

열처리온도 및 시간에 따른 알루미늄 주조재의 고상확산 접합 특성

선주현*** · 신승용** · 홍주화*†

*충북대학교 공과대학 신소재공학과, **한국생산기술연구원 에코공정연구부

Solid State Diffusion Brazing of the Aluminum Alloy Castings According to the Heat Treatment Conditions

J. H. Sun***, S. Y. Shin**, J. W. Hong*†

*Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University,
410, Sungbong-Ro, Heungduk-Gu, Cheongju 361-763, Korea

**Department of Eco Materials & Processing, Korea Institute of Industrial Technology 7-47, Dongdo-Dong,
Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea

Abstract Solid state diffusion brazing of aluminum castings (AC4C) and wrought alloys (Al6061) was conducted in order to improve thermal conductivity and temperature uniformity of the aluminum heater which was generally fabricated by casting method. Tensile strength and thermal conductivity are raised with increasing brazing temperature, obtaining 122.5 MPa and 206 W/m · K at 540°C 5hrs brazing conditions, respectively. The diffusion brazed heater, shows maximum temperature difference of 4°C, exhibits an enhanced temperature uniformity compared with the cast heater having the maximum temperature difference of 11°C.

(Received October 17, 2008; Revised October 23, 2008; Accepted October 31, 2008)

Key words: Solid state diffusion brazing, Aluminum castings, Heat treatment, Metal heater, Semiconductor

1. 서 론

CVD/PVD 등의 반도체 공정 중 반도체 웨이퍼를 지지시키면서 동시에 특정한 온도로 가열시키기 위한 목적으로 사용되는 메탈히터는 금속재질의 기지재 내부에 발열체가 몰딩된 시스히터(Sheath heater)를 내장하는 형태로 되어있다. 이중 알루미늄 히터는 400°C 이하의 저온 공정에서 사용 되는 반도체 장비용 히터이며 제조방법으로는 주조공정을 이용하는 방법, 용접을 이용하는 방법 및 브레이징을 이용한 방법 등이 있다. 최근 반도체용 금속히터 제조 시 중요한 고려대상으로 제조비용이 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 제조공정이 단순한 알루미늄 주조재를 이용한 주물형 히터가 주목받고 있다[1].

그러나 주물형 히터의 경우 주조 시 유동성을 높이기 위해 첨가된 다량의 금속원소 및 주조결함으로 인해 열전도율 및 온도균일도가 떨어지는 단점이 있어 주물형 히터의 열전도율 개선을 위한 연구개발

노력이 필요하다. 본 연구에서는 열전도율이 높은 알루미늄 전신재를 웨이퍼가 지지되는 주물히터 상부에 접합함으로써 금속히터의 열전도율 및 온도 균일도를 높이기 위한 방법을 시도하였다.

일반적으로 알루미늄 합금의 접합방법으로는 용접, 브레이징 및 확산접합법 등이 사용되고 있다. 용접법의 경우 제조공정이 간단하여 선호되고 있으나, 외부의 개방된 부분만 접합되고 내부는 접합되지 않은 기계적 체결상태로 남아 있어 열전도율이 낮다는 단점이 있다. 따라서 알루미늄 히터의 열전도율의 개선을 위해서는 브레이징 및 확산 브레이징법에 의한 접합기술 개발이 필요한 실정이다[2, 3].

그러나 용가재를 사용한 브레이징법의 경우 알루미늄 주물재의 용점이 알루미늄 접합용 용가재의 용점보다 낮아 접합공정 중 모재금속이 용융 용가재에 의해 쉽게 침식되고 젖음특성이 나쁘다는 단점이 있다. 따라서 알루미늄 주물재의 용점보다 낮은 온도에서 접합이 가능한 고상확산 접합기술이 주요기술로

†E-mail : jhhong@cbnu.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of the base metals

Alloy	Chemical composition (wt%)											
	Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr
AC4C	Bal.	< 0.25	7.2	0.3	< 0.35	< 0.55	< 0.35	< 0.10	< 0.20	< 0.10	< 0.05	< 0.10
Al 6061	Bal.	0.35	0.5	1.0	< 0.25	< 0.7	< 0.15	-	< 0.15	-	-	-

