

동-스테인리스강 브레이징 접합부의 계면 조직과 접합 강도에 관한 연구

박종혁* · 이우천** · 강춘식***

A Study on the Interfacial Structure and Shear Strength of Cu/Stainless Steel Brazed Joint

Jong Hyeok Park*, Woo Chun Lee** and Choon Sik Kang***

Key Words : brazing filler metal(브레이징 용가재), spreadability(퍼짐성), shear strength(전단강도),
interface layer(계면층), Joint clearance(접합부 틈새)

Abstract

In this experiment, to find optimum brazing conditions for Cu/Stainless Steel brazing using filler metals of Ag-Cu-Zn-Cd system, first of all spreading ratio was tested on 304stainless Steel and low carbon steel. And then shear test of brazed joint was executed. As the result of that, the shear strengths of brazed joints were the range of 60-90 MPa. Through microstructure analysis for brazed interface layer, We found as follows. Firstly interface layer increased as time increased. Secondly continuous layer of Ag-Cd compound was observed along the side of stainless steel. Also by means of EDS analysis for fracture surface, ductile fracture was occurred and precipitates on the fracture surface were found to include Cr, Mn, Si in Ag-rich phase.

1. 서 론

브레이징이란 “용점이 450℃ 이상이고 모재의 고상선보다 낮은 용가재(filler-metal)를 사용하여 적당한 온도에서 모재를 접합시키는 일련의 용접 공

정그룹¹⁾으로 정의한다. 브레이징기술은 낮은 접합 온도로 인해 모재의 열화, 변형이 적고 잔류 응력이 거의 남지 않으며 용접이 서로 다른 이종 금속-세라믹의 접합도 가능하게하고 용접(fusion welding)에 비해 미세 조직의 손상을 줄일 수 있고 복잡한 형상의 구조물에도 적용이 쉽다는 장점이 있다. 본 연구의

* 학생회원, 서울대학교 공과대학 금속공학과

** 정회원, 한국표준과학연구소 소재특성평가센터

*** 정회원, 서울대학교 공대 금속공학과

목적은 국내에서 식기류 등에 이용되고 있는 페라이트계의 430 스테인리스강과 Cu의 접합을 위하여 BAg 계의 특성을 지니고 동시에 BCuZn 계의 단점을 보완한 용가재를 얻기위함이다. 그래서 먼저 BCZC-A 계의 용가재와 Cd를 첨가하지않은 BCZA 계 용가재를 사용하여 저탄소강과 스테인리스강에서 퍼짐성시험을 행하여 적정 접합조건을 찾았다. 그 결과를 토대로 스테인리스강과 Cu를 접합시켜 전단강도를 측정하여 젖음성과 접합 강도와의 관계를 살펴 보았고 반응층의 계면 조직 관찰을 행하여 접합 강도와의 관계를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 모재, 용가재 및 플렉스

퍼짐성 시험과 브레이징 접합 실험을 위하여 스테인리스강은 Cr-Ni계의 304와 Cr계의 430을, 저탄소강은 SM15C, 동은 순동판을 사용하였다. 용가재는 미국 용접학회(A.W.S)에서 규정하고 있는 BAg계열의 경우 Ag의 함량이 30-90% 정도로 많이 포함되어있어 가격면에서 불리하고 BCuZn의 경우 Cu의 함량이 50-60% 정도로 포함되어있어 브레이징 온도가 높아지게 되고 증기압이 높은 Zn을 다량 포함하고있어 가스가 많이 발생하는 단점이 있다. 그래서 이번 실험에서는 BAg와 BCuZn의 중간적인 성분을 가지는 Ag는 10-20%, Cd는 0-15% 변화시킨 Ag-Cu-Zn-Cd계의 200 mesh이하의 입도를 가지는 powder를 사용하여 특성을 살펴보았다. 용가재의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다. 플렉스로는 봉사계에 불화물이 첨가된 분말 형태의 U25를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of filler metals
(Unit : Wt(%)

specimen	Ag	Cu	Zn	Cd	Si
BCZC-A10	10	40	40	10	-
BCZC-A15	15	43	30	12	-
BCZC-A18	18	39	28	15	-
BCZA20-Si	20	44	36	-	0.2

