

# 인코넬 617을 이용한 고온고압용 미세채널 열교환기의 확산접합 공정에 관한 연구

## A Study of Diffusion Bonding Process for High Temperature and High Pressure Micro Channel Heat Exchanger Using Inconel 617

송찬호(Chan Ho Song)<sup>†</sup>, 윤석호(Seok Ho Yoon), 최준석(Joon Seok Choi)

한국기계연구원 열공정극한기술연구소

Department of Extreme Thermal Systems, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, 305-343, Korea

(Received November 17, 2014; revision received December 8, 2014; Accepted: December 9, 2014)

**Abstract** Recently, the heat exchangers are requiring higher performance and reliability since they are being used under the operating condition of high temperature and pressure. To satisfy these requirements, we need special materials and bonding technology. This study presents a manufacturing technology for high temperature and high pressure micro channel heat exchanger using Inconel 617. The bonding performance for diffusion bonded heat exchanger was examined and analyzed. The analysis were conducted by measuring thermal and mechanical properties such as thermal diffusivity and tensile strength, and parametric studies about bonding temperature and pressing force were also carried out. The results provided insight for bonding evaluation and the bonding condition of 1200°C, and 50 tons was found to be suitable for this heat exchanger. From the results, we were able to establish the base technology for the manufacturing of Inconel 617 heat exchanger through the application of the diffusion bonding.

**Key words** Micro channel heat exchanger(마이크로 채널 열교환기), PCHE(인쇄기관형 열교환기), Inconel 617 (인코넬 617), Diffusion bonding(확산접합), Thermal diffusivity(열확산율)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: sch@kimm.re.kr

### 기호설명

$c_p$	: 비열 [kJ/kgK]
$k$	: 열전도율 [W/mK]
$R''$	: 열저항 [ $m^2K/W$ ]
$T$	: 온도 [K or °C]
$\Delta T_0$	: Fig. 9에서 정의된 1과 2사이의 불순물이 없는 상태에서의 온도차
$\Delta T_{12}$	: Fig. 9에서 정의된 1과 2사이의 불순물이 존재할 때의 온도차
$t$	: 두께 [m or mm]

### 그리스 문자

$\alpha$	: 열확산율 [ $m^2/s$ ]
$\gamma$	: 식(4)에서 정의된 변형률
$\rho$	: 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$\delta$	: 적층 높이 [m or mm]

### 하첨자

0	: 불순물이 없는 확산접합 상태
12	: 불순물이 있는 확산접합 상태
1, 2	: Fig. 9에서 정의된 위치
c	: 불순물
i	: 인코넬

## 1. 서론

발전 플랜트의 효율 향상을 위하여 시스템은 고온 고압화 되어가고 있고 이에 대응하는 요소부품도 보다 높은 수준의 요건이 필요하게 되었다. 플랜트에서 가장 많이 사용되고 있는 요소부품의 하나인 열교환기도 초고온 내압환경에 맞는 성능 및 신뢰성과 높은 집적도가 요구되는데 이를 만족시키기 위하여 재질, 접합 방법 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

작동온도가 800℃ 이상의 고온에서는 SUS 재질의 열교환기를 사용하기 어렵기 때문에 인코넬(Inconel)과 같은 특수합금 등이 점차 사용되고 있다. 본 연구에서 사용하고 있는 인코넬 617은 고온 열교환기의 선도적인 재질로서 고온에 매우 강하며 내산화성이 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 고온고압의 환경에서는 플레이트 간의 접합이 매우 중요하다. 높은 유용도와 내압성을 갖는 인쇄기판형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE)의 접합에 응용하고 있는 확산 접합은 피접합물을 접촉시켜 가열 및 가압함으로써 모재를 용융시키지 않고 원자간의 확산을 통해 접합시키는 방법이다.<sup>(2,3)</sup> 모재를 용융시키지 않는다는 점에서 용접과 다르며, 별도의 접합재를 사용하지 않는다는 면에서 브레이징과 다르다. 접합부는 모재와 거의 동일한 조직과 성질을 갖게 되며 기존 용접제품, 브레이징 제품에 비하여 내열성이나 접합강도가 훨씬 높은 효과가 있으므로 초고온 내압환경에 유리한 접합방식이다. 이와 같이 확산접합에 대한 많은 관심과 연구가 진행되어 왔으나 접합면에 대한 정량적인 해석은 충분히 제시되어 있지 않다.<sup>(4-6)</sup> 더욱이 인코넬 재질에 있어서는 수행된 바가 거의 없는 상황이다.

