

日本에서의 알루미늄의 진공 브레이징

— 日本의 브레이징 技術과 動向(2) —

鄭在弼* · 竹本正** · 姜春植***

Aluminum Vacuum Brazing in Japan — Brazing Technology and Trend in Japan(2) —

J. P. Jung*, T. Takemoto** and C. S. Kang***

5.2. 알루미늄의 진공 브레이징

5.2.1. 진공 브레이징의 특징

본고에서는 전보³³⁾에 이어 알루미늄의 브레이징 방법중 진공 브레이징에 대해서 기술하고자 한다. 진공 브레이징 재료에 대한 내용은 전보에서 언급 하였으므로, 본고에서는 진공 브레이징의 특성, 기술 및 일본의 연구동향 등에 대해 보고한다. 브레이징후 플럭스 세정공정이 불필요한 진공 브레이징은 드론컵(drawn cup)형 열교환기의 제조에 대한 적용을 시작으로 정밀 고신뢰성 부품에 많이 적용되고 있다. 일본의 경우, 전체 알루미늄 라디에이터 브레이징 양 중 약 1/3을 진공 브레이징으로 제조하고 있다³⁴⁾. 진공 브레이징은 드론 컵형 등 中空 구조를 가진 열교환기나, 잔류 플럭스가 부품 내부의 流體에 혼입될 염려가 있는 제품의 브레이징에 주로 사용된다. 특히, 드론 컵형 열교환기의 경우는 진공법의 적용이 일본과 미국에서 주류를 이루고 있으며, 쿨게이트 타입도 진공법의 적용이 일본에서 주류를 이루고 있으나, 금후에는 노코록(NOCOLOCK)법도 적용될 것으로 예상된다. 알루미늄 라디에이터의 경우, 일본에서는 진공법을 대체하여 노코록법이 주류로 되어

가고 있으며, 미국에서는 GM, FORD사를 중심으로 아직 진공법이 주로 적용되고 있으나, NOCOLOCK 법이 적용될 움직임도 있다. 그외 유럽에서는 진공법(영국 IMI사), VAW법(독일 Behr사), 저노점 로중법(프랑스 Chausson사) 등이 적용되고 있다. 알루미늄 브레이징시 가장 중요한 방법 중의 하나인 NOCOLOCK법에 대해서는 추후 보고하기로한다.

사진 1은 진공 브레이징 방법을 이용하여 제조한 알루미늄 evaporator의 일 예를 보인 것이다.

진공 브레이징 제품은 브레이징 설계, sheet, 爐, fin의 성형과 가공, 기기 및 기타 주변 기술들이 어우러져 이루어지므로, 우수한 진공 브레이징을 확보

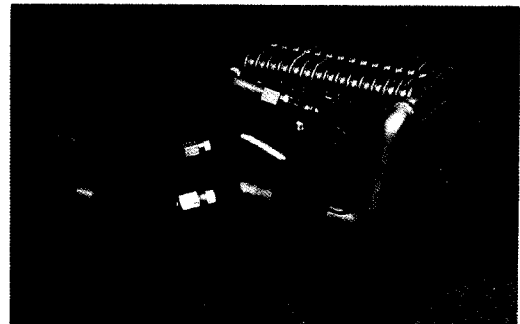


사진 1 진공브레이징 방법을 이용하여 제조한 알루미늄 evaporator(昭和 알루미늄 提供)

* 정회원, 한국기계연구원 용접연구부
現 大阪大學 熔接工學研究所 客員研究員

** 비회원, 大阪大學 熔接工學研究所

*** 정회원, 서울대학교 금속공학과

하기 위해서는 단위 기술에 대한 개발이 필요하다.
진공 브레이징의 장단점은 다음과 같다.

- 장점 :
 - a. 플럭스가 불필요하므로 제품의 後洗淨 공정이 불필요
 - b. 플럭스 잔사에 의한 부식이 없음
 - c. 치구의 손상이 적음
 - d. 염화물, 불화물을 사용하지 않기 때문에 작업 환경이 양호함
 - e. 진공 브레이징시 脫가스 작용에 의해 접합부에 기공등 결함의 생성이 억제되어 기밀성 및 기계적 성질이 양호함
- 단점 :
 - a. 고가의 진공로가 필요함
 - b. 증기압이 높은 원소(예 : Zn)의 증발 손실이 커서, 고강도 합금의 브레이징이 나빠짐.
 - c. 아연 함유 알루미늄계에서도 아연의 증발로, 아연에 의한 희생 양극효과가 없어져서 내식성이 저하됨.
 - d. 복사 가열 방식이기 때문에 승온 시간이 길어짐.

그러나 최근 고진공 브레이징법의 단점을 개선한 저진공 캐리어 가스 브레이징법도 사용되고 있다.

5.2.2. 진공 브레이징의 개념

진공 브레이징 기구는 다음과 같이 알려져 있다 (그림 15 참조)³⁵⁾ 브레이징전 모재 및 sheet 납재의 표면은 강한 산화 피막으로 덮혀져 있다(그림 15. a). 가열과 더불어 알루미늄 합금과 산화 피막의 열팽창차에 의해 산화 피막에 균열이 발생한다. 균열 사이로 납재 중의 마그네슘(Mg)이 증발하여 산화 피막이 파괴된다(그림 15. b). 피막이 파괴되면, 파괴된 산화 피막 사이로 용융된 납재가 wetting되기 시작한다. 브레이징이 진공 중에서 행해지기 때문에, 납재는 산화되지 않으며, 증발된 마그네슘과 모재중의 마그네슘에 의해 로내 분위기는 청정하게 유지된다. 따라서 납재의 퍼짐과 wetting이 촉진되어, 납재의 모세관 침투 및 필렛 형성으로 브레이징이 완료된다(그림 15.c)

진공용 납재에는 타겟 자료 Mg가 첨가되어, 로내 수분, 산소의 제거, 표면 피막의 환원 작용을 하여 양호한 접합부를 얻도록 해준다. 진공중 Mg의 작용은 아래의 반응식과 같다.^{35,36)}

