

## 고주파유도용접된 열교환기용 BAS121합금튜브의 기계적 특성에 미치는 인발조건의 영향

한상우 · 김병일 · 이현우\* · 진우용\*\* · 국진선\*\*\*†  
순천대학교 신소재응용학부, \*전북대학교 신소재공학부  
\*\*광양보건대학 치기공과, \*\*\*한려대학교 신소재공학과

## Effects of Drawing Parameters on Mechanical Properties of BAS121 Alloy Tubes for Heat-exchangers by High Frequency Induction Welding

Sang-Woo Han, Byung-Il Kim, Hyun-Woo Lee, Woo-Young Chon\*\* and Jin-Seon Gook\*\*\*†

Material Science and Metallurgical Engineering, Sunchon National University, Suncheon, 540-742, Korea

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

\*\*Dept. of Dental Technology, Kwangyang Health College, Kwangyang 545-704, Korea

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

(2004년 9월 21일 받음, 2004년 11월 24일 최종수정본 받음)

**Abstract** The aim of this study is to investigate the optimum drawing parameter for BAS121 welded tubes. The BAS121 aluminium alloy tubes with 25 mm in external diameter and 1.3 mm in thickness for heat-exchangers were manufactured by high frequency induction welding with the V shaped convergence angle 6.5° and power input 55 kW. With increasing the reduction of area (13, 21%) 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 22 mm, hardness of weld metal was higher than that of base metal. The optimum drawing parameter of area reduction in BAS121 alloys was estimated about 13% because of the work hardening of welds.

**Key words** high frequency induction welding, clad aluminium alloy, extrusion, brazing.

### 1. 서 론

고주파유도용접(High Frequency Induction Welding)에 의한 알루미늄합금 튜브의 용접 및 성형조건이 보고<sup>1-4)</sup>된 이후 최근 국내에서도 열교환기용으로 사용할 수 있는 알루미늄합금 클래드재(BAS111합금 및 BAS121합금) 튜브를 고주파유도용접에 의해 생산하고 있다.

BAS121합금은 KSD7043(알루미늄합금 뿔뿔 및 브레이징시트)에서 다음과 같이 규정하고 있다. 우선 BAS는 브레이징시트(Brazing Sheet)를 의미한다. 다음 121의 첫 번째 숫자는 브레이징시트를 구성하는 호칭번호(한면 뿔뿔 클래드일 경우 1)이며, 두 번째 숫자는 표피재의 합금번호 및 호칭번호(A4343의 경우 1, A4045일 경우 2)이며, 세 번째 숫자는 심재의 합금번호 및 호칭번호(A3003의 경우 1)를 각각 의미한다. 따라서 BAS121합금은 피복재인 A4045합금이 심재인 A3003합금에 한면

뿔뿔 클래딩 되어있는 브레이징시트이다.

BAS121합금은 피복재(A4045)의 액상선온도가 590°C, 심재(A3003)의 액상선온도가 654°C이다. 이 클래드 알루미늄합금(BAS121)을 620°C에서 30분 정도 가열하면 피복재가 녹아 브레이징 필러(Brazing Filler)의 역할을 한다. 따라서 BAS121합금 튜브는 자동차 열교환기의 PFC(Parallel Flow Condenser)의 헤더튜브로 장착되어 별도의 브레이징 필러가 없는상태로 브레이징 할 수 있다.

알루미늄합금은 연강에 비해 비열 및 잠열이 크기 때문에 저항발열이 어렵고, 열전도도도 3~4배 정도 커서 열방산이 쉽게 이루어지기 때문에 고주파유도용접에 어려움이 많다.<sup>5)</sup> 또한 BAS121합금재를 고주파유도용접하여 튜브를 생산하는 경우 피복재부와 심재부에서 용점이 64°C의 차이가 있고, 고주파전류가 접합면의 표면부에 집중되는 경향이 있어<sup>6)</sup> 심재의 가열 및 용융이 불충분하여 용접이 용이하지 않다.

