

# 열교환기용 BAS111합금 고주파유도용접관에서 인발조건이 기계적 특성에 미치는 영향

국진선\* · 김낙찬\*\* · 송중근\*\*\* · 전동태\*\*\*

\*한려대학교 신소재공학과

\*\*전북대학교 신소재공학부

\*\*\*알메탈(주)

## Effects of Drawing Parameters on Mechanical Properties in High Frequency Induction Welded Tubes of BAS111 Alloy for Heat-exchangers

Jin-Seon Gook\*, Nak-Chan Kim\*\*, Jung-Keun Song\*\*\* and Dong-Tae Jeon\*\*\*

\*Dept. of Advanced Materials Engineering, Hanlyo University, Kwangyang 545-704, Korea

\*\*School of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

\*\*\*ALMETAL Industrial Co., Ltd, Yeosu 556-822, Korea

### Abstract

The aim of this study is to investigate the optimum drawing parameter for BAS111 welded tubes. The BAS111 aluminium alloy tubes with 25.4mm in external diameter and 1.5mm in thickness for heat-exchangers were manufactured by high frequency induction welding with the V shaped convergence angle  $6.8^\circ$  and power input 50kW.

With increasing the reduction of area (1.6, 5.8, 11.5, 14.2, 18.5, 22.5%) by drawing, tensile strength was increased and elongation was decreased. With increasing the reduction of area by drawing, hardness in weld metal increased rapidly, while that of base metal increased slowly. In the specimen with the outer diameter smaller than 22mm, hardness of weld metal was higher than that of base metal. The optimum drawing parameter of area reduction was estimated about 15% because of the work hardening of welds.

\* Corresponding author : jskook@hanlyo.ac.kr

(Received May 24, 2004)

Key Words : High frequency induction welding, Clad aluminium alloy, Extrusion, Brazing

## 1. 서 론

고주파유도용접(High Frequency Induction Welding)을 이용한 알루미늄합금 튜브의 제조는 20여년 전에 용접조건 및 성형조건이 보고 되었다<sup>1-4)</sup>. 현재 이러한 용접조건 및 성형조건을 바탕으로 일본 및 독일에서 열교환기용 튜브로 사용할 수 있는 알루미늄합금 클래드재(BAS111합금) 튜브를 고주파유도용접에 의해 생산하고 있으며, 국내에서는 최근 알루미늄 클래드재의 고주파유도용접기술 개발에 성공하였다.

BAS111은 KSD7043에 규정하는 알루미늄합금 브

레이징 시트(Brazing Sheet)에 해당하는 피재(A4343)가 클래딩 되어있는 클래드재로서 피재(A4343)의 액상선온도가  $615^\circ\text{C}$ , 심재(A3003)의 액상선온도가  $654^\circ\text{C}$ 이다. 이 클래드 알루미늄합금(BAS111)을  $620^\circ\text{C}$ 에서 30분 정도 가열하면 피재가 녹아 브레이징 필러(Brazing Filler)의 역할을 한다. BAS111합금 튜브는 자동차 열교환기의 PFC (Parallel Flow Condenser)의 헤더튜브로 장착되어 별도의 브레이징 필러를 공급하지 않은 상태로 브레이징된다.

알루미늄합금 용접튜브는 강관제조공정과 마찬가지로 코일의 절단, 조관성형, 용접, 후처리 및 검사과정을 거치게 된다. 후처리의 경우 정형(Sizing), 절단, 인발

(Drawing), 교정, 검사(와전류탐상)의 과정이 있다. 알루미늄합금의 고주파유도용접은 연강의 용접과 달리 어려운 점이 많다. 그 이유로서 알루미늄합금은 연강에 비해 비열 및 잠열이 크기 때문에 저항발열이 어렵고, 열전도도도 3~4배 정도 커서 열방산이 쉽게 이루어지기 때문이다<sup>5)</sup>. 또한 BAS111합금재의 고주파유도용접에 의한 튜브생산의 경우 피재부와 심재부에서 용접이 40℃ 정도의 차이가 있고, 고주파전류가 접합면의 표면부에 집중되는 경향이 있어<sup>6)</sup> 심재의 가열 및 용융이 불충분하여 용접이 용이하지 않다. 특히 고주파전류의 수렴 및 단락점, 수축각<sup>1)</sup>, skelp 성형가공<sup>2)</sup>, 스퀴즈 롤에 의한 girth reduction(G. R.)의 조정<sup>3)</sup>, 개선부 형성<sup>4)</sup> 등의 차이로 인하여 철강재료의 고주파유도용접방식을 그대로 적용하여서는 고품질의 용접부를 얻을 수 없다.

BAS111합금판재는 보통 H14의 상태에서 조관하여 용접한 후 수요자가 원하는 기계적성질 및 치수는 인발공정을 거쳐 조절한다. 이 경우 압출에 의한 심리스 튜브재와 달리 고주파유도용접 후 인발된 BAS111합금 튜브는 모재부와 기계적 성질이 다른 용접부를 포함한다. 따라서 BAS111합금은 비열처리형합금이지만 냉간가공에 의한 기계적성질의 경년변화를 방지하기 위해서 인발 후 안정화처리가 실시된다.