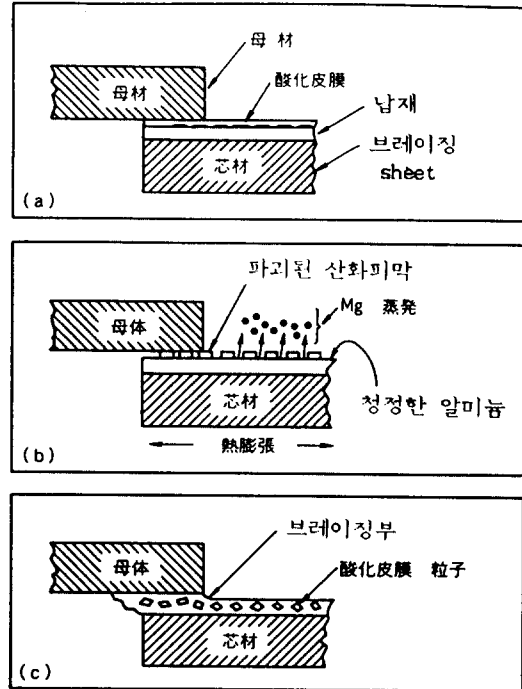
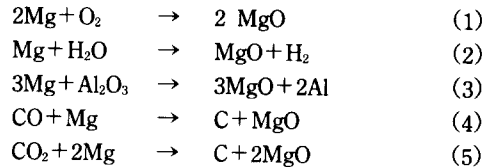


그림 15 알루미늄의 진공브레이징 기구 모식도



식 (1), (2)는 O₂, H₂ 혹은 수분을 제거하는 것이고, 식 (3)은 Mg에 의한 알루미늄 산화층의 환원작용을 나타낸 것이다. 식 (4), (5)가 브레이징성에 미치는 영향은 잘 알려져있지 않다. 첨가 Mg의 소비, 납재와 wetting이 어려운 C의 형성 등과 관련하여서는 브레이징에 좋지 않은 영향을 미치나, 로내의 청정화에는 도움을 준다.

진공 브레이징시 납재와 모재에서 탈가스 현상이 일어나는데, 이에 의해 접합부에 pin hole, blow hole, void 등의 결함 발생이 억제된다. 따라서, 브레이징부는 기밀성이 우수해지고, 접합강도가 향상된다.

로내의 진공도를 양호하게 유지하기 위해서는 로내 불순물이 접합물 표면에 충돌하는 횟수보다 Mg의 증발속도를 크게 할 필요가 있다.³⁷⁾

5.2.3. 진공 브레이징의 공정

진공 브레이징 공정은 플럭스를 사용하지 않기 때문에 플럭스를 사용할 때의 부대공정들이 모두 없어지므로 공정이 매우 단순화된다. 그림 16은 알루미늄 라디에이터의 진공 브레이징 제조공정을 보인 것인데, 전보 33)의 플럭스 사용 제조공정(그림 12)과 비교해보면 공정이 매우 단순화되었음을 알 수 있다.

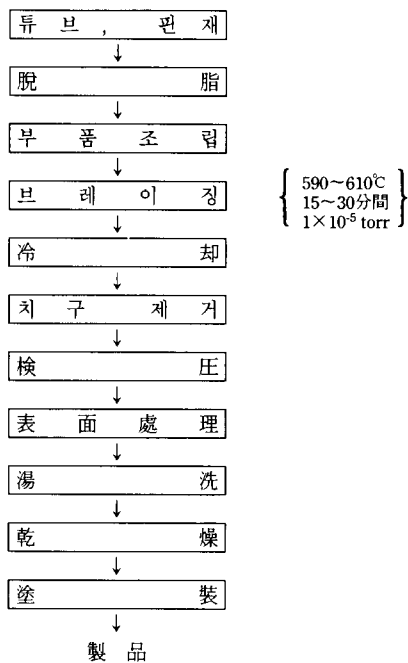


그림 16 알루미늄 라디에이터의 진공 브레이징 공정

진공 브레이징 공정으로는 우선 전처리가 있다. 전처리는 접합부정부의 기름이나 먼지, 기타 오염물질을 제거하기 위해 행한다. 전처리에는 알칼리 세정(洗淨), 산세정, 유기용제 세정, 水 세정 등이 있다. 전처리에 의해 접합부 표면의 피막을 제거하는 경우에는 전처리후 가능한 빠른 시간내에 브레이징을 하거나, 보존에 신경을 써야한다.

브레이징시 가열, 유지, 냉각시간은 짧은 것이 좋다. 가열속도가 느리면 모재 표면에 산화 피막이 생성되기 쉽고, 냉각이 느리면 모재가 연화되기 쉽다. 또, 브레이징 온도에서 유지시간이 길어지면, 납재의 흐름이 지나쳐서 접합부의 필렛형성이 나쁘거나, 납재

내의 규소(Si)가 모재에 침투하여 모재침식과 변형 등이 발생하기 쉽다.

진공 브레이징시 진공도가 잘 유지되도록 주의하고, 알루미늄의 경우 모재와 납재의 용점 차이가 적기 때문에 로내 온도의 편차가 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 이내가 되도록 한다.

진공 브레이징시 爐내 압력은 $10^{-6}\sim 10^{-4}$ torr의 범위이기 때문에 산소나 수분등 오염 가스가 적고, 제품의 오염도 적다. 따라서 10^4 torr 정도의 진공 분위기에서 알루미늄을 브레이징하면 光輝面을 얻을 수 있다.

진공로에는 cold wall형과 hot wall형이 있는데, 알루미늄 진공 브레이징에는 cold wall형이 주로 사용된다. 또, 조업도에 따라서는 batch형과 연속형으로 나눌 수 있으며, 진공도에 따라서는 고진공형과 저진공 캐리어 가스형으로 나눌 수 있다.

Batch형은 소량 다품종 생산을 위해 많이 사용되었으나, 최근에는 대형, 다량 생산에도 이용되고 있다. Batch형 爐로 생산되는 제품에는 라디에이터 등 열교환기, 콘덴서, evaporator, 진공 차단스위치 등이 있다. 연속로는 주로 소품종 다량 생산용으로 사용되는데, 최근 한 제품의 생산을 위한 전용로도 증가되고 있다. 연속로에서는 브레이징 室이 항상 진공이기 때문에 품질이 안정되고, 로내의 손실이 적어로의 유지, 가동기간이 길어지며, 전자동화가 용이하다.

진공 브레이징법으로 제조되는 대표적인 제품으로 알루미늄 evaporator가 있다.

5.2.4. 접합변수와 브레이징성

진공 브레이징시 진공도, 가열곡선, 유지시간, 예열여부, 접합부 간격 등은 브레이징성에 영향을 미친다. 특히, 진공 브레이징은 다른 브레이징법에 비해 납재의 유동성이 나쁘기 때문에, 간격(clearance)은 매우 중요하다. 간격내에 납재가 침투하는 정도를 평가하기 위해 일본의 경금속 용접구조협회에서는 '간격 충전시험법'을 규격화하고, 납재의 브레이징성을 평가하는 중요한 항목으로 취급하고 있다³⁹⁾. 브레이징성의 시험 평가 방법에 대해서는 추후의 보고에서 기술하기로 한다.

