

## 알루미늄의 브레이징과 원리

이순재 · 정도현 · 정재필<sup>†</sup>

서울시립대학교 신소재공학과

### Aluminum Brazing and Its Principle

Soon-Jae Lee, Do-Hyun Jung, and Jae-Pil Jung<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

(Received November 1, 2017; Corrected November 13, 2017; Accepted November 21, 2017)

**Abstract:** Aluminum alloys have been widely used in many fields such as electronic, structure, aero-space and vehicle industries due to their outstanding thermal and electrical conductivity as well as low cost. However, they have some difficulties for using in brazing process because of the strong oxide layer of  $Al_2O_3$  on the surface of Al alloy. In addition, their melting point is similar to that of brazing filler metal resulting in thermal damage of Al alloys. Therefore, it is very important to understand the brazing principles, filler metal and its properties such as wetting, capillary flow and dissolution of base metal in the Al brazing process. This paper reviews the brazing principles, aluminum alloys, and brazing fillers. In the case of brazing principle, some formula was used for calculation of capillary force and the dissolution to obtain the best condition of Al brazing. In addition, the advanced research trends in Al brazing were introduced including thermal treatment, additive for improving property and decreasing melting point in Al brazing process.

**Keywords:** Aluminum, Brazing, Filler metal, Capillary force

## 1. 서 론

알루미늄은 철강재료에 비해 가볍고 전, 연성이 뛰어나며 표면에 산화막이 형성되어 내식성이 우수하다. 또한 전기 전도도와 열전도도가 우수하여 전기나 전자재료, 건축소재, 우주항공재료 등 다양한 분야에서 사용하고 있다.<sup>1-5)</sup> 전자산업에서는 회로나 제품 혹은 생산설비의 열교환기 등에서, 자동차산업에서는 차체 경량화 소재로 알루미늄의 사용이 증가하는 추세이다. 알루미늄은 알루미늄 동종끼리의 접합 이외에도, 알루미늄과 이종금속 간의 접합에 관한 연구도 증가하고 있다.<sup>2,3)</sup> 알루미늄 소재를 접합하는 방법 중 브레이징법은 모재 사이에 용가재를 삽입하여, 모재는 용융시키지 않고 용가재만 용융시켜 접합하는 방법이다. 브레이징은 면접합법으로 한번에 여러 곳을 동시에 접합하여 생산성이 높고, 접합강도도 모재 파단수준으로 강하며, 이종재료도 용이하게 접합할 수 있는 장점이 있다.<sup>3-5)</sup>

그러나, 알루미늄 합금은 다른 소재에 비해 브레이징이 상대적으로 까다로운 재료에 속한다. 그 이유는 알루미

늄 표면에 화학적으로 안정한 산화막( $Al_2O_3$ )이 덮혀 있기 때문이다. 이 산화막은 우수한 내식성을 갖지만, 반대로 용융된 용가재와의 젖음성을 저하시켜 브레이징성을 떨어뜨린다. 또 다른 이유는 알루미늄의 용점을 들 수 있는데, 알루미늄의 용점이 용가재의 용점과 가깝기 때문이다. 알루미늄 브레이징 용가재로 쓰이는 Al-Si 합금인 A4047을 예로 들면, A4047의 용점은 약 580°C 이고 작업 온도는 약 610~620°C이다. 한편, 순수한 알루미늄의 용점은 약 660°C이고, 고강도 알루미늄인 5000, 6000계열의 경우 대략 585~650°C의 용점을 갖는다.<sup>7)</sup> 고강도 알루미늄을 A4047을 사용하여 접합할 경우, 모재와 용가재의 용융온도의 차이가 50°C이하로 그 차이가 적다. 모재와 용가재의 용융점의 차이가 적을 경우 모재가 녹아내리는 용락이 발생하기 쉽고, 이로 인해 브레이징이 어려워지게 된다. 아울러, 브레이징 온도가 모재 용점에 가까워서, 모재가 손상될 위험이 높다. 따라서, 이를 방지하기 위해서는 용가재와 모재의 용점차이를 크게 할 필요가 있다.<sup>7-8)</sup>

본 고에서는 전술한 알루미늄 브레이징의 문제점 해결에 관한 기초 원리와 최근 연구 동향에 대해 기술하고자

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: [jjung@uos.ac.kr](mailto:jjung@uos.ac.kr)

© 2017, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다. 추가로 브레이징 현상에 대한 기초지식과 관련 연구 또한 소개하고자 한다.

## 2. 금속의 브레이징

브레이징 공정은 통상 피접합재의 세척(cleaning) - 플럭스 공급 - 용가재 공급 - 가열 및 냉각 - 브레이징 잔사 제거 및 세척 - 제품 검사 순으로 진행된다. 다음에 브레이징과 이에 관한 내용들에 대해 차례대로 기술한다.