Table 2. Major properties of the base metals

		Al6061	AC4C
Alloy		Al-Mg-Si system (Wrought alloy)	Al-Si-Mg system (Casting alloy)
M.P. (°C)		582~652	555~610
Tensile Strength (MPa)	O	125	99 ~ 176
	T6	310	190 ~ 284
Hardness (H _B)	O	25	57
	T6	73	81
Thermal Conductivity (W/m · K)		180	159

주목받고 있다. 이러한 확산접합의 특징은 접합부의 제 성질이나 미세조직이 모재와 거의 같고, 변형이 극히 적기 때문에 밀착구조를 가지는 고강도의 접합면을 얻을 수 있다는 장점이 있다[4-6].

본 연구에서는 주물형 알루미늄 히터의 열전도율 개선을 위해 알루미늄 주물재인 AC4C 합금과 열전도율이 높은 Al 6061 합금의 고상확산 접합 시 접합온도 및 시간에 따른 접합부 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 접합모재

본 연구에서는 Table 1의 화학조성을 갖는 Al AC4C 및 Al 6061합금을 사용하였으며 접합시편의 크기는 실제 알루미늄 히터와 동일한 $\phi 200 \text{ mm} \times t15 \text{ mm}$ 로 제작하였다. 접합모재인 Al AC4C 및 Al 6061 합금의 특성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 접합조건

고상확산접합을 위하여 분당 5°C의 속도로 승온시킨 후 500, 520 및 540°C의 온도에서 접합한 후 로냉시켰다. 접합시간은 각각의 온도에서 2시간 및 5시간 유지시켰으며 접합압력은 5 MPa로 고정하였다. 접합장비는 100 Tonf의 최대압력을 갖는 고진공 핫 프레스를 이용하였으며 접합 시 5×10^{-6} Torr의 고진공 분위기를 유지하였다.

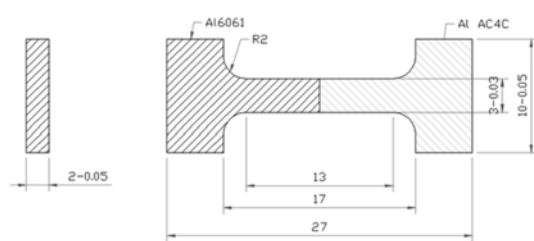


Fig. 1. Schematic diagram of the tensile test specimen.

2.3 접합부 조직관찰

열처리 조건에 따른 접합부 미세조직변화를 관찰하기 위하여 광학현미경(PHDT-M, Nikon)을 이용하였으며 시편의 에칭은 Keller 부식액(20 ml distilled water, 20 ml 32 HCl, 20 ml 65% HNO₃, 5 ml 40% HNO₃)을 이용하였다. 또한 X-ray 회절분석기(XRD, D8 discover, Bruker)를 이용하여 접합부의 산화물 및 생성 상을 조사하였다.

2.4 접합부 강도 및 경도측정

접합강도를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 접합부를 중심으로 인장시험편을 제조하였다. 인장시험은 만능재료시험기(MTS 810 series)를 이용하였으며 3 mm/min의 변형 속도로 측정하였다. 알루미늄 접합 시 접합모재 표면에 존재하는 알루미늄 산화물은 접합공정 중에 알루미늄 모재금속과의 열팽창계수의 차이에 의해 물리적으로 분해되기 시작하며 점차 모재 속으로 확산하여 가는 것으로 알려져 있다[4, 6]. 따

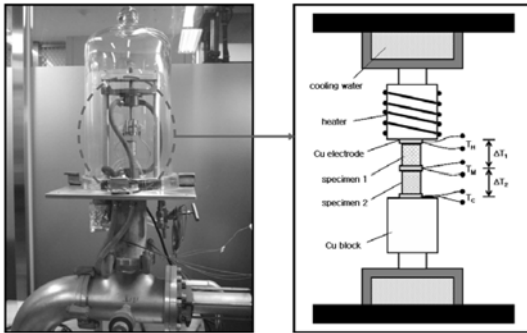


Fig. 2. Schematic diagram and feature for the thermal conductivity test.