브레이징시 접합부 간격(clearance)은 납재의 침투 깊이, 브레이징부 필렛의 폭두께, 각장, 유동계수 등에 중요한 영향을 미친다. 그림 17은 간격(그림내 필렛시편의 우측 끝단간격 D_0)을 변화시켰을 때, 납재의

충진 깊이(F)변화를 보인 것이다⁴⁰⁾. 단, 여기서 Sk, Os, K, Or 등은 그림 18에 보인 바와 같이 시편의 가열곡선(예열 유무포함)과 진공도가 다른 것을 나타낸다. Os와 Sk는 530°C에서 20~30분 예열한뒤 600°C에서 3분 정도 가열한 것이고, K와 Or은 예열이 없는 경우이다. 또, 실험에 사용된 재료는 3003 심재에 Al-9.8Si-1.5Mg납재를 cladding(cladding을 10%)한 것이다.

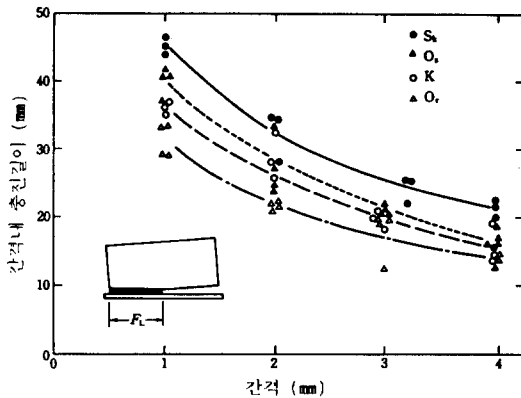


그림 17 알루미늄 진공브레이징시 납재의 간격내 충전깊이에 미치는 간격크기의 영향

그림 17에서, 간격이 커지면 충전깊이는 작아지고, Os와 Or의 비교에서 예열한 Os쪽이 예열하지 않은 Or쪽보다 충전 깊이가 커짐을 알 수 있다.

그림 19는 간격에 따른 유동계수(K)의 변화를 보인 것이다⁴⁰⁾. 간격이 증가하여도 납재의 유동계수, 즉 유동성에는 거의 변화가 없다. 단, 유동계수란 아래 식(6)과 같이 정의된다⁴¹⁾.

$$K = S_f / S_o \quad (6)$$

Sf : 브레이징후 필렛부의 단면적
So : 가열전 납재 부분의 단면적

유동계수는 납재의 성능을 평가하는 중요한 항목의 하나로, 유동계수가 클수록 납재의 유동성도 좋아진다.

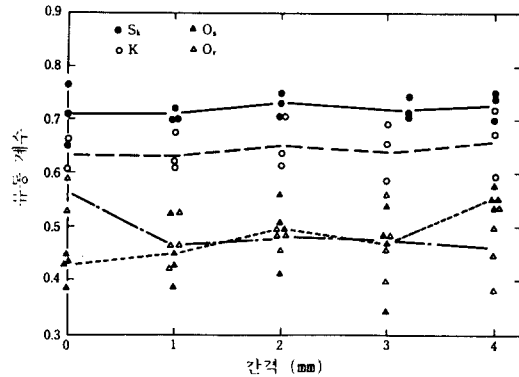


그림 19 알루미늄 진공브레이징시 유동계수 변화

그림 20은 간격 변화에 따른 필렛부 목두께(d) 변화를 보인 것이다⁴⁰⁾. 간격 증가에 따라 목두께가 증가하고 있음을 알 수 있다. 간격 증가에 따라 유동계수는 일정하고(그림 19), 충전깊이는 감소하며(그림 17), 목두께는 증가하므로, 결국 단위 길이당 납재의 용착량은 증가하게 된다.

그림 21은 간격 변화에 따른 필렛부의 수직 脚長(Lv) 변화를 보인 것이다⁴⁰⁾. 간격 증가에 따라 수직 각장이 증가함을 알 수 있다. 또, 예열한 쪽의 수직 각장이 목두께와 마찬가지로 더 적었는데, 이로 인해 예열한 쪽이 충전 깊이는 더 커지는 한 원인이 되었다.

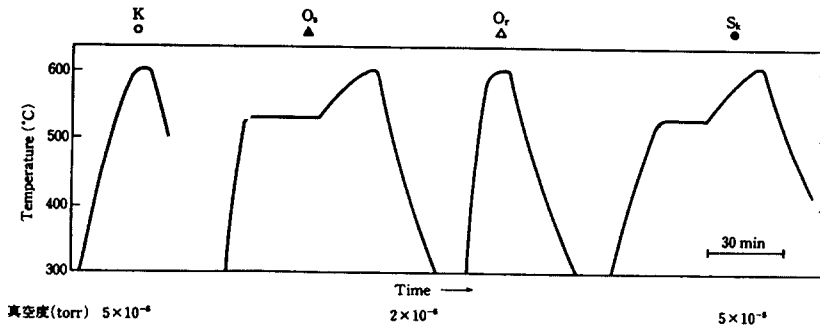


그림 18 알루미늄 진공브레이징시 가열곡선

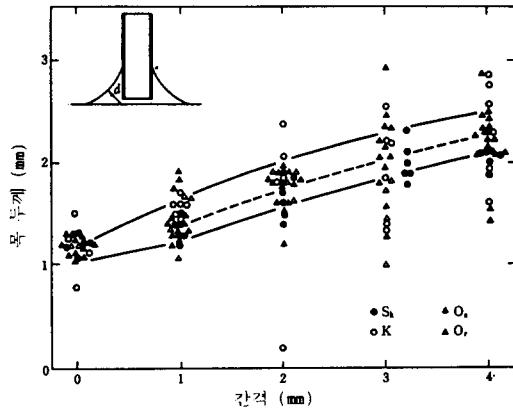


그림 20 알루미늄 진공브레이징시 목두께에 미치는 간격의 영향

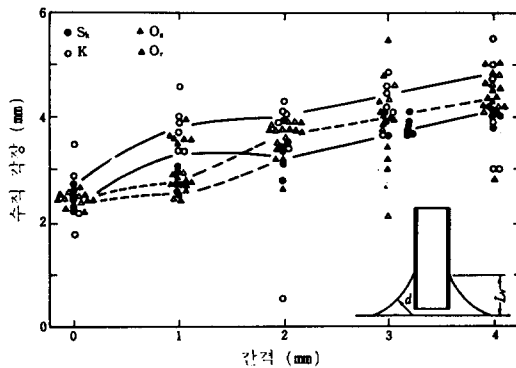


그림 21 알루미늄 진공브레이징시 간격이 수직 각장에 미치는 영향

예열온도가 브레이징부 형상에 미치는 영향은 다음과 같이 보고되어 있다. 즉, 예열온도를 330°C, 430°C, 530°C로 증가시켰을 때(예열시간 20분, Do=1, 3.2 mm), Sk의 경우 충전 깊이나 유동계수에 별다른 변화가 없었다. 다만 Do=1mm일 때 예열온도 증가에 따라 충전깊이가 약간 증가하였다. 이에 관한 보다 상세한 내용과 열처리가 브레이징성에 미치는 영향은 문헌을 참고하기 바란다.^{40, 42)}

5.2.5. 첨가원소와 브레이징성

납재 혹은 모재내의 첨가원소가 브레이징성에 미치는 영향을 조사하므로써, 새로운 납재 및 모재의 개발과 정확한 재료를 선정할 수 있는 기준을 마련할 수 있다.