BAS121합금판재는 보통 H14(가공경화만 하여 인장강도가 1/2경질로 한 것)의 상태에서 조관하여 용접한 후

†E-Mail : jskook@hanlyo.ac.kr

요구되는 기계적성질 및 치수는 인발을 하여 H16(가공경화만 하여 인장강도가 3/4경질로 한 것)의 상태로 조절한다.

본 연구에서는 고주파유도용접에 의하여 외경 25.0 mm, 두께 1.3 mm인 고주파유도용접관을 제작하고, 내·외면 비드를 절삭제거 한 후 그 외경을 22 및 20 mm로 인발하여 단면축소율을 13% 및 21%로 하였을 때 기계적 성질에 미치는 인발조건에 영향을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험재료

실험재료는 BAS121합금 판재로서 두께 1.3 mm중에 피재인 A4045합금이 0.13 mm 클레딩되어 있으며, 클레딩율은 판두께의 10%이다. 이 판재의 질별은 H14 상태이며, 그 기계적 성질 및 화학조성은 각각 Table 1 및 Table 2에 나타냈다. 고주파유도용접하여 제조된 튜브는 외경 25 mm, 두께 1.3 mm로 외경비  $t/D=0.05$ 이었다.

### 2.2 용접튜브의 제조조건

고주파유도용접에 대한 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 튜브의 제조장치는 상하 롤 스탠드 #1~#7의 7단, 사

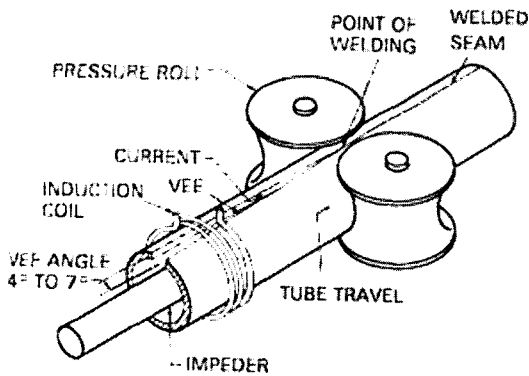


Fig. 1. Schematic of high frequency induction welding process used in producing aluminium tube.

Table 1. Mechanical properties of test material.

Tensile properties			Vickers hardness (Hv)
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	
153	163	9.5	51.5

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

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
A4045	9.9	0.32	0.02	0.05	0.01	0.9	0.02
A3003	0.1	0.4	0.07	1.2	0.01	0.0	0.01

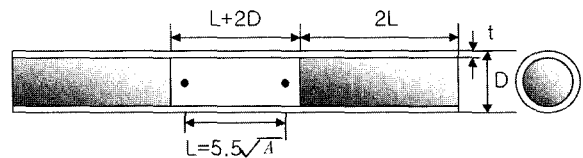
이드 롤 스탠드 7단, 심 가이드 (SG) 롤, 유도가열코일, 스퀴즈(SQ) 롤, 내·외면비드 절삭부 및 정형 롤로 구성되어 있다. 고주파전류발생장치는 공칭출력 95 kW, 발진주파수 400 kHz, 용접속도는 80 m/min이었다. 유도가열코일, 임피더에서 페라이트 코어의 형상, 배치에 관한 고주파전류 도입조건은 안정한 플래쉬(flash)가 얻어져 접합면 에지의 가열효율이 최적이 되는 조건을 적용하였다. 가열조건에 있어 수축각(vee angle)  $\alpha$ 는 6.5°였다. 발진관 입력조건은 플레이트전압  $V_p(kV)$ , 플레이트전류  $I_p(A)$  및 그리드전류  $I_G(A)$ 를 측정하여 그 입력  $P=V_p(I_p-I_G)=55 kW$ 를 표준으로 하였다. 가압조건으로는 스퀴즈 롤(SQ)에서의 girth reduction을 조절하여 약 2.0 mm가 되도록 하였다.

