundary는 미일체화된 결정립계인 것으로 밝혀졌다. 이러한 결합율과 결정립 미일체화율의 변화에 미치는 접합조건의 영향을 검토한 결과, 유지시간과 접합온도의 증가에 의해 결합율과 미일체화율은 감소하였고 특히 접합온도 증가에 의해 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 가압력 증가의 영향은 명확히 확인되지 않았다.

2) 접합부의 결합 및 미일체화 결정립 형성에 대한 접합조건의 영향을 검토하여, $900\text{ }^{\circ}\text{C} \times 90\text{ min} \times 8\text{ MPa}$ 를 최적조건으로 도출하였다. 도출된 최적조건으로 제작된 접합부에 대한 상온 및 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인장시험을 수행하여 접합부의 기계적 물성을 평가하였으며, ASME에

서 규정하는 STS316L에 대하여 요구하는 물성을 크게 넘어서는 기계적 물성을 확보할 수 있음이 확인되었다. 특히 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서도 50 % 정도의 연신율을 확보할 수 있음을 확인하였다.

3) 기계적 물성이 확인된 최적조건으로 수소스테이션용 PCHE Core를 제작하였으며, 헤더의 경우 수동 GTAW로 조립하였다. 완성된 PCHE 제품은 규정에 의거하여 1200 bar의 수압시험을 통해 열교환기의 구조건전성 확인하였다.

References

1. Y. Miwa, K. Noishiki and T. Suzuki, K. Takatsuki, Manufacturing Technology of Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger, *Kobelco technical review*, 32 (2013), 51-56
2. A. J. Jeon, T. J. Yoon, S. H. Kim, H. J. Kim and C. Y. Kang, Effect of Bonding Temperature and Bonding Pressure on Deformation and Tensile Properties of Diffusion Bonded Joint of STS304 Compact Heat Exchanger, *J. of Welding and Joining*, 32(4) (2014), 385-392 (in Korean)
3. K. N. Song and S. D. Hong, Evaluation of High-Temperature Structural Integrity Using Lab-Scale PCHE Prototype, *Transactions of Korean society mechanical engineering A*, 37(9) (2013), 1189-1194 (in Korean)
4. S. D. Hong and I. J. Sah, Evaluation of High-temperature Tensile Property of Diffusion Bond of Austenitic Alloys for S-CO₂ Cycle Heat Exchangers, *Transactions of Korean society mechanical engineering A*, 38(12) (2014), 1421-1426 (in Korean)
5. C. H. Song, S. H. Yoon and J. S. Choi, A Study of Diffusion Bonding Process for High Temperature and High Pressure Micro Channel Heat Exchanger Using Inconel 617, 27(2) (2015), 87-93 (in Korean)
6. A. J. Jeon, Effect of Bonding Conditions and Surface Treatment on Microstructure and Tensile Properties of Diffusion Bonded Joint for X5CrNi18-9 Multi-channel Heat Exchanger, *Master thesis, Pusan National University*, (2014) (in Korean)
7. 이영철, 수소스테이션 국내외 현황과 운영실적 및 시사점, 고효율수소에너지제조·저장, 이용기술개발사업단, 수소에너지정보, 38 (2012) (in Korean)
8. 임희천, 전력분야 수소에너지 이용 및 향후 전망, *J. of the electric world, Special Issues*, (2014), 31-40 (in Korean)
9. 정현석, 수소전기자동차 충전소 기술, 한국수소 및 신에너지학회, 수소차 산업 발전 심포지엄, (2017) (in Korean)
10. KWJS, Welding and Joining Handbook, Vol. III, (2007), 171-172 (in Korean)
11. K. Zhao, Y. Liu, L. Huang, B. Liu and Y. He, Diffusion bonding of Ti-45Al-7Nb-0.3W alloy by spark plasma sintering, *Journal of Materials Processing Technology*, 230 (2016), 272-279