

Novel Brazing법에 의한 Al의 공정접합에 관한 연구

정병호 · 김무길* · 이성열**

A Study of Eutectic Bonding for Aluminium using Novel Brazing Process

B. H. Jung · M. G. Kim* · S. Y. Lee**

Key words : Novel brazing(노블 브레이징), Bonding condition(접합조건), Eutectic composition (공정조성), Thickness of eutectic layer(공정층의 두께), Diffusion controlled process(확산율속과정), Ultimate tensile strength(최대인장강도)

Abstract

To investigate the optimum brazing condition, variation of bonded structure and mechanical properties of novel brazed pure Al with bonding condition (brazing temperature, time and Si/flux ratio) was studied. A basic study of the bonding mechanism was also examined.

The optimum brazing condition was obtained at 590°C for 2 minutes and the bonded structure showed that it is composed of almost entirely eutectic Al-Si with near eutectic composition.

At higher brazing temperature 630°C, hypoeutectic Al-Si structure was observed in the bonded area and resulted in erosion of base metal. The thickness of eutectic layer formed in optimum brazing temperature increased linearly with the square root of time, showing a general diffusion controlled process. The ultimate tensile strength of bonded joint brazed at an optimum brazing condition was about 60% of base metal and its fracture surface showed a brittle mode.

1. 서 론

1970년대부터 브레이징(brazing)을 이용하여 생산을 시작한 자동차 에어컨용의 콘덴서나 증발기 등에서는 현재 거의 100% Al화가 되어 있으며, 최근에는 Al이 가볍고 열전도성이 좋아 라디에이터나 가열기의 20~30%가 Cu제품에서 Al제품으

로 대체되고 있는 실정이다¹⁾. Al의 브레이징은 플럭스(flux)를 사용하는 방법과 사용하지 않는 2가지 방법으로 크게 나누어지며 그 방법 또한 다양하다²⁾. 현재 사용 용도가 많은 열교환기 등의 대량생산에서는 주로 N₂ 분위기에서 비부식성 불화물계 플럭스를 사용하는 Nocolok 브레이징(NB법)과 플럭스를 사용하지 않는 진공 브레이징의 2가지로

* 부경대학교 재료공학부(원고접수일 : 99년 9월)

** 한국해양대학교 기계소재공학부

집약되고 있는데, 경제성이 큰 NB법은 1983년경부터 미국, 일본 등지에서 열교환기 메이커에 의하여 양산되기 시작하였다¹⁾. 그러나 이러한 NB법으로 제조되는 열교환기의 Al소재 중 약 50% 이상이 납재인 브레이징 시트(brazing sheet)인데, 이것은 고가이기 때문에 보다 저렴한 재료로 대체하기 위하여 1992년에 열교환기 Al재의 접합에 적용한 방법이 Nocolok Sil-flux 브레이징, 일명 노블 브레이징(Novel Brazing)이다^{2)~5)}. 이 방법은 기존의 NB법에서 사용하는 브레이징 시트 대신 Si 등의 금속 분말과 플럭스를 납재로 사용하여 공정조각의 접합부를 형성시키는 일종의 공정접합으로 Al과 공정을 이루는 Si분말 외에 Zn, Cu, Ge분말 등도 사용 가능하며, 최근 Al/Cu의 이중금속 접합이나 표면개질에도 적용 가능한 것으로 일부 보고되고 있으나⁶⁾ 상세한 보고는 없는 실정이다. 이 방법의 실용화에 대해서는 캐나다의 Alcan사와 일본 경금속사가 공동으로 연구 중에 있으나 접합조건에 따른 조직 및 기계적 성질 등의 보고가 거의 없고, 또 향후 실제 제품 생산에도 적용할 수 있는 견해도 있지만 실용화의 열쇠는 플럭스의 균일한 도포기술, 접합결합의 감소 등으로 보고 있다⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 Al/Al의 접합에 있어 새로운 기술인 노블 브레이징법을 적용시킨 국내 기초연구의 일환으로서 접합조건에 따른 접합부의 조직, 최적 접합조건 및 기계적 성질을 조사·연구하였으며, 아울러 접합기구에 대한 기초적인 고찰도 실시하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료