### 2.3 용접튜브의 인발조건

인발하기 전 용접튜브는 길이 9 m, 외경 25 mm, 두께 1.3 mm로 용접상태가 양호한 것을 선택하였다. 이 샘플을 1회의 인발공정으로 그 외경과 두께가 각각 22 mm, 20 mm 및 1.3 mm로 되도록 하였다. 이때 단면축소율(area reduction)은 각각 12.6% 및 21%였으며 인발시 튜브내부에 플러그를 장착하여 튜브 내·외면이 고르게 응력을 받도록 하였다.

### 2.4 용접부의 평가방법

인장시험편은 용접후 비드를 제거한 외경 25 mm, 두께 1.3 mm인 튜브와 2.3의 방법으로 인발한 외경과 두께가 각각 22, 20 mm 및 1.3 mm인 튜브를 Fig. 2와 같이 KSB0801에서 규정하는 정형시험편(14C호)으로 하여 물림부의 내부에 동일재질의 금속봉을 넣은 상태로 제작하였다. 시험편의 표점거리를 L이라 할 때, 양쪽 물림부 사이의 비접촉부 길이는  $(L+2D)$ 로 하였고, 물림부 길이는



L : Gage Length  
 D : Outer Diameter of the Tube  
 t : Thickness  
 A : Area of the Cross Section of the Specimen  
 $[= (D-t) \times t \times \pi]$

Fig. 2. Shape of a tensile specimen.

2L, 시험편 전체길이는 400 mm로 하였다.

경도측정은 마이크로비커스 경도기를 사용하였으며, 모재부 및 용접부의 경도분포는 튜브단면의 외경쪽에서 내경쪽을 따라 0.2 mm마다 측정하였고 각각 3회 측정하여 그 평균값을 나타내었다. 용접부와 열영향부를 포함한 모재부의 경도측정은 튜브단면의 외경쪽에서 내경쪽으로 각각 상부(3/10지점), 중앙(1/2)지점 그리고 하부(7/10지점)를 용접선을 가로지르는 방향으로 0.2 mm마다 측정하였고 각각 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다. 이때 시험하중은 100 g, 가압시간은 15초였다.

용접부 단면관찰은 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 또한 시편의 부식액은 90% 중류수에 10%의 불산을 혼합하여 사용하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 용접부의 관찰

Fig. 3은 외경 25 mm의 BAS121합금 튜브의 용접부를 나타낸 것이다. 접합면에 걸쳐있는 용접금속의 폭은 약 30  $\mu\text{m}$ 였으며, 튜브외면부의 버(burr)의 각도는 120~130°의 범위였고, 내면부의 비드도 구의 형상을 가진 양호한 용접부를 나타내었다.

Fig. 4는 외경 25 mm의 BAS121합금 튜브를 내·외면의 비드 및 버를 제거한 후 외경 22 mm로 인발한 시험편의 용접부 단면이다. KSD6713에 규정된 표준조건으로서 튜브내외면의 비드 및 버는 매끄럽게 제거되어야 한다. 즉 비드 및 버의 크기는 0.02 mm 이하, 용접선 좌우의 피복재(A4045) 간격은 0.2 mm 이하를 만족하여야 한다. 이러한 시편을 내부플러그를 사용한 상태에서 인발하면 Fig. 4와 같은 튜브 내외면이 균일한 상태를 얻을 수 있다.

#### 3.3 기계적 특성

Fig. 5는 외경 25 mm인 용접튜브를 각각 외경 22 mm 및 20 mm로 인발하여 튜브상태의 시험편을 2.4의 방법으로 인장시험 한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도는 인발을 하지 않은 외경 25 mm의 시편에서 약 165 MPa이었으며, 외경 20 mm의 경우 183 MPa로 증가하였다. 항복강도는 외경 25 mm의 시편에서 약 155 MPa이었으며, 외경 20 mm의 경우 약 172 MPa로 증가하였다. 연신율은 인발을 하지 않은 외경 25 mm의 시편에서 약 9%이었으나 외경 20 mm로 인발한 시험편의 경우 7.3%로 감소하였다.

