

관형 열교환기의 기계적 건전성 확보를 위한 유체-고체 연성해석과 브레이징 접합부의 국부적 물성분포 분석

강석훈* · 박상후† · 민준기** · 정호승** · 손창민* · 하만영* · 조종래*** · 김현준****

* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대-롤스로이스 대학기술센터, *** 해양대학교 기계에너지시스템공학부
**** 동화엔텍(주) 기술연구소

Analysis of Two-Way Fluid-Structure Interaction and Local Material Properties of Brazed Joints for Estimation of Mechanical Integrity

Seok Hoon Kang*, Sang Hu Park†, June Kee Min**, Ho Sung Jeong**, Chang Min Son*,
Man-Young Ha*, JongRae Cho*** and Hyun Jun Kim****

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** PNU & Rolls-Royce University Technology Center, Pusan Nat'l Univ.,

*** Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime Univ.

**** R&D Center, DongHwa Entec Co., LTD.

(Received March 8, 2012 ; Revised October 3, 2012 ; Accepted October 3, 2012)

Key Words: Local Material Properties(국부 재료물성), Brazing Joint(브레이징 접합부), Mechanical Integrity(기계적 건전성), Heat Exchanger(열 교환기)

초록: 최근 환경적 요인으로 친환경 에너지나 효율성이 높은 에너지관리 기술에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 열교환기는 역사가 오래된 기계장치이지만 최근 온실가스 저감을 위해 항공기 등에 응용을 시도함에 따라 그 가치가 증가하고 있다. 또한 이러한 열교환기가 항공기 엔진에 적용될 경우 고온, 고압의 조건을 견디어야 함으로 기계적 건전성 평가는 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 관형 열교환기의 취약부인 브레이징 접합부의 국부적인 물성분포 분석과 유체-고체 연성해석을 통하여 구조적 안전성을 평가하였다. U자형 단일 곡관을 제작하여 해석과 실험을 통하여 신뢰성을 검증하였고 브레이징 조건 변경을 통하여 재료 분포를 확인하였다.

Abstract: Recent years have witnessed a strong need for eco-friendly and energy-efficient systems owing to global environmental problems. A heat exchanger is a well-known mechanical rig that has long been used in many energy systems. The use of a heat exchanger in an airplane engine has been attempted. In this case, the heat exchanger should be redesigned to be compact, lightweight, and highly reliable, and the issue of mechanical integrity gains importance. Therefore, in this study, we proposed a method for evaluating the mechanical integrity of a tube-type heat exchanger. A U-shaped single tube was used as an example, and its behavior and stress distribution were studied using fluid-structure interaction (FSI) analysis.

1. 서론

최근 환경문제가 대두되면서 고효율 에너지 기기에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 열에너지에 대한 효율성을 올리기 위해서 열 회수 장치를 개발하거나 완전연소를 유도하여 화석연료를 절감하는 방안을 제시하는 것은 열에너지 관리기술

(thermal management technology)의 좋은 사례라고 할 수 있다. 이러한 고효율 에너지 시스템에서 핵심적인 역할을 하는 기계장치 중 하나가 열 교환기(heat exchanger)이다.^(1,2) 열 교환기는 동력 및 열 에너지 관련 기기에 오래 전부터 사용되어 왔다. 최근에는 온실가스 저감요구에 따라 항공기 엔진과 같은 고온, 고압 조건에도 맞는 열 교환기 개발에 연구가 진행되고 있다.⁽³⁾ 항공기 엔진에 열 교환기가 적용될 경우, 고온 고압조건에 견딜 수 있는 소재선택, 경량화가 요구되는 최적설계 뿐만 아니라 기계적 신뢰성이 매우 중요하게 된다. 현

† Corresponding Author, sanghu@pusan.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

재 주로 사용되는 재료는 인코넬(inconel) 계열 또는 니켈(nickel) 계열의 내열합금이 주로 사용된다. 기계적 신뢰성 입장에서 보면, 일반적으로 열 교환기는 관형 또는 관형으로 나누어지는데 두 경우 모두 이음새나 연결부분에 누수현상을 방지하는 기술과 용접, 브레이징(brazing)과 같은 영구접합이 필요한 부분에 대하여 진동, 반복적인 압력 등의 물리적 하중에 대하여 기계적 건전성을 갖도록 설계를 해야 한다.

따라서 본 연구에서는 항공기 엔진에 적용 가능한 관형 열교환기(tube-type heat exchanger)에서 취약부로 판단되는 미세 관과 연결 판(tube sheet)의 브레이징 접합부의 기계적 건전성을 평가하고자 한다. 이러한 접합부의 경우 재료물성이 고온의 접합과정과 접합재(filler material)의 영향으로 국부적인 물성 변화가 많다. 따라서 국부적인 물성을 고려한 평가방법이 필요하며, 현재까지 다양한 방법들이 제안되어 왔다.⁽⁴⁻⁹⁾ 본 연구에서는 유동조건을 고려하여 전체 형상에 대한 해석을 먼저 수행하고 그것을 통하여 얻어진 접합부 부근의 변형량을 경계조건으로 고려하여 다음 단계로 국부 해석을 수행하는 방법을 제안하였다. 이 때 국부적 물성을 나노 인덴테이션(nano-indentation)으로 구하여 적용하였다. 또한, 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 피로수명과 단일 물성적용으로 구한 피로수명을 비교하여 그 차이점을 분석하였다.