인코넬(또는 인코넬 617) 열교환기와 관련하여 수행된 연구들은 재료 또는 화학과 관련된 연구가 대부분이다. Duval et al.<sup>(7)</sup>은 인코넬 617은 고온용 열교환기의 주요한 후보 재질이며 약 850도에서 산화에 의한 불순물이 예측되는 것으로 지적하였고 산화시험을 수행하여 관련 메커니즘을 제시하였다. Hsu<sup>(8)</sup>의 연구에서는 인코넬 합금이 고온에서 좋은 기계적 성질을 가지고 있으므로 발전산업에서 열교환기 튜브 등의 재료로 널리 사용되고 있다고 하였다. Jo et al.<sup>(9)</sup>은 산화에 의한 인코넬 617의 열적 노화현상을 연구하였고 시간에 따라 크롬이 감쇄된 영역을 나타내었다.

이와 같은 논문들은 재료 기반의 연구 등이 대부분이다. 따라서 실제로 확산접합된 인코넬 열교환기의 품질상태를 평가하는 것은 어렵기 때문에 제작기술에 대한 확립이 매우 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 열교환기 코어를 제작하기 위하여 확산접합을 사용하였으며 이에 대한 설계해석을 수행하였다. 열교환기의 재질은 인코넬 617이며 진공챔버에서 확산접합이 이루어졌다. 열물성 분석을 통하여 열교환기의 신뢰성을 강화하기 위한 연구가 시도되었다. 확산접합은 두 가지 관점에서 해석되었다. 첫 번째는 기계적 물성뿐만 아니라 열물성을 측정하여 평가를 하였고, 두 번째는 접합 요소인 접합온도, 시간, 인가힘에 관한 파라미터 해석을 통하여 열교환기 접합에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 열교환기 코어 제작에 영향을 미치는 인자를 도출하고 해석하여 최적의 접합 조건을 제시하고자 한다.

## 2. 열교환기 코어제작 및 실험방법

### 2.1 인코넬 시편 선정

접합을 위한 플레이트 시편의 재질은 인코넬 617로 고온에서 강도 및 내부식성이 강한 니켈-크롬-코발트-몰리브덴 합금이다. 확산접합 설비를 고려하여 원판으로부터 Fig. 1과 같이 채널이 없는 플레이트를 절삭하였다. 플레이트의 크기는 200 mm×100 mm, 두께는 1.6 mm 직사각형 형태이다. 플레이트는 폴리싱(polishing) 처리하였고, 표면조도를 측정한 결과 120 nm(RMS)의 수준을 나타내었다(Fig. 2).

### 2.2 채널 제작

인코넬은 채널 형상을 제작하기에 매우 힘든 재질이다. 인코넬 600의 경우 에칭작업이 가능하여 용이하게 채널 형상을 제작할 수 있었다. 그러나 인코넬 617

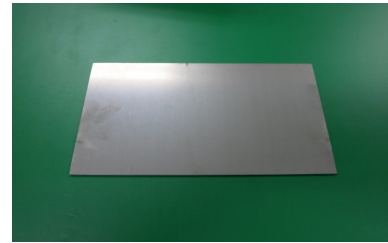


Fig. 1 The specimen Inconel plate for diffusion bonding.

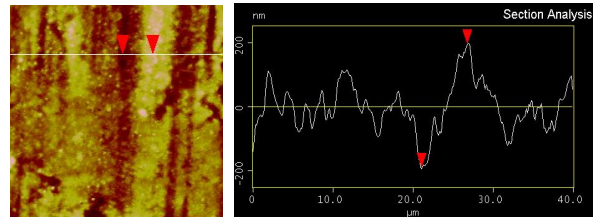
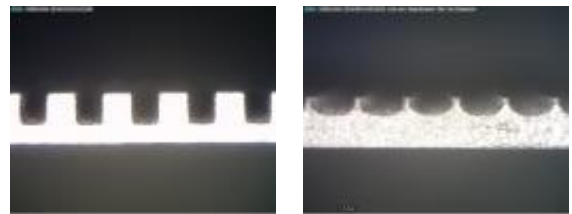


Fig. 2 Roughness of Inconel 617 plate surface after polishing.