### 2.1. 브레이징 현상

브레이징은 전술한 바와 같이 모재를 용융시키지 않고 용가재만 용융시켜 소재를 접합하는 방법이다. 접합과정에서 용융된 용가재는 피접합재 표면 위에 웨팅(wetting) 되고, 접합부 틈새에 모세관 현상으로 충전되며, 피접합재와의 상호 확산현상에 의해 접합부가 형성된다. 용가재의 용점이 450°C 이하인 것을 솔더링, 그 이상을 브레이징이라 한다.

브레이징 접합법은 접합 온도가 낮거나, 이종재료의 접합 시 두 모재의 용점차이가 클 때 효과적이다. 브레이징은 피접합재는 용융되지 않고, 그 사이에 용융된 용가재를 접합에 사용함으로써, 보통 모재의 손상이 적다. 그러나, 실제 브레이징 접합에서는 모재 일부의 용해(dissolution) 및 변형이 일어날 수 있다.<sup>4,6)</sup> 브레이징 온도 부근에서 모재와 용융된 용가재 사이에 상호확산이 일어나 모재와 용가재의 계면에서는 두 금속 성분의 합금이 형성되기도 한다.<sup>4,10)</sup>

### 2.2. 젖음성과 모세관 현상

브레이징에 있어 젖음성(wettability)은 접합여부에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 젖음성은 용융된 용가재가 고체의 표면에서 얼마나 잘 젖는지를 나타내는 척도로, 용가재 금속원자와 모재의 금속원자간 상호인력에 의해 형성된다. 젖음성이 좋을수록 용가재와 모재를 접합하기에 용이하고, 모재 사이 즉, 접합부 간극 내 침투력도 증가한다. 이러한 이유로, 접합 전 젖음성을 확인함으로써 접합여부를 예측하기도 한다. 대체로 젖음성은 젖음각 20도 이하에서 우수하다고 보고, 젖음각이 90도 이상인 경우에는 젖지 않았다(non-wetting)고 한다.<sup>11)</sup> (Fig. 1 참조)

한편, 모세관 현상에 의해 젖음각 90도 이하의 용융된 용가재가 두 모재 사이에 침투하여 접합된다. 즉, 모세관

현상은 용융된 용가재의 표면장력과 모재와의 젖음성에 의해 발생하는 현상으로, 젖음성이 좋을수록 모세관력(Capillary force)도 대체로 증가한다. 특히 모세관력은 용융된 용가재의 침투하는 정도를 나타낸 것으로, 접합 전 모세관력을 측정함으로써 용가재의 침투여부를 미리 확인할 수 있다. 용융된 용가재의 침투가 충분하고 균일하게 되면 미충전부가 감소하여 브레이징부 결함이 줄어들어 접합강도가 상승한다. 따라서, 브레이징 접합에 있어서 용가재의 침투력 혹은 침투여부는 접합강도에 큰 영향을 끼친다. 또한, 용가재의 침투시간이 짧을수록 접합시간이 짧아질 수 있어서 전체 공정시간을 절약할 수 있다.

모세관 현상의 측정은, 모재를 수직으로 세운 후 그 간격 틈새에 용가재가 모세관현상에 의해 빨려 들어간 높이(H)를 측정하여 모세관력을 확인 할 수 있다. 다음 식 (1)에서 모세관 현상에 의해 빨려 들어간 높이 H를 나타내었다.<sup>12)</sup>

$$H = 2\gamma \frac{\cos \theta}{D\rho g} \quad (1)$$

D는 접합부 폭(joint gap)이고,  $\gamma$ 는 용융된 용가재의 표면장력,  $\rho$ 는 용융된 용가재의 밀도,  $\theta$ 는 모재와 용융된 용가재의 접촉각이고  $g$ 는 중력 가속도이다(Fig. 2 참조).

접합부 폭인 D가 감소할수록 침투높이인 H가 증가하여 모세관 현상이 잘 일어나는 것으로 보이지만, 접합에서 D의 값이 너무 작으면 접합부 틈새에 충분한 용가재가 공급되지 못하여 접합결함이 생성되기도 한다. 식 (1)에서 다른 고려사항을 추가하여 더 정확한 모세관현상에 대한 예측도 가능하다. Shen 등은 표면의 거칠기에 따라 모세관현상의 방해요소로 식 (2)를 제시하였다.<sup>13)</sup>

$$\Delta p = F_f + F_D = \lambda \frac{u^2 \rho S}{2V} + \frac{1}{2} C_D \rho u^2 A \quad (2)$$

식 (2)에 표면 거칠기에 따른 저항을 나타내었으며, 표면 거칠기 저항  $p$ 는 점성에 의한 마찰 저항요소 ( $F_f$ )와 유체 흐름에 의한 국부 저항요소 ( $F_D$ )로 구성되어 있다.  $\lambda$ 는 마찰저항계수,  $u$ 는 평균유속,  $\rho$ 는 밀도,  $S$ 는 단위면적,  $V$ 는 단위부피,  $C_D$ 는 국부저항계수,  $A$ 는 유속방향으로 수직 투영한 넓이다.<sup>13)</sup> 또한, Washburn, Fries 등은 중력의 영향을 고려하여 모세관 유동시간을 계산하였다. 중력의 영향을 고려하지 않는 경우는 식 (3)으로, 중력을 고려하는 경우는 식 (4)로 모세관 유동 시간을 계산할 수 있다.<sup>14,15)</sup>