일본에서는 중공구조를 갖는 열교환기 등에 적용할 수 있는 브레이징 sheet⁴³⁾, 양면의 조성이 다른 납재의 cladding⁴⁴⁾, 희생 양극을 이용한 내식성이 우수한 진공 브레이징 sheet의 개발²²⁾ 등이 행해지고 있다.

(1) Si의 영향

Si는 알루미늄 납재의 주요 첨가원소로, Al-Si 共晶 조성을 중심으로 보통 5-12%가 첨가된다. 알루미늄 (Al) 납재중 Si량이 많아지면 공정 조성에 가까워지며, 용융온도 범위도 그만큼 좁아지게 된다. 용융온도 범위가 좁은 납재는 브레이징 온도를 정확하게 조정하지 않으면 재대로 용융되지않거나 과다하게 가열되어, 브레이징부가 불량해지거나 모재가 침식되기도한다. 따라서, 공정조성에 가까운 4047(12% Si) 등의 납재는 사용에 주의를 기울여야한다. 알루미늄 납재중 Si 함량이 증가될수록, 브레이징 온도가 높아질수록 납재의 유동성은 증가된다(그림 22 참조)⁴⁵⁾

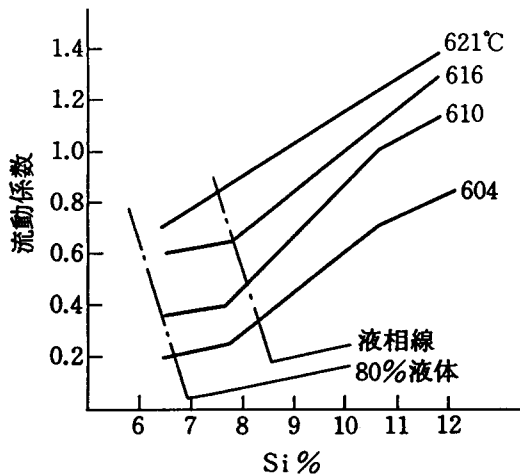


그림 22 알루미늄 침적브레이징시 Si량 및 브레이징 온도가 납재의 유동성에 미치는 영향

그러나, Si 함량이 증가될 때 납재의 유동성은 좋아지지만 납재가 흐르기 쉬워서, 틈새내의 충전성은 그림 23에 보인 바와 같이 오히려 나빠진다.

Si가 필렛부의 형상에 미치는 영향은 그림 24와 같다⁴⁶⁾. 즉, 이음부가 그림 24. a의 형상을 가질때 그림 24.b에서 보듯이 일정한 브레이징온도 이상에서는 필렛부의 '수직각장/수평각장(L_v/L_H)'이 일정함을 알 수 있다. 또, 용융온도가 높은 4043은 약 615°C에서

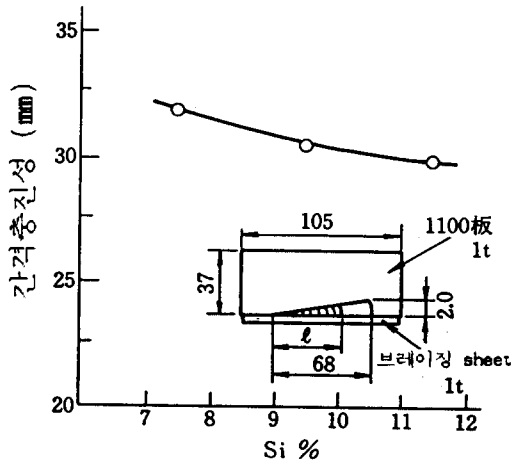


그림 23 알루미늄 진공브레이징시 Si량이 납재의 간격내 유동성에 미치는 영향

$L_v/S_H=0.9$, 기타의 납재는 약 590°C 정도에서 $L_v/L_H=0.9$ 정도가 되어 일정한 값에 도달하므로써, 용고납재의 필렛 단면이 거의 이등변 삼각형이 된다. 그림 24.c에서는 브레이징 온도가 높아질수록 Si량이 증가될수록, 필렛 단면적(S_f) 및 납재의 침투면적(S_e)은 증가됨을 알 수 있다. 그러나 S_e 량이 커지면 모재의 침식도 커지게 되므로, S_f 및 S_e 량을 관리할 수 있는 적절한 브레이징 온도와 적절한 Si함량을 갖는 납재의 선택이 필요하다.

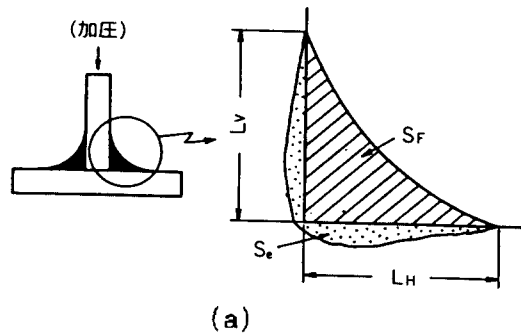
브레이징성에 미치는 Si의 영향을 조사한 또 다른 보고⁴⁷⁾도 있다. 이 보고에 의하면, 납재 중 Si 함량을 4.6%에서 11.8%까지 증가시킬때 Si 함량이 많아질수록 모재의 침식(dissolution)도 커지게 된다.

(2) Mg의 영향

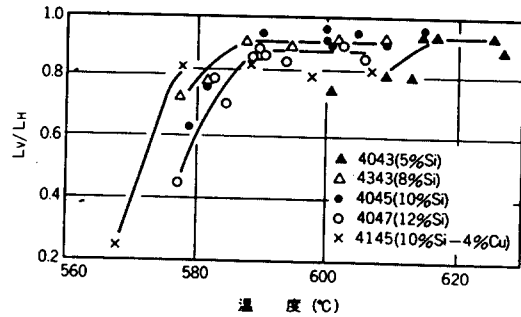
Mg는 전술한 바와 같이 진공 브레이징시 산화피막 제거, 납재의 산화방지, 진공분위기 유지 등의 역할을 하며 브레이징성을 향상시킨다⁴⁸⁻⁵⁰⁾. 그림 25는 납재 중 Mg함량 증가에 따른 납재의 유동성 변화를 보인 것이다⁵¹⁾.