Fig. 6은 튜브의 외경변화에 따른 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 외경 25 mm의 경우 용접부의 경도는 Hv52이었고 열영향부에서는 급격히 감소하여 Hv48에서 Hv51 정도를 유지하다가 점차 상승하여 모재에서

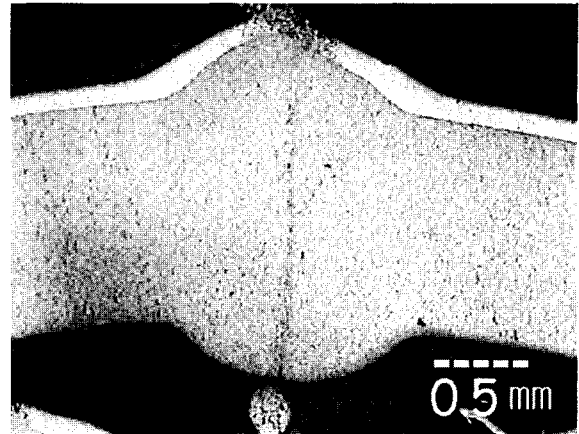


Fig. 3. Microstructures of a welded region.

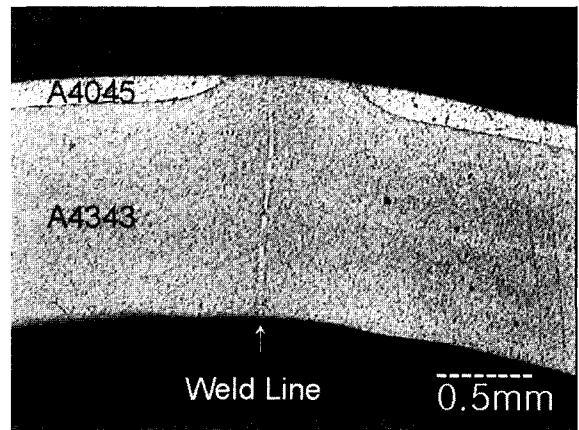


Fig. 4. Cross-section of a welded region,  $\phi = 22$  mm,  $t = 1.3$  mm.

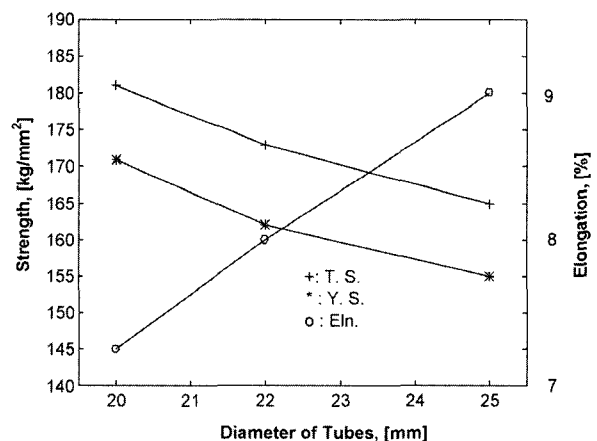


Fig. 5. Variation of strength and elongation of tubes with respect to the tube diameter.