2. 단일 U자형 관의 유체-고체 연성해석

2.1 난류 유동해석 모델

관형 열교환기의 미세 관(tube)들은 연결 판에 브레이징으로 접합이 되어 있다. 따라서 미세 관 사이의 유동현상을 정확하게 예측해야만 미세 관에 걸리는 압력과 변형량을 계산해서 수명과 안정성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 미세 관 사이의 유동을 해석하기 위하여 유동해석에 많이 사용되고 있는 난류 유동모델을 몇 가지 검토하고 본 연구에 가장 적합한 난류모델을 선택하였다. 검토한 난류모델은 가장 많이 사용하는 $k-\epsilon$ 모델, SST(shear stress transport) 모델, LES (large eddy simulation) 모델로 하였다.^(10,11)

난류모델 선정을 위한 해석모델은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 단일 U자형 관(직경 1.5 mm, 두께 0.12 mm)으로 하였다. U자형 관 외기의 유동장 크기는 높이 (H) 50 mm, 폭 (W) 20 mm, 길이 (L) 300 mm의 크기이며, 해석 경계조건으로 입구 쪽

외기는 항공기 엔진의 요구조건인 14.45 m/s 속도로 연속적으로 외부에서 유입되는 것으로 가정하였다. 유동장의 양 옆은 반복대칭 경계조건(periodic condition)을 부여하였으며, 출구 쪽 외기는 대기압 조건으로 설정하였다. 외기로부터 영향을 받아 압력데이터를 얻을 벽면에 15 층의 격자를 생성해 주었으며 유동해석은 ANSYS사의 ICEM CFD를 이용하고 약 700 만 개의 격자를 생성해 주었다. 해석 정밀도를 높이기 위하여 관 주변에는 육면체 요소(hexahedron element)를 사용하였다[Fig. 1(b) 참조].

세가지 난류모델 비교를 위해 U자형 튜브의 첫 번째 열의 x 축으로 10 mm, 떨어진 지점의 높이 50 mm 인 지점에서 0.02 초일 때의 각 난류모델의 속도 값을 Fig. 2(a)-2(b)와 같이 비교하였다. $k-\epsilon$ 모델의 속도는 시간에 따라 변화가 없이 일정하게 나타났다. 또한 SST 모델과 LES 모델의 경우 U

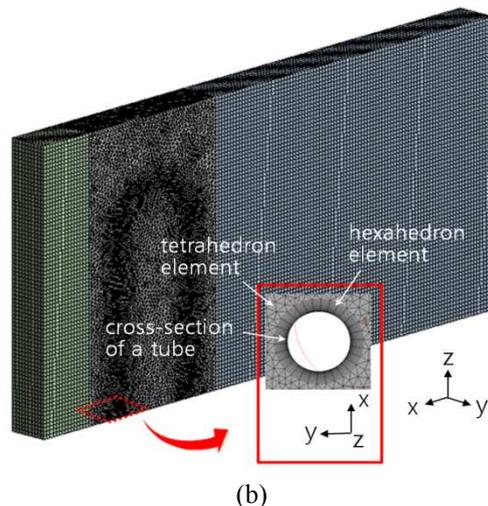
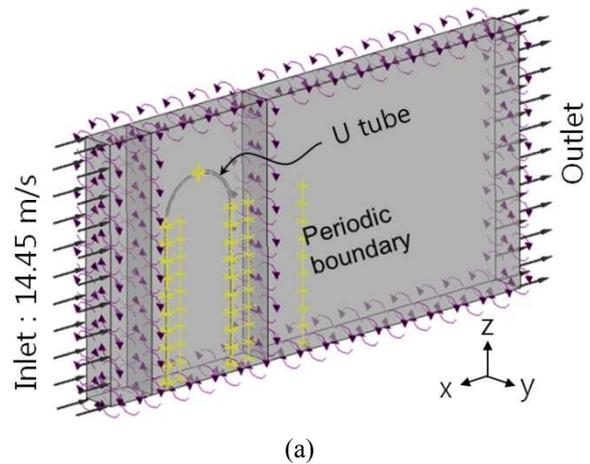
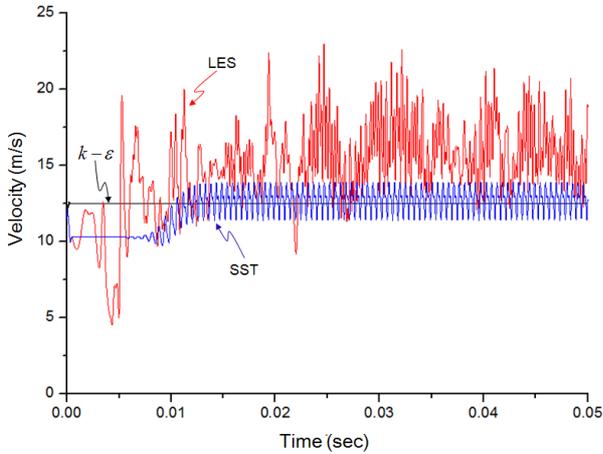
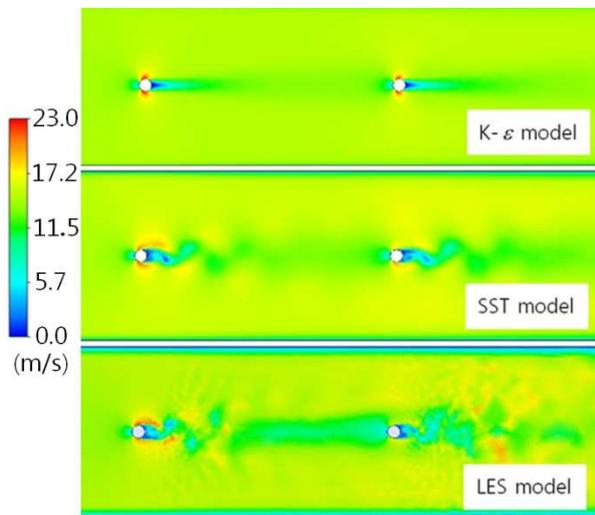