라서 미소경도기(MHV-2000)를 사용하여 접합부 경도를 측정함으로써 접합부의 산화물의 존재 여부를 확인하였다.

2.5 열전도율 측정

접합체의 열전도율 측정은 Fig. 2의 장치를 이용하여 Al 6061 소재를 표준시료로 이용한 정적비교법(Static comparative method)을 이용하였다. 열전도도는 아래의 식에 의해 열류 q 가 동일하다고 가정하여, 측정시료의 온도차에 의해 계산될 수 있다.

$$q = \frac{K_1}{L_1} \Delta T_1 A_1 = \frac{K_2}{L_2} \Delta T_2 A_2 \quad (1)$$

$$\therefore \frac{K_1}{K_2} = \frac{A_2 L_1 \Delta T_2}{A_1 L_2 \Delta T_1} \quad (2)$$

이때 K_1 은 표준시편

K_2 는 측정시편의 열전도율

이때 대류에 의해 방출되는 열량을 최소화하기 위하여 5.0×10^{-5} torr의 진공분위기 하에서 측정하였고, 열전대로 빠져 나가는 열을 차단하기 위해 직경 75 μm 의 얇은 열전대를 사용하였다. 열전도도 측정을 위한 시편의 형상은 폭 5 mm, 길이 5 mm, 두께 8 mm로 하였으며 길이방향의 중심부에 접합부가 위치하도록 제작하였다.

2.6 알루미늄 히터의 온도 균일성

본 연구에서는 직경 300 mm의 주물형 알루미늄 히터를 제작 한 후 상부에 Al 6061 합금을 고상화산 접합하여 히터의 온도균일성을 측정하였다. 온도

측정은 제조된 히터 상부에 직경 200 mm의 웨이퍼를 거치시킨 후 10개의 열전대를 이용하여 웨이퍼의 표면온도를 측정하였으며 400°C의 온도로 가열시킨 후, 웨이퍼의 각 위치별 온도를 측정하여 온도편차를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 접합부조직 및 상 분석

본 연구에서는 열처리 온도 및 시간에 따른 Al AC4C 합금과 Al 6061합금의 고상화산 접합특성에 대하여 평가하였다. 알루미늄 주물재의 용점(555°C) 이하에서 용가재를 삽입하지 않고 고상화산 접합실험을 실시한 결과 전 조건에서 모재의 침식은 없는 것으로 확인되었다. Fig. 3에 열처리 온도 및 열처리 시간에 따른 접합부 조직을 나타냈었다. 알루미늄 주물재의 경우 알루미늄 초정상과 Al-Si 공정조직이 혼재된 전형적인 주조조직을 보였다. 열처리온도가 500°C인 조건에서는 접합부에 약 100 μm 이하의 기공이 관찰되어 미 접합 부분이 존재하는 것을 확인하였고 열처리온도가 540°C로 증가함에 따라 기공이 없는 건전한 접합부를 형성함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4에 500°C × 5시간 및 540°C × 5시간의 열처리 조건에 대한 XRD 분석결과를 나타내었다. 500°C × 5시간 조건의 경우 알루미늄의 산화물상인 Al_2O_3 상이 검출되었으며, 초기 표면에 존재하는 알루미늄 산화물이 분해되어 모재 속으로 확산하지 못하고 접합부에 남아 있는 것으로 사료된다. 540°C × 5시간 열처리 조건에서의 접합부 조직은 Al, Si 및 강화상인 Mg_2Si 상이 존재하는 것으로 확인되었고 산화물상은 관찰되지 않았다. 알루미늄 접합 시 용가재를 사용할 경우 공정온도에서 액상용가재의 확산경로를 따라서 산화물이 모재 쪽으로 확산하지만 고상화산 접합의 경우 산화물의 확산기구가 고상화산이므로 확산속도가 매우 느리며 온도에 의한 영향이 매우 크다고 알려져 있다[5]. 따라서 알루미늄 주물재의 고상화산 접합 시 알루미늄 산화물이 미세하게 분해되어 모재 속으로 완전히 확산하기 위해서는 540°C × 5시간 이상의 조건이 되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