열교환기용 PFC에서는 압출 튜브를 끼워 넣기 위해 BAS111합금튜브를 피어싱(piercing)하는데, 이 때 튜브의 경도가 높으면 용접부의 균열이 발생하거나 또는 멀트콘덴서 완성품의 압력시험에서 파열이 발생할 수 있다. 따라서 BAS111합금 튜브의 인발공정에 따른 최적의 단면축소율을 결정하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 고주파유도용접에 의하여 외경 25.4mm, 두께 1.5mm인 고주파유도용접관을 제작하고, 내·외면 비드를 절삭제거 한 후 그 외경을 20~25mm의 범위로 인발하여 단면축소율을 1.6~22.5%의 범위로 하였을 때 인발조건이 튜브의 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하여 최적의 인발조건에 대하여 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료

실험재료는 BAS111합금 판재로서 두께 1.5mm중에 피재인 A4343합금이 0.15mm 클래딩되어 있으며, 클래딩율은 판두께의 10%이다. 이 판재의 질별은 H14 상태이며, 그 기계적 성질 및 화학조성은 각각 Table 1 및 Table 2에 나타냈다. 고주파유도용접하여 제조된

Table 1 Mechanical properties of test material

Tensile properties			Vickers hardness (Hv)
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	
147	134	9.6	50.4

Table 2 Chemical composition(wt.%) of test material

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
A4343	7.3	0.29	0.01	0.04	0.01	1.1	0.01
A3003	0.1	0.4	0.07	1.2	0.01	0.0	0.01

튜브는 외경 25.4mm, 두께 1.5mm로 외경비  $t/D = 0.06$ 이었다.

### 2.2 용접튜브의 제조조건

Fig. 1에 고주파유도용접 모식도를 나타냈다. 튜브의 제조장치는 상하 롤 스탠드 #1~#7의 7단, 사이드 롤 스탠드 7단, 심 가이드 (SG) 롤, 유도가열코일, 스퀴즈(SQ) 롤, 내·외면비드 절삭부 및 정형 롤로 구성되어 있다. 고주파전류발생장치는 공칭출력 95kW, 발전 주파수 400kHz, 용접속도는 80m/min이었다. 유도가열코일, 임피더에서 페라이트 코어의 형상, 배치에 관한 고주파전류 도입조건은 안정한 플래쉬(flash)가 얻어져 접합면 에지의 가열효율이 최적이 되는 조건을 적용하였다. 가열조건에 있어 수축각(vee angle)  $\alpha$ 는 6.8° 였다. 발전관 입력조건은 플레이트전압  $V_P$ (kV), 플레이트전류  $I_P$ (A) 및 그리드전류  $I_G$ (A)를 측정하여 그 입력  $P = V_P(I_P - I_G) = 50kW$ 를 표준으로 하였다. 가압조건으로는 스퀴즈 롤(SQ)에서의 girth reduction을 조절하여 약 2.0mm가 되도록 하였다.

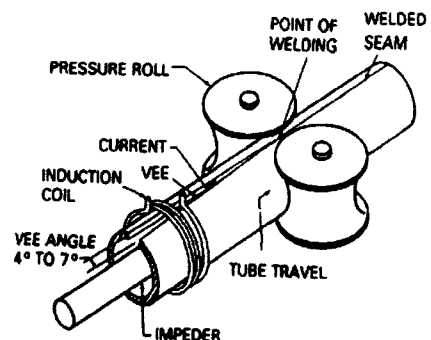


Fig. 1 Schematics of high frequency induction welding process used in producing aluminium tube

### 2.3 용접튜브의 인발조건

인발하기 전 용접튜브는 길이 9m, 외경 25.4mm, 두께 1.5mm로  $t/D = 0.06$ 의 외경비를 갖는 용접상태가 양호한 것을 채취하였다. 이 샘플을 1회의 인발공정으로 그 외경과 두께가 각각 25, 24, 23, 22, 21, 20mm 및 1.5mm로 되도록 하였다. 이때 단면축소율(area reduction)은 각각 1.6, 5.8, 11.5, 14.2, 18.5, 22.5%였으며 인발시 내부에 플러그를 장착하여 튜브 내·외면이 고르게 응력을 받도록 하였다.

### 2.4 용접부의 평가방법

용접부 용접상태의 판정은 단면현미경관찰 및 편평시험으로 행하였다. 편평시험은 Fig. 2에 나타난 것처럼 KSB6713에 따라 인발된 튜브의 끝에서 잘라낸 길이 50mm의 시험편을 용접부 압축방향에 직각으로 놓고 2매의 평판 사이에 끼워 그 거리  $H$ 가 각각  $0.75D$ ,  $0.45D$ ,  $0.15D$ 로 될 때까지 눌러서 시험을 행하였다. 이때 용접부의 갈라짐 상태는 확대 관찰하는 방법을 사용하였다.