Fig. 1 (a) Analysis model of single U tube and its boundary conditions, and (b) mesh generation of the model



(a)



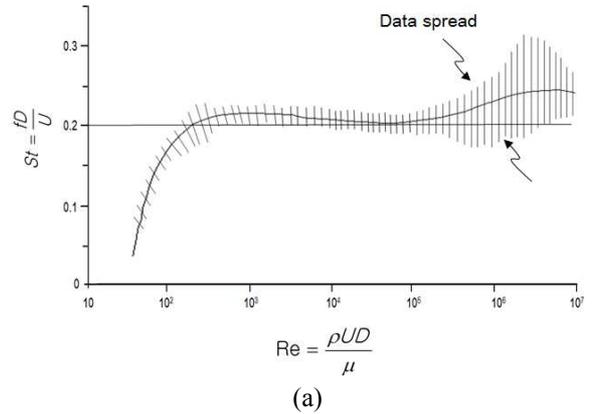
(b)

Fig. 2 Comparison of the results come from three different non-linear models: $k-\epsilon$, SST, and LES model; (a) Velocity profile and (b) velocity distribution

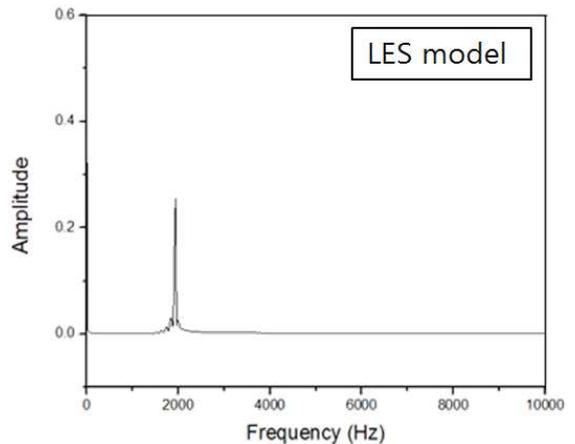
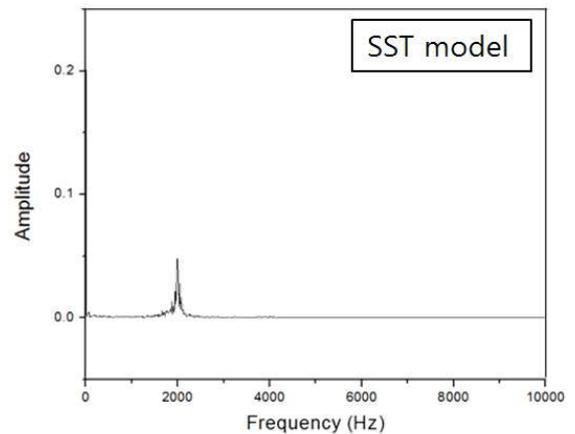
자형 관을 지나면서 후류(slip stream)에 의해 국부적인 속도분포를 나타내며 SST 모델의 경우 반복적인 속도 패턴을 나타내었다. 또한 정량적인 난류모델 평가를 위하여 Fig. 3(a)와 같이 직선형태의 관 주변 유동실험에서 구한 Re 수(Reynolds number)와 St 수(Strouhal number)의 상관관계⁽¹²⁾를 이용하여 알아 보았다. Fig. 3(a)에서 U자형 관을 지날 때 Re 수가 식 (1)과 같이 1,435 로 계산되므로

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{(1.185)(14.45)(0.0015)}{1.789 \times 10^{-5}} = 1435 \quad (1)$$

$$f = 0.21 \cdot \frac{U}{D} = 2030 \text{ Hz} \quad (2)$$



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Relationship of Strouhal Nu. and Reynolds Nu.; f , D , ρ , and μ stand for frequency, diameter of a tube, density of fluid, and viscosity, respectively, and (b) frequencies of SST and LES model obtained using velocity changes depending time

이에 대응하는 St 수를 찾게 되면 약 0.21 이 된다.

