

## 초소형 튜브와 튜브판의 링 프로젝션 용접 공정개발 및 강도 평가

윤영현\* · 김현준\*\* · 김창수\*\* · 조상명\*\*\*,†

\*부경대학교 조선시스템관리공학협동과정

\*\* (주) 동화엔텍 기술 연구소

\*\*\*부경대학교 소재프로세스공학과

### Development and Strength Evaluation of Ring Projection Welding Process of the Microminiature Tube and Tubesheet

Young-hyun Yun\*, Hyun-joon Kim\*\*, Chang-soo Kim\*\* and Sang-myung Cho\*\*\*,†

\*Dept. of Shipbuilding Systems Management Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

\*\*R&D Center, Dong-Hwa Entec, Busan 618-230, Korea

\*\*\*Product & Welding Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

†Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr

(Received November 6, 2008 ; Revised January 14, 2009 ; Accepted March 16, 2009)

#### Abstract

Microminiature heat exchanger has been applied to the gas turbine in order to increase energy efficiency. During the production of microminiature heat exchanger, however, it is very difficult to weld tube to tubesheet. In this study, therefore, welding process of resistance ring projection was used, and weld tensile tests were performed. Sound weld joint was obtained as a result of applying resistance ring projection welding to microminiature heat exchanger to tubesheet. Cold weld occurred at under 1600A. Even though tensile strength was increased with increasing current, splash occurred and tensile strength decreased at 2000A due to the excessive current. Therefore it was determine that the optimal current is 1900A. As result of tensile tests based on ASME code for tube to tubesheet weldment, rupture position was weldment due to Fs (Fractured section) of nugget, which was smaller than tube thickness (t), and it was proven as a partial strength welding because of the average joint efficiency  $fr = 0.90$ .

Key Words : Microminiature heat exchanger, Ring projection welding, Tube, Tubesheet, Electrode tip angle, Tensile strength, Tube extension, Welding current

#### 1. 서 론

가스 터빈은 에너지 효율을 증가시키기 위해 초소형 열교환기를 적용하고 있다. 이러한 가스 터빈용 열교환기는 고온·고압의 가스가 흐르고 있어 피로 파괴를 일으키기 쉬운 환경에 있다.

그러나 고온·고압에서 사용되고 있는 초소형 열교환기에 대한 연구가 미흡한 실정이고, 그에 따른 초소형 열교환기에 적용되는 접합 기술에 대한 연구 역시 미흡한 상태이다.

중간 열교환기는 진공 브레이징을 이용한 접합 성능에 대한 연구가 진행되고 있고 다양한 삽입금속에 대한 접합 성능 및 경도에 대한 결과도 보고되고 있다<sup>1)</sup>. 그리고 고온 고압용 고효율 마이크로 열교환기의 미세채널 접합을 위하여 레이저 용접<sup>2,3)</sup>을 적용하고 있지만, 가스 터빈용 초소형 열교환기의 튜브와 튜브판 접합에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 초소형 열교환기용 튜브와 튜브판 접합에 링 프로젝션 용접 공정을 개발하는 것이다.

본 연구에서는 튜브 돌출 길이 변경 실험, 전류 증가 실험, 전극 형상 변경 실험을 수행하였다.

## 2 초소형 열교환기와 프로젝션용접의 기본개요

### 2.1 초소형 열교환기의 기본개요

Fig. 1은 초소형 열교환기용 튜브와 튜브판 모식도이다. 초소형 열교환기용 튜브와 튜브판에는 고온의 고압 기체가 흐르므로 충분한 강도와 기밀이 요구 된다.

### 2.2 프로젝션 용접의 기본개요 및 연구대상

일반적인 프로젝션 용접은 Fig. 2와 같은 방법을 사용한다. Fig. 2의 (a)는 판과 판 용접에서 사용되며, (b)는 판과 봉, (c)는 튜브판과 튜브에서 가장 많이 사용되는 방법이다<sup>4)</sup>.

Fig. 3는 본 연구의 대상으로써 사용된 튜브와 튜브판 링 프로젝션 용접 모식도이다.