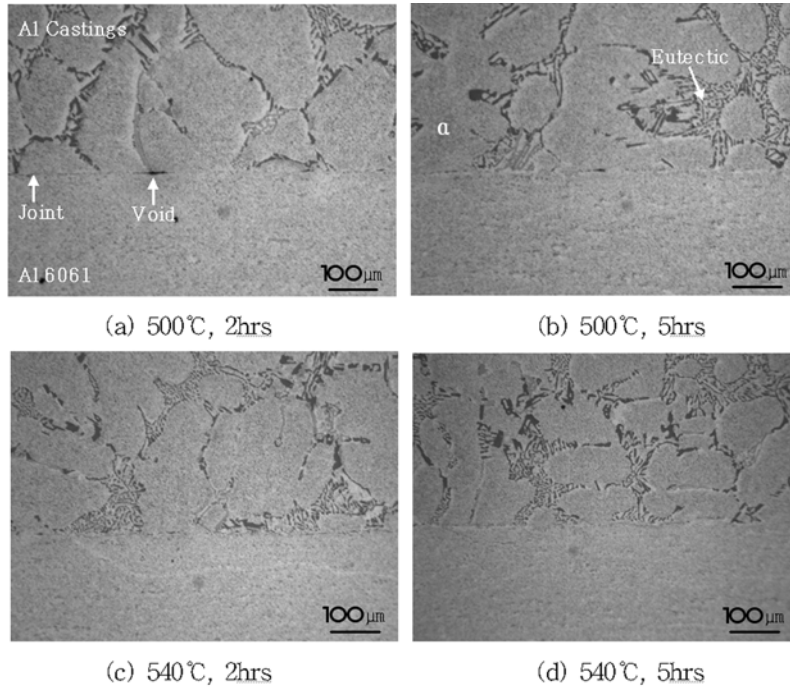


Fig. 3. Microstructure of the diffusion brazed joint with various temperature and time.

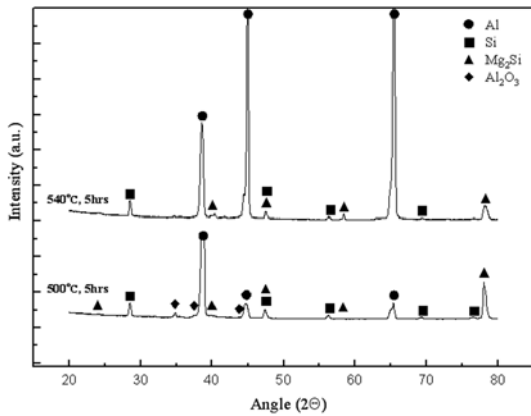


Fig. 4. XRD patterns of the joint specimens at 500°C and 540°C brazing temperature.

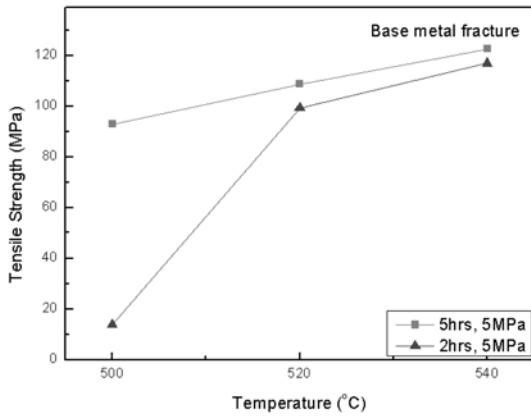
3.2 기계적 성질

알루미늄 합금의 접합 시 접합부에 취약한 금속간 화합물 및 알루미늄 산화물이 존재할 때 접합부의 강도가 저하되고 경도가 증가한다. 따라서 본 연구에서는 접합부 강도 및 경도측정을 통해 열처리 온도 및 시간에 따른 기계적 특성을 평가하였다.