2.2 퍼짐성 시험

퍼짐성 시험은 JIS 3191에 따라 50X50X3t(mm)의

스테인리스강, 탄소강 판재를 #220 사포로 연마 한 후 아세톤으로 세척 하였으며 0.2g±0.01의 용가재를 초기 면적 70mm²되게 도포 시킨 후 플렉스를 위에 덮었다. 이 시편을 관상로에 넣어 Ar과 N₂ 분위기에서 상태도상의 용융점 부근인 750℃와 그 이상인 780,810℃에서 1분간 각각 유지시켜 퍼진 면적을 비교하였으며 아래식을 이용하여 온도 변화에 따른 퍼짐율(spreading ratio)을 측정하였다.

$$\text{wetting ratio} = s/s.$$

S : 용융후 용가재의 퍼진 면적

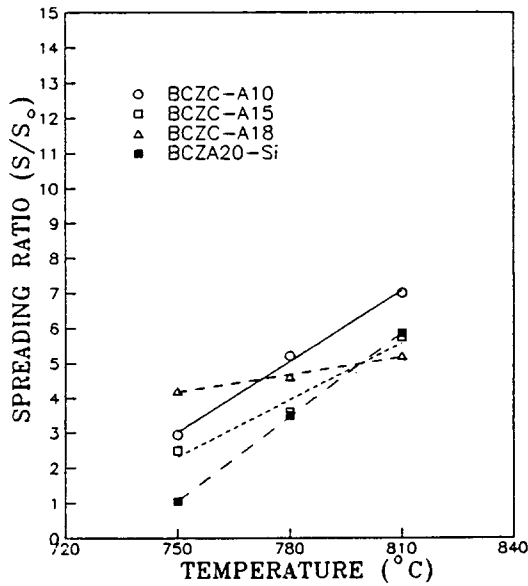
S. : 용융전 용가재의 퍼진 면적

2.3 조직 및 전단 시험편 제작

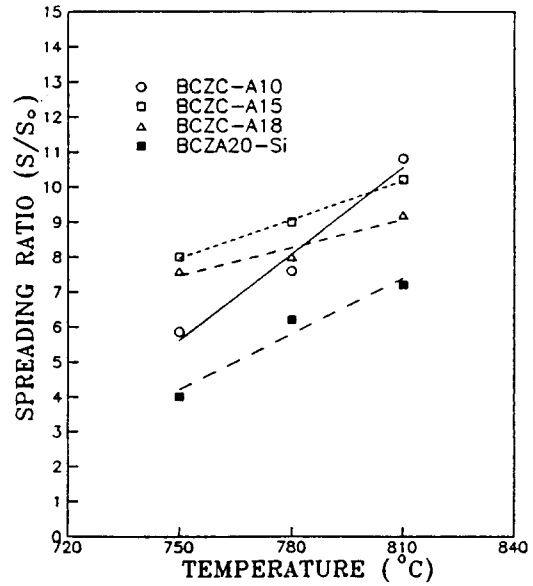
24X100X3t(mm) 크기의 304 스테인리스강, 430 스테인리스강과 Cu판재 표면을 #220사포로 한 방향으로 연마 한 후 아세톤으로 깨끗이 세척 한 후 건조시킨 지그(jig)에 고정시켜 접합부 틈새를 일정하게 하고 그위에 용가재와 플렉스를 올려 놓았다. 이때 접합부 틈새는 0.04-0.05mm를 유지 하였으며 포개진 부분은 전단 시험시 모재파단을 줄이기 위해 7mm를 하였다. 사용된 전단시험편의 종류는 AWS Single Lap Shear Test Specimen을 사용하였다. 시편을 지그와 함께 이미 브레이징 접합 온도에 도달한 관상로에 넣어 Ar 분위기에서 15-16분 후에 브레이징 접합 온도인 780℃, 810℃에 도달하도록 하였다. 이때 750℃는 퍼짐성 시험시 결과가 안 좋아 제외되었다. 시편이 브레이징 온도에 도달한 후 1,10,20,30분동안 유지시킨 후 500℃까지 노냉시키고 그후 공냉시켰다.