## 3. 사용재료 및 실험방법

### 3.1 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 STS 304을 사용하여 실

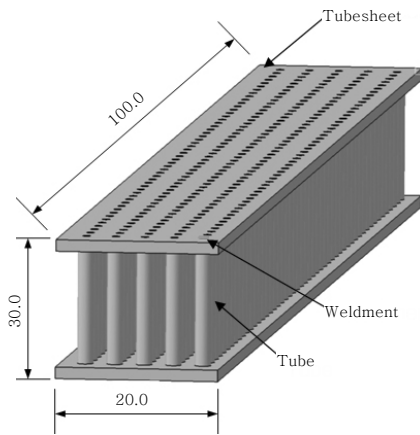


Fig. 1 Schematic of the tube to tubesheet

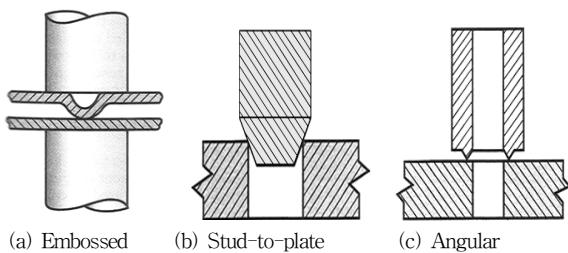


Fig. 2 Commonly used types of projections<sup>4)</sup>

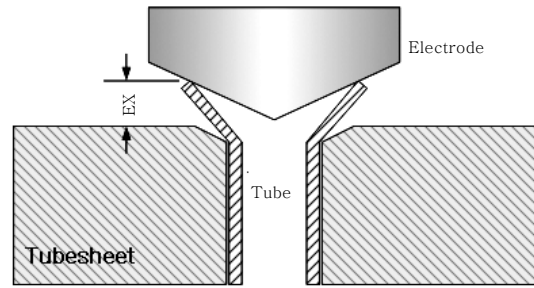


Fig. 3 Schematic of ring projection welding

험을 하였다. 이에 따른 성분 분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 2는 튜브 및 튜브판의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 튜브의 인장 강도가 높은 이유는 압출에 의해 튜브가 냉간 가공되어 경도 및 인장 강도가 높아진 것으로 판단된다.

Fig. 4는 실험에 사용된 튜브에 대해 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 튜브의 두께가 0.075mm이므로 (c)와 같은 방법으로 가공하기가 어려우므로 튜브는 용접 전에 확관 지그를 사용하여 확관하였다.

Table 1 Chemical compositions of tube and tubesheet

	Chemical compositions (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
STS304	0.08	1.08	1.65	0.045	0.03	8.06	20.80

Table 2 Mechanical properties of tube and tubesheet

	Tube	Tubesheet
Hardness (Hv)	370	129
Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	123	53

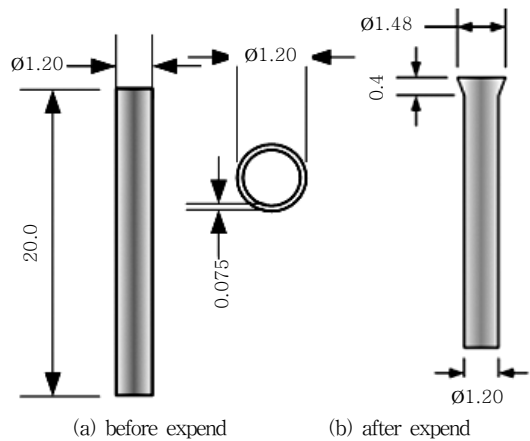


Fig. 4 Schematic of the tube

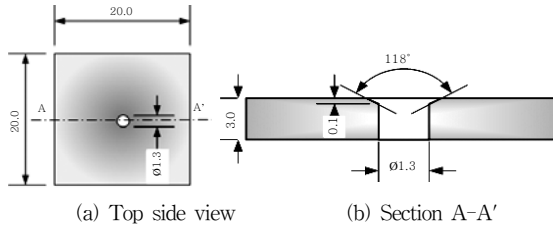


Fig. 5 Schematic of the tubesheet

Fig. 5는 실험에 사용된 튜브판을 나타낸 것이다. 튜브판에 탁상용 드릴 머신을 사용하여 깊이 0.1mm, 그 루브 각도 118°로 가공하였다.