따라서 Fig. 3(b)에 나타낸 SST 와 LES 모델의 속도 분포를 이용하여 주파수 분석으로 구한 주파수 값과 (f , unit: Hz)와 St 수 0.21 에서 구한 주파수를 비교하여 실험치와 정량적인 오차량을 분석하였다. St 수가 0.21 일 때 관 주변의 유동 주파수는

식 (2)와 같이 2,030 Hz 로 나타났다. 따라서 SST 모델과 LES 모델의 주파수와 비교해 보면 약 1.5% 차이를 나타낸다. 주파수 분석의 결과만으로는 SST 모델과 LES 모델 사용이 합리적으로 판단되며, LES 모델이 유동패턴 입장에서 볼 때, 보다 복잡한 난류유동을 잘 표현하는 것으로 사료되어 LES 모델을 해석에 적용하여 유체-고체 연성해석을 실시하였다. 또한 격자 민감도(mesh dependency) 확인을 위해서 100 만개, 400 만개, 700 만개, 1000 만개를 각각 생성하여 실시한 결과 700 만개 이상에서 일정한 속도분포를 가지는 것으로 확인되었다.

2.2 유체-고체 연성해석

단일 U 자형 관에 대하여 양방향 유체-고체 연성해석(two-way fluid-structure interaction, FSI)을 통하여 U 자형 관의 전체적인 거동을 계산하였다. 먼저 계산에 적용된 재료물성을 얻기 위하여 해석 모델과 동일한 관을 이용하여 상온에서 인장시험으로 실시하였다. 사용된 재료는 inonel-625 소재이며, 인장시험은 2 mm/min 속도로 시편에 하중을 가하면서 응력과 변형률 곡선을 구하였다. Table 1 에는 실험에서 구한 주요 재료물성을 정리하여 나타내었다.

유체-고체 연성해석은 유체에 의하여 구조물의 형상이 변형하고 구조물의 변형된 형상에 의해서 다시 유체 유동이 바뀌게 되므로 오일러언 (Eulerian) 관점을 적용할 수 없으며, 라그랑지안 (Lagrangian) 관점을 같이 포함하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 오일러언과 라그랑지안을 결합한 ALE(arbitrary Lagrangina-Eulerian) 관점의 지배방정식을 사용하여 양방향 연성해석을 수행하였다. 사용된 지배방정식은 식 (3)~(5)와 같다.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla\rho = -\rho \nabla \cdot \vec{u} \quad (3)$$

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} \right) = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \rho \vec{f}^B \quad (4)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla E \right) = \nabla \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{u}) + \vec{u} \cdot \rho \vec{u} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 밀도, \vec{u} 는 속도 벡터, E 는 총 에너지, \vec{f}^B 는 단위 체적당 체력이며 $\vec{\sigma}$ 는 코시 응력 텐서 (Cauchy stress tensor)이다.

해석조건으로 2.1 절과 동일한 조건을 주었으며 전체적인 U 자형 관 거동분석 모델에는 브레이징부의 필릿모양(fillet)과 국부적인 재료물성은 무

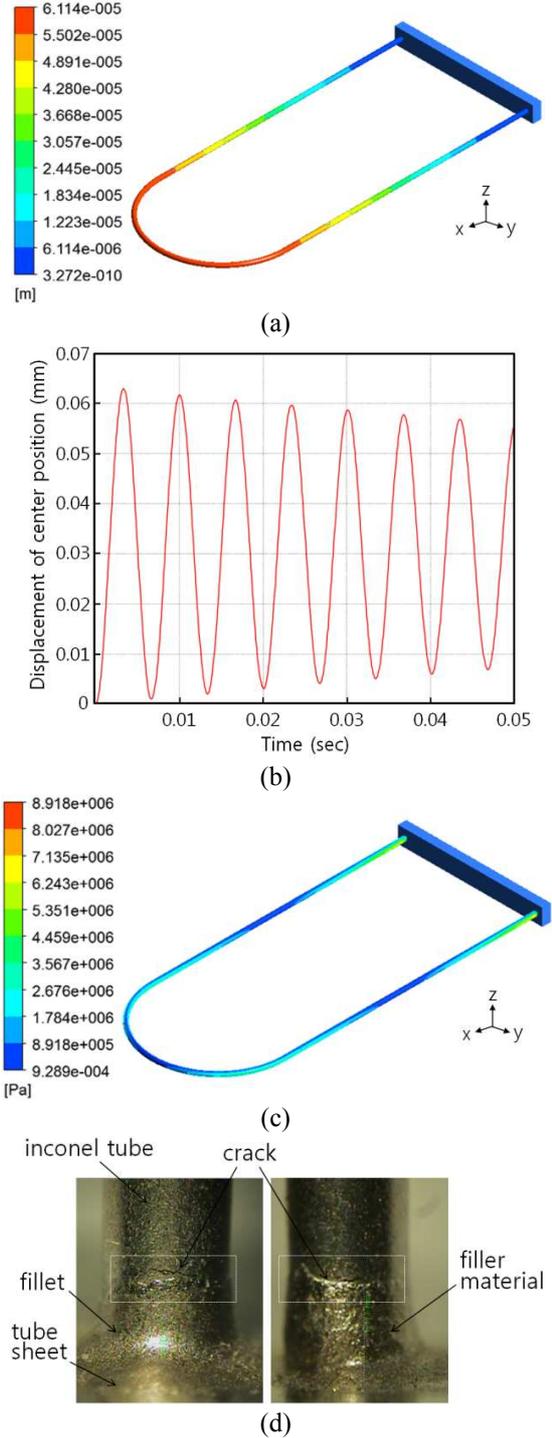


Fig. 4 (a) Displacement contour of a U-tube, (b) displacement at the center position of a U-tube in y-direction, (c) von Mises stress distribution of a tube, and (d) photo images of fractured or damaged part in a tube after vibration test