2.4 미세 조직 관찰

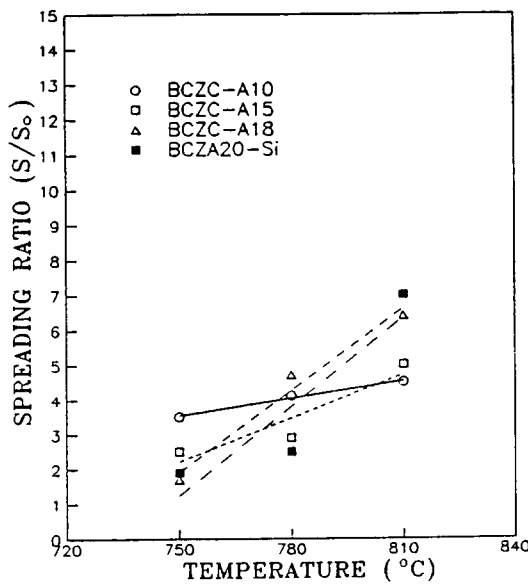
접합부의 계면조직 관찰을 위해 전단 시험편을 절단, 연마 과정을 거쳐 광학 현미경을 이용하여 응고 조직 및 계면층의 두께변화를 관찰하였으며, 이때 부식액은 FeCl 5g + HCl 50ml + H₂O 100ml의 혼합용액을 사용하였다. 계면반응층의 성분분석은 스테인리스강과 용가재 계면에 EPMA로 정성분석을 행하였으며, EDS (energy dispersive spectrometer)로 정량분석을 하였다. 전단시험편은 최대하중 2 ton중, crosshead speed는 20mm/min로 시험하였다.



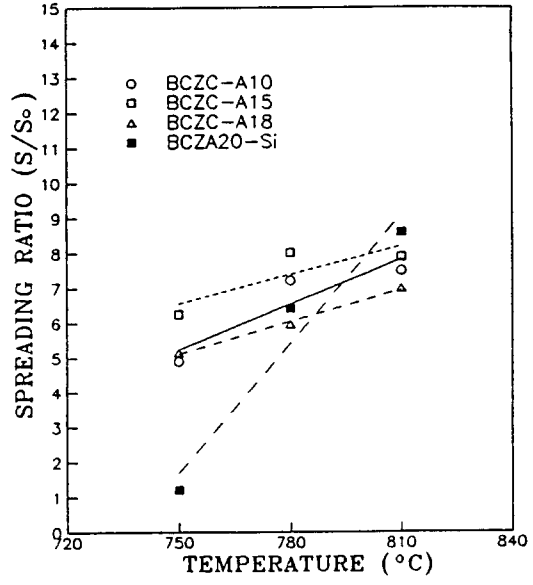
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1 Spreading ratio of filler metals at 750°C, 780°C, 810°C

- (a) mild steel, Ar atmosphere, 1 min
- (b) STS304, Ar atmosphere, 1 min
- (c) mild steel, N₂ atmosphere, 1 min
- (d) STS304, N₂ atmosphere, 1 min

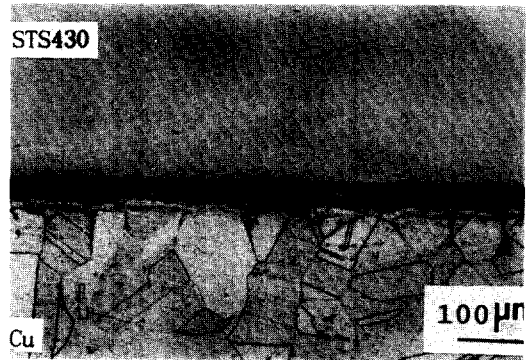
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용가재의 퍼짐성 (spreadability)

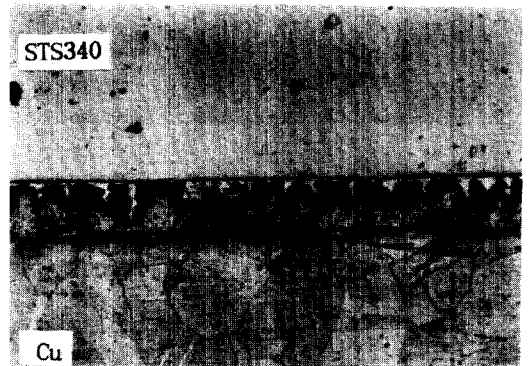
Fig.1를 보면 모든 시료에서 온도 증가에 따라 퍼짐율이 증가하였다. 이는 온도 증가에 따라 용가재의 유동성이 증가하기 때문이다. BCZA20-Si는 Ar, N₂ 분위기에 관계없이 750°C에서 가장 나쁜 퍼짐성을 나타냈는데 이는 Cd를 첨가하지 않고 상대적으로 Cu의 양이 증가하여 액상점 온도가 상승하기 때문이다. 이때 소량의 Si의 첨가는 퍼짐성을 증가시킬 수 있으나 0.1% 이상 첨가시 퍼짐성이 감소하는 것이 보고되어 있다.²⁾ Fig.1에서 (a),(b)와 (c),(d)를 비교해보면 Ar분위기에서 행한 용가재의 퍼짐성이 N₂분위기 보다 크게 나왔다. 이는 Ar분위기에서 Zn과 Cd에 증발 억제 효과가 크기 때문이다.³⁾ 또한 SM15C에 비해 304 스테인리스강의 퍼짐율이 전반적으로 크게 나왔다. 이는 주성분이 Cu인 용가재가 모재 입계 침투가 일어날때 어떤 종류의 강들은 그들의 조성 및 결정구조에 의해 침투에 커다란 저항성을 갖기 때문이다. 예를들면 Cu의 침투를 억제하는 강 능력은 침투시 얻어지는 dihedral angle의 측정을 통해 알 수 있다. 304 스테인리스는 Cu침투에 매우 약하며 일반탄소강은 304 스테인리스강보다 침투깊이가 1/3 이하이다.⁴⁾ Ag의 경우도 Cu와 비슷한 퍼짐성의 경향을 가지는데 탄소강에서는 주어진 온도에서 초기에는 빠른 Ag의 퍼짐이 일어나고 그 이후에 이차적인 느린 퍼짐이 발생한다. 즉 용융 Ag 브레이징 용가재의 일부가 모재의 표면을 따라 확산이 일어난 후 실제적인 용가재의 퍼짐이 발생한다는 보고⁵⁾가 있다. 이때 모재 입계 침투가 지나치게 되면 균열 발생의 위험이 있게 되나 이를 방지하기 위해 브레이징시간은 짧게 하여 그 영향을 최소화하였다.