접합실험에 사용된 모재는 10mm의 인발가공된 공업용 순 Al 봉재로 이의 화학성분 및 측정된 대표적인 기계적 성질은 표 1과 같다. 납재(삽입재)로 사용된 Si 분말은 순도 99.9%의 CP급으로 입도분석 결과 평균입경은 약 24 μ m이었으며, 불화물계 Nocolok 플럭스는 XRD분석 결과 $KAlF_4 + K_2AlF_5 \cdot H_2O$ 에 K_3AlF_6 가 미량 함유된 개량된 형태의 화합물임이¹¹⁾ 확인되었다. 한편 이 플럭스의 열분석 시험결과 액상선 온도는 약 580~590°C이

Table 1 Chemical composition and some mechanical properties of base material used

| Chemical Composition(wt.%) | | | | Mechanical Properties (at room temp.) | | | |
|----------------------------|------|------|------|---------------------------------------|-----------|-------|---------------|
| Fe | Si | Zn | Al | UTS (kg/mm ²) | T · E (%) | Hv | Fracture mode |
| 0.15 | 0.08 | 0.01 | Bal. | 12 | 40 | 29~34 | cup & cone |

였으며, 평균입경은 약 11 μ m이었다.

2.2 접합방법 및 조건

접합로는 PID 제어방식의 고온 관상 접합로를 사용하였다. 삽입재는 Si/flux의 중량비가 각각 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3이 되도록 혼합 후 알코올을 이용, slurry를 만들고 접합할 면의 한쪽에만 현축·도포시켜 150°C에서 약 3분간 건조시켰다. 삽입재의 도포량은 약 9~12 $\times 10^{-3}$ kg/m²의 일정량이 되도록 하였으며, 접합시 가해지는 하중은 시편의 자중보다 크게 하였다. 접합시의 분위기는 NB법에서 사용되는 N₂분위기 대신 약 2 $\times 10^{-4}$ torr의 진공도를 유지시켰다. 접합 온도는 590°C, 610°C 및 630°C의 3종류로 하였는데, 접합온도에 도달할 때까지의 승온온도는 약 80°C/min으로 일정하게 하였다. 또 접합 유지시간은 접합온도에 도달 후 2분에서 12분까지 2분 간격으로 하였으며, 접합 후의 냉각은 전부 노냉시키는 조건으로 하였다. 특히 접합기구의 조사를 위해서는 접합시 생성된 액상이 일정하게 유지되는 것이 중요한데, 이를 위해 접합시편과 달리 봉재 시편의 중앙부에 ϕ 2.7mm, 길이 6mm의 hole을 정밀 가공한 hole시편을 제작하였다. 이 hole내에는 Si/flux의 중량비가 1 : 1인 혼합 slurry를 충전시킨 후 건조시켰으며(이때 삽입재의 양은 약 35~37 $\times 10^{-3}$ kg/m²) 590°C의 온도에서 0~90분까지 각각 유지시킨 후 노냉하였다.

2.3 접합부의 조직 및 기계적 성질 시험

접합시편과 접합기구 조사를 위한 hole시편은 중앙부를 절단 후 2000번까지 사포로 연마하고 diamond paste로 최종 연마 후 keller시약으로 에칭, 광학 현미경 및 SEM-EDX로 접합 계면부 근방의 조직과 성분 분석을 각각 실시하였다. 접합조건에 따른 이음강도는 비례인장시험편을 제작 후

최대인장강도(UTS)와 총연신률(T·E)을 측정하였는데, 이때 접합부는 인장시험편의 중앙부에 오도록 하였고 cross head speed는 1mm/min으로 하였다. 또 접합부의 경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용, 접합부의 중심에서 일정 간격으로 측정하였는데, 이때 하중 50g, 시간은 15sec로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부의 미세조직