는 Hv52 정도의 일정한 값을 유지하고 있다. 이러한 경향은 외경이 다른 시료에서도 거의 비슷하였으나 외경 25 mm 및 22 mm의 경우 용접부 접합면 경도와 모재부

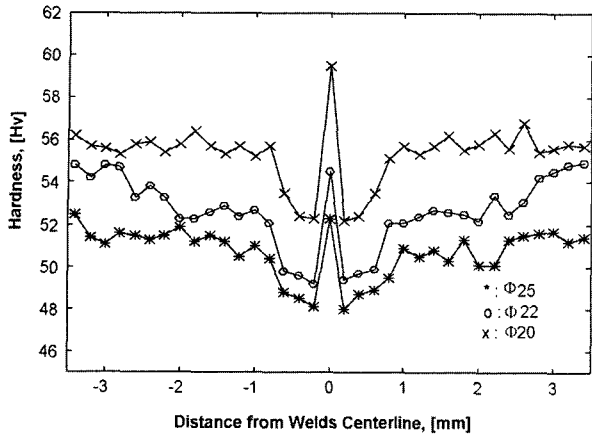


Fig. 6. Hardness distribution across the weld.

의 경도는 비슷한 값을 나타내었다. 반면 외경 20 mm에서는 모재부 경도가 평균 Hv56이었으나 용접부는 평균 Hv59.5로 높게 나타났다.

#### 4. 고찰

BAS121합금을 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 스패터(splatter)로 배출되는 현상은 우수한 용접 품질을 얻을 수 있는 기초조건을 제공한다는 측면에서 볼 때 Fig. 3과 같은 용접부 형상은 바람직하다고 볼 수 있다.

Fig. 5의 인발에 따른 강도와 연신율의 관계에서 인장강도 및 항복강도는 튜브의 외경이 25 mm에서 20 mm로 감소할수록 상승하였다. 또한 연신율은 외경 25 mm의 시험편에서 약 9%, 외경 20 mm의 경우 7.3%로 감소하였다. 따라서 인발에 의한 단면축소율이 커짐에 따라 가공경화가 증가함을 알 수 있다.

인발가공에 따른 용접선과 모재부의 경도증가의 관계

에서 용접선을 따른 경도분포는 Fig. 6에 나타난 것처럼 Hv 8 정도의 증가가 있으나 모재부에서는 Hv 4 정도 증가하였다. 이러한 결과로 볼 때 인발에 의한 단면축소율이 커질수록 용접부는 열영향부 및 모재부보다 가공경화의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에 나타난 것처럼 외경 25 mm 시험편의 경우 용접부의 경도가 열영향부의 경도보다 높은 현상은 BAS111합금에서도 확인할 수 있다.<sup>8)</sup> 즉 용접선으로부터 약 2mm에 걸친 열영향부에서 거의 일정하게 낮은 경도분포를 보이다가 모재부로 갈수록 경도가 상승하여 일정한 값을 나타낸다.

Fig. 6의 경도분포에서 인발가공의 유무와 상관없이 용접부의 경도가 열영향부 보다 높게 나타나는 현상과 인발가공에 따른 외경 20 mm 시험편에서 모재부보다 용접부의 경도가 보다 높게 나타나는 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. BAS121합금이 조관성형되어 고주파유도 용접되는 과정을 보면 유도코일에 의해 가열된 용융부는 스퀴즈 롤에서 압착이 되면서 여분의 용융금속은 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 변한다.<sup>8)</sup> 이때 스퀴즈 롤 사이의 G. R. 크기에 의해 용접부 및 열영향부의 크기가 결정되는데, 이 영역은 G. R.이 높을수록 좁아지며 경도가 낮아지는 경향이 있다고 알려져 있다.<sup>3,4)</sup>

Fig. 7의 (A)는 BAS121합금의 용접부 단면을 나타내었다. 또한 Fig. 7(B)는 Fig. 7(A)에서 A3003합금의 용접부 및 열영향부에 해당하는 A지점의 미세조직을 나타낸 것이고, Fig. 7(C)는 Fig. 7(A)에서 A3003합금의 모재부에 해당하는 B지점의 미세조직을 나타내었다. Fig. 7(B)에서 용접선의 폭은 약 30 μm이며 치밀한 응고조직을 나타내며, 용접선에 접해있는 열영향부는 각각 좌우로 약 30 μm에 걸쳐 급냉으로 인하여 응고조직이 매우 치밀하게 형성되어 있다. 그러나 용접선에서 각각 좌우