(a) rectangular shape (b) circular shape  
Fig. 3 The shape of channels in Inconel 617 plate.

은 600보다 기계적 강도 및 내산화성이 우수하여 에칭에 의한 채널 제작이 용이하지 않다. 기계적 가공에 의한 채널형상은 Fig. 3(a)와 같이 단면을 직사각형 형태로 자를 수 있고 깊이 방향으로 깊게 형상을 만들 수 있다. 이에 반해 에칭에 의한 채널 가공은 Fig. 3(b)와 같이 반원상태의 모양이 형성되므로 깊이 방향으로의 가공은 한계가 있으며 이에 따라 채널 사이의 간격, 개수에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 접합성을 평가하기 위하여 채널형상이 없는 플레이트의 접합면을 대상으로 해석을 수행하였고 이에 대한 결과는 향후 채널형상을 가지는 플레이트에 적용될 예정이다.

### 2.3 확산 접합

채널 간의 접합은 확산접합(diffusion bonding)에 의해 수행되었다. 녹는 점 이하의 적정 온도에서 일정한 압력으로 시편을 가압하면 접합모재간 고체상의 확산에 의해 접합되는 방식이다.<sup>(10)</sup> 확산접합의 과정은 다음과 같다. 먼저 전처리 과정으로 시편의 세척과 건조가 필요하다. 각 플레이트는 Fig. 4에 나타나 있는 연구원 보유의 확산접합 설비인 진공챔버의 노(furnace) 안에 있는 그라파이트(graphite) 판 위에 차례로 적층되어지고, 이후에 챔버가 밀폐된 상태에서 진공상태로 진행된다. 챔버 내부의 진공도가  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-5}$  torr로 도달된 후에 가열과정이 시작된다. 가열과정은 20분 내로 100℃까지 승온하고 이후에 접합온도까지 80분 내로 승온시킨 후 접합온도에서 주어진 시간 동안 유지한 뒤 가열을 멈추고 자연냉각하게 된다. 가열과정 동안에는 일정량의 압력으로 시편을 눌러주게 된다. 냉각 시에는 재료와의 반응을 최소화하고자 불활성 기체를 주입하여 냉각시키게 된다.

### 2.4 물성 측정

물성측정은 열물성과 기계적 물성으로 나누어서 수행하였는데, 열물성으로는 열확산율(thermal diffusivity), 기계적 물성으로는 인장강도(tensile strength)를 측정, 분석하였다. 열확산율의 정의로부터 밀도와 비열값을 이

용하여 재료의 열전도도를 구할 수 있으며 열저항 모델의 해석에 이용이 가능하다(식(1)).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}, k = \alpha \times \rho c_p \quad (1)$$

열확산율은 LFA(Laser Flash Analysis, Netzsch LFA 447)을 이용하여 측정하였고, 비열은 DSC(Differential Scanning Calorimetry, Mettler Toledo DSC-1 System)을 이용하여 측정하였다(Fig. 5). LFA 시편은 직경 12.5 mm 원형타입으로 Fig. 6과 같이 9개의 다른 위치에서 샘플을 취하여 평균값으로 계산하였다. 인장강도 시편의 경우 Fig. 7과 같은 길이방향으로 긴 모양의 시편이 필요하므로 38개의 플레이트를 확산접합 한 뒤 접합면에 수직방향으로 잘라내어 시편을 제작하였고 Instron 4484를 이용하여 측정하였다.

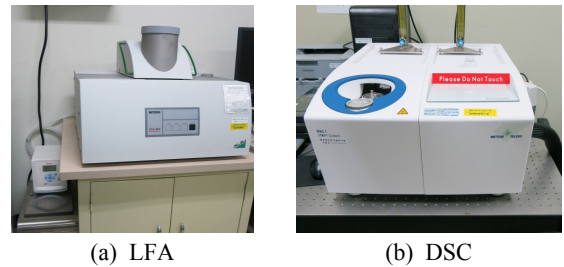


Fig. 5 LFA and DSC for measuring thermal properties.



Fig. 6 Specimens and diffusion-bonded plate for LFA.