시하고 inonel-625 소재와 동일한 것으로 가정하였다. 해석 결과로 14.45 m/s 의 유체 유속에 의하여 발생한 최대 변위는 약 63 μ m 가 발생하였으며, 브레이징 접합부 주위의 최대응력은 약 9 MPa 로 나타났다

[Fig. 4(a)-4(c) 참조]. 전체적인 거동을 보면 U 자형 관이 유동방향[Fig. 4(a)에서 y 축방향]으로 진동하면서 거동하며 재료 댐핑(material damping)에 의하여

Table 1 Tensile test specimen and its material properties of inconel-625



Properties	Values (avg.)
Yield stress (MPa)	454.3
Tensile stress (MPa)	887.3
Elastic modulus (GPa)	207.0
Elongation (%)	18.2

시간에 따라 진폭이 약간씩 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 해석시간을 충분히 두게 되면 일정한 값으로 수렴될 것이다.

또한, 최대응력 관점에서 보면 Fig. 4(d)와 같이 진 동실험에서 파손이나 균열이 잘 발생되는 부분과 거의 일치하게 잘 나타났다. 해석결과를 통하여 피로수명을 예측해 보면, 단일 U 자형 미세관을 이용하여 실험적으로 구한 S-N 곡선에서 피로 한도(fatigue limit)가 약 300 MPa 수준으로 나타났기 때문에 현재 구해진 최대응력(9 MPa)은 매우 낮은 수준이다. 따라서 주어진 요구조건 풍속 14.45 m/s 에서는 충분히 안전하다고 사료된다 .

2.3 해석모델 실험적 검증

단일 U 자형 관의 해석결과를 검증하기 위하여 Fig. 5 와 같이 실험장치를 구성하였다. 실험조건은 해석과 동일한 조건이 주어지도록 하였으며 시편에 14.45 m/s 의 풍속을 부가하기 위해서 아크릴판으로 높이 150 mm, 폭 20 mm, 길이 1,000 mm 의 덕트를 제작하였다. 직관 내부에 해석과 동일한 크기의 단일 U 자형 관을 고정하여 진동에 의한 거동을 측면에서 촬영이 가능하도록 고속카메라(model: Fastcam SA-X, maker: Photron Co.)를 설치하였다. 또한 시편에 외기를 유입시켜주는 공기 유동의 직진성을 위해서 벌집구조(honeycomb)를 설치하였다.

고속카메라로 촬영된 데이터를 최대변위가 발생하는 U 자형 관의 중심부 위치에서 0.05 sec 까지 변형량을 비교해 보면 Fig. 6 과 같다. 실험결과와 해석결과가 전체적으로 진동 주파수가 거의 유사하게 나타났다. 그러나 0.015~0.025 sec 구간에서는 변위량이 해석결과와 차이가 발생한다. 이것은 실험에 사용된 시편의 미세한 오차나 유동의 직진성이 해석조건과 달라서 실험에서 변형모드가 해석과 달라져서 나타나는 형상으로 분석된다. 그러나 최대 변위량은 실험과 잘 일치하는 것으로 판단되어 해석의 신뢰성이 검증되었다고 할 수 있다.

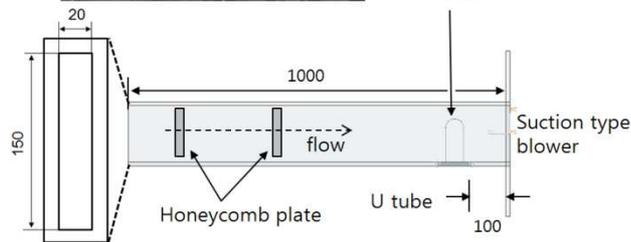
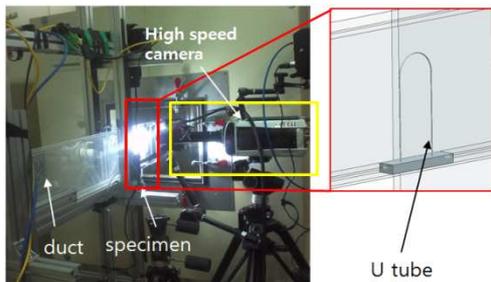


Fig. 5 Experimental setup for measurement of the displacement of a U-tube (unit: mm)