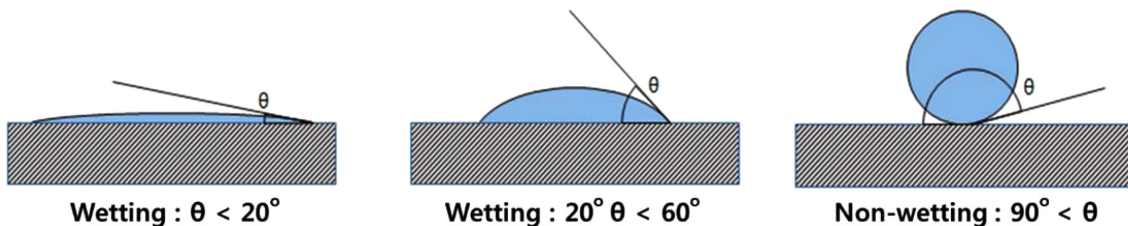


Fig. 1. Wetting and non-wetting state with wetting angle of brazing filler.

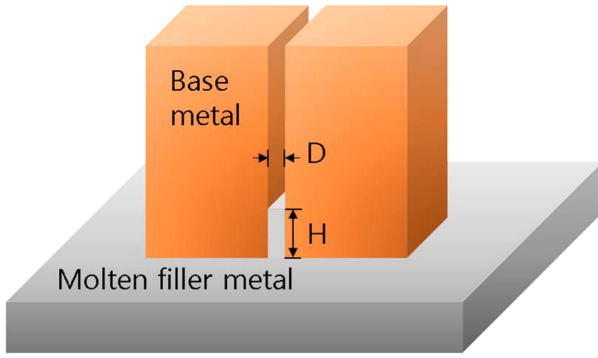


Fig. 2. The schematic diagram of measurement capillary force.

$$t = \frac{2\mu}{\sigma R \cos \theta} x^2 \quad (3)$$

$$t = \frac{8\mu}{\rho g R^2} x - \frac{16\sigma\mu \cos \theta}{\rho^2 g^2 R^3} \ln\left(1 - \frac{\rho g R}{2\sigma \cos \theta} x\right) \quad (4)$$

t는 유동시간, x는 모세관내 이동거리,  $\theta$ 는 접촉각,  $\rho$ 는 밀도, g는 중력가속도이다. 이 식을 사용하여, Zhao 등은 몇 가지 가정하에 미세채널 튜브로 액상금속이 10 mm 거리를 모세관 유동하는데 0.1초 이내가 소요됨을 계산하였다.<sup>14,15)</sup>

Zhao 등도 용융 Al-Si 합금이 미세채널 튜브로 모세관 유동하는 현상을 브레이징 장비를 이용하여 조사하였다. 용융 Al-Si의 표면 장력에 의해 중력에 거슬러 모세관 유동을 관찰하고, 이를 통해 열교환기의 성능확보를 위해서는 설계, 재료선정 및 브레이징 변수가 중요함을 확인하였다.<sup>16)</sup>

Hall 등은 브레이징부 간격에서 용융 금속이 유동하는 현상을 관찰하기도 하였다. 이 데이터는 모재 용해의 영향이나 확산, 조성변화, 응고, 필렛형상 등을 예측하는데 사용 가능하다.<sup>17)</sup>

**2.3. 모재 용해(dissolution of base metal)**

전술한 바와 같이 브레이징 접합시 모재와 용가재의 계면에서 확산에 의한 합금화가 진행된다. 모재의 용점보다 낮은 온도에서 고체 상태인 모재가 용융된 용가재로 확산이 진행되는 것을 모재 용해(dissolution)이라고 한다. 모재가 용해되면, 용해된 양 만큼 모재가 줄어드는데, 이런 점에서 모재 용해는 모재 손상으로 볼 수도 있지만, 반면에 접합성을 향상시키는 역할도 한다. 이런 방법으로 생성된 확산층(모재가 용해된 용가재층)은 용가재와 모재 사이에 성분적 차이를 어느 정도 해소시켜 용가재의 젖음성을 향상시킨다.<sup>11)</sup> Chen 등은 Al-Si계 용가재를 이용하여 Ti-6Al-4V와 5A06을 접합하여 브레이징 중 이중 금속간에 간극을 해소하는 확산층이 생성되는 것을 확인하였다. Ti-6Al-4V 표면에 확산층으로  $Ti_7Al_5Si_{12}$  층이 표면에 생성되고  $Ti(Al_xSi_{1-x})_3$ 이 성장하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다.<sup>18)</sup>