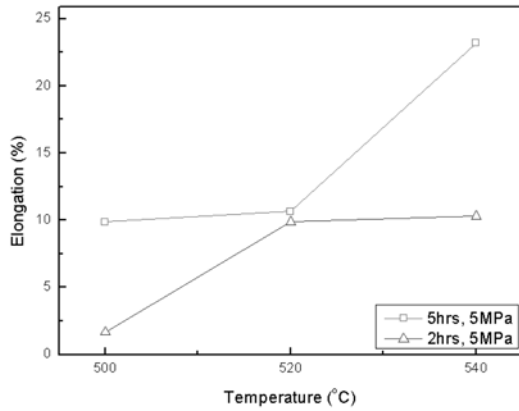
Fig. 5에 열처리온도 및 열처리 시간에 따른 인장

강도 측정결과를 나타내었다. 열처리시간이 2시간인 경우, 열처리온도가 500°C인 조건에서 접합강도가 13.8 MPa로 매우 낮은 강도를 보였으나 열처리온도가 540로 증가함에 따라 116.8 MPa의 고강도 접합부를 얻을 수 있었다. 그러나 측정된 연신율은 10.3%로 모재의 연신율보다 낮았으며 접합부에서 파단되어 접합부 강도가 모재강도에 비해 낮았다. 따라서 2시간의 열처리시간은 접합부에서 충분한 상호확산이 형성되기에는 짧다는 것을 알 수 있었다. 열처리시간이 5시간인 경우, 540°C 열처리온도에서 122.5 MPa의 인장강도 및 23.2%의 연신율을 보였으며 Al AC4C 모재부위에서 파단이 발생하여 접합부 강도가 모재강도 이상으로 고강도의 접합부를 형성함을 확인하였다.

또한 Fig. 6의 접합부의 경도 측정결과에서 확인할 수 있듯이 열처리온도가 증가하고 열처리시간이 길어질수록 접합부 경도가 감소함을 확인할 수 있었다. 500°C × 2시간 열처리 조건에서의 경도가 $H_B = 63$ 으로 높은 것은 Fig. 4의 XRD 결과에서 확인할 수 있듯이 접합부에 존재하는 산화물에 기인한 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 5. Mechanical strength with various brazing temperature and time; (a) tensile strength and (b) elongation.

3.3 열적 성질

본 연구에서 사용된 모재의 열전도율을 측정 한 결과 알루미늄 주물체인 Al AC4C합금의 열전도율은 160.5 W/m · K이었으며 Al 6061합금의 열전도율은 176.2 W/m · K이었다. 본 연구의 목적은 알루미늄 주물체와 전신재의 접합을 통하여 알루미늄 주물히터의 열전도율을 향상시키는 것이다. 따라서 접합시편의 열전도율을 측정하여 Al 6061합금의 열전도율과 비교함으로써 열적 특성을 확인하였다.

Fig. 7에 접합시편의 열전도율 측정결과를 나타내었다. 열처리 시간이 2시간인 경우, 500°C 열처리온도에서 열전도율이 164.7 W/m · K 이었으며 열처리온도가 520°C 이상으로 증가하면서 179 W/m · K 이상

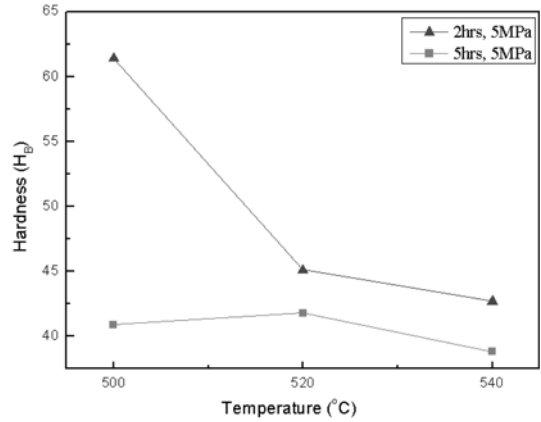


Fig. 6. Hardness in the joint area with various temperature and dwell time.

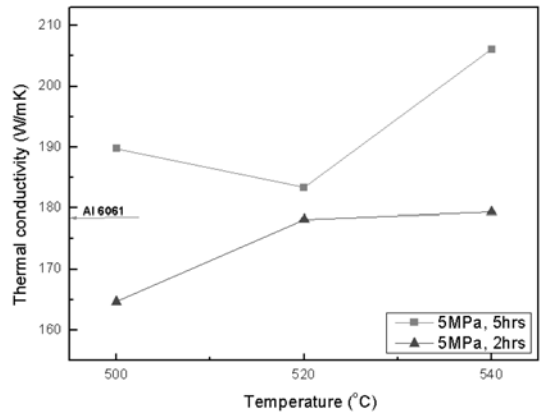


Fig. 7. Thermal conductivity of the joint specimen brazed with various temperature and dwell time.