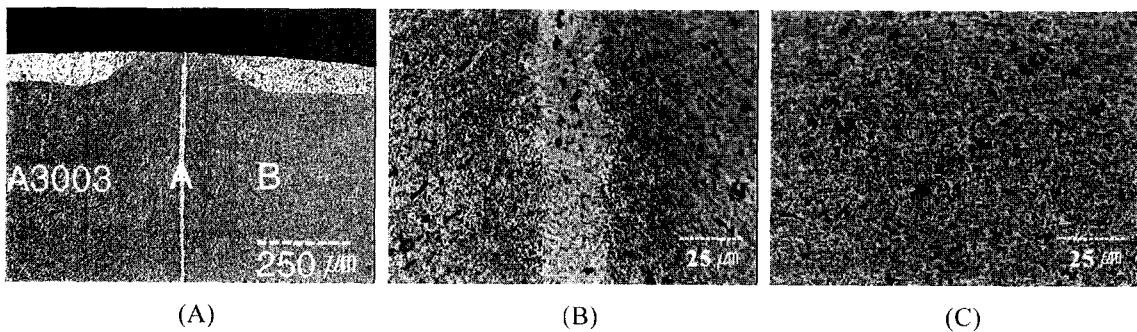


Fig. 7. Microstructures of BAS121 alloy. (A)cross-section of welds, (B)weld metal and HAZ in A3003 alloy, (C)base metal in A3003 alloy

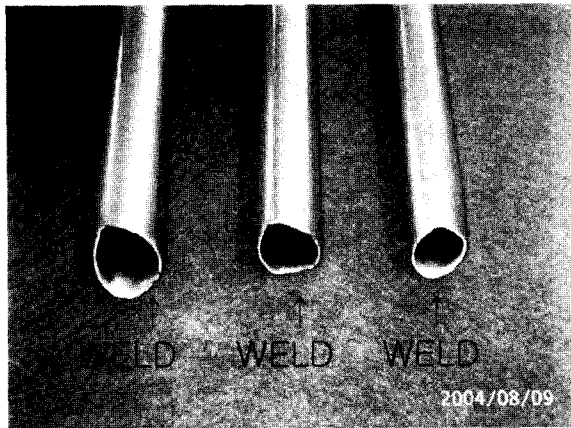


Fig. 8. Fracture shape of tensile test specimen ( $\phi=25, 22, 20$  mm,  $t=1.3$  mm).

로 약  $60 \mu\text{m}$  떨어진 열영향부에서는 열처리효과에 의해 Fig. 7(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.

Fig. 8은 인장시험편의 파단면을 나타낸 것이다. 튜브 외경에 관계없이 대부분의 시편에서 인장축과 슬립방향의 각도가 약  $45^\circ$ 로 파단되었다. 인장시험편에서 파단이 발생한 네킹(neck) 부위의 외경변화는 외경 25 mm의 경우 24 mm로 1.4 mm 감소하였으나 외경 20 mm의 경우 19 mm로 1.0 mm 감소하였다. 파단부에서 용접부가 관찰된 부위는 외경 20 mm의 경우 시험편에 걸쳐있는 상하 슬립방향의 양단에서 관찰되었으나 외경 25 mm의 경우 상하 슬립방향의 중간지점에서 관찰되었다. 따라서 외경 20 mm의 경우 냉간가공경화에 의한 용접부의 경도증가가 모재부보다 크게 작용하기 때문에 소성변형에 대한 저항이 증가한다고 생각된다.