그림 1은 Si/flux의 중량비가 1 : 2이고 유지시간이 2분으로 일정시 접합온도에 따른 접합부 근방의 미세조직을 나타낸다. 접합온도에 관계없이 접

합부는 Al-Si 공정조직을 나타내고 있으며 판상 모양의 공정 Si는 불규칙공정 형태로 α -Al의 고용체 내에 석출되어 있다. 또 접합온도가 630°C로 높아지면 접합시 형성된 공정액상이 모재의 입계 쪽으로 많이 침투되어 접합계면의 불규칙성이 커지고 전체적으로 아공정 용고조직에 가까운 형태를 보이고 있다. 접합온도가 590°C일 때 공정액상의 평균 폭은 약 45~50 μ m 정도이나 접합온도가 높은 630°C일 때는 이 폭이 더 넓어진 것을 알 수 있으며, 접합시 형성된 액상이 입내보다는 입계에서 우선 생성된 입계우선용융현상⁸⁾이 더 많이 나타나고 있어, 입계가 액상생성의 시발점이라 볼 수 있다. 즉 입계에서 일단 액상이 생성되면 이 액상은 접합부 표면을 wetting시키면서 퍼지게 되고 액상중의 Si는 고상중의 Al과 밀착성이 더 좋아져서 삼입재 Si는 모재 Al과의 계면에서 반응에 의해 액화가 유도되고 액상의 생성이 촉진되는 것으로 생각된다.

이와 같이 높은 접합온도에서는 액화유도에 의한 모재의 용융이 급격하게 발생되므로 일정량의 삼입재를 고려한다면 시간이 경과할수록 공정액

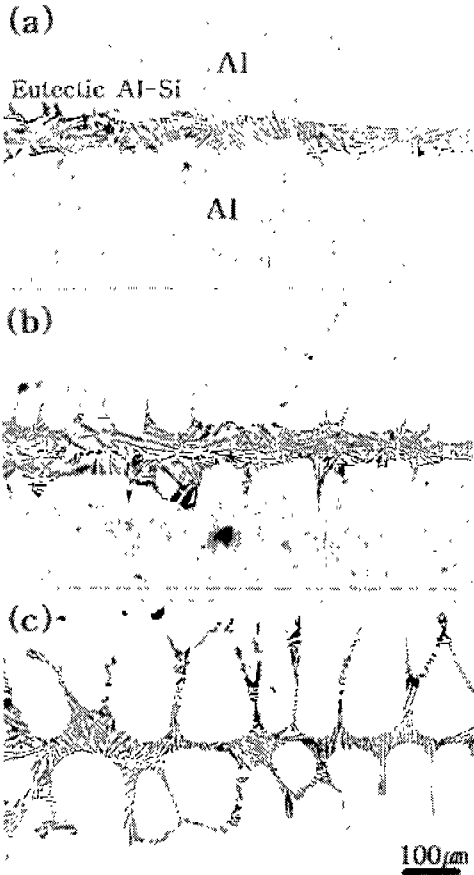


Fig.1 Optical micrographs of cross section brazed at 590°C(a), 610°C(b) and 630°C(c) for 2 minutes



Fig.2 Optical micrographs of cross section brazed at 590°C for 4minutes with different Si/flux ratio (a : 1 : 1, b : 1 : 3)

상보다는 아공정액상이 우선적으로 생성, 아공정 응고조직이 더 쉽게 형성되어 그림 1의 (c)와 같이 α -Al 입자의 입계로 공정조성에 가까운 Al-Si 공정 조직이 둘러싼 형태로 된다고 생각된다. 이러한 아공정응고 형태는 모재쪽으로 침식되는 erosion 현상으로 볼 수 있어 내식성의 열화⁹⁾가 우려된다. 따라서 최적의 접합온도 및 시간은 본 연구의 접합온도 중 가장 낮은 590°C가 적합하고 유지시간도 2분 정도의 단시간이 좋은 것으로 판단된다.