Mg함량이 0.5%에서 2.5%까지 증가됨에 따라 납재의 유동성은 대체로 증가함을 알 수 있다.

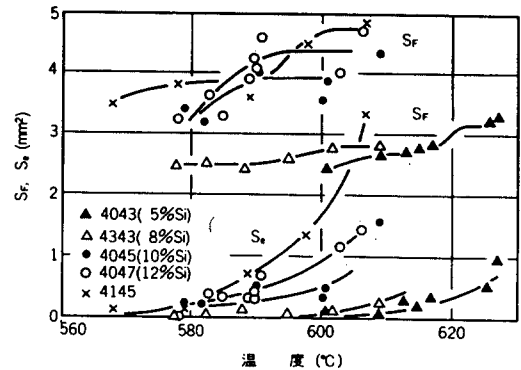
그러나, Mg는 납재가 용융되었을 때 모재에 대한 wetting각을 크게하여 wetting성을 나쁘게 하므로, 모재에는 가능한한 적게 첨가하는 것이 좋다. 예로써, Mg함량이 많은 5052는 진공 브레이징성이 매우 나쁘다. 그외에도, Mg는 진공브레이징시 증발되어 로벽이나 치구에 부차되어 로내를 오염시키기도 한다.



(a)



(b)



(c)

그림 24 알루미늄 진공브레이징시 逆 T자 이음부(a)에서, 브레이징 온도와 Si함량이 '수직각장/수평각장 (L_v/L_H)' (b) 및 '필렛단면적/납재의 침투면적 (S_f/S_e)' (c)에 미치는 영향

이러한 문제점들을 해결하기 위한 방안으로, 납재중 Mg함량을 감소시키는 방법이 검토되고 있기는하나, 진공 브레이징법에서 현실적으로 납재 중 Mg의 최저 첨가량은 0.8%이다. 따라서 심재에 Mg를 함유시킨 합금(약 0.5% 이하)을 사용하는 것이 납재의 Mg

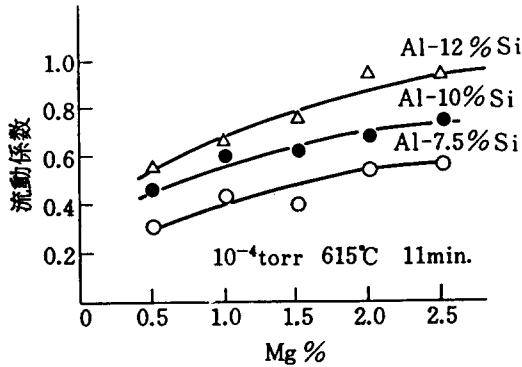


그림 25 알루미늄 진공브레이징시 逆 T자 이음부에서, 브레이징 sheet 납재중 Mg함량이 납재의 유동성에 미치는 영향(心材 3003)

감소에 보다 유용한 방법이라 할 수 있다⁵²⁾. 이외에도, 분위기 가스를 사용하는 무플렉스브레이징시 Bi, Be, Sr 등을 함유시킨 납재⁵³⁾나, 표면처리 혹은 Ni 도금법⁵⁴⁾을 사용하는 것이 검토되고 있다.

(3) Bi 및 기타 원소의 영향

Bi는 Al에 첨가되면 표면 장력을 감소시키고²⁴⁾ Bi 함량이 0.05% 이상일 때 유동계수가 커진다. 예로써, 4104합금은 0.1% 정도의 Bi를 함유하고 있어, 진공도가 나쁜 분위기에서도 납재의 유동성이 좋아 납

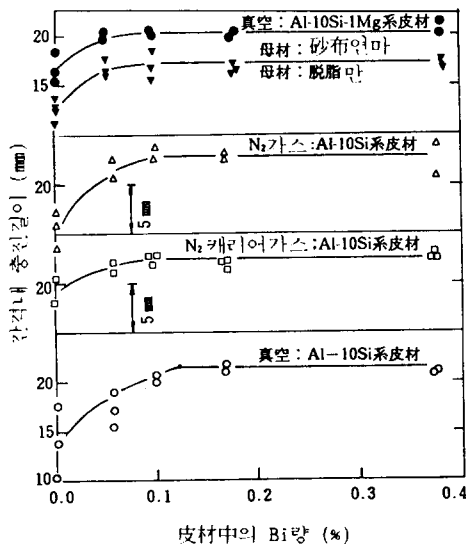


그림 26 납재의 간격내 충전깊이에 미치는 브레이징 sheet 납재중 Bi함량의 영향

재가 간격에 잘 침투하여, 양호한 브레이징 결과를 얻을 수 있다^{20,56,57)}. (그림 26 참조)

그 외에, Bi가 Al-Si계 납재의 브레이징에 미치는 영향은 문헌²⁰⁾을 참고하기 바란다.

표 14는 Al납재중 첨가 원소와 그 목적을 정리한 것이다¹⁹⁾. 그러나 진공브레이징용으로 실용화된 납재는 Al-Si-Mg계, Al-Si-Bi계 정도이다. 표 14의 자료로부터, Sn의 효과(저융점 금속의 용융에 의한 산화피막의 박리)를 이용하여, Al-Sn계 삼입금속을 개발하여, 알루미늄 동종 혹은 이종금속이나 세라믹을 대기 분위기에서 확산접합하는 방법이 개발되었다⁵⁸⁾.

5.2.6. 부식성과 개선방향

알루미늄 열교환기에 발생할 가능성이 있는 부식으로는 입계 부식(anode형, cathode형), 孔食(파이프 관통 부식), 갈바닉 부식, 간격부식 등이 있다.

진공 브레이징이 보급되기 이전에 주로 사용된 염화물계 플렉스 브레이징법에서는, 브레이징부 표면에 아연 확산층이 형성되어 전면 부식형이 되므로 孔食이 방지될 수 있었다. 그러나, 진공 브레이징에서는 증기압이 높은 Zn이 가열중 증발해 버리기 때문에, Zn함유 재료를 孔食 방지 목적으로 사용하는 것이 어렵다. 이 때문에, 진공브레이징 부품은 플렉스사용 브레이징 부품에 비해 내식성이 나쁘고, 이의 해결을 위해 많은 노력이 행해지고 있다.