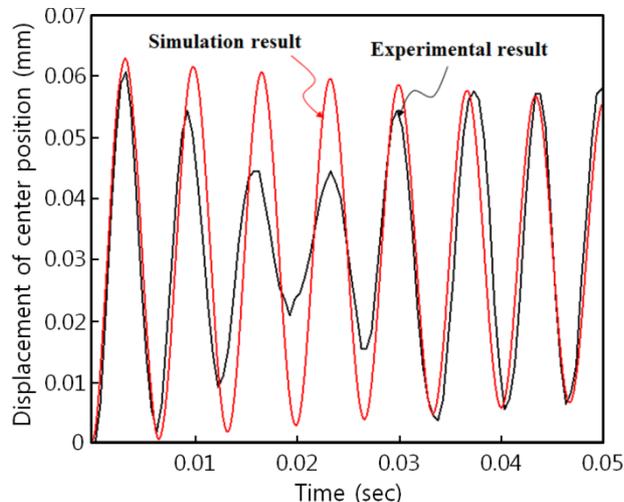


Fig. 6 Comparison of displacement between analysis and experiment results

3. 브레이징 접합부 물성분석

3.1 브레이징부 미세 기계적 물성

관형 열교환기는 여러 가닥의 미세관들이 브레이징 공정으로 관 고정판에 접합하게 되는데 이때 접합재(filler material) 사용과 1,050 °C 의 고온 조건에 의하여 국부적인 재료의 물성이 달라지게 된다. 따라서 정밀한 해석을 수행하기 위해서는 이러한 국부적인 물성과 필릿모양을 고려해야 한다.

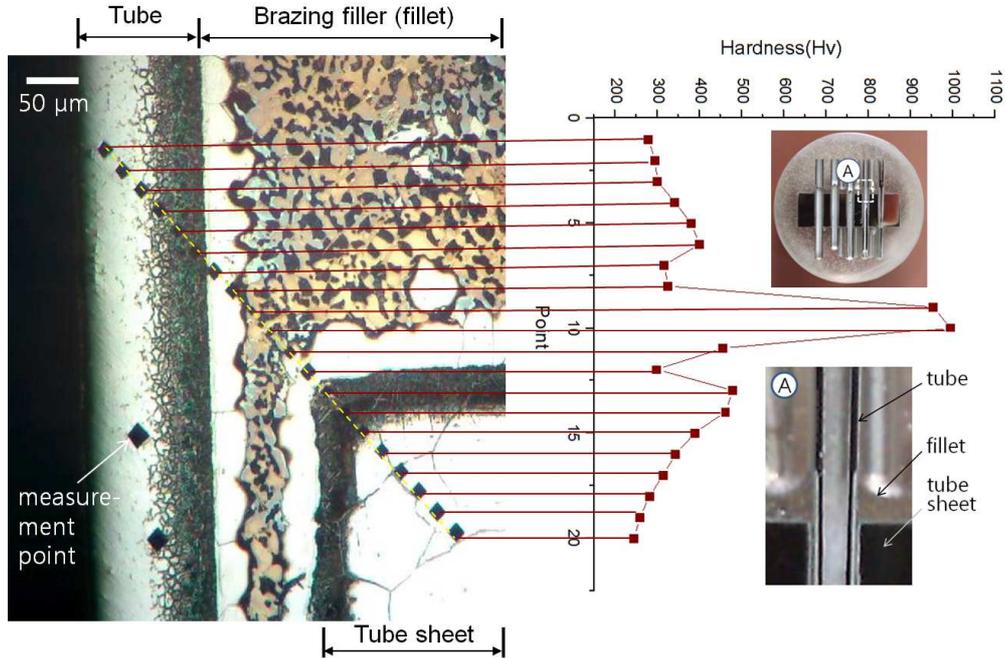


Fig. 7 Magnified photo-image of the brazed part and hardness distribution

본 연구에서 사용된 브레이징 접합재는 상품명 Nicobraz L.M. (Wallcolmonoy Co.) 이며, 주요성분으로는 Cr 7.0%, B 3.1%, Si 4.5%, Fe 3.0%, C 0.06%, Ni 4%, 등이 있다. 브레이징 공정조건으로 는 진공로를 이용해서 1,050 °C 온도조건에서 30 분간 유지한 뒤 상온까지 서냉시켰다.

앞서 기술한 것처럼 기초실험을 통하여 Fig. 4(d)에 나타난 바와 같이 미세관의 진동실험에서 파단되거나 균열이 발생하는 부분이 미세관 접합부 부근으로 용접재에 의한 필릿형상이 끝나는 부근이다. 따라서 국부적인 물성평가가 더욱 필요하다. 먼저 브레이징 접합부의 국부적인 물성을 알아보기 위하여 경도실험을 실시하였다. 경도 측정을 위해 brazing 된 시편을 와이어커팅을 통해 접합부 부근의 튜브 절반을 잘라 냉간 마운팅으로 시편을 제작하였다 [Fig. 7 오른쪽 삽입그림 (A) 참조]. 시편의 크기는 20 mm 정도이며 단면부를 연마하여 브레이징 접합부를 관찰할 수 있도록 하였다. 경도실험은 마이크로 비커스 (micro-vickers, Mitroyo Co.)를 이용하였다. 브레이징부의 국부적인 재료물성 분포를 확인하기 위하여 관의 길이방향, 관 고정판 접합부 부근을 등간격으로 경도실험을 실시하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 inconel-625 소재의 평균적인 경도값은 280 Hv로 나타났으며, 전체적으로 브레이징 필릿 부분의 경도가 가장 높다. 또한 브레이징 접합재와 맞닿는 관 벽이나 관 고정판 부분에서 경도가 비교적 높게 측정이 되었는데,