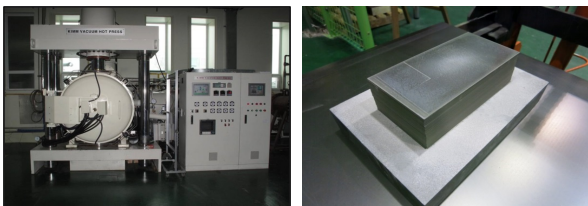


Fig. 4 Vacuum hot press chamber and diffusion-bonded plates.

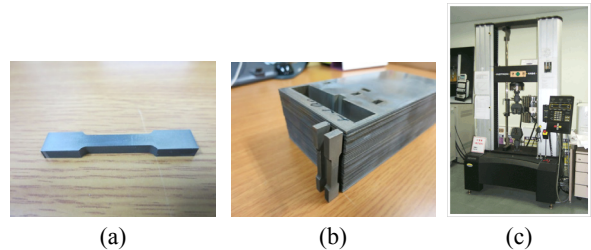


Fig. 7 Specimen, diffusion-bonded plates, Instron for measuring tensile strength.

### 3. 접합성 평가

본 연구에서는 플레이트 사이의 접합이 잘 되었는지 평가하기 위하여 열물성 측정, 인장강도 시험을 통한 물성분석으로 판단하였다. 열물성 평가는 확산접합된 플레이트의 열확산율을 측정하여 단일판에서의 물성치와 비교분석 후 접합성에 대한 평가를 수행하였고, 기계적 강도를 평가하기 위하여 인장강도를 측정 후 그 값을 분석하였다.

#### 3.1 열물성 평가

확산접합시 시편에 가하는 힘을 동일한 상태로 하고 접합온도를 변수로하여 열확산율을 측정하였다. 시편은 2장의 플레이트를 서로 접합하도록 준비하였고, 접합온도는 800, 900, 1000, 1100℃로 구분하였으며 접합시간은 1~3시간으로 하여 비교하였다. 열확산율 측정온도는 LFA의 측정범위에 따라 25, 100, 200, 300℃에서 측정하였으며 3번 측정된 평균값을 취하였다. 열확산율 측정결과는 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8은 크게 3가지 서로 다른 결과를 보여주고 있다. 첫 번째 그룹은 그래프 상에 가장 위에 존재하는 결과로 단일 플레이트의 결과도 포함하고 있으며 그 오차는 3%안에 존재하고 있다. 즉, 확산접합한 플레이트의 열확산율 값과 순수 인코넬 소재의 열확산율 값이 거의 동일하다는 것으로 확산접합이 잘 이루어졌다고 판단할 수 있다. 두 번째 그룹은 접합온도 1000℃, 접합시간 1시간의 조건에서 확산접합이 진행된 결과로 첫 번째 그룹과 열확산율 값의 차이를 보이고 있다. 세 번째 그룹은 접합온도 800℃, 접합시간 3시간의 조건에서 진행된 결과로 다른 그룹과 매우 차이가 있는 결과를 나타내고 있다. 접합시간이 짧을수록, 접합온도가 낮을수록 확산접합이 불안정하게 되는데 Fig. 8과 같이 열

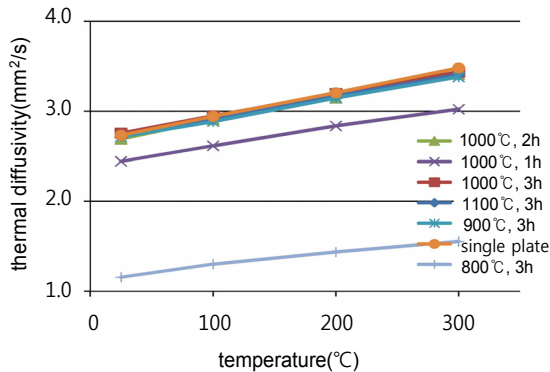


Fig. 8 The comparison of thermal diffusivity with bonding temperature.

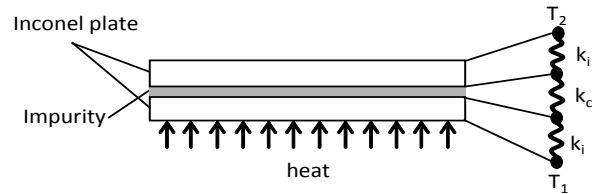


Fig. 9 Thermal resistance model considering impurities inside the plates.