### 3.2 실험방법

Exp. 1은 튜브 돌출 길이 변경 실험이다. 튜브 돌출 길이 EX는 Fig. 3에 나타내었다. Table 3는 튜브 돌출 길이 변경 실험 조건을 나타낸 것이다.

Exp. 2는 전류 증가 실험이다. Table 4는 전류 증가 실험 조건을 나타낸 것이다.

설정 전류 1600A이하에서는 냉접이 발생하여 인장 시험을 수행하지 않았고, 1600A에서 100A씩 전류를 증가시켜서 용접한 후 인장 시험을 하였다.

Exp. 3는 전극 형상 변경 실험이다. 전극 형상 변경 실험 조건은 Table 4와 같고, 전류는 1900A로 고정하여 실험하였다.

Table 5는 전극 형상 변경 실험에 사용된 전극 모식도이다. 튜브판의 그루브 각도가 118° 이므로 전극 팁 각을 118°를 기준으로 5°씩 증가시켜서 실험하였다.

Table 3 The condition of Exp. 1

Parameter	Condition
Set current (A)	1900
Welding time (ms)	10
Force (kg)	8.5
Tube extension (mm)	0.1, 0.3, 0.5

Table 4 The condition of Exp. 2

Parameter	Condition
Current (A)	1600, 1700, 1800, 1900, 2000
Welding time (ms)	10
Force (kg)	8.5
Tube extension (mm)	0.3

Table 5 Schematic of the electrode tip shape in Exp. 3

Electrode tip angle	118°	123°	128°
Electrode tip shape			

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 튜브 돌출 길이 변경 실험 결과 및 고찰

Table 6는 Exp. 1의 튜브 돌출 길이 변경 실험 결과를 나타낸 것이다.

튜브 돌출 길이가 0.1mm인 경우에는 충분한 너깃 N을 형성할 튜브가 존재하지 않기 때문에 용접이 되더라도 낮은 인장 응력에서도 용접부가 파괴된다. 그리고 튜브 돌출 길이가 0.3mm인 경우에는 비교적 양호한 용접부를 얻을 수 있었고, 단면에서 보는 것과 같이 적절한 크기의 너깃 N이 생성되었다. 튜브 돌출 길이 0.5mm인 경우에는 튜브 돌출 길이 과대로 인한 튜브 돌출부 무너짐 F가 발생하였다.

### 4.2 전류 증가 실험 결과 및 고찰

Table 7은 Exp. 2의 전류 증가에 따른 용접부 외관 사진을 나타낸 것이다. 용접부 외관에서는 비교적 양호한 용접부를 얻을 수 있었다.

그러나 용접부 단면을 보면 전류가 증가 할수록 너깃의 크기가 증가하고, 2000A에서는 날림이 발생하여 너깃이 날아간 것을 관찰할 수가 있다.

본 연구에서 용접부 강도를 평가하기 위해 인장시험을 수행하였고, Fig. 7에 튜브와 튜브판 용접부 인장 시험 모식도를 나타내었다.

Table 6 The shape and cross section of the weld with variable tube extension

Tube extension	0.1mm	0.3mm	0.5mm
Top view			
Cross Section			

Table 7 The shape of weld with current variation

Current	Top view	Cross section
1600A		
1700A		
1800A		
1900A		
2000A		

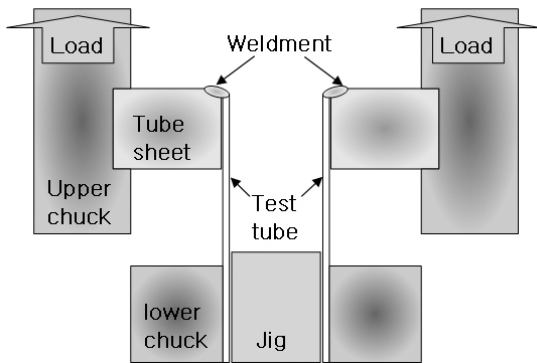


Fig. 7 Schematic of the tube to tubesheet tensile test

하부척킹으로 인한 튜브파단을 방지하기 위하여 튜브에 Ø1.0 환봉지그를 삽입하여 튜브를 고정하였고 튜브판을 당김으로써 튜브에는 인장응력, 용접부에는 전단응력이 작용하였다.