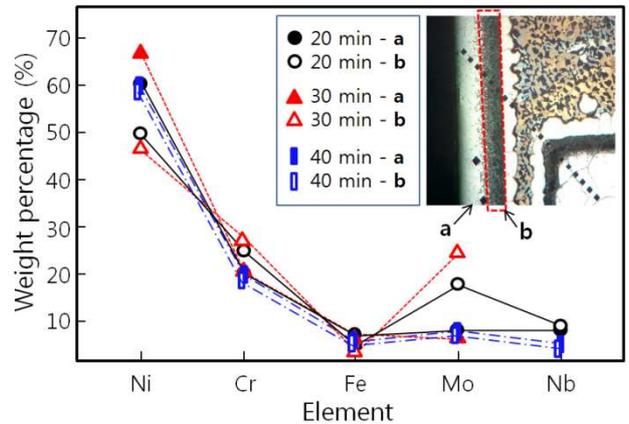


Fig. 8 Variation of average weight percentage of elements according to highest temperature holding time 20, 30, and 40 min (colored circle, triangle, rectangular: 'a' part, and the others: 'b' part in the inset figure)

이것은 성분분석 결과 브레이징 공정 중에 접합재의 성분 중에서 크롬 (Cr)이 모재인 inconel 쪽으로 쓰며 들어 경도가 올라간 것으로 파악된다. 경도실험을 통하여 재료물성 분포를 그룹으로 묶어서 표현이 가능한데, 미세관의 신뢰성 차원에서 보면 관 고정판 부분을 제외하고 모재, 모재경계층, 브레이징부 경계층, 브레이징부로 네 개의 그룹으로 나타낼 수 있다. 이러한 그룹간의 물성 차이가 클 경우 고온조건에서 열 응력이 발생하거나 경도 차이로 인하여 기계적 하중에 의해 접합부 부근에 균열이 발생할 수도 있다.

3.2 EDS 를 이용한 브레이징 접합부 성분분석

접합부의 성분분석을 통하여 브레이징 과정에서 발생하는 성분변화를 SEM-EDS 를 이용하여 알아보았다. 모재인 inconel-625 는 Ni 이 60% 정도 차지하고 그 외에 Cr 22%, Fe 5%, Mo 10%, Nb 3%, 등으로 구성되어져 있다. 브레이징 될 때 브레이징 접합재와 만나는 모재 경계부분은 원 소재와 다르게 색깔이 검정색으로 변화하게 되는데 이는 브레이징 공정 중에 온도상승으로 발생한 쌍정면에 접합재의 원소인 크롬성분이 침투하여 Cr-Mo 화합물이 만들어지기 때문으로 분석된다. 이 영역은 Fig. 7 에 나타낸 바와 같이 inconel-625 원소재보다 경도값이 증가하는 부분이다.

브레이징 공정 조건별로 접합부의 성분변화를 알아보기 위하여 재료물성 변화에 가장 큰 영향을 주는 최고점 온도(1,050 °C)의 지속시간을 각각 20, 30, 40 min 으로 변화를 주어서 브레이징 조건이 성분변화에 어떤 영향을 주는지 실험적으로 알아보았다.

Fig. 8 의 분석결과에서 보면 브레이징 공정조건으로 최고점 온도를 20 min 과 30 min 유지한 경우에는 inconel-625 미세관의 물성이 접합재에 근접한 쪽(Fig. 8 에서 'b')과 접합재에 먼 쪽(Fig. 8 에서 'a') 간의 평균적인 성분차이가 많음을 알 수 있으며 유지시간을 40 min 으로 한 경우에는 충분한 성분확산 시간이 주어져서 모든 주요성분의 성분차이가 7% 이내로 적음을 알 수 있다. 따라서 미세관 내벽의 성분차이가 미소하여 재료물성 차이가 적을 것으로 사료되며, 브레이징 조건에서 최고점 온도를 40 min 이상으로 유지하는 것이 필요함을 알 수 있었다. 그리고 유지시간에 따라서 브레이징 접합부의 국부적인 재료물성과 기계적 건전성에 영향을 준다고 판단된다.

3.3 접합부 기계적 물성 분석

나노 인덴테이션(nano-indentation)을 이용하여 접합부의 국부적인 기계적 물성을 정량적으로 측정해 보고 성분차이로 인한 국부적인 탄성계수 차이를 비교해 보았다. 나노 인덴테이션으로 탄성계수를 구하기 위하여 Oliver 와 Pharr 가 제시한 식 (6) 과 식 (7)을 이용하였다.⁽¹⁴⁾

$$E_r = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \tag{6}$$

여기서, A 는 압입면의 단면적, S 는 강성을 나타내는 것으로 하중-변위 곡선에서 하중제거 곡선의

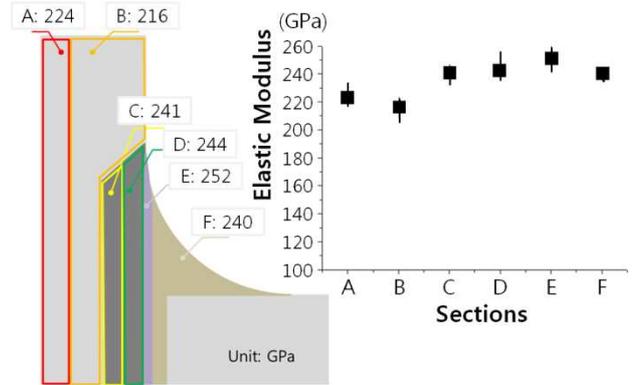


Fig. 9 Local elastic modulus distribution at the brazed joint

최대하중 부분의 기울기로부터 구한다. β 는 삼각뿔 형태의 Berkovich 팁을 사용하기 때문에 1.034 를 적용하면 된다. 식 (6)으로부터 환산 탄성계수 E_r 를 구하게 된다. 이것을 이용하여 식 (7)에서 압입자의 탄성계수 (E_i)와 푸아송비(ν_i)를 이용하여 시편의 국부적인 탄성계수 (E_s)를 계산하게 된다.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \tag{7}$$