확산율 분석을 통하여 정량적으로 결과를 도출할 수 있다. 특히, 800℃ 접합온도 조건에서는 플레이트가 붙어 있지 않고 떨어져 버리는데 접합면 사이에 다른 불순물이 삽입되어 있는 것으로 볼 수 있으며 이는 열저항 모델을 통하여 분석이 가능하다.

Fig. 9는 확산접합의 해석을 위한 열저항 모델을 나타낸 것으로 2개의 인코넬 플레이트 사이에 불순물이 들어있다고 가정하였다.  $k_i$ 는 인코넬 플레이트의 열전도율이고  $k_c$ 는 불순물에 대한 열전도율을 의미한다. 일정 열유속 조건에서 열저항 모델을 이용하여 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$R_{12}'' = \frac{\Delta T_{12}}{\Delta T_0} R_0'' = \frac{k_0}{k_{12}} R_0'' \quad (2)$$

여기서 하첨자 0는 인코넬 플레이트 사이에 불순물이 없는 경우의 확산접합된 상태를 의미하고, 하첨자 12는 불순물이 존재하는 경우의 확산접합된 상태를 의미한다. LFA에 의해 측정된 열확산율을 토대로 식(1)을 이용하여 열전도율을 구할 수 있는데 밀도와 비열은 알려진 값을 이용하여 계산하였다. 이와 같은 과정을 통하여  $k_0$ , 즉  $k_i$ 와  $k_{12}$ 는 각각 12.42, 5.58 W/(mK)로 구할 수 있었다. 구하여진 열전도율을 이용하여 열저항 값인  $R_{12}''$ 를 얻을 수 있게 된다. 불순물을 공기로 가정한다면 공기의 열전도율 값인  $37.3 \times 10^{-3}$  W/(mK)(450 K에서의 값에 해당)을 적용하여 불순물의 두께를 유추할 수 있는데, 두께  $t_c$ 는 다음의 식으로 계산될 수 있다.

$$R_{12}'' = R_0'' + R_c'' = \frac{2t_i}{k_i} + \frac{t_c}{k_c} \quad (3)$$

$$t_c = \left( R_{12}'' - \frac{2t_i}{k_i} \right) \times k_c$$

여기서  $t_i$ 는 인코넬 단일 플레이트의 두께로 1.6 mm이다. 식(3)을 이용하여 불순물의 두께를 계산하면 약 12  $\mu\text{m}$ 의 값을 얻을 수 있는데 이러한 결과로부터 확산접합 공정에 있어서 불순물이 공기인 경우 10  $\mu\text{m}$  수준의 불순물 관리가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 인장강도 평가

기계적 강도의 대표적인 것으로 인장강도에 대한 시험을 수행하여 비교하였다. 인장강도에 대한 시편을 제작하기 위하여 Fig. 7(b)와 같이 플레이트 38장(약 60 mm)을 쌓아서 확산접합을 수행하였다. 접합시간은 모두 5시간으로 하였다.

온도에 따른 인장강도 값을 Fig. 10에 나타내었다. 접합온도는 1000, 1075, 1150℃로 구분하였고, 플레이트의 적층 방향으로 자른 시편 뿐 아니라 가로방향으로 절단한 시편의 값과 문헌값도 같이 비교하였다. 접합온도가 증가함에 따라 인장강도 값은 거의 선형적으로 증가하고 있고 100℃ 증가 시 약 110 MPa의 인장강도 증가값을 확인할 수 있다. 가로 방향의 시편에서의 인장강도와는 상당한 차이를 보이고 있는데 이는 인장강도 시험의 당기는 힘의 방향과 접합 방향이 수직인 상황에 기인한다. 시험 결과 값은 문헌값과도 어느 정도 차이를 나타내고 있으나 내압테스트를 위한 허용압력 보다는 높은 값을 나타내고 있다.