인장시험편은 2.3의 방법으로 인발한 외경과 두께가 각각 25, 24, 23, 22, 21, 20mm 및 1.5mm인 튜브를 Fig. 3과 같이 KSB0801에서 규정하는 정형시험편(14C호)으로 하여 몰림부의 내부에 심금을 넣은 상

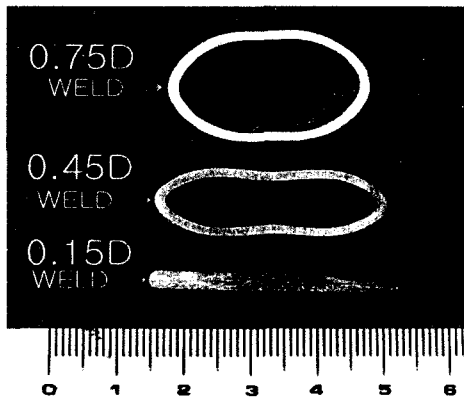


Fig. 2 Typical cross-sections of flattening test specimens

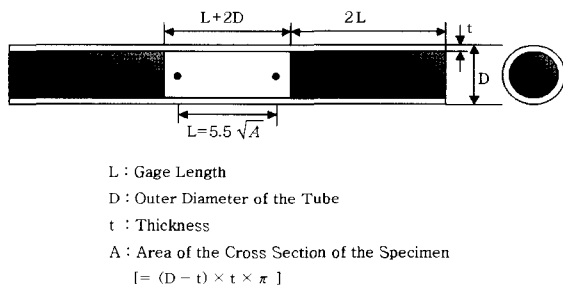


Fig. 3 Shape of a tensile specimen

태로 제작하였다. 시험편의 표점거리를  $L$ 이라 할 때, 양쪽 심금 사이의 비접촉부 길이는  $(L+2D)$ 로 하였고, 몰림부 길이는  $2L$ , 시험편 전체길이는 400mm로 하였다.

경도측정은 마이크로비커스 경도기를 사용하였으며, 모재부 및 용접부의 경도분포는 Fig. 6의 상태에서 튜브단면의 외경쪽에서 내경쪽을 따라 0.2mm마다 측정하였고 각각 3회 측정하여 그 평균값을 나타내었다. 용접부와 열영향부를 포함한 모재부의 경도측정은 Fig. 6의 상태에서 튜브단면의 외경쪽에서 내경쪽으로 각각 상부(3/10지점), 중앙(1/2)지점 그리고 하부(7/10지점)을 용접선을 가로지르는 방향으로 0.2mm마다 측정하였고 각각 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다. 이때 시험하중은 100g, 가압시간은 20초였다.

용접부 단면관찰은 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하였으며, 시험편의 부식은 90% 증류수에 10%의 불산을 혼합한 부식액을 사용하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 용접부의 관찰

Fig. 4는 외경 25.4mm의 BAS111합금 튜브의 용접부를 나타낸 것이다. 접합면에 걸쳐있는 용접금속의 폭은  $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 였으며, 튜브외면부의 버(burr)의 각도는  $120 \sim 130^\circ$ 의 범위였고, 내면부의 비드도 구의 형상을 가진 양호한 용접부를 나타내었다.

Fig. 5는 외경 25.4mm의 BAS111합금 용접부의 내외면비드를 절삭가공 한 것이다. 절삭면은 용접속도가 80m/min인 상태에서 튜브의 내외면부에 절삭바이트를 설치하여 절삭한 것이다. 이때 외면부에 비해 내면부가 거칠게 가공되었음을 알 수 있다.

Fig. 6은 외경 25.4mm의 BAS111합금 튜브를 25mm로 인발한 시험편의 용접부 단면이다. 인발과정에서 내부플러그를 사용하였기 때문에 내면이 매끄럽게 가공된 것을 알 수 있다.