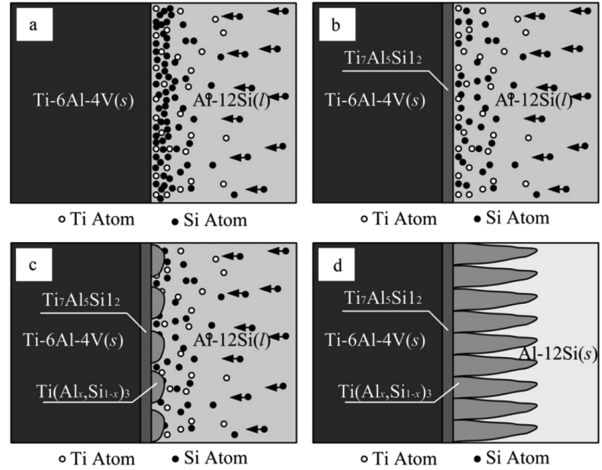


Fig. 3. Interfacial reaction mechanism of Ti/Al dissimilar alloys by laser welding-brazing for dissolution mode, (a) Dissolution of Ti alloy and segregation of Si element, (b) formation of  $Ti_7Al_5Si_{12}$ , (c) nucleation and growth of  $TiAl_3$ , (d) solidification of seam.<sup>18)</sup>

모재가 용해될 때, 용가재의 확산계수와 용해한도에 영향을 받는다. 확산계수는 아레니우스식에 의해 온도의 영향을 받으므로 일반적으로 접합온도가 증가함에 따라 용가재의 용해한도가 증가하고, 젖음성이 증가한다.<sup>19,20)</sup> 확산계수와 확산 거리와의 관계를 식 (5)에, 확산계수와 온도와의 관계를 식 (6)에 나타내었다.

$$d = \sqrt{Dt} \quad (5)$$

식 (5)에서 d는 확산거리이고 D는 확산계수(diffusion coefficient), t는 가열시간이다. 확산거리를 늘리기 위해, 가열시간이나 확산계수를 증가시켜야 한다.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

식 (6)에서 확산계수 D는 온도에 영향을 받는 계수이다.  $D_0$ 는 온도에 무관한 상수이고,  $E_a$ 는 활성화 에너지, R은 기체상수, T는 절대온도이다.

전술한대로, 용가재와 모재간의 합금화는 접합온도와 접합시간에 영향을 받는다. 모재가 용가재로 용해되면, 젖음성이 증가하지만, 지나친 모재의 용해는 모재의 변형을 야기할 수 있다.<sup>21)</sup> 열교환기용 구리 파이프와 알루미늄 파이프의 브레이징에서, 접합 중 모재가 용해되어 변형된 모습을 Fig. 4에 나타내었다.

한편, Nerst-Brunner 이론을 참고하면, 모재의 용해는 가열 온도 및 시간 이 외에도 확산속도와 포화 용해도를 이용하여 보다 상세하게 설명이 가능하다.<sup>22-25)</sup> 즉, 용해되는 모재의 농도를 C라하고 용융 가능한 포화농도를  $C_s$ 라 하면 Nerst-Brunner이론에 의해 식 (7)로 표현할 수 있다.

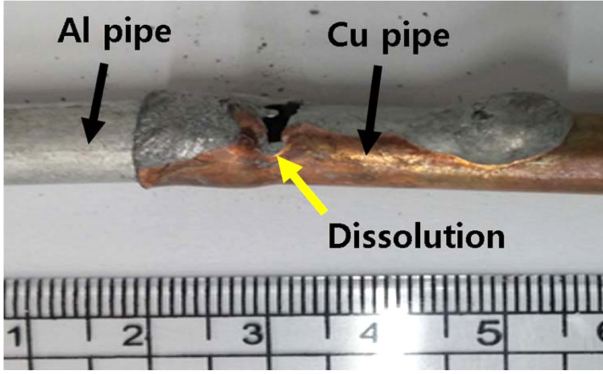


Fig. 4. Failure of Al-Cu pipe brazing by dissolution of the base metal.

$$C = C_s \left[ 1 - \exp\left(-K \frac{S}{V} t\right) \right] \quad (7)$$

식 (7)에서  $K$ 는 용해 속도 상수이고,  $S$ 는 용융된 용가재와 용융되지 않은 합금화된 모재의 계면 면적,  $V$ 는 용융된 용가재의 부피,  $t$ 는 확산시간이다. 시간당 용해량 즉 용해속도를 구하기 위해 위의 식을 시간  $t$ 에 대해 미분하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dc}{dt} = K \frac{S}{V} (C_s - C) \quad (8)$$

식 (8)에서 용해되는 모재의 양이 동일하다는 가정을 하면 식 (9)의 용해 파라미터( $P^*$ )를 표현할 수 있다.

$$P^* = h \left[ \frac{\ln(X_0 X_t + \rho h)}{\rho h (X_0 - X_t)} \right] \quad (9)$$