## 4. 내압성 시험을 통한 접합인자 분석

### 4.1 내압성 시편 및 접합인자 선정

내압성 시험을 위한 시편은 Fig. 11과 같이 확산접합된 플레이트의 내부를 빈공간으로 만들고 두 측면은

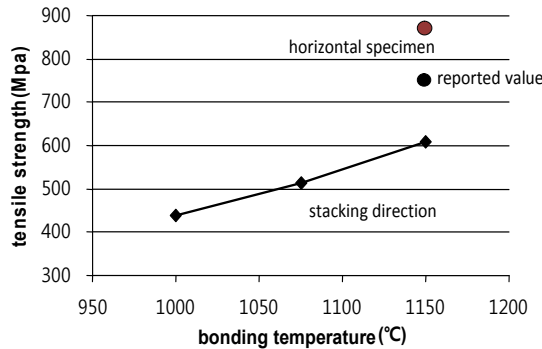


Fig. 10 The comparison of tensile stress with bonding temperature.

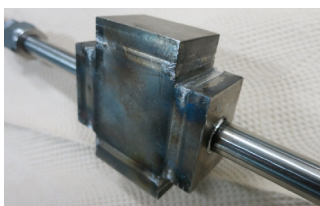


Fig. 11 The specimen for pressure-resistant test.

밀폐시키고 다른 두 측면에 헤더를 용접하여 파이프를 통한 수압 시험이 가능하도록 제작하였다. 사용된 플레이트 수는 30개이며 수압은 300 bar로 시험하였다.

앞의 열 및 기계적 물성 분석을 통하여 주요 접합인자로 선정한 접합온도, 접합시간 외에 시편에 대한 인가힘(pressing force) 등 세 가지를 고려할 수 있다. 본 절에서는 높은 압력으로 내압 시험을 수행하고자하여 앞절에서 확인한 접합조건 중 접합 안정 영역보다 조건이 더 가혹한 영역에서 확산접합을 수행하였다. 접합온도는 재료의 녹는 점을 고려하여 1150℃에서 1250℃, 인가힘은 50, 60 ton, 접합온도 도달 시에서의 접합시간은 5, 10시간으로 선정하였다. 이상의 접합조건을 정리하여 시험 케이스를 Table 1과 같이 나타내었다.

### 4.2 실험결과

내압성 시험은 물을 이용하여 시편 내부를 300 bar까지 가압 후 누설이 있는지 확인하여 성공여부를 판단하였다. 열교환기의 성능은 유로 형상과 밀접한 관계가 있는데 접합 시에 유로가 변형이 일어나지 않도록 해야 한다. 따라서 내압 시험의 결과와 더불어 중요한 인자로 적층방향으로의 인가힘에 대한 변형정도를 살펴보는 것이 매우 중요하다. 이에 대한 변형률( $\gamma$ )은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\gamma(\%) = \frac{\delta_{before} - \delta_{after}}{\delta_{before}} \times 100 \quad (4)$$

여기서  $\delta$ 는 적층높이에 해당된다.

Table 1 Test cases in various bonding parameters

No.	Bonding temp.(°C)	Bonding time(hours)	Pressing force(ton)
1	1150	5	60
2	1150	10	60
3	1200	10	60
4	1200	10	50
5	1250	10	60
6	1250	10	50

Table 2 The results of pressure-resistant test

Pressing force(ton)	Bonding temperature(°C)		
	1150	1200	1250
50	-	-	10
60	5	10	10

내압 시험에 대한 결과와 변형률 값을 Table 2와 Fig. 12에 나타내었다. 실험은 실험 중간에 나오는 결과를 고려하여 case 1, 2, 5, 3, 6, 4의 순서로 진행하였다.

Table 2의 숫자 5, 10은 접합시간을 나타내며 시험을 수행한 케이스에 접합시간을 표시하였다. 누설이 발생하여 실패한 경우에는 회색으로 표시하였고, 성공한 경우에는 노란 색으로 표시하였다. 시험조건 1150℃에서 실패한 결과로부터 접합시간은 10시간으로 유지한 채 인가힘을 60, 50 ton으로 변화시키면서 시험을 수행하였다. 접합온도 1150℃와 그 밖의 접합온도를 비교한 결과 접합온도가 결과에 보다 민감한 영향을 주는 것을 알 수 있었다. Table 2의 결과로부터 1200℃ 이상 접합시간 10시간, 50 ton의 인가힘의 범주에서 확산접합을 해야 함을 판단할 수 있다. 적층방향으로의 인가힘에 대한 변형률을 Table 2의 성공한 조건에 대해서 Fig. 12에 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 가혹한 조건으로 갈수록 변형률이 점차 증가함을 나타내고 있다. 접합온도의 영향을 살펴보고자 60 ton의 동일한 인가힘에서 접합온도를 1250℃에서 1200℃로 변화시켰을 때(case 5 → case 3) 변형률은 1/3(9.3% → 3.1%)로 감소하였다. 확산접합 과정에서는 열교환기 내의 유로를 확보하는 것이 중요하므로 과도한 변형률은 피하는 것이 바람직하다. 인가힘에 의한 변형률을 살펴보고자 1250℃에서 50 ton으로(case 6) 인가힘을 변경하였을 경우의 변형률을 알아보았다. 변형률은 6.2%로 case 5 대비 2/3수준으로 작아짐을 확인하였다. 이러한 결과들은 마지막 시험 케이스인 case 4의 조건을 유추할 수 있도록 한다. 내압시험에서 성공한 조건이고 case 5의 조건 대비 접합온도와 인가힘을 Table 1과 같이 변경하게 되면 약 1/9까지 변형률이 감소될 것으로 예측할 수 있고 실제로 접합온도 1200℃, 인가힘 50 ton 시험조건에서 변형률은 Fig. 12와 같이 약 0.9%의 값을 나타내었다.