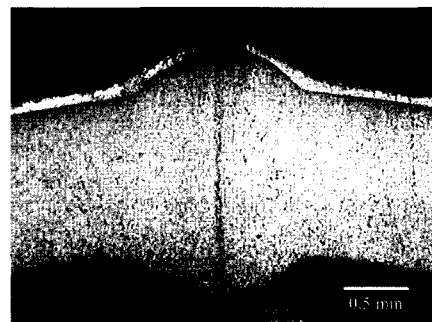


Fig. 4 Microstructures of welds

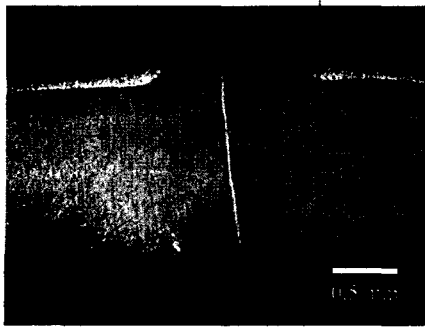


Fig. 5 Cross-section of welds,  $\Phi=25.4\text{mm}$ ,  $t=1.5\text{mm}$

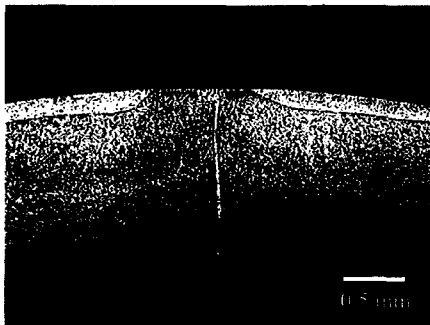


Fig. 6 Cross-section of welds,  $\Phi=25\text{mm}$ ,  $t=1.5\text{mm}$

### 3.2 굽힘시험

Fig. 7은 외경 25.4mm의 BAS111합금 튜브를 외경 20mm로 인발한 상태에서  $H=0.45D$ (a) 및  $H=0.15D$ (b)로 굽힘시험 한 후 단면을 나타낸 것이다.  $H=0.45D$ 의 굽힘상태에서 용접부의 균열발생은 나타나지 않았으나  $H=0.15D$ 의 상태에서는 튜브의 내측에서 용접부를 따라 0.5mm 정도의 균열이 발생하였다.

### 3.3 기계적 특성

Fig. 8은 외경 25.4mm인 용접튜브를 각각 외경 25, 24, 23, 22, 21, 20mm로 인발하여 튜브상태의 시험편을 2.4의 방법으로 인장시험 한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도는 인발을 하지 않은 외경 25.4mm의 시험편에서 약 150MPa이었으며, 외경 20mm의 경우

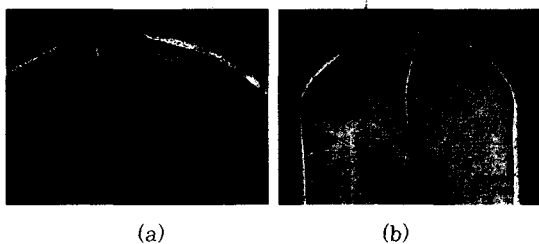


Fig. 7 Typical cross-sections of flattening test specimens,  $\Phi=20\text{mm}$ ,  $t=1.5\text{mm}$ . (a)  $H=0.45D$ , (b)  $H=0.15D$

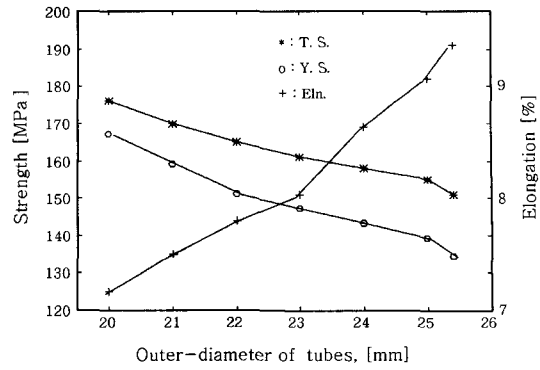


Fig. 8 Variation of strength and elongation in tubes with tube diameter

175MPa로 증가하였다. 항복강도는 외경 25.4mm의 시험편에서 약 136MPa이었으며, 외경 20mm의 경우 약 165MPa로 증가하였다. 연신율의 경우는 이와 반대로 인발을 하지 않은 외경 25.4mm의 시험편에서 약 9.4 %이었으나 외경 20mm로 인발한 시험편의 경우 7.2 %로 감소하였다.

Fig. 9는 Fig. 5 또는 Fig. 6에 나타낸 튜브의 용접선을 따라 외면부에서 내면부에 이르는 경도분포를 나타낸 것이다. 외경 25.4mm의 경우 외면부와 내면부의 경도차이가 거의 없었으며, 약 Hv47을 나타내었다. 외경 25mm의 경우 외면부의 경도는 약 Hv50이었고, 내면부는 약 Hv54로 내면부로 갈수록 경도가 상승하였다. 반면 외경 22mm 및 외경 20mm의 경우 외면부와 내면부의 경도차이는 거의 나타나지 않았다.

Fig. 10은 모재부의 경도를 나타낸 것으로 외경 25.4mm의 경우 평균경도는 Hv52.5였으며, 이 값은 용접 전 BAS111합금 시트의 경도값 50.2보다 높은 값으로 조관성형가공에 의해 경도가 상승한 것이다. 모재부에서는 용접부와는 달리 외면부나 내면부에서 거의 균일한 분포를 보였다. 튜브의 외경이 감소함에 따라 평균경도가 약간 상승하지만 외경 20mm의 경우 상승폭이 커졌으며 평균경도 Hv57을 나타내었다.