의 열전도율을 보였다. 또한 열처리시간이 5시간인 조건에서는 열처리온도가 500°C인 경우에서도 열전도율이 189.8 W/m · K로 Al 6061합금의 열전도율보다 우수한 결과를 얻었다. 또한 540°C 5시간의 열처리조건에서는 206 W/m · K의 열전도율을 보여 Al 6061 모재합금의 열전도도에 비해 약 110%의 열전도율을 얻을 수 있었다.

열전도율 증가의 원인을 분석하기 위하여 저배율 현미경을 이용하여 접합면을 관찰하였다(Fig. 8). 열처리온도가 500°C인 경우 알루미늄 주물체인 AC4C 측에 1 mm 이하의 기공이 확인되었으나, 접합온도가 540°C로 증가함에 따라 주물체 내부의 기공은 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 이는 열처리온도가 증가함에 따라 접합 시 고온 · 기압환경 하에서 알루미늄

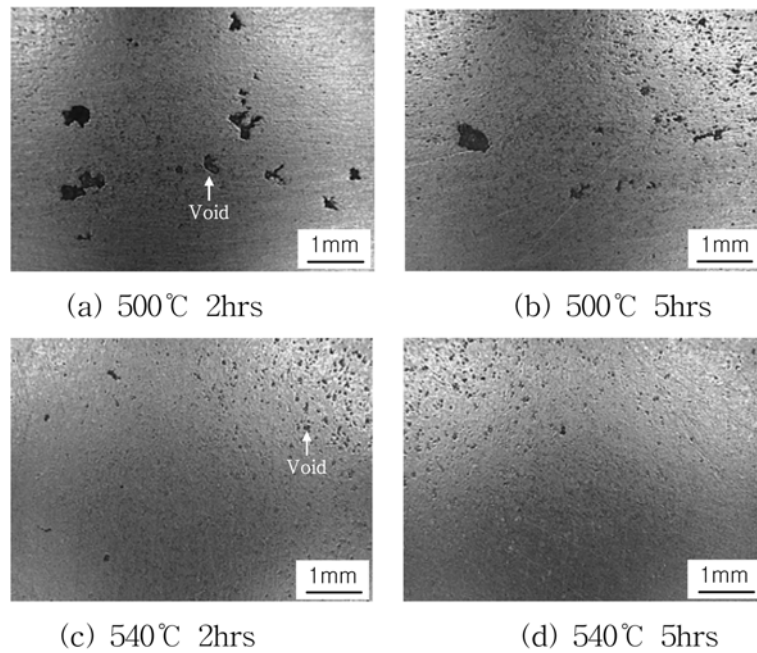


Fig. 8. Macrostructure of the solid state diffusion brazed specimen.

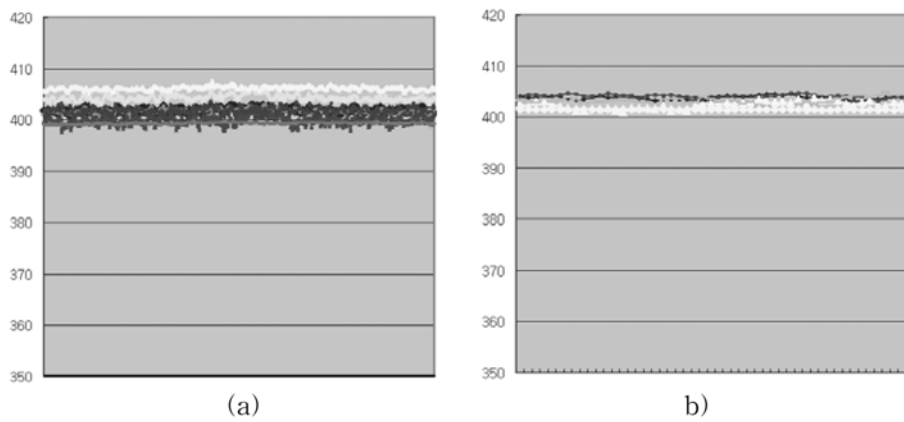


Fig. 9. Temperature uniformity of the fabricated aluminum heater; (a) cast heater and (b) diffusion brazed heater.