그림 2는 590°C에서 유지시간이 4분으로 일정할 때 접합부 조직에 미치는 Si/flux비의 영향을 비교한 것이다. Si/flux비의 변화에 의해 접합이 되지 않는 경우는 없었으나 이의 비가 1:1일 때, 즉 Si량이 상대적으로 많을 때가 공정 Si 사이의 간격이 더 좁아 미세한 공정조직을 나타내고 있는데, 접합온도가 610°C 및 630°C로 높은 경우에도 유사한 경

향을 나타낸 것이 확인되었다. 그러나 접합온도가 높을 때는 낮을 때보다 모재 Al으로의 Si확산이 더 잘 되고 또 모재의 용융이 쉽게 일어날 수 있어 Si/flux 비를 1:3으로 하여도 무방하나 실제 산화피막의 제거를 충분히 하기 위해서는 이의 비도 적절해야만 접합결합의 감소에 더 유리하리라 생각된다.

그림 3은 Si/flux의 중량비가 1:2로 일정할 때 유지시간의 변화에 따른 접합부 미세조직을 접합온도 590°C 및 630°C에서 각각 비교하여 나타낸 것이다. 대체적으로 일정 접합온도에서 시간의 증가에 따라 공정조직의 평균 폭은 증가되는 경향을 나타내고 있고, 동일 유지시간에서도 접합온도가 높을수록 공정조직의 평균 폭은 더 커져 있음을 알 수 있다. 접합온도가 높은 경우 공정조직의 폭이 더 크게 나타나는 것은 모재 Al내로 Si의 확산속도¹⁰⁾가 빠르고 또 모재의 용융속도도 이에 따라 더 빨라지