여기서  $h$ 는 초기 용융된 용가재 폭의 1/2 이고,  $X_0$ 는 포화 용해되었을 때의 용해된 모재의 폭,  $X_t$ 는 시간  $t$ 일 때의 모재의 폭,  $\rho$ 는 용가재의 밀도/모재의 밀도이다. 또한, 용해 파라미터  $P^*$ 를 용해 시간에 관한 식으로 표현하면 식 10처럼 간단히 표현되며, 식 (10)을 이용하여 용해 상수  $K^*$ 를 구하는 것도 가능하다.

$$P^* = K^* t \quad (10)$$

Fig. 4는 전술한 모재의 용해에 의해 접합 파이프에서 불량인 그림이다. 인덕션(induction) 브레이징을 이용하여 알루미늄 3003 파이프와 구리 파이프를 접합 하였으며, 구리 파이프 쪽에서 불량이 발생하였다. 접합온도는 브레이징 용가재인 Al-Si계의 용점인 약 600°C 전 후에서 접합하였다. 구리의 용점은 1084°C로, 접합 중에 구리 파이프가 용융된 것이 아닌, 용가재로 용해 되었다고 볼 수 있다. 이처럼 모재의 용해는 모재의 용융온도보다 낮은 온도에서 모재의 변형을 야기 할 수 있으므로 모재의 포화용해도는 접합 전 확인해야 하는 요소이다.<sup>21-25)</sup>

### 3. 알루미늄 브레이징

#### 3.1. 알루미늄의 종류

알루미늄 합금은 AA(Aluminum Association)의 명명법에 따라 합금의 명칭을 정하는데, 주 합금 원소에 따라 4 자리 숫자 중 첫 번째 숫자에 이를 표시하여 1000계열부터 9000계열까지 명명하고 있다. 알루미늄은 크게 열처리 합금과 비열처리 합금으로 분류 할 수 있으며, 합금의 강도를 향상시킬 때 강화 열처리를 하지 않는 합금군을 비열처리형 합금, 열처리에 의한 석출강화를 주로 사용하는 합금군을 열처리형 합금이라 한다.

이 중 비열처리형 알루미늄 합금은 1000, 3000, 4000, 5000계열로, 가공 경화의 방법으로 강도를 향상시킨다. 가공경화의 정도는 명칭 뒤에 -HX 로 나타내며, 숫자가 커질수록 가공강화가 증가한다. 여기서, X는 가공경화의 정도를 숫자로 나타낸 것이다. 그 외에는 -0 (annealed, recrystallized) 와 -F (As fabricated)로 표시한다. 또 다른 계열로써, 열처리 알루미늄 합금은 그 나머지인 2000, 6000, 7000계열이 있다. 열처리상태는 합금 명칭 뒤에 -TX 로 나타내며, X는 열처리 상태 번호를 의미한다.<sup>26)</sup> 그 외에는 -0, -F, -W (Solution heat treated)로 표시한다. Table 1에 알루미늄 열처리에서 사용되는 각각 기호의 의미를 정리하였다.

#### 3.2. 알루미늄 브레이징 용가재

브레이징에서 용가재를 선정할 때에는 접합 예정부의 크기와 공차, 피접합 부품의 소재와 형태, 브레이징 후 외관, 단가, 용점 등을 고려하여 결정한다. 특히, 알루미늄은 다른 금속에 비해 접합 시 주의할 요소들이 있다. 알루미늄 표면의 산화막은 고온에서 그 성장 속도가 증가하여 접합 후 산화막에 의한 접합불량이 발생할 수 있다.<sup>7)</sup> 또한, 비열처리 알루미늄의 경우 접합온도에 따라 모재의

Table 1. The meaning of symbols in the heat treatment of Al brazing

열처리 기호	의미
F	열처리 하지 않음
0	어닐링
H	가공 경화처리
W	담금질
T	F,0,H 외 안정된 열처리
T2	고온 가공에 의해 냉각 후, 냉간 가공 후 자연시효
T3	담금질 후 냉간 가공 후 자연시효
T4	담금질 후 자연시효
T5	고온 가공에 의해 냉각 후 인공시효
T6	담금질 후 인공시효
T7	담금질 후 안정화 처리
T8	담금질 후 냉간 가공 후 인공시효
T9	담금질 후 인공시효 처리 후 냉간가공

**Table 2.** The forming parameters of Al-Si Alloys<sup>35)</sup>

Nr	Alloy designation	Melting temperature [°C]	Atomization gas pressure [MPa]	Melt flow rate [kg/h]	Gas flow rate [kg/h]	GMR
1	AlSi7Cu20Sn2Mg1	597	0.4-0.6	293	992-1388	3.4-4.7
2	AlSi10Cu10Mg3	634	0.5	268	1190	4.4
3	AlSi10Cu8Sn2Mg1	628	0.5	268	1190	4.4
4	AlSi10Zn10Cu4	637	0.4-0.6	276	992-1388	3.6-5.0
5	AlSi10Zn13Cu4	635	0.5	290	1190	4.1

강도가 저하될 우려가 있다. 그 뿐만 아니라 알루미늄은 모재와 용가재의 용점차이가 적어 모재의 일부가 용융되어 결합이 발생하기도 한다.