이와 같은 결과를 가지고 단면미세조직 사진을 분석하기 위하여 접합면에서의 SEM 사진을 비교 분석하였

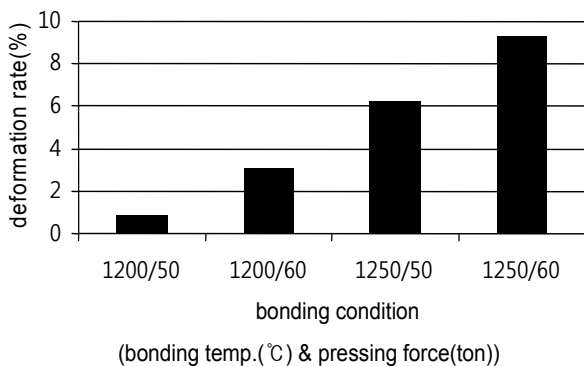


Fig. 12 Deformation in stacking direction(%).

다(Fig. 14). 접합면에서의 결정계면의 상태는 접합이 성공적인 경우와 실패의 경우에 있어서 확연히 다른 경향을 보이고 있다. 확산접합이 잘 이루어진 경우 접합계면의 경계 크기가 크고 두 플레이트 간의 접합면까지 계면이 확장되어진 현상을 확인할 수 있다.<sup>(11)</sup> 따라서 접합의 질적인 측면을 분석하고자 할 때 계면 상태를 살펴본다면 보다 확실한 접합성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

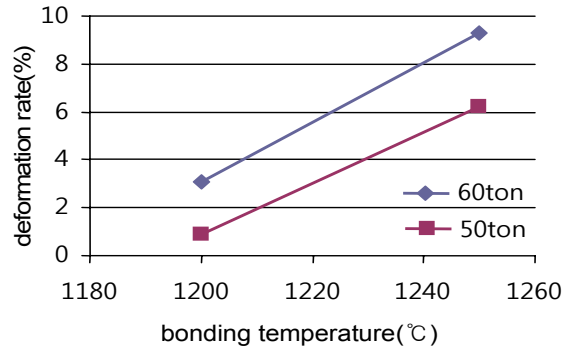
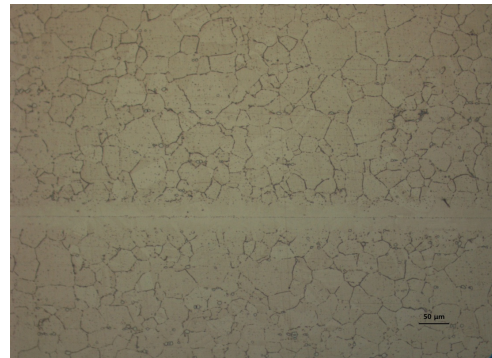
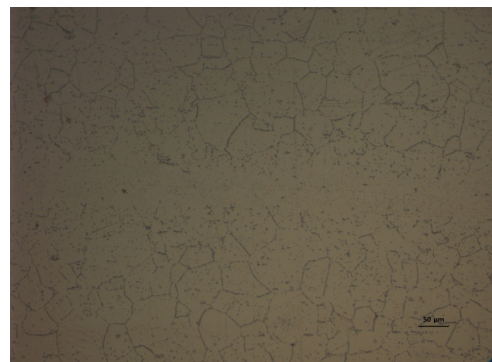


Fig. 13 The effect of deformation in different condition.