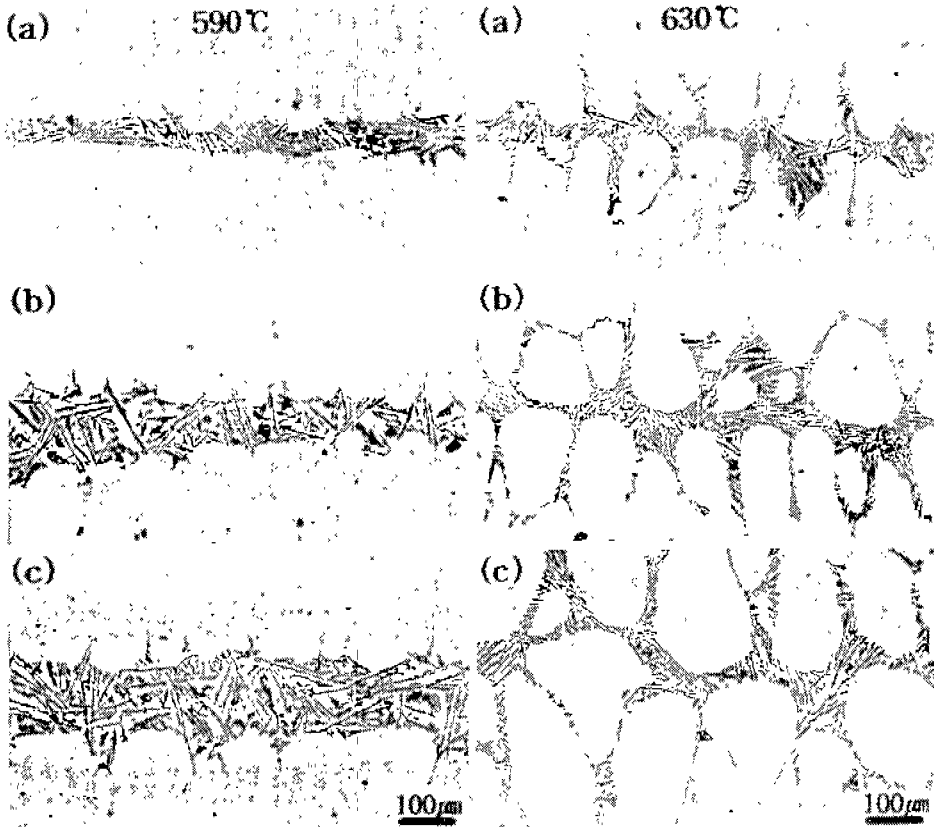


Fig. 3 Optical micrographs of cross section brazed at 590°C and 630°C with different holding time(a; 2min., b; 4min., c; 12min.)

므로 Al중의 Si의 액상선 농도가 감소되어 액상을 유지할 수 있는 최저 Si의 농도가 작아지기 때문이다. 또 접합온도가 590°C일 경우, 유지시간이 증가되어도 공정액상의 입계우선용융 현상에 따른 아공정 응고조직 형태는 나타나지 않는데 비해 접합온도가 높은 경우는 이러한 현상이 크게 나타나고 있다. 이것은 높은 접합온도에서 시간이 증가되면 Al모재와 공정액상의 고액계면에서 Al 모재의 계속적인 용해가 더 많이 일어나게 되어 Al-Si 평형상태도¹⁰⁾에서 알 수 있는 바와 같이 액상중의 Si 농도가 낮아져 계면에서 떨어진 모재쪽으로는 오히려 아공정조성의 액상이 형성되기 때문이다.

그림 4는 630°C의 높은 접합온도에서 접합부 조직의 주요 구성원소를 선분석한 결과로 접합부의 중앙이나 계면에서 떨어진 아공정입계에서 Si의 농도변화에 차이가 없음을 알 수 있으며 α-Al 입자 내에서도 Al 이외의 Si성분은 관찰되지 않고 있다. 이러한 사실은 공정조성에 가까운 공정 Si가 접합부의 중앙이나 아공정입계쪽에도 동일한 조성으로 석출됨을 나타내 주고 있다.

집분석 결과 Si 성분은 접합온도나 시간에 관계없이 공정조성에 가까운 약 9~11wt.%로 나타남이 확인되었다.

3.2 접합결합

그림 5는 접합부 단면조직에서 나타난 결합형태 중 대표적인 것으로 접합조건외의 영향보다는 접합시 표면의 평활도 문제로 인해 생성된 액상이 흐르

거나 또는 편중되어 발생된 경우로 추정된다. 이러한 결함들은 시편의 가장자리 부에 가장 많이 발생되었으며, 그 외 공정조직내에 생성된 결함들은 삼입재 Si이 편중되어 일부가 모재내부로 미처 확산하지 못하고 있다가 시편이 냉각되면서 그대로 잔존되어 나타나거나 또는 모재 표면에 존재한 산화물이 플럭스에 의해 완전히 제거되지 못할 경우 Si이 모재내로 확산이동하지 못하여 발생된 것으로 생각된다.

3.3 접합기구

그림 6은 Si/flux의 비가 1:1로 일정시, 590°C의 온도와 유지시간 0분에서 hole시편에 형성된 Al-Si 공정조직을 나타낸 것이다. 여기서 유지시간 0분은 로의 온도가 590°C에 도달 즉시 로의 스위치를 끄고 시편을 노냉시킨 경우인데, 형성된 공정조직의 평균 폭은 약 150~200μm으로 미세한 침

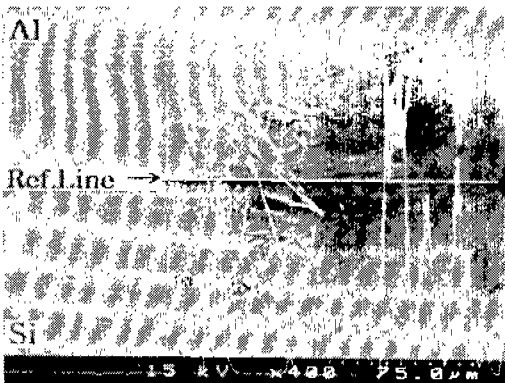


Fig. 4 SEM and X-ray intensity profiles of cross section (brazing temp. ; 630°C, time ; 2min.)