알루미늄 열교환기에서 문제가 되는 부식은 전보³⁵⁾의 그림 7에서 보인 바와 같은 tube재의 관통 孔食이다. 관통 공식에 대한 재료측면에서의 방지책은 塗裝외에, (1) 핀을 희생양극으로 하여 핀을 全面부식시킴으로써 튜브의 공식을 방지하는법, (2) 튜브 표면을 희생양극화하여 튜브 표면을 全面부식시킴으로써 내부에의 부식 진전(관통 공식)을 방지하는법 등이 있다. 이를 위해서는 보통 튜브 및 심재에 아연을 수 % 정도 함유시킨다. 그러나, 기본적으로는 핀과 심재에 전위차를 거는 것이 좋다. 즉, 심재 전위를 貴하게하고, 표면 및 핀 전위를 卑하게 한다. 이를 위해 心材3003합금에는 동(Cu), 튜브 표면 및 핀재에는 아연을 확산시키는 것이 좋으나, 진공용으로는 증발하는 Zn 대신 Sn, In을 첨가하면 효과가 있다. 내식성이 좋은 핀 및 튜브재의 구조 예를 그림 27에 보였다⁵⁹⁾.

내식성 개선에 관한 연구 예로 여러 보고들^{13, 60-63)}이 있다.

표 14. 알루미늄 납재 중의 첨가원소와 첨가 목적

添 加 目 的		添 加 元 素	參 考 文 獻
融點 低下(流動性 向上)		Cu, Zn Y, Ge, In Mg(昭48-31821)	輕金屬學會講演 1969/II Weld. J. 1972/2 輕金屬熔接 1973/3
熔融 납재의 表面張力 低減 (流動性 向上, 필렛 形狀 改善)		Bi, Sb, Ba, Sr Pb Sn Li	日本特許昭 50-4466 日本特開昭 50-43346 日本特開昭 52-147543 日本特開昭 51-138562
微細化.....組織 Si 粒子		Ti, Zr(B, V) Na, Sb, P	日本特許昭 44-25455
진 공 브레이징의 촉진	酸素, 水蒸氣 除法	Pr, Sc, Sm, Ca, Be, La Ce, Nd, Mg, Sr, Li, Ba, Na K, Zn, (Cd, Bi, Sb)	Weld. J. 1971/12
	Al ₂ O ₃ 還元	Pr, Sc, Sm, Ca, Be, La, Ce Nd, Mg, Sr, Li	
	氯化時酸化皮膜 破壞	(K, Cd, Na, Zn) Mg, Sb Sr, Li, Ca, Ba	
酸化皮膜 의 박리	酸化皮膜의 密着性 低下 혹은 硬한 酸化物 生成	Li, Na, K, Mg, Ca, Ba Sb	Aluminum 1962/II
	低融點金屬의 熔融에 의한 酸化皮膜의 박리	Bi, Sn, Pb, In, Sb, Cd Mg	SEA 780299
犠牲陽極의 效果		Li, K, Ba, Sr, Ca, Na Mg, Ce, L, Ti, Be, Zn, Sn Cd, In, Ga, Bi, Zr	

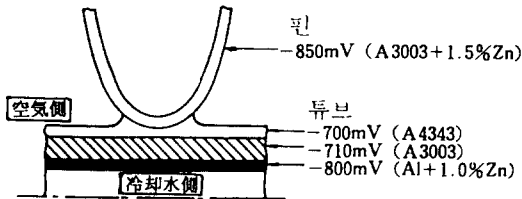


그림 27 Zn 첨가에 의해 희생 양극효과를 가진, 내식성이 우수한 알루미늄계 라디에이터용 clad의 구조

5.2.7. 中空구조를 갖는 열교환기의 브레이징

드론 컵형 열교환기와 같이 비교적 밀폐된 중공 구조를 가진 제품을 진공 브레이징하는 경우가 있다. 이런 형은 보통의 진공 브레이징과는 약간 다르기 때문에 비교적 까다로운 브레이징으로 볼 수 있다. 밀폐 공간(제품 내부)에서는 Mg의 증발속도나 반응 생성물의 양, 불순물의 배기나 도달속도 등이 개방 공간(제품 외부)과는 다르기 때문에 브레이징성에 차이가 발생한다.

중공구조의 물품을 브레이징할 때, 불활성 가스를

도입한 때의 금속의 증발속도(Vg)와 고진공 중에서의 증발속도(Vv)의 차이는 식(7)과 같다⁶⁴⁾.

$$V_g/V_v = 2.736b^{-2/3}(1 + M_m/M_g)/\lambda P [1 + (\rho_g/\rho_m)^{1/3}]^{1/2} \quad (7)$$

단, b : 불활성 가스에 대한 Vander Waals 상수

Mm : 증발 금속의 원자량

Mg : 불활성 가스의 분자량 혹은 원자량

λ : 금속면상의 피가열부의 길이에 관한량

P : 불활성가스 분위기 압력

ρg : 불활성가스 밀도

ρm : 증발 금속의 밀도

여기에서, 진공중의 半밀폐공간에서는 증발금속 자신의 증기에 의해 압력이 증가하여, 금속의 증발이 억제되기 때문에, 식(7)은 식(8)로 표시된다.

$$V_g/V_v = 2.736\sqrt{2(1/b)^{2/3}/4\lambda P_m} \quad (8)$$

여기서 Pm은 밀폐 공간에서의 금속증기 압력으로, 밀폐도가 커지면 약간의 Mg증발로도 Pm가 커지기

때문에 Vg가 적어진다. 따라서, 증발속도 식으로부터 예상되는 것처럼, 밀폐 공간에서는 Mg의 증발속도가 느리고 getter효과를 충분히 얻지 못한다.

밀폐도와 브레이징 sheet 납재중의 Mg함량을 변화시켰을 때 진공 브레이징성을 검토한 것으로 竹本 등^{65, 66)}의 보고가 있다. 즉, 알루미늄 파이프와 편면(片面) cladding brazing sheet를 조합시켜, 브레이징 sheet 중앙부에 직경 D₀의 구멍을 뚫어 밀폐도를 변화시키면서 진공 브레이징한다. 브레이징후 파이프 내부(밀폐부)와 파이프 외부(개방부)의 브레이징부 fillet크기를 목두께(d)로 비교한 결과를 그림 28 및 29에 보였다. 단, 여기에서 Do=0는 완전 밀폐된 공간을 뜻한다.