Fig. 8은 전류에 따른 인장 강도를 나타낸 것이다. 각 점당 한 개의 데이터를 이용하였다. Fig. 6과 같은 경향을 볼 수 있고, 1600A에서 1900A까지는 전류가 증가할수록 인장 강도가 증가를 하였고, 2000A에서는

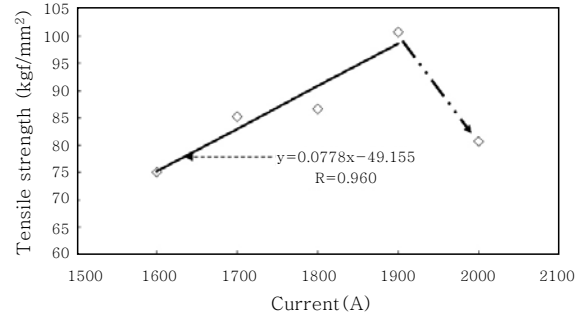


Fig. 8 Variation of tensile strength with set current

인장 강도가 감소하였다. 이는 전류 과대로 인한 날림이 발생하여 인장 강도가 떨어진 것으로 판단된다. 그래서 2000A를 제외하고 1600A에서 1900A까지 1차 회귀선을 그려 보았는데 R이 0.960로 직선 상관관계를 가지는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 어느 범위 이상의 전류에서 용접부 강도가 감소하는 현상을 다음의 경우에도 보고되고 있는 일반적 현상으로 생각된다.

즉, J.K.Min등은 자동차용 도금강판의 점용접성에 관한 연구에서 전류가 증가하면 강도가 증가하지만 과대한 전류로 인해 날림이 발생하면 강도가 감소한다고 밝혔다<sup>5)</sup>.

또한 Murat Vural등도 전류가 증가하면 너깃크기가 증가를 하지만, 날림이 심하게 발생하면 너깃크기가 오히려 줄어든다고 하였다<sup>6)</sup>.

Table 8은 인장시험후의 튜브와 튜브판의 사진을 나타낸 것이다. 1600A의 경우 튜브판에는 용접부가 존재하지 않고 튜브판 그루브 가공한 영역이 보인다.

이것은 낮은 전류로 인해 충분한 너깃을 생성하지 못하여 낮은 인장 강도에서 파단 되었다고 판단된다. 그리고 1700A에서 2000A의 조건에서는 용접부가 튜브판에 존재하는 것을 볼 수가 있다.

### 4.3 전극 형상 변경 실험 결과 및 고찰

Table 9는 Exp. 3의 전극 팁 각도에 따른 용접부 사진을 나타 낸 것이다. 모든 용접조건에서 비교적 양

Table 8 Tube and tubesheet after tensile test in the experiments with current change

Current	1600A	1700A	1800A	1900A	2000A
Tube					
Tube sheet					

Table 9 The shape of weld with electrode tip angle

Electrode tip angle	118°	123°	128°
Top view			

호한 용접부를 얻을 수 있었다.

ASME는 튜브와 튜브판 용접부를 이음부 효율  $f_r$ 를 사용하여 분류한다. 튜브와 튜브판 용접부는 이음부 효율  $f_r = 1.0$ 일 때 완전 강도 용접부(Full Strength Weld),  $f_r < 1.0$ 일 때 부분 강도 용접부(Partial Strength Weld), 강도를 요구하지 않는 밀봉 용접부(Seal Weld)로 구분한다. 여기서  $f_r$ 은 1.0을 초과할 수는 없고, 식 (1)로부터 얻어진다<sup>7)</sup>.

$$f_r(test) = \frac{L(test)}{A_t S_T} \quad (1)$$

여기에서 L은 파단이 일어났을 때의 파단 하중,  $A_t$ 는 튜브의 단면적,  $S_T$ 는 튜브 재료의 최소 인장 강도를 나타낸다.