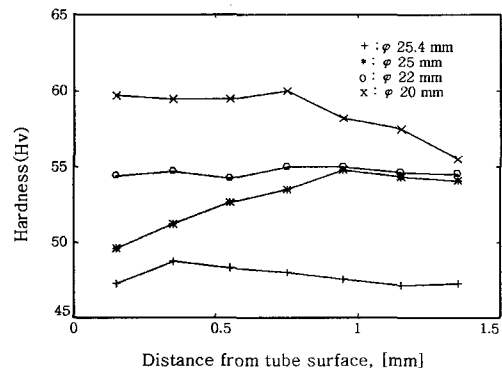


Fig. 9 Hardness distribution along the weld line

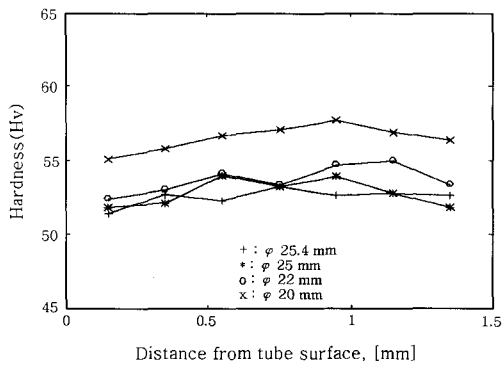


Fig. 10 Hardness distribution in base metal

Fig. 11은 튜브의 외경변화에 따른 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 외경 25.4mm의 경우 용접부의 경도는 Hv47.5이었고 열영향부에서는 급격히 감소하였다가 이후 점차 상승하여 모재에서는 일정한 경도를 유지하고 있다. 이러한 경향은 외경이 다른 시료에서도 거의 비슷하였으나 외경 25mm 및 22mm의 경우 용접부 접합면 경도와 모재부의 경도는 거의 같은 값을 나타내었다. 반면 외경 20mm에서는 모재부 경도가 평균 Hv56이었으나 용접부는 평균 Hv58로 높게 나타났다.

#### 4. 고찰

실험결과로부터 알 수 있는 것처럼 철강의 고주파저항용접속도와 비슷한 80m/min의 속도로 BAS111합금을 고주파유도 용접한 결과 양호한 용접부를 갖는 튜브를 제조할 수 있었다. 분위기가스를 사용하지 않는 고주파유도용접의 특성상 용융된 금속은 산화물과 불순물을 포함하고 있으며<sup>7)</sup>, 용접선 밖으로 용융금속 일부가 배출되는 현상(Fig. 12)은 우수한 용접품질을 얻을 수 있는 기초조건을 제공한다는 측면에서 볼 때 Fig. 4와 같은 용접부 형상은 바람직하다고 볼 수 있다.

편평시험에서는 용착금속부에 내재하고 있는 용합불량에 의한 균열 등의 결함은 나타나지 않았다. 특히 외

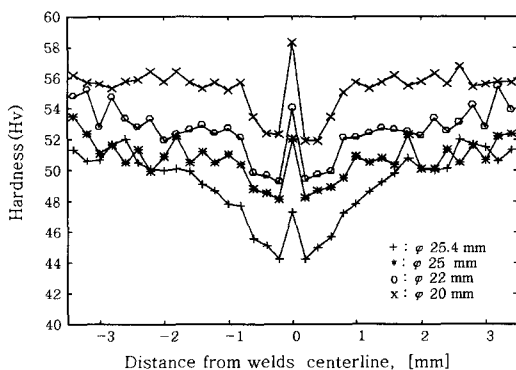


Fig. 11 Hardness distribution across the welds

경 20mm 시험편은 인발에 의한 단면축소율이 22.4%로 가공경화가 되었음에도 불구하고 Fig. 7(a)에 나타난 것처럼  $H=0.45D$  상태에서 용접부 내외면부의 균열발생은 나타나지 않았고 Fig. 7(b)와 같이  $H=0.15D$ 의 극한상황의 시험 조건하에서도 튜브 외면의 용접부에서 균열발생은 나타나지 않았다. 이러한 결과로부터 용접부의 건전성을 확인할 수 있었다.

Fig. 8의 인발에 따른 강도와 연신율의 관계에서 인장강도 및 항복강도는 튜브의 외경이 25.4mm에서 20mm로 감소할수록 상승하였다. 또한 연신율은 외경 25.4mm의 시편에서 약 9.4%, 외경 20mm의 경우 7.2%로 감소하였다. 따라서 인발에 의한 단면축소율이 커짐에 따라 가공경화가 증가함을 알 수 있다.

용접선을 따른 경도분포는 Fig. 9에 나타난 것처럼 튜브외경이 작아질수록 Hv47에서 Hv58로 급격히 증가하고 있으나 모재부에서는 Fig. 10에 나타난 것처럼 그 증가가 Hv51에서 Hv56으로 적었다. 이러한 결과로 볼 때 인발에 의한 단면축소율이 커질수록 용접부는 열영향부 및 모재부보다 가공경화의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11에 나타난 것처럼 외경 25.4mm 시험편의 경우 용접부의 경도가 열영향부의 경도보다 높은 현상은 Nanba 등의 문헌<sup>3)</sup>에서 확인할 수 있다. 즉 용접선으로부터 약 2mm에 걸친 열영향부에서 거의 일정하게 낮은 경도분포를 보이다가 모재부로 갈수록 경도가 상승하여 일정한 값을 나타낸다. 이때 입열량에 따라 용접선의 경도가 열영향부보다 약간 높게 나타나지만, 이 경우는 인발가공이 없는 용접한 상태 그대로의 경도분포이다.