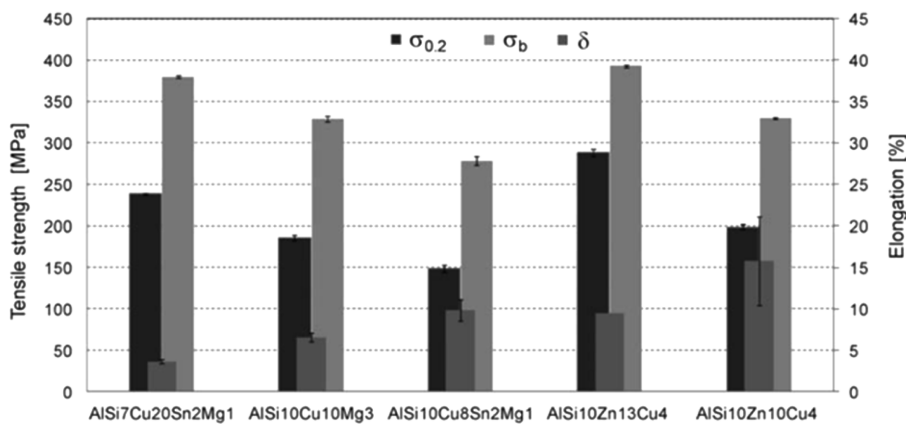
순수한 알루미늄의 용점은 660°C로 낮은 편이고 알루미늄과 이종재료를 접합 할 때는 용점차이나 이종금속간의 직접 혼합을 억제하기 위하여 용가재를 사용하는 브레이징이 유리하다.<sup>27)</sup> 알루미늄의 용점인 660°C 이하에서 사용이 가능한 용가재의 경우 알루미늄계열 용가재 등이 있다. 알루미늄계 용가재인 Al-Si계 합금인 4000번대 알루미늄은 첨가원소를 통해 용점을 낮출 수 있다.<sup>28)</sup> Al-12Si내에 Si가 첨가원소에 의해 Si입자로 석출되면서 용점을 낮출 수 있다. Si가 석출 될 때에 Si 석출상의 성장 메커니즘이 불순물에 의한 쌍정(impurity induced twinning)으로 바뀌어 미세한 Si 입자로 석출된다.<sup>29,30-34)</sup> 알루미늄 용가재의 용점을 낮출수록 모재 용해 및 열화에 영향을 적게 줄 수 있는데, 이에 대한 관련 연구가 지속적으로 진행되고 있다.<sup>30-34)</sup> Table 2에 보고된 Al-Si계 합금과 용점 및 실험 조건을 나타내었다. Table 2에서는 Al-Si 합금에 구리, 주석, 아연, 마그네슘을 1~20%까지 첨가하며 각 합금의 용점을 표기하였다. 1, 3 합금을 비교해 보면, 구리의 함량이 증가하면서 용점이 약 30°C 감소한 것을 확인할 수 있다. 하지만 2, 3 합금을 비교해보면, 구리의 성분 함량이 증가하면서 용점도 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 4, 5 합금을 비교해보면, 아연의 성분 함량이 증가했을 때, 용점이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 위의 연구 결과와 같이 용가재의 용점은 용가재 내의 여러 성분의 상

호작용에 의해 결정되며, 지속적인 연구가 추가로 필요하다. 또한, AlSi7Cu20Sn2Mg1과 같이 600°C이하의 용가재를 확보하였더라도 실제 사용하기 위해서는 접합성 또한 확보하여야 한다. 위의 연구의 합금들의 접합성을 확인 하기 위해 각 합금의 기계적 물성을 Fig. 5에 나타내었다.<sup>35)</sup>

Fig. 5의 Al-Si-Cu계 합금에서 대체적으로 인장강도와 항복강도는 연신률과 반비례 관계를 가진다. 구리의 함량이 20, 10, 8 wt%로 감소할 때, 인장강도와 항복강도도 함께 감소하고 연신률은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그 외 규소, 주석, 마그네슘의 함량변화에 따른 용점 변화는 확인하기 어렵다. 또한, 아연을 13 wt% 함유하고 있는 합금의 인장강도와 항복강도가 가장 높게 측정되었으며, 아연의 양을 10 wt%로 감소시켰을 때에는 인장강도와 항복강도가 감소하고 연신률이 증가하는 것을 확인할 수 있다.<sup>35)</sup> 이러한 연구결과를 통해 접합의 요구 조건(인장강도, 접합강도, 연신률 등) 내에서 저용점에서 접합이 가능한 용가재를 확보 할 수 있다.