Fig. 9는 전극 팁 각도에 따른 용접부 인장 강도를 나타낸 것으로 각 점은 3개의 데이터를 평균하였다.

튜브판의 그루브 가공으로 인한 튜브의 응력 집중을 고려하여 전극 팁 각도를 증가시켰으나, 전극 팁 각도는 용접부 인장 강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 인장 시험을 통한 용접부 파단면 Fs를 나타낸 것이다. 모든 용접부의 인장 강도는 튜브 인장 강도 보다 낮게 나왔는데 이는 파단면인 Fs가 튜브 두께

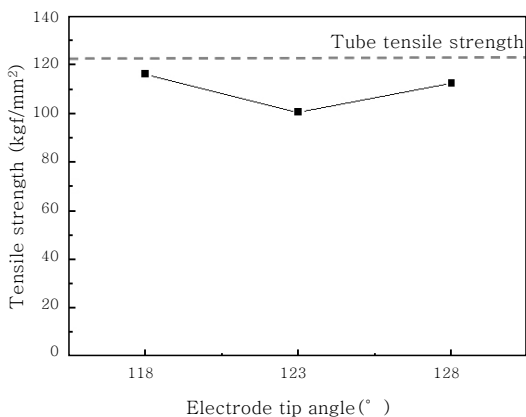


Fig. 9 Variation of tensile strength with electrode tip angle

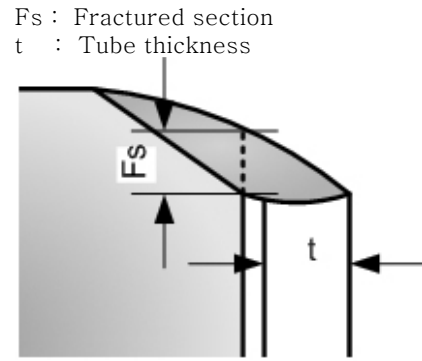


Fig. 10 Schematic of the fractured section

Table 10 Tube and tubesheet after tensile test in the experiments with electrode tip angel change

Electrode tip angle	118°	123°	128°
Tube			
Tubesheet			
$f_r$	0.95	0.82	0.92

보다 작아 쉽게 파단이 일어난 것이라고 판단된다. 또한 튜브에는 수직 인장 응력이 작용하지만 Fs에는 전단 응력이 작용하는데 이 역시 낮은 응력에서 너깃 파단면 파괴가 일어난 원인이라고 판단된다.

Table 10은 인장 시험 이후에 파단된 튜브와 튜브판의 사진을 나타낸 것이다. 용접부는 튜브판과 튜브에 존재하는 것이 보이며, 모든 조건에서  $f_r < 1.0$ 이므로 부분 강도 용접부로 인정이 된다.

튜브의 응력집중을 완화하기 위해 튜브판의 그루브 각도 변경 실험은 추후에 이루어 질것이고, 그루브 각도가 작아지면 응력집중 완화와 전단응력 성분의 감소로 인해 인장강도가 더 높아질 것이라 예상된다.

#### 4.4 튜브와 튜브판 용접부 품질에 미치는 인자의 고찰

일반적인 프로젝션 용접부 품질에 미치는 인자는 용접 전류, 전극 가압력, 용접시간, 전극재질, 프로젝션 형상등이 있다<sup>8)</sup>. 본 연구에서는 용접부 품질에 미치는 중요한 인자로 튜브돌출길이, 용접전류, 전극팁 각도등을 고려하여 실험을 하였지만, 직경 1mm 내외의 작은

시편의 링 프로젝션 용접은 전극 축과 피용접물 중심의 동심도 역시 중요한 인자가 된다. 이러한 동심도는 너트 프로젝션 용접에서도 중요한 인자이고 가이드에 관한 연구도 활발하다<sup>9)</sup>. 그러나 본 연구에서는 동심도에 대한 실험을 수행하지 않았지만, 현장 적용 및 대량 생산을 위해서는 가압기구의 흔들림을 방지 할 수 있는 지그가 개발되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

초소형 튜브와 튜브판의 링 프로젝션 용접공정 개발 및 강도평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 직경 1.2mm, 두께 0.075mm의 튜브와 깊이 0.1mm, 각도 118°로 그루브 가공한 튜브판에 링 프로젝션 용접을 적용한 결과 비교적 양호한 용접부를 얻을 수 있었다.