A3003과 같은 비열처리형 알루미늄합금은 냉간가공 및 안정화처리를 통해 강화된 합금으로서 용접에 의해 재료의 재결정온도 이상까지 가열된 열영향부의 조직 및 특성은 매우 다르게 나타난다<sup>8)</sup>. 비열처리형 알루미늄합금을 아크용접 할 때 입열량을 증가시키면 열영향부의 크기는 증가하고 강도는 저하한다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 이러한 강도의 저하는 냉간가공에 의해 연신 및 강화된 조직이 용접열에 의해서 결정립이 재결정하고 온도가 증가할수록 (즉 용접선에 가까워질수록) 재결정된 결정립이 성장하기 때문이다.

Fig. 11의 경도분포에서 인발가공의 유무와 상관없이 용접부의 경도가 열영향부 보다 높게 나타나는 현상과 인발가공에 따른 외경 20mm 시험편에서 모재부보다 용접부의 경도가 보다 높게 나타나는 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. BAS111합금이 조관성형되어 고주파유도 용접되는 과정을 보면 유도코일에 의해 가열된 용융부는 스퀴즈 롤에서 압착이 되면서 여분의 용융

금속은 Fig. 12와 같이 플래쉬(flash)가 되어 용접선 외부로 분출되고 이어서 튜브는 냉각수에 의해 급냉된다. 고주파유도용접 특성상 이러한 일련의 가열, 용접, 압착, 냉각은 거의 동시에 이루어지기 때문에 용접부의 조직은 미세하게 변한다고 생각된다. 이 때 스퀴즈 롤 사이의 G. R. 크기에 의해 용접부 및 열영향부의 크기가 결정되는데, 이 영역은 G. R.이 높을수록 좁아지며 경도가 낮아지는 경향이 있다<sup>3, 4)</sup> 고 알려져 있다.

Fig. 13의 (A)는 BAS111합금의 용접부 단면을 나타내었다. 또한 Fig. 13(B)는 Fig. 13(A)에서 A3003합금의 용접부 및 열영향부에 해당하는 A지점의 미세조직을 나타낸 것이고, Fig. 13(C)는 Fig. 13(A)에서 A3003합금의 모재부에 해당하는 B지점의 미세조직을 나타내었다. Fig. 13(B)에서 용접선의 폭은 약 30 $\mu$ m이며 치밀한 응고조직을 나타내며, 용접선에 접해있는 열영향부는 각각 좌우로 약 30 $\mu$ m에 걸쳐 급냉으로 인하여 응고조직이 매우 치밀하게 형성되어 있다. 그러나 용접선에서 각각 좌우로 약 60 $\mu$ m 떨어진 열영향부에서는 열처리효과에 의해 Fig. 13(C)의 모재부에 비해 석출물의 입자가 길게 성장하여 그 크기가 모재부보다 증가하고 있다. 따라서 용접부는 용융상태에서 응고될 때 급냉에 의해 조직이 미세하게 되며, 더욱이 SQ롤에서 G. R.에 의해 압착되므로 열영향부보다는 경도가 증가한다고 생각된다. 그러나 인발가공이 없는 Fig. 11의 외경 25.4mm 시험편에서는 모재부가 응고조직인 용접부보다 높은 경도를 나타내는데 그 이유는 BAS111합금이 열간가공에 의해 클래딩 될 때 H14 상태로 경화되었기 때문이다.

Fig. 14는 인장시험 후 파단면을 나타낸 것이다. 튜브외경에 관계없이 대부분의 시험편에서 인장축과 슬립방향의 각도가 약 45°로 파단되었다. 인장시험편의 파단이 발생한 네킹(neck) 부위의 외경변화는 외경 25.4mm의 경우 24.0mm로 1.4mm 감소하였으나 외경 20mm의 경우 19mm로 1.0mm 감소하였다. 파단부에서 용접부가 관찰될 부위는 외경 20mm의 경우 시험편에 걸쳐있는 상하 슬립방향의 양단에서 관찰되었으

나 외경 25.4mm의 경우 상하 슬립방향의 중간지점에서 관찰되었다. 따라서 외경 20mm의 경우 냉간가공경화에 의한 용접부의 경도증가가 모재부보다 크게 작용하기 때문에 소성변형에 대한 저항이 증가한다고 생각된다. 이러한 파단면의 용접부와 모재부에 대한 미세조