여기서, ν_s 는 시편의 푸아송비 이며, 본 실험에서 0.308 을 적용하였다.⁽¹³⁾ 유지시간 30 min 일 때 접합부의 국부적인 탄성계수 물성은 Fig. 9 와 같다. 접합부의 성분차이로 인하여 국부적인 탄성계수가 211~252 GPa 분포를 가짐을 알 수 있다.

전체적으로 경도가 높게 나온 부분에서 탄성계수가 크게 나타남을 알 수 있으며, 미세관의 경우 접합재와 접촉하는 부분에서 탄성계수가 큰 값을 가지며, 필릿이 끝나는 부분에서 탄성계수의 불연속이 존재함을 알 수 있다. 따라서 이러한 부분에 재료결합이나 응력집중이 발생할 가능성이 크기 때문에 진동실험에서 균열이 이 부분에 많이 발생하는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서 관형 열교환기의 기계적 신뢰성을 검토하기 위하여 유체-고체 연성해석을 실시하였으며 난류해석 모델 비교검토를 통하여 LES 모델이 적합함을 알았다. 또한 연성해석 결과 주어진 풍속조건에서 미세관의 접합부에서 최대응력이 발생되지만 응력 크기가 9MPa 수준으로 피로한도 이하이기 때문에 충분히 안전한 것으로 판단된다.

또한 브레이징 조건 중 최고점 온도 유지시간을

달리하면서 접합부의 미세 성분을 분석하였으며, 분석결과 유지시간에 따라 성분분포가 많은 차이를 보인다. 따라서 브레이징 공정에서 특정시간 이상의 유지시간이 요구된다. 그리고 성분차이에 의해서 발생하는 국부적인 탄성계수를 검토한 결과 경도가 높은 곳에서 탄성계수가 크게 나왔으며 211~252 GPa 분포를 가진다. 특히 필릿이 끝나는 부근에서 미세관의 탄성계수 편차가 심함을 알 수 있다. 향후 이러한 국부적인 미세물성을 해석적 방법에 적용하여 기계적 신뢰성을 평가하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 정부재원으로 수행되었으며 관련 과제 담당자에게 감사를 표한다. (한국연구재단 과제번호: No.K20701002274-12E0100-05710), (한국에너지기술평가원 과제번호: 20101720200020-12-3-01), 그리고 (국가핵심연구센터사업 과제번호: 2012-0000-965).

참고문헌

- (1) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Introduction to Heat Transfer, Third Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) Mueller, A. C., 1973, *Heat Exchangers, in Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, Chapter 18.
- (3) Min, J. K., Jeong, J. H., Ha, M. Y. and Kim, K. S., 2009, "High Temperature Heat Exchanger Studies for Applications to Gas Turbines," *Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 175~186.
- (4) Reiter, T., Dvorak, G. J. and Tvergaard, V., 1997, "Micromechanical Models for Graded Composite Materials." *J. of the Mechanics and Physics of Solid*, Vol.45, No.8, pp.1281~1302.
- (5) Jang, J. H., Yoon, M. W. and Lee, J. H., 1998, "Computation of Equivalent Material Properties of Woven Fabric Composites Using Homogenization Technique," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 22, No.3, pp. 588~594.
- (6) Lee, M. J., 2000, "Stress Analysis of Ceramic Solid Composite with Pore Using Homogenization Technique." Graduate School Master of Engineering Thesis, Hong-ik University.
- (7) Bae, J. D., Cho, J. R. and Ko, W. S., 2005, "Derivation of Equivalent Material Properties of Induction Motor Windings Based on Homogenization Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No.4, pp. 511~638.
- (8) Lee, H. M., Heo, S. C., Song, W. J., Ku, T. W., Kang, B. S. and Kim, J., 2009, "Finite Element Analysis and Validation for Dimpled Tube Type Intercooler Using Homogenization Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No.2, pp. 99~188.
- (9) Ransom, J. B. and Knight, N. F., 1989, "Global/Local Stress Analysis of Composite Panels," *Computers & Structures*, Vol. 37, No. 4, pp. 375~395.
- (10) Noh, E. K., 2004, *Theory of Turbulent Flow*, Sigma-Press, Seoul.
- (11) Myung, H. K., 2000, *Computational Heat and Fluid Mechanics*, Moon-ung-dang, Seoul, pp. 21~23.
- (12) White, F. M., 2002, *Viscous Fluid Flow*, Mc Grow Hill, New York.
- (13) Lee, H. I. and Lee, J. H., 2008, "Evaluation of Material Characteristics by Micro/Nano Indentation Tests," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No.10, pp. 805~904.
- (14) Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 2004, "Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology," *J. of Mater. Res.*, Vol. 9(1), pp. 3~20.