### 4. 결 론

본고는 알루미늄 브레이징의 원리, 젖음성 및 모세관현상과 모재의 용해 현상을 최근 연구동향과 함께 소개하였다. 또한 알루미늄의 종류와 특성, 브레이징 합금에 대하여도 서술하였다. 알루미늄은 열 및 전기전도도가 우수하고, 경량금속이며 내식성 및 강도도 우수하여 전자



**Fig. 5.** Tensile properties of Aluminum alloys<sup>35)</sup>

산업을 포함한 산업 전반에 열교환기와 경량화 구조체로서 필수적인 금속이다. 알루미늄은 낮은 용점과 강한 산화막으로 인해 브레이징이 까다로운 점은 있지만, 브레이징 용가재 합금, 브레이징 공정 등 기술개발이 꾸준히 진행되고 있다. 이를 통하여 전자 및 패키징 산업, 이와 관련된 장비산업 등에서 보다 용이하게 알루미늄 합금을 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20142020104380).

### References

1. A. Sharma, and J. P. Jung, "Aluminium Based Brazing Fillers for High Temperature Electronic Packaging Applications", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(4), 1 (2015).
2. A. Mathieu, S. Pontevicci, J. Viala, E. Cicala, S. Mattei, and D. Grevey, "Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88%Al, 12%Si)", *Materials science & engineering: A*, 435-436, 19 (2006).
3. J. H. Lee, T. J. Yoon, K. H. Lee, S. Y. Kwak, and C. Y. Kang, "Microstructure and mechanical property of joint of Al-Steel laser brazing using Cu filler metal", *The Korean Welding & Joining Society.*, 174 (2016).
4. R. J. Klein, "Soldering in electronics", 2<sup>nd</sup> Ed., (1989).
5. R. W. Messler, Jr, "Joining of advanced materials", Butterworth - Heinemann, 3-16 (1993).
6. P. T. Viance, "Soldering handbook", American Welding Society, 3<sup>rd</sup> Ed., (1999).
7. J. E. Hatch, "Aluminum:properties and physical metallurgy", American society for metals, 1 (1999).
8. X. Song, H. Li, and X. Zeng, "Brazing of C/C composites to Ti6Al4V using multiwall carbon nanotubes reinforced TiCuZrNi brazing alloy", *J. Alloys and Compounds*, 664, 175 (2016).
9. X. Song, H. Li, X. Zeng, and L. Zhang, "Brazing of C/C composites to Ti6Al4V using grapheme nanoplates reinforced TiCuZrNi brazing alloy", *Materials Letters*, 183, 232 (2016).
10. Z. Wang, G. Wang, M. Li, J. Lin, Q. Ma, A. Zhang, Z. Zhong, J. Qi, and J. Feng, "Three-dimensional graphene-reinforced cu foam interlayer for brazing C/C composites and Nb", *Carbon*, 118, 723 (2017).
11. C. S. Kang, and J. P. Jung, "Micro joining", Samsung-Books, pp.22-23 (2002).
12. M. H. Sloboda, "Design and Strength of Brazed Joints", Johnson Matthey & Co limited, London, pp.3-6 (1961).
13. A. Shen, Y. Liu, X. Qiu, Y. Lu, and S. Liang, "A model for capillary rise in nano-channels with inherent surface roughness", *Appl. Phys. Lett.*, 110, 121601 (2017).
14. E. W. Washburn, "The dynamics of capillary flow", *Phys. Rev.*, 17(3), 273 (1921).
15. N. Fries, and M. Dreyer, "The transition from inertial to viscous flow in capillary rise", *J. Colloid Interface Sci.*, 327, 125 (2008).
16. H. Zhao, S. Elbel, and P. S. Hrnjak, "Capillary Flow of Liquid Metal Occurring in Microchannel Heat Exchanger Fabrication", (2012).
17. A. C. Hall, F. M. Hosking, and M. Reece, "Visual observations of liquid filler metal flow within braze gap", *Science and Technology of Welding and Joining*, 9(2), 95 (2002).
18. S. Chen, L. Li, Y. Chen, and J. Huang, "Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process", *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 891 (2011).
19. D. Gupta, K. Vieregge, and W. Gust, "Interface diffusion in eutectic Pb-Sb solder", *Acta Materilalia*, 47, 5 (1998).
20. H. T. Lee, and M. H. Chen, "Influence of intermetallic compounds on the adhesive strength of solder joints", *Materials Science and Engineering: A*, 333, 24 (2002).
21. C. Hunt, and D. D. Maio, "A test methodology for copper dissolution in lead-free alloys", *IPC APEX EXPO*, (2009).
22. K. Barmak, "Dissolution kinetics of nickel in lead-free Sn0Bi-In-Zn-Sb soldering alloys", *Proc. Mater. Re. Soc, Symp.*, 993, 0993-E03-01 (2007).
23. H. Nakagawa, C. H. Lee, and T. H. North, "Modeling of base metal dissolution behavior during transient liquid phase brazing", *Metallurgical transaction A*, 22(2), 543 (1991).
24. D. U. Kim, C. Y. Kang, and W. J. Lee, "The effect of grain boundary on the dissolution of base metal into insert metal during TLP bonding of Ni-Base super alloy", *Metals and Materials*, 5(5), 377 (1999).
25. Y. Li, W. Liu, P. He, J. Feng, and D. P. Sekulic, "Dissolution of TiAl alloy during high temperature brazing", *Journal of Materials Science*, 48(15), 5247 (2013).
26. K. Elangovana, and V. Balasubramanian, "Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded aa6061 aluminum alloy joints", *Material Characterization*, 59, 1168 (2008).
27. M. Craig, and G. Jin, "Aluminum brazing –what matter most: fundamentals and case studies", Ipsen Incorporated, Cherry Valley, Illionis USA (2017).
28. D. M. Jacobson, and H. Giles, "Principles of Brazing II", ASM international, 3rd Ed., pp.1-14 (2005).
29. S. Z. Lu, and A. Hellawell, "The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys:impurity induced twinning", *Metallurgical transactions A*, 18, 1721 (1987).
30. M. M. Makhlof, and H. V. Guthy, "The aluminum silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography.", *Journal of light metals*, 1, 199 (2001).
31. D. J. Fray, "Determination of sodium in molten aluminum and aluminum alloys using beta alumina probe", *Metallurgical transactions B*, 8(1), 153 (1977).
32. A. Knuutinen, K. Nogita, S. D. McDonald, and A. K. Dahle, "Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb", *Journal of Light Metals*, 1, 229 (2001).
33. H. C. Lia, Y. Sun, and G. Sun, "Correlation between mechanical properties and amount of dendritic  $\alpha$ -Al phase in as-cast near eutectic Al-11.6%Si alloys modified with strontium", *Materials Science and Engineering: A*, 335, 62 (2002).
34. K. Nogita, S. D. Mcdonald, and K. A. Dahle, "Eutectic modification of Al-Si alloys with rare earth metals", *Materials Transactions*, 45, 323 (2004).
35. C. Cui, A. Schulz, L. Achelis, V. Uhlenwinkel, H. Leopold, V. Piwek, Z.Tang, and T. Seefeld, "Development of low-melt-