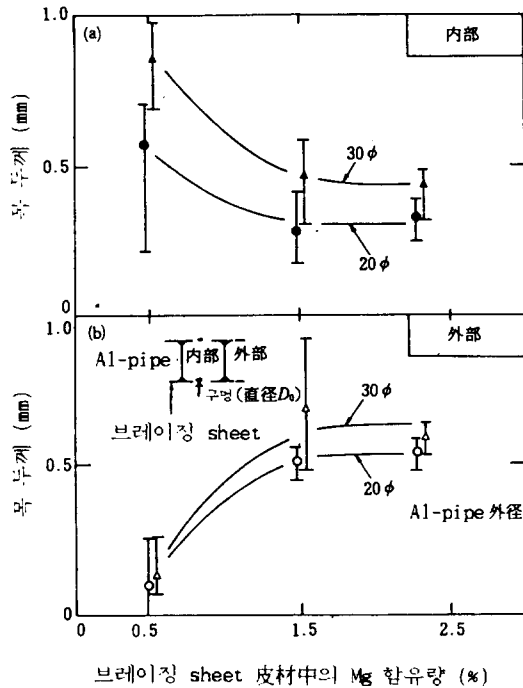


그림 28 밀폐내부와 외부의 진공 브레이징성에 미치는 브레이징 sheet 납재중 Mg 함량의 효과 (Do=0)

이 결과에서, 파이프 내부와 외부의 브레이징부 fillet의 크기는 납재중 Mg 함량에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그림 28에서, 파이프 직경이 20mm 및 30mm로 변화되어도 내부 및 외부의 fillet 크기는 유사한 변화 경향을 보이고 있다. 납재중 Mg 함량이 0.5%인 경우, 파이프 외부에서 비교적 작은 fillet이

형성되었으며, 완전 밀폐내부에서는 편차가 있는 꽤 큰 fillet가 형성 되었음을 알 수 있다.

통상 사용되는 1.5% Mg 납재에서는 내부의 fillet이 외부에 비해 작게 형성된다. 1.5% Mg의 브레이징 sheet에 대해 밀폐도를 변화시켜 시험한 결과를 그림 29에 보였다.

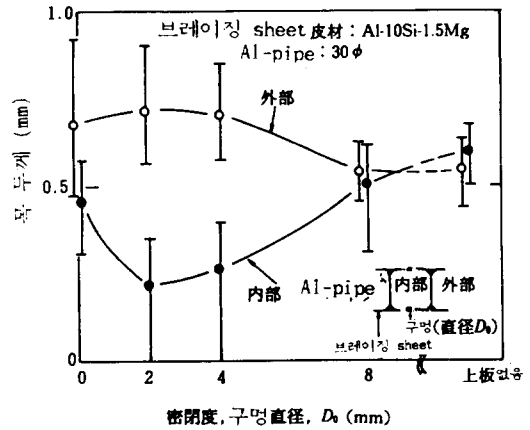


그림 29 알루미늄의 진공 브레이징성에 미치는 밀폐도의 영향

Do=2~4mm의 중간 정도의 밀폐도일 때 내부의 fillet이 작아지며, 브레이징성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 아울러, 밀폐정도에 따라 fillet의 크기가 변하고, 브레이징성이 변하는 것을 알 수 있다. 이처럼, 밀폐공간의 브레이징 결과는 개방공간과는 상이한 점이 많기 때문에, 비교적 밀폐 공간을 브레이징하는 경우, 밀폐도를 고려한 적절한 Mg 함량을 결정하는 것이 중요하다. 그러나, 통상은 동일 조성의 브레이징 sheet로 외부(개방부)와 내부(밀폐부)를 브레이징하는 경우가 많으며, 실제 작업에는 1.5% Mg를 기본으로 사용하고 있어, 비교적 밀폐된 내부의 브레이징성이 나빠지는 결과를 가져온다. 이것을 해결하는 방법으로, Al-Si-1.5Mg와 Al-Si 피재의 브레이징 sheet를 상호 중첩시켜 中空첩을 만들면 내부의 브레이징성이 양호하게 된다⁶⁷⁾.

밀폐된 내부의 브레이징성은, Mg의 증발 속도와 밀폐공간 내부로 확산해 오는 로내 불순물의 확산 속도의 균형에 의해 결정된다고 여겨진다⁶⁵⁾. 또, 상세한 기구는 아직 잘 알려져 있지 않으나, 片側에 Mg를 함유시키지 않는 브레이징 sheet를 사용하면, 내부의 순 Mg량이 감소되기 때문에, 납재 용융 초

기에는 단위 면적당 Mg의 증발속도가 접합부에 대한 불순물의 충돌빈도 속도보다 높아져서, 브레이징성이 개선될 것으로 생각된다.

중공 구조를 갖는 열교환기의 브레이징성을 파괴 압력 측면에서 조사한 결과, 미량 첨가원소 Be 혹은 Bi의 처가가 내압강도 상승에 기여하며, Be+Bi의 복합첨가는 내압강도 상승과 더불어 외관도 미려하게 해주는 것으로 보고되어 있다⁶⁸⁾.

그외에 중공 구조용 알루미늄의 진공 브레이징을 위한 기능 분리형 납재에 대한 검토 보고⁴⁴⁾도 있다.

5.2.8. 알루미늄의 低溫 브레이징화

알루미늄 브레이징 온도는 약 600°C 부근으로, 알루미늄 모재와의 용점 차이가 적어서(순 알루미늄의 경우 용점은 660°C) 브레이징이 어렵다. 특히, 2000계나 6061합금 등 저용점 알루미늄 합금의 경우, 브레이징 온도가 이들 합금의 고상선 이상이 되기 때문에 더욱 어렵다. 이의 해결 방안으로 브레이징 온도를 낮추는 저온 브레이징이 연구되고 있다.

저온 브레이징의 장점으로는

- 저용점 알루미늄 합금(2000계, 6000계, 7000계)의 브레이징 가능
- 예로우전(용융 납재와 모재의 반응)의 억제
- 브레이징 온도가 피접합재의 재결정 온도 이하이기 때문에, 피접합재의 가공 강도가 유지됨
- 브레이징 온도가 시효온도 이하이기 때문에, 피접합재가 시효 경화재일 경우 그 강도가 유지됨
- 복합재료를 브레이징할 경우, matrix/filament간의 과잉 반응 방지 등이 있다.

브레이징온도를 낮게하는 연구는 이전에도 시도되었으나, 문제점이 있어 실용화에는 어려움이 있었다. 예로써, 플럭스 사용 브레이징용 Al-Si-10ZR-4Cu 등의 납재는 570°C 정도에서 브레이징이 가능하나, 가공성이 나빠 거의 사용되지 않는다. 또, 4Cu 함유 4145 알루미늄은 내식성과 erosion의 측면에서 문제가 있어 별로 사용되지 않고 있다.