Fig. 5 A typical defect formed in the bonded area

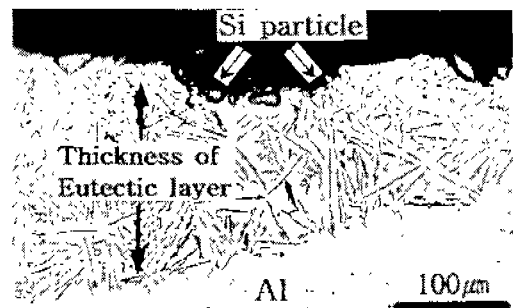


Fig. 6 An optical micrograph of cross section showing Si particles which did not react with Al at the interface in the hole specimen (holding temp. ; 590°C, time ; 0min., Si/flux ratio ; 1 : 1)

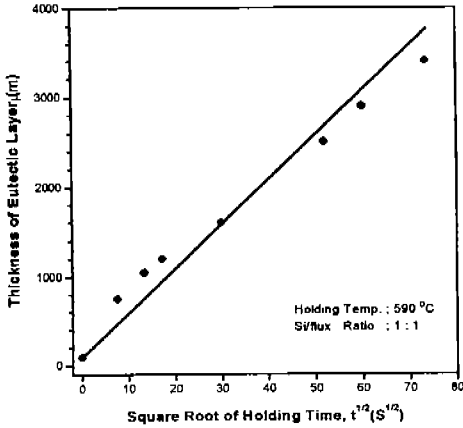


Fig. 7 Relation between the thickness of eutectic layer and square root of holding time in the hole specimen

상의 공정조직을 나타내고 있다. 그러나 그림 6에서 알 수 있듯이 모재 Al과 반응하지 않은 미용융 Si입자가 계면이나 계면근방의 공정조직 사이에 잔존되어 있어, 계면의 일부에 모재 Al과 Si분말이 반응하여 액상이 완전히 형성되지 않은 현상을 보이고 있다. 한편, 유지시간이 1분에서 90분으로 증가될수록 공정조직의 폭은 크게 증가되고, 또 모재와 공정조직의 경계부인 맨 아래쪽은 아공정응고 조직 형태도 일부 나타남이 확인되었다.

그림 7은 590°C에서 유지시간의 변화에 따른 공정조직의 평균 폭을 hole시편에서 각각 측정하여 도시한 것이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 형성된 공정조직의 폭은 유지시간의 제곱근에 비례하여 증가되는 직선형태의 경향에 가깝게 나타나 있다. 이러한 경향은 본 연구의 접합기구가 용접저하 원소 Si이 고상의 Al모재쪽으로 확산되어 나가는 확산을속과정임을 시사해 주고 있는데, 최근 Tim-sit가 제시한 접합기구의 고찰에서도 밝힌바 있으며⁵⁾, 이러한 접합기구는 실제 접합시편에서도 동일하게 적용될 수 있는 것으로 판단된다.