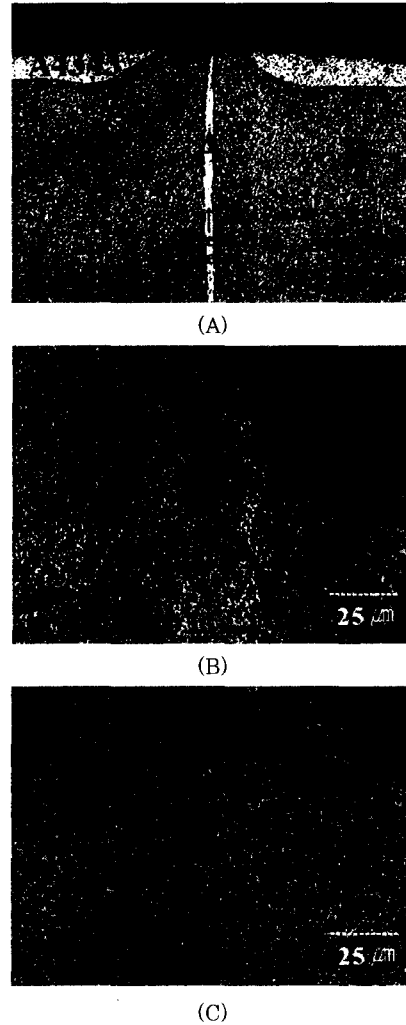


Fig. 13 Microstructures of BAS111 alloy. (A)cross-section of welds, (B)weld metal and HAZ in A3003 alloy, (C)base metal in A3003 alloy

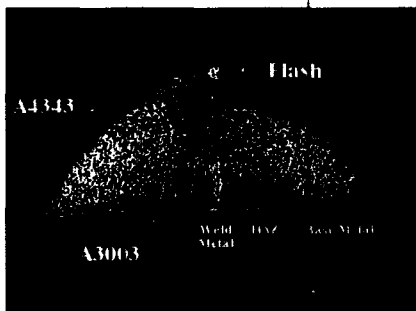


Fig. 12 Cross section of weld bead in BAS111 alloy

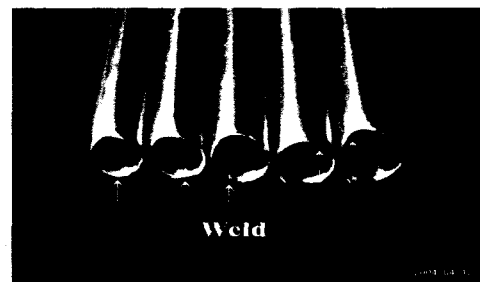


Fig. 14 Fracture shape of tensile test specimens ( $\phi$ =20, 22, 23, 24, 25.4mm, t=1.5mm)

직을 관찰한 결과로부터 Fig. 11에서 외경 20mm 튜브의 경우 용접부가 모재부보다 경도가 증가하는 현상을 유추할 수 있다.

Fig. 15는 인발하지 않은 외경 25.4mm 튜브 용접 시험편에서 용접부(a)와 모재부(b)의 파단면을 나타낸 것이다. 모두 연성파괴로서 용접부에서는 슬립변형에 의한 슬립면이 연신된 벽면에서 부분적으로 관찰되었다. Fig. 16은 인발가공된 외경 20mm 용접 시험편의 용접부(a) 및 모재부(b)의 파단면으로, 이 경우도 연성 파괴를 나타냈으나 Fig. 15와 달리 파단면은 덩플 형태를 보였다. 인발가공이 없는 외경 25.4mm 튜브의 경우 Fig. 13에서 알 수 있는 것처럼 용접부(B)는 치밀한 조직을 보이지만 가공경화는 없는 응고조직 자체의 상태이므로 열간가공에 의해 가공경화된 모재부(C)보다 경도가 낮다. 그러나 인발은 냉간가공상태에서 이루어지기 때문에 가공경화의 정도는 열영향부 및 모재부보다 조직이 치밀한 용접부에서 크게 나타나므로 인발에 의한 가공도가 증가할수록 경화가 크게 된다고 보여진다.

제2상입자를 함유하고 있는 상용재료에서의 연성파괴는 대부분 제2상입자들에 의해 유발된다고 알려져 있다<sup>10)</sup>. Fig. 15에서처럼 인발가공이 없는 외경 25.4mm 시험편의 경우 용접부(a) 및 모재부(b)에서 비교적 균일하게 큰 소성변형을 일으키므로 lips 형태의 파괴양상을 보이며, Fig. 8에 나타난 것처럼 연신율은 9.4%에 달한다.



(a) welds



(b) base metal

Fig. 15 SEM fractographs of tensile test specimen ( $\Phi=25.4\text{mm}$ ,  $t=1.5\text{mm}$ )

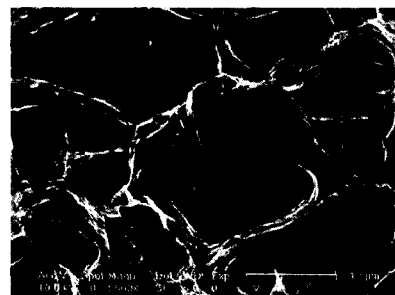
반면에 Fig. 16에서처럼 외경 20mm로 단면축소율이 22.5%로 인발가공된 경우 제2상입자에 의해 미소 공동의 발생, 성장 및 합체에 의하여 연성파괴가 일어나기 때문에 그 파면이 덩플 형태로 나타나며 연성이 감소된 결과 Fig. 8에 나타난 것처럼 연신율은 7.2%로 감소하게 된다.