- ing-point filler materials for laser beam brazing of aluminum alloys”, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 45(8), 717 (2014).
36. T. I. Yoo, J. P. Jung, and Y. S. Shin, “Practical brazing technology”, *Engineering information*, Seoul (2005).
  37. A. Tressaud, “Functionalized Inorganic Fluorides”, pp.214-221, John Wiley & Sons Ltd., India (2010).
  38. W. Dai, S. B. Xue, J. Y. Lou, Y. B. Lou, and S. Q. Wang, “Torch brazing 3003 aluminum alloy with Zn-Al filler metal”, *Transactions of nonferrous metals society of China*, 22, 30 (2012).
  39. K. Allen, “Solving the problems inherent to torch brazing aluminum”, *Welding Journal*, 39 (2009).
  40. D. Claydon, and A. Sugihara, “Brazing aluminum automotive heat exchanger assemblies using a non-corrosive flux process”, *SAE technical paper*, 830021 (1983).
  41. W. E. Cooke, T. E. Wright, and J. A. Hirschfield, “Furnace brazing of aluminum with a non-corrosive flux”, *SAE technical paper*, 780300 (1978).
  42. M. P. Heisler, “Temperature chart for induction and constant heating”, *Trans. ASME.*, 69(3), 227 (1947).
  43. V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, “Handbook of induction heating”, *Manufacturing Engineering and Materials Processing*, 61, pp.80-98 (2003).
  44. J. N. Antonevichm, “Fundamentals of ultrasonic soldering”, *Welding Journal*, 55(7), 200 (1976).
  45. M. Ding, P. I. Zhang, Z. Y. Zhang, and S. Yao, “Direct soldering 6061 aluminum alloys with ultrasonic coating”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, 292 (2010).
  46. M. Naka, and K. M. Hafez, “Applying of ultrasonic waves on brazing of alumina to copper using Zn-Al filler alloy”, *Journal of materials science*, 38(16), 3491 (2003).
  47. J. Yan, Z. Xu, L. Shi, X. Ma, and S. Yang, “Ultrasonic assisted fabrication of particle reinforced bonds joining aluminum metal

matrix composites”, *Materials and Design*, 32(1), 343 (2011).



- Soon-Jae Lee
  - Department of Materials Science and Engineering University of Seoul
  - Research Interest: Brazing, Welding, Soldering
  - e-mail: tnswo123@uos.ac.kr
- 



- Do-Hyun Jung
  - Department of Materials Science and Engineering University of Seoul
  - Research Interests: Brazing, Soldering, Electroplating
  - e-mail: jdh1016@uos.ac.kr
- 



- Jae-Pil Jung
  - Department of Materials Science and Engineering University of Seoul
  - Research Interests: Brazing, Microjoining Brazing fillers, Solder joint reliability
  - e-mail: jppjung@uos.ac.kr
-