3.4 접합부의 기계적 성질

그림 8은 접합온도와 시간에 따른 접합부의 최대인장강도(UTS)와 총연신률(T·E)을 나타낸 것이다. 590°C 및 610°C에서의 UTS값은 접합온도와 시간에 관계없이 모재의 약 60%로 이용효율이

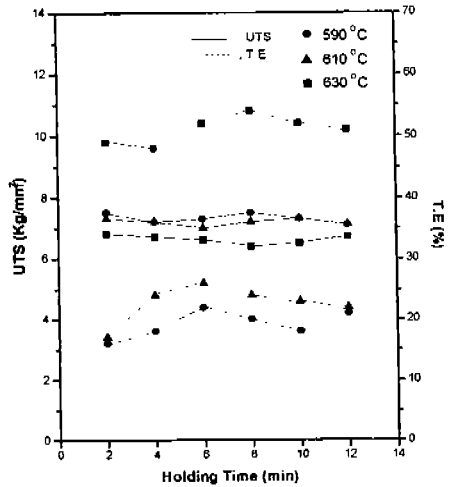


Fig.8 Variation of ultimate tensile strength and total elongation of Al/Al bonded joint with the holding time and brazing temperature

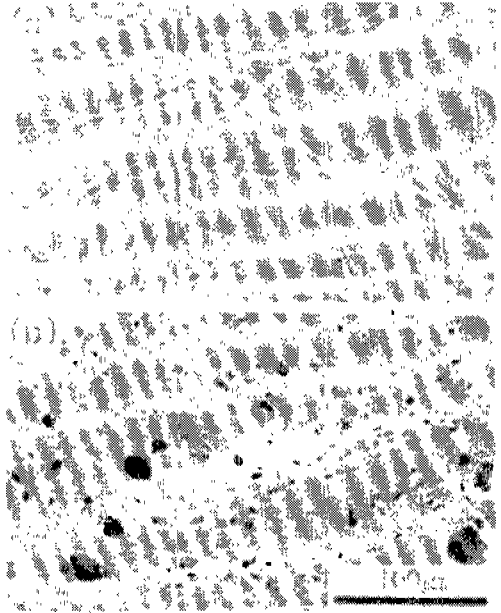


Fig.9 Fracture surface of the tensile specimen brazed at 590°C, 610°C(a) and 630°C(b)

낮음을 알 수 있는데, 이것은 인장시의 파단이 공정조직의 접합부에서 발생되었기 때문이다. 그러나 630°C의 높은 접합온도에서는 모재부의 연화가 커져 인장시 접합부가 아닌 모재부에서 파단되어 UTS값도 약간 더 낮게 나타나고 있다. 한편

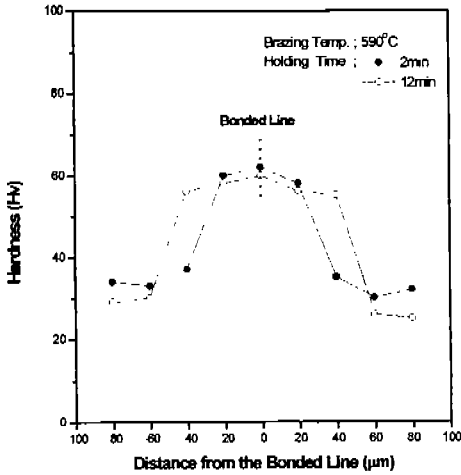


Fig.10 Hardness distribution of the Al/Al bonded joint brazed at 590°C

T·E값은 630°C의 접합온도가 가장 크게 나타나고 있어 기계적 성질이 양호하다 할 수 있으나, 전술한 미세조직에서 알 수 있듯이 접합부는 α-Al을 둘러싼 아공정조직이 큰 폭으로 형성되므로 모재 내로의 침식현상은 오히려 크다고 볼 수 있다. 따라서 열교환기 같은 공조기 계통에서는 장시간 사용시 내식성의 열화 가능성을 고려한다면 역시 최적 접합온도 및 시간은 590°C에서 2분 정도인 단시간의 접합이 가장 적합하다고 판단된다.

그림 9의 (a) 및 (b)는 인장 후의 파단면 조직을 비교한 것으로 590°C와 610°C의 온도에서는 (a)와 같이 공정조직의 벽개파괴로 취성파면을 나타내고 있고, 접합온도가 높은 630°C에서는 (b)와 같이 연성파괴인 cup & cone의 모재파단이 발생되어 파단면에 딩플(dimple)이 잘 나타남을 알 수 있다.