그러나, 최근 종래의 Al-Si-Mg 납재에 의한 진공 브레이징 온도의 저온화가 검토되고 있다. 즉, 중공 구조체 내부에서는 Mg의 증발이 늦기 때문에, 납재가 Al-Si-Mg/3원 공정온도(약 555°C, 문헌에 의하면 551~559°C)^{57, 69)}에서 용융이 시작된다. 이때문에 브

레이징 제품을 밀폐구조(중공구조)로 만들면, Mg의 증발이 억제되어 납재가 저온에서 많이 용융되기 때문에, 종래의 브레이징 온도보다 20°C 낮은 온도에서 브레이징이 가능하다. 밀폐용기냉서, 572°C에서 브레이징한 경우 브레이징 sheet중 Mg의 함량을 변화시켰을 때, 납재의 간격내 침투 시험 결과를 보인 보고⁷⁰⁾가 있다. 또, Al-10Si-1.2Mg-0.125Bi-Be(8.5 ppm) 조성의 납재를 사용하면, 585°C에서 진공 브레이징이 가능하고⁷¹⁾, Zn함유 心材로 부터 Zn증발이 억제되어, 防食효과가 유지된다. Al-Ge-Si-Mg계 브레이징 합금을 사용하면, 550°C 부근에서도 진공 브레이징이 가능하다는 보고가 있다⁷²⁾. 다만, 저온용 납재 중에는 硬하고 脆성이 있는 것이 많기 때문에, 납재의 가공에 어려움이 있기도하나, 점차 해결되어 가는 추세에 있다.

5.2.9. 低眞空 캐리어 가스법

기존의 진공 브레이징법은 보통 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ torr의 고진공에서 브레이징을 행한다. 따라서, 5.2.1 항에서 기술한 바와 같은 단점을 가지고 있다. 기존의 진공 브레이징법(低眞空 캐리어 가스법과 구별하기 위해 고진공 브레이징법이라고도 함)의 단점을 개선한 것으로 저진공 캐리어 가스(carrier gas)법(혹은 캐리어 가스법)이 있다. 이 방법은 10^{-2} torr 정도로 진공 배기되고 있는 분위기에 99.999% 순도의 캐리어 가스를 유입시켜, 고진공과 같은 정도 혹은 그 이상의 비산화성 분위기를 만들어 주는 것이다. 캐리어 가스로는 불활성 가스나 환원성 가스면 어느 것도 좋으나, 경제성과 안전성을 고려하여 질소가 대부분 사용된다. 질소 가스는 액체 질소를 기화시켜 사용하는데, 질소의 순도는 99.9995% 이상이 바람직하다.

저진공 캐리어 가스법과 고진공법의 차이는 다음과 같다.

- 브레이징성 및 브레이징 강도에는 큰 차이가 없다.
- 브레이징부의 내식성은 저진공법의 우수하다.
- 저진공법의 경우 Zn, Mg의 증발이 적어서 로 내에 부착되는 이들의 양이 고진공법보다 적다. 따라서 로의 청소 시간이 고진공법에 비해 1/3 정도이다.
- 장치의 가격이 싸다.
- 장비의 관리가 용이하다.
- 캐리어 가스가 잘 침투하지 못하는 브레이징부는

분위기가 10^2 torr 정도에 해당되고, 캐리어 가스가 잘 침투하는 브레이징부는 분위기가 10^7 torr 정도에 해당된다. 따라서 중공구조를 갖는 제품의 경우, 캐리어 가스가 잘 침투하지 못하는 곳은 분위기가 나빠 알루미늄의 브레이징이 곤란하다.

저진공 캐리어 가스법은 알루미늄 브레이징에 아직까지 그다지 사용되고 있지 않으나, 최근 미쯔비시 중공업에서 연구 보고한 것⁷³⁾이 있다.

辭 謝

본고는 大阪大學 溶接工學研究所 松田 福久 教授님의 協助로 作成되었으며, 協助를 아끼지 않으신 松田 福久 教授님께 感謝 드립니다.

참 고 문 헌

33. 정재필 외 : 대한용접학회지, 12(1994), 4호
34. Private Communication
35. J. R. Terrill et. al : Weld. J., 50(1971), 833-S
36. 石川 외 : 古河電工時報, No. 81, (1987), 79
37. 竹本 외 : 輕金屬學會 第80回 春期大會講演, (1991)
38. 川瀬 외 : 輕金屬溶接, 15(1977), 345
39. 輕金屬溶接構造協會規格, LWS T 8801-1991
40. 輕金屬溶接構造協會 低溫溶接委員會, 輕金屬溶接, 25(1987), 102
41. J.R. Terrill ; Weld, J., 45(1966), 202
42. 竹本 외 ; 輕金屬, 41(1991), 681
43. 伊藤 외 : 住友輕金屬技報, 32(1991), 116
44. 前田 외 : 住友輕金屬技報, 33(1992), 135
45. Woods et. al : Weld. J., 52(1973), 115
46. 剛本 외 : 輕金屬, 31(1981), 539, 1976/12
47. 前田 외 : 住友輕金屬技報, 35(1994), 57
48. W.L. Winterbottom et. al : Vac. Tech., 13(1976), 634
49. W.A. Anderson : Weld. J., 56(1977), 314-S
50. E. Lugscheider et. al : Sch. u. Sch., 34(1981), 194s
51. 剛本 외 : 溶接學會關西支部講演會, 1976/12
52. P. Vernia : Weld. J., 60(1981), 194-5
53. W. Schultze et. al : Weld. J., 52(1973), 645
54. K. F. Dockus : Weld. J., 57(1978), No. 10, 36
55. ASM : "Aluminum", Vol. 1, 1968
56. 吉田 외 : 輕金屬, 27(1977), 122
57. 竹本 외 : 輕金屬, 32(1983), 206
58. 伊藤 외 : 輕金屬溶接, 32(1994), 154
59. 竹本 : 쇼이テツク, 1991/9.27
60. 福井 외 : 住友輕金屬技報, 21(1980), 271
61. 馬場 외 : 住友輕金屬技報, 12(1971), No. 3, 21
62. 福井 외 : 住友輕金屬技報, 21(1980), 114
63. 竹本 외 : 輕金屬溶接, 23(1985), 2
64. 林 외 : 眞空冶金, 日刊工業新聞社, (1968), 64
65. 竹本 외 : 輕金屬, 36(1986), 345
66. T. Takemoto et. al, Brazing & Soldering, 15 (1988), 32
67. 伊藤 외 : 輕金屬, 41(1991), 3
68. 麻野 외 : 輕金屬學會 第67回 秋季大會講演概要, (1984), 67
69. 渡邊 외 : 輕金屬, 41(1991), 3
70. 龍用 외 : 輕金屬學會 第80回 春期大會講演概要, (1991), 209
71. 服部 외 : 三菱重工技報, 24(1987), 524
72. 鈴木 외 : 輕金屬, 43(1993), 533
73. T. Hattori et. al : Weld. J., 73(1994), 233-S