늄 주물재가 소성변형함으로써 주물재의 기공을 축소시키고 이로 인해 알루미늄 주물재의 열전도율을 증가시키는 것으로 생각된다. 또한 Al 6061합금은 시효경화형 합금으로 조직 내의 미세한 석출물은 포논(Phonon) 산란원으로 작용하여 고용체처리된 합금에 비해 낮은 열전도도를 가진다고 알려져 있다[7]. 따라서 접합 시 540°C의 열처리온도에서 석출상이 알루미늄 기지 내로 고용되어 T6 열처리된 모재보다 높은 열전도도를 나타낸 것으로 사료된다.

3.4 온도균일성

고상확산 접합한 알루미늄 히터의 온도 균일성을 측정하기 위하여 직경 300 mm의 알루미늄 주물히터를 제작한 후 상부에 Al 6061 합금을 고상확산 접합하였다. 주물형 히터 및 고상확산 접합된 각각의 히터를 이용하여 400°C의 온도로 가열시킨 후, 웨이퍼의 각 위치별 온도를 측정하여 온도편차를 구하였으며 Fig. 9에 결과를 나타내었다. 주물히터는 397.5°C~408.6°C의 온도분포를 보였으며 최대온도편

치는 11.1°C로 측정되었고, 접합된 알루미늄 히터의 경우 400.1°C~403.9°C의 온도분포를 보여 온도편차는 4°C로 측정되었다. 따라서 본 연구를 통하여 접합형 알루미늄 히터의 온도 균일도가 개선됨을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 반도체 공정에 사용되는 주물형 알루미늄 히터의 열전도율 및 온도 균일도를 개선하기 위하여 열처리 온도 및 시간에 따른 알루미늄 주물재인 Al AC4C 합금과 전신재인 Al 6061 합금의 고상확산 접합특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열처리 온도 및 시간이 증가함에 따라 접합강도가 증가하였으며 540°C × 5시간 및 5 MPa의 조건에서 123 MPa의 강도 및 23%의 연신율을 나타내었다.

2. XRD 분석결과 520°C 이하 온도에서 접합부에 존재하던 알루미늄 산화물이 540°C에서는 검출되지 않았다. 540°C 이상의 접합 온도에서 알루미늄 산화물이 분해되어 모재 속으로 확산되었으며, 이로 인하여 접합강도가 상승한 것으로 사료되었다.

3. 열처리 온도 및 시간이 증가함에 따라 Al AC4C / Al 6061 접합시편의 열전도율이 증가하였으며, 540°C × 5시간 및 5 MPa 조건에서의 열전도율이 모재인 Al 6061의 열전도율 보다 높은 206 W/

m · K이었다. 이는 접합부 내의 산화물의 분해, 모재의 기공 감소 및 석출상의 고용효과에 기인하였다고 판단되었다.

4. 히터의 온도 균일도를 측정한 결과 주물형 히터의 경우 11.1°C의 온도편차를 보였으며 접합형 히터의 경우 4°C의 온도편차를 보였으며, 고상확산 접합을 통한 열전도율 개선에 의해 알루미늄 히터의 온도편차를 줄이는 것이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 충북대학교 2007년도 학술연구지원사업에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. T. Osawa : *Welding Journal*, **74**(6) (1995) 206.
2. J. T. Niemaann and G. W. Wille : *Welding Journal*, **57**(10) (1978) 285.
3. R. S. Timsit and B. J. Janeway : *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **314** (1993) 215.
4. T. Osawa and I. Kawakatsu : *Jpn. Inst. Light Metals*, **29**(3) (1979) 102.
5. Mel M. Schwartz : *The Materials Information Society* (2003) 54.
6. D. P. Sekulic, P. K. Galenko, M. D. Krivilyov, L. Walker and F. Gao : *Int'l. J. of Heat and Mass Transfer*, **48** (2005) 2372.
7. 輕金屬學會 : “アルミニウムの組織と性質” (1991) 477.