Fig. 9는 A3003합금과 클래드층 A4045합금의 경계면을 나타낸 것이다. 경계층은 명확히 구분이 되며, A4045층의 Si입자들의 크기는 약  $5 \mu\text{m}$  정도이다. 또한 A3003합금 기지내의 홀 내부에 2상입자가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 인발하지 않은 외경 25 mm 튜브에서 A4045 및 A3003 경계층의 파단면을 나타낸 것이다. 모두 연성파괴형태를 나타내지만 A4045층은 슬립변형에 의한 슬립면이 연신된 벽면에서 전체적으로 관찰되었다. 반면 A3003의 경우 덩플형태의 파단면을 나타내고 있으며 인장시험에서 보다 큰 응력을 받고 변형되었음을 알 수 있다.

Fig. 11은 인발가공된 외경 20 mm 용접시험편의 용접부(a) 및 모재부(b)의 파단면을 나타낸 것이다. 용접부(a)

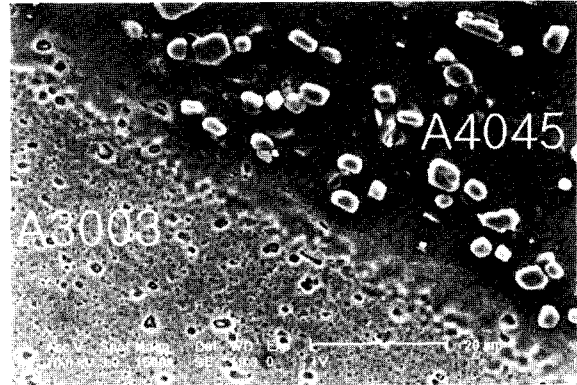


Fig. 9. Interface of A4045 and A3003 alloys ( $\phi=25$  mm,  $t=1.3$  mm).

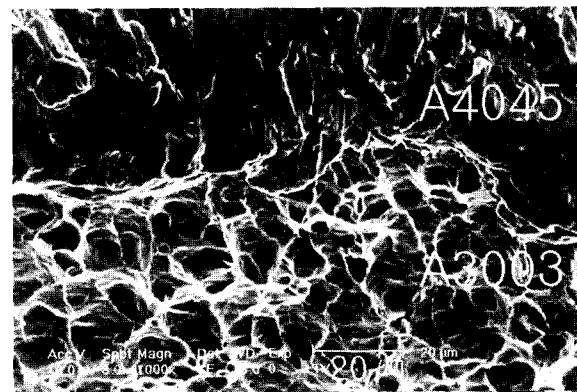
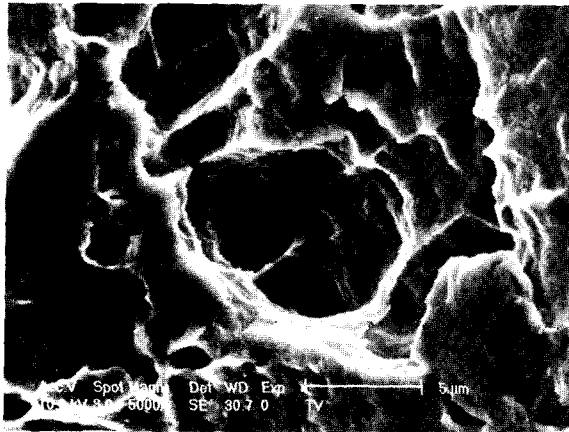


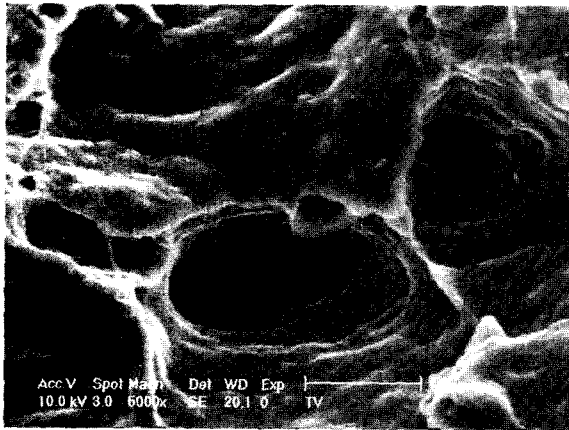
Fig. 10. SEM fractographs of tensile test specimen ( $\phi=25$  mm,  $t=1.3$  mm).