그림 10은 590°C의 온도에서 유지시간의 변화에 따른 접합부 근방의 경도분포를 나타낸 것으로, 유지시간에 따른 경도 차이는 없고, 최고 경도값은 Al-Si 공정조직이 나타난 접합부에서만 나타나고 있다. 또 계면에서 떨어진 장소의 경도값은 접합온도나 시간에 따른 모재 결정립의 성질과 연화 정도에만 관계되어 나타나고 있어 특정한 경도분포를 보이지 않고 있다.

4. 결 론

Novel brazing법에 의한 순 Al/Al의 접합시 접합조건에 따른 접합부의 조직 및 기계적 성질을 조사·연구한 결과는 다음과 같다.

- 1) 최적 접합조건은 590°C의 접합온도에서 2분 정도 유지시키는 경우였으며, Si/flux비의 영향은 적었다.
- 2) 590°C의 접합온도에서 접합부는 공정조성이 가까운 Al-Si 공정조직이 형성되었고, 접합온도가 630°C로 높은 경우는 Al-Si의 아공정조직이 많이 나타나 모재의 침식현상이 컸다.
- 3) 공정조직의 층 두께는 최적 접합온도에서 유지시간의 평방근에 거의 비례하여 증가되는 확산율속과정으로 생각되었다.
- 4) 최적 접합조건에서 이음효율은 약 60%로 낮았으며, 공정조직의 파단면은 취성파면을 나타내었다.

참고문헌

1. 정재필, 강춘식의 2인, "일본의 브레이징 기술과 동향(I)", 대한용접학회지, Vol.12, No.4, PP.50~62, 1994
2. 竹本正, "アルミニウムろう付の最近の動向と研究", 輕金屬, Vol.41, No.10, PP.639~649, 1991
3. 鄭在弼, 竹本正, 姜春植, "알루미늄의 비부식성 플럭스 브레이징", 대한용접학회지, Vol.13, No.2, PP.53~59, 1995
4. U.S.Patent, No.5190596, 1992
5. R.S.Timsit and B.J.Janeway, "A Novel Brazing Technique for Aluminium", W.R.S, June, PP.119s~128s, 1994
6. Atsushi Sugihara, "Nocolok Sil-flux Brazing process", 輕金屬鎔接, Vol.32, No.10, PP.435~441, 1994
7. Hiroshi Kawase, Motoyoshi Yamaguchi et al, "Effect of KAlF₄ and K₂AlF₅ · H₂O Mixture on Aluminium Brazability", 輕金屬鎔接, Vol.28, No.5, PP.193~197, 1990
8. Goroh Itoh and Motohiro Kanno, "Encroachment

Mechanism of the Liquid Phase on the core Material of Brazing Sheets”, 輕金屬, Vol.37, No.11, PP.754~756, 1987

- 9. 輕金屬銲接構造協會編集委員會, “Aluminium Brazing Handbook”, PP.44~108, 1992
- 10. Ken-ichi Hirano, “Diffusion in Aluminium”, 輕金屬, vol.29, No.6, pp.249~252, 1979
- 11. J.I.Murray and A.J.mcalister, “Binary Alloy Phase Diagrams”, ASM, Vol. I, PP.164~165, 1984

저 자 소 개



정병호(鄭炳琥)

1950년 9월생. 1973년 부산대학교 공과대학 금속공학과 졸업. 1978년 부산대학 대학원 금속공학과 졸업(석사). 1989년 동대학원 졸업(박사). 1985년~부경대학교 재료공학부 교수, 당학회 회원.



김무길(金武吉)

1946년 10월생. 1972년 인하대학교 공과대학 금속공학과 졸업. 1985년 한국해양대학 기관공학과 졸업(석사). 1999년 동대학원 졸업(박사). 1979년~현재 부경대학교 재료공학부 교수, 당학회 회원.