이러한 덩플 내부에는 공동을 발생시키는 작은 입자가 관찰되는데, 용접부(a)의 덩플 내부에서 관찰되는 입자의 크기는 약  $1.5\mu\text{m}$ 이며, 모재부(b)의 입자는 약  $2\mu\text{m}$ 로 약간 크게 나타났다. 또한 Fig. 16의 용접부(a)의 덩플크기가 10~15 $\mu\text{m}$  정도인 것에 비하여 모재부(b)는 15~20 $\mu\text{m}$ 로서 덩플이 생긴 후 슬립에 의한 성장이 일어날 때 용접부 쪽이 모재부보다 큰 응력을 받고 있음을 알 수 있으며 따라서 인발에 의한 냉간가공경화가 증가할수록 모재부보다 용접부의 경도가 증가하는 현상을 나타낸다고 생각된다. 이처럼 인발에 의한 냉간가공이 증가하여 모재보다 용접부의 경도가 상승하면 BAS111합금 튜브는 피어싱 공정에서 균열이 발생할 수 있다.

이상으로부터 외경 25.4mm를 인발하는 경우 모재부와 용접부의 경도가 거의 동일한 값을 나타내는 외경 22mm 정도로 가공하는 것이 바람직하며 이때 단면축소율은 약 15%이다. 그 이상의 단면축소율에서는 냉간가공에 의한 기계적성질의 경년변화를 방지하기 위해 안정화처리가 필요하다.



(a) welds



(b) base metal

Fig. 16 SEM fractographs of tensile tested specimen ( $\Phi=20\text{mm}$ ,  $t=1.5\text{mm}$ )

## 5. 결 론

열교환기용 BAS111알루미늄합금을 고주파유도용접하여 외경 25.4mm, 두께 1.5mm의 튜브로 제조하였다. 이 튜브를 두께의 변화없이 외경만을 25~20mm의 범위로 냉간인발가공하여 기계적 특성을 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 수축각  $\alpha=6.8^\circ$ , 스퀴즈 롤에 의한 girth reduction은 2.0mm, 발전판 입력  $P=50\text{kW}$ 의 조건에서 양호한 용접편이 제조되었다. 이 경우 튜브 내외면부의 버 및 비드 형상이 양호하였으며, 용접부의 폭은  $30\sim 40\mu\text{m}$ 였다.

2)  $H=0.45D$ 의 굽힘시험에서 모든 시험편의 용접부는 균열발생이 나타나지 않았다.

3) 인발에 의한 단면축소율이 증가할수록 용접부 및 모재부의 경도는 증가하였으며, 특히 용접부의 경도증가는 현저하게 나타났다.

4) 적절한 인발조건은 모재부와 용접부의 경도가 거의 동일한 값을 나타내는 단면축소율 약 15%정도이며, 그 이상의 시험편에서는 용접부의 경도가 모재부보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 용접부가 급냉으로 인해 미세조직으로 되어 인발에 의한 냉간가공경화가 보다 크게 작용하기 때문으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 2003년도 중소기업기술혁신개발사업의 연구비지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Keizo Nanba : Heating Form of Faying Edges and Effect of Convergence-Angle, Journal of Japan Welding Society, **49-10** (1980), 668 (in Japanese)
2. Keizo Nanba : Experimental study on forming condition for manufacturing of high frequency induction welded tube of BA11 alloy for heat exchangers, Journal of Japan Institute of Light Metals, **32-7** (1982), 356 (in Japanese)
3. Keizo Nanba : Requirements of high frequency induction welding of BA11 alloy tubes for heat-exchangers, Journal of Japan Institute of Light Metals, **32-9** (1982), 465 (in Japanese)
4. Keizo Nanba : Experimental study on tubing condition for manufacturing of high frequency induction welded tube of 5083 alloy, Journal of Japan Institute of Light Metals, **33-4** (1983), 204 (in Japanese)
5. S. S. Kang : Prospect and reality of aluminum alloy resistance welding technology, Journal of KWS, **15-2** (1997) 19 (in Korean)
6. D. C. Martin : High Frequency Resistance Welding, Bull. Ser. Welding Res. Council., **160** (1972), 1
7. C. M. Kim and Y. S. Kim : Characteristics of Weld Quality produced by the High Frequency Electric Resistance Welding Simulator, Journal of KWS, **19-3** (2001) 4 (in Korean)
8. C. H. Lee, R. W. Chang : Weldability of Al Alloys, Journal of the KWS, **11-1** (1993) 2 (in Korean)
9. White S. S., Manchester R. E., Moffat W. G. and Adams C. M., : Plastic Properties of Aluminium - Magnesium Weldments, Welding Journal, **34-2** (1955), 112
10. D. Broek : The role of inclusions in ductile fracture and fracture toughness, Eng. Fracture Mechanics, **1-10** (1973), 55-66