3.2 미세 조직 관찰

Photo.1은 BCZA20-Si 용가재를 사용하여 430 스테인리스강과 Cu의 접합부 조직사진으로 시간의 증가에 따라 모재와 용가재층의 상호확산에 의해 확산층의 두께가 증가했다. 이때 스테인리스강과 용가재 사이의 균열은 발견되지 않았다. 균열의 발생은 전단강도의 저하와 연결된다. Photo.2는 주사 전자



(a) 1 min



(b) 20 min

Photo.1 Microstructure of STS430 and CU brazement brazed by BCZA20-Si at 810°C

현미경사진으로 계면 반응층의 유무와 계면층의 균열을 관찰하고 접합부위의 성분들의 분포를 조사하기 위하여 EPMA분석한 결과이다. 이 분석의 결과 스테인리스강 계면쪽으로 띠형태로 보이는 것이 Ag로 확인이 되어 Ag가 용가재의 성분에서 유동성을 좋게하는 성질 이외에 스테인리스강과 용가재 사이에 위치해 열팽창계수 차이에 의한 잔유응력을 줄인 것으로 보인다. Photo.2는 Cd가 첨가된 용가재를 사용한 경우로 Cd가 띠형태로 검출된 것으로 보아 Ag-Cd상이 형성된 것을 알 수 있었다. Photo.3은 BCZC-A15 용가재로 430스테인리스강과 Cu를 접합한 시편을 EDS로 정량 분석과 결과로 띠형태의 반응층은 EPMA의 결과와 마찬가지로 B부분은 68.99% Ag-21.15%Cd가 주성분이고 그외에 4% 정도의 Cu와 Zn이 검출되었다. D,E부분에서는 주로 Cu와 Zn이 검출되고 Ag가 일부 발견되었다. 이는 용가재의 성분이 용융 과정에서 분리되어 Ag-Cd과 Cu-Zn의