의 파단면은 덩플 내외부의 변형이 심하게 나타나며 가공경화가 많이 발생한 것을 알 수 있다. 반면에 모재부(b)의 경우 덩플 내외부의 변형이 그다지 심하지 않으며 가공경화가 적은 것을 알 수 있다. 이러한 덩플은 제2상입자에 의해 미소공동의 발생, 성장 및 합체에 의하여 연성파괴가 일어나기 때문에 발생한다.<sup>10)</sup> 제2상입자를 함유하고 있는 상용재료에서의 연성파괴는 대부분 제2상입자들에 의해 유발된다고 알려져 있으며,<sup>10)</sup> Fig. 9에서 A3003합금 기지중에 있는 홀 내부에 2상입자가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

인발가공이 없는 외경 25 mm 튜브의 경우 Fig. 7에서 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 경도가 크게 된다고 보여진다. Fig. 11에서 용접부와 모재부의 파단면 덩플을 비교해보면 용접부는 덩플주



(a)



(b)

**Fig. 11.** SEM fractographs of tensile tested specimen ( $\phi=20$  mm,  $t=1.3$  mm) (a) welds (b) base metal.

변이 거칠고 변형이 심하지만 모재부에서는 딩플주변이 매끄러우며 큰 변형이 없는 것으로 보인다. 따라서 인발에 의한 냉간가공경화가 증가할수록 모재부보다 용접부의 가공경화가 증가하며 경도가 상승한다고 보여진다.

이상으로부터 외경 25 mm를 인발하는 경우 모재부와 용접부의 경도가 거의 동일한 값을 나타내는 외경 22 mm 정도로 가공하는 것이 바람직하며 이때 단면축소율은 약

13%이다.

## 5. 결 론

열교환기용 BAS121알루미늄합금을 고주파유도용접하여 외경 25 mm, 두께 1.3 mm의 튜브로 제조하였다. 이 튜브를 두께의 변화없이 외경만을 각각 22 mm 및 20 mm로 냉간인발가공하여 기계적 특성을 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 양호한 용접튜브를 제조할 수 있는 조건은 수속각  $\alpha=6.5^\circ$ , 스퀴즈 롤에 의한 girth reduction 2.0 mm, 발진관 입력  $P=55$  kW였다. 이 때 튜브 내외면부에서 양호한 형상의 비드 및 버가 얻어졌으며, 용접선의 폭은 약  $30 \mu\text{m}$ 였다.

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

3) 적절한 인발조건은 모재부와 용접부의 경도가 거의 동일한 값을 나타내는 단면축소율 약 13%정도이다. 그 이상의 시험편에서는 용접부의 경도가 모재부보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 용접부가 급냉으로 인해 미세조직으로 되어 인발에 의한 냉간가공경화가 모재부보다 증가하기 때문으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. N. Keizo, J. of Jpn. Welding Soc., **49**(10), 668 (1980).
2. N. Keizo, J. of Jpn. Inst. Light Metal, **32**(7), 356 (1982).
3. N. Keizo, J. of Jpn. Inst. Light Metal, **32**(9), 465 (1982).
4. N. Keizo, J. of Jpn. Inst. Light Metal, **33**(4), 204 (1983).
5. S. S. Kang, J. of Kor. Welding Soc., **15**(2), 19 (1997).
6. D. C. Martin, High Frequency Resistance Welding, Bull. Ser. Welding Res. Council., **160**, 1 (1972).
7. C. M. Kim and Y. S. Kim, J. of Kor. Welding Soc., **19**(3), 4 (2001).
8. J. S. Gook, N. C. Kim, J. K. Song and D. T. Jeon, J. of Kor. Welding Soc., **22**(4), 56 (2004).
9. D. Broek, Eng. Fracture Mechanics, **1**(10), 55-56 (1973).