2) 튜브 돌출 길이 변경 실험 결과 0.1mm에서는 충분한 너깃을 생성하지 못해 낮은 강도에서 파괴가 일어났고, 0.5mm는 튜브 돌출부 무너짐이 발생하였으며, 0.3mm에서 비교적 양호한 용접부를 얻을 수 있었다.

3) 전류 증가 실험 결과 1600A이하에서는 냉접이 발생하였고, 전류가 증가할수록 인장 강도가 증가하였으나, 2000A에서는 전류 과대로 인해 날림이 발생하였고, 오히려 인장 강도가 떨어져 1900A가 최적의 조건인 것을 알 수 있었다.

4) ASME 규격에 따라 튜브와 튜브판 용접부에 대한 인장 시험을 수행한 결과 튜브 두께 (t) 보다 작은 너깃부 파단면(Fs)으로 인해 용접부에서 파단이 일어났고, 평균 이음부 효율  $fr = 0.90$ 으로써 부분 강도 용접부로 확인되었다.

## 참 고 문 헌

1. K.H.Kim, G.H.Kim, M.G.Lee, H.H.Kim, S.W.Kim, S.H.Kim, "Preliminary Investigation on Joining Performance of Intermediate Heat Exchanger Candidate Materials of Very High Temperature Reactor(VHTR) by Vacuum Brazing" KWS 2005-Autumn, 195-197 (in Korean)
2. H.Y.Cho, G.H.Kim, J.H.Lee, J.Seo, M.S.Choe, "Finite element analysis of laser welding of micro heat exchanger", Korean Society Of Laser Processing, 2005, 40-44 (in Korean)
3. H.S.Kang, J.Seo, J.H.Lee, J.O.Kim, S.H.Yu, H.Y.Cho "Temperature Characteristics of Laser Welding Parts of Micro Heat Exchanger", KWS 2006-Spring, 65-67 (in Korean)
4. AWS Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 2, Chapter 2
5. J.K.Min, Y.K.Oh, G.S.Kim, "A Study on the Spot Weldability of Automotive Steel Sheets", Journal of KWS. 14-3 (1996), 41-46 (in Korean)
6. Murat Vural, Ahmet Akkus, "On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets", Journal of Materials Processing Technology, 153 - 154, 2004
7. Boiler and Pressure Vessel Code ASME, Section VIII -Division 1, 2001
8. AWS Resistance Welder Manufacturers Association : Resistance welding manual Fourth edition(1988. 10), 4.1-4.10
9. M.L. Kuntz, J.C. Bohr "Assessing Weldability of Projection Welding Fasteners to AHSS using Finite Element Analysis", 2000 Town Center Suite 320
10. 최송천, 한상인, "공정플랜트 고온 튜브 수명연장 및 건전성 평가에 관한 연구", 한국가스안전공사, (2002) (in Korean)
11. Kwang soo Yu, Song Chun Choi, Yong-Soo Kim, "Finess-For-Service of Heat Exchanger Tubing Expansion Transition Zone", Journal of the Korean Institute of Gas, 11-3, 2007
12. Jose Luis Otegui, Pablo Gabriel Fazzini, "Failure analysis of tube - tubesheet welds in cracked gas heat exchangers", Engineering Failure Analysis 11 903-913, 2004
13. C.R. Simmons, "Gas Turbine Manual", 1968, Chapter 13, 239-255
14. Hee-Seok Chang, Seung-Kyu Park, "Micro spot welding technology for microminiature parts", Journal of KWS. 22-4 (2004), 12-19 (in Korean)