(a) 1150℃, 60 ton



(b) 1200℃, 50 ton

Fig. 14 Microstructure in cross section of diffusion-bonded plates.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 인코넬 617을 이용하여 고온고압용 열교환기의 제작기술에 대한 내용을 제시하였다. 열교환기의 채널제작, 코어제작 및 접합성 평가를 수행하였고, 접합성 평가는 열물성 시험과 인장강도 시험을 비교 분석하였다. 열물성 측정에 의한 분석은 열저항 모델을 적용하여 불순물이 공기인 경우 그 관리가 10  $\mu\text{m}$  수준으로 되어야 함을 확인하였다. 또한 내압시험을 통하여 접합온도, 인가힘에 대한 인자 분석을 수행하였다. 이를 통하여 접합 성공 조건을 정의할 수 있었고, 그 외 플레이트의 적층방향으로의 변형률이 열교환기 제작에 중요한 요소임을 밝혔다. 기준 조건으로 삼은 접합온도 1250 $^{\circ}\text{C}$ , 인가힘 60 ton 대비 최적 조건으로 찾은 1200 $^{\circ}\text{C}$ , 50 ton에서 그 변형률 비가 0.1% 이내로 들어옴을 알 수가 있었다. 이상의 결과와 더불어 접합면에서의 미세조직에 대한 관찰을 통하여 확산접합 상태를 확인하였다. 계면의 확장정도로서 접합상태를 판단할 수 있는 근거자료를 확보하였다. 이와 같은 연구를 통하여 확산접합기술을 적용한 인코넬 617 열교환기 제작에 관한 기본 기술을 수립할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국기계연구원 기관고유사업 “극한환경 고신뢰성 열교환기술 개발(2012~2014)”의 일환으로 수행되었다.

#### References

1. Li, X., Kinimont, D., Pierres, R. L., and Dewson, S. J., 2008, Alloy 617 for the high temperature diffusion-bonded compact heat exchangers, Proceedings, ICAPP 2008, Anaheim, CA, USA, pp. 282-288.
2. Mylavarapu, S. K., Sun, X., Glosup, R. E., Christensen, R. N., and Patterson, M. W., 2014, Thermal hydraulic performance testing of printed circuit heat exchangers in a high-temperature helium test facility, Applied Thermal Engineering, Vol. 65, No. 1/2, pp. 605-614.
3. Kim, J. H., Baek, S., Jeong, S., and Jung J., 2010, Hydraulic performance of a microchannel PCHE, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 14/15, pp. 2157-2162.
4. Lee, Y. S., 2007, A study on diffusion brazing of aluminium alloys by an eutectic reaction, Ph.D thesis, Inha University, Korea.
5. Park, Y. H. and Kang, C. Y., 2006, Sinter diffusion bonding technology for assembly and hybrid of materials, Journal of the Korean Welding Society, Vol. 24, No. 5, pp. 7-10.
6. Samavatian, M., Halvaeae, A., Amadeh, A. A., and Khodabandeh, A., 2014, An investigation on microstructure evolution and mechanical properties during liquid state diffusion bonding of Al2024 to Ti-6Al-4V, Materials Characterization, Vol. 98, pp. 113-118.
7. Duval, A., Miserque, F., Tabarant, M., Nogier, J. P., and Gedeon, A., 2010, Influence of the oxygen partial pressure on the oxidation of Inconel 617 alloy at high temperature, Oxidation of Metals, Vol. 74, No. 5/6, pp. 215-238.
8. Hsu, S. S., 1993, Time-dependent crack growth in a heat-resistant alloy Inconel 617, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 30, No. 4, pp. 302-313.
9. Jo, T. S., Kim, S. H., Kim, D. G., Park, J. Y., and Kim, Y. D., 2008, Thermal degradation behavior of Inconel 617 alloy, Metals and Materials International, Vol. 14, No. 6, pp. 739-743.
10. Ontaku, T., 1988, The theory and basis of diffusion bonding, Journal of the Korean Welding Society, Vol. 6, No. 1.
11. Li, X., 2012, Development and qualification of diffusion bonding procedures for microchannel heat exchangers, Proceedings, ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.