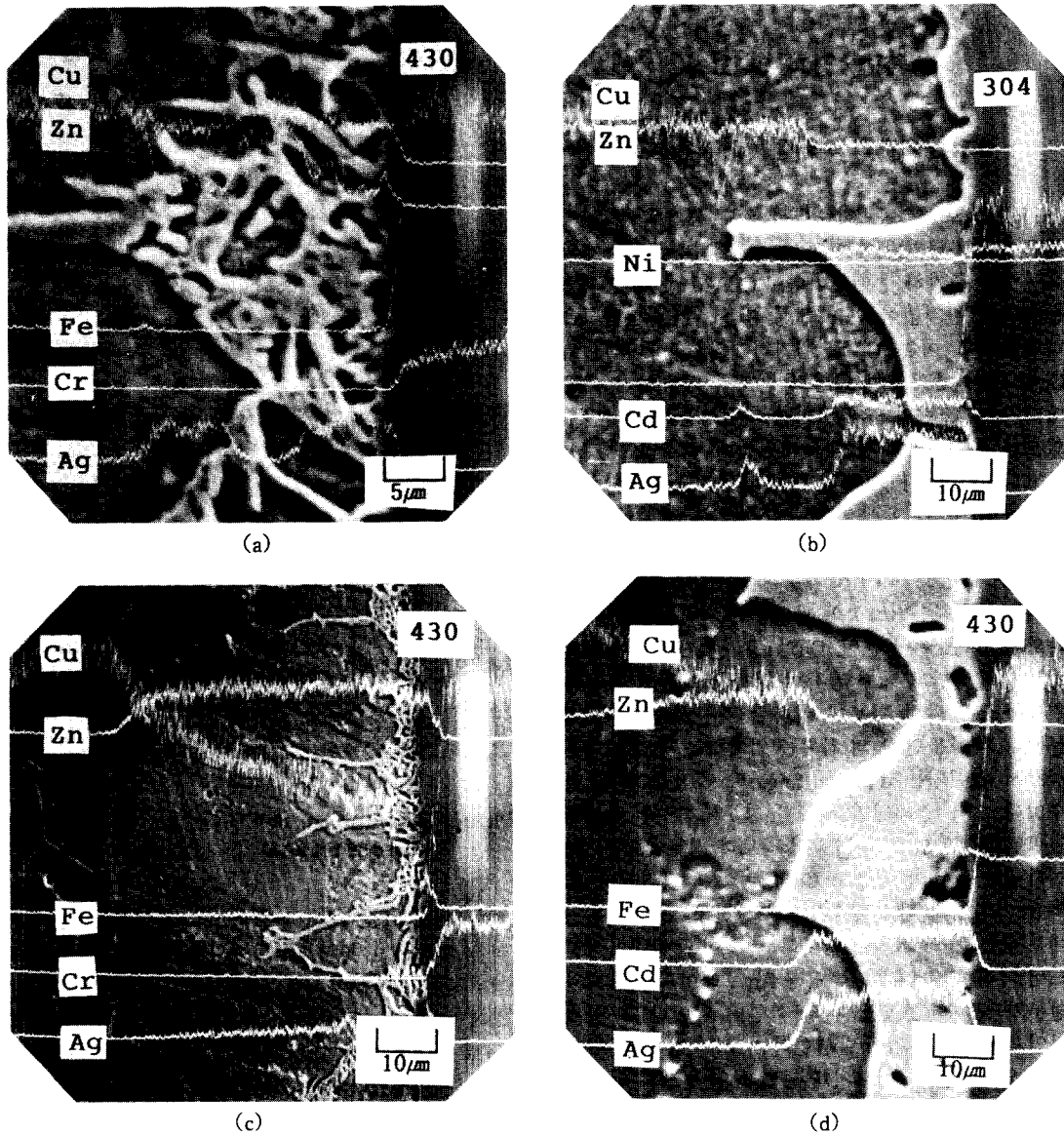
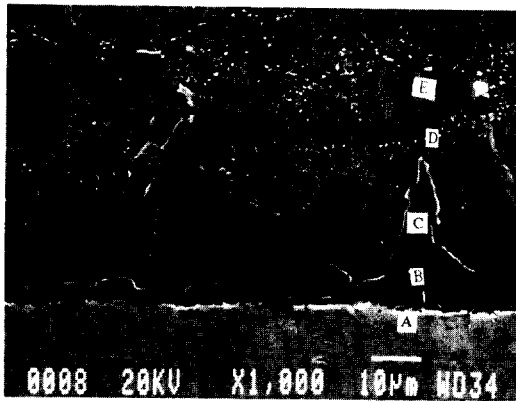


Photo.2 Microstructure and EPMA of the brazed joint

(a), (c) BCZA20-Si at 810°C/10min

(b) BCZC-A15 at 810°C/30min (d) BCZC-A18 at 780°C/10min



	Wt(%)						
	Fe	Cr	Ni	Cu	Zn	Ag	Cd
A	84.14	14.00	0.49	0.82	0.16	0.38	—
B	0.53	0.08	0.55	4.26	4.55	68.99	21.15
C	0.45	—	—	5.34	5.04	66.17	23.00
D	0.40	—	—	66.99	20.94	10.69	0.40
E	0.68	—	—	72.47	18.12	7.48	1.25

Photo.3 EDS analysis of interfacial layer(BCZC-A15, 780 °C/30min)

비균질 혼합물을 형성하기 때문이다. 한편 EDS분석을 통해 용가재가 스테인리스강 모재부로 확산된 것으로보아 반응층이 형성되었다. Photo.4는 BCZC-A15를 430 스테인리스강과 Cu를 접합시킨 시편의 파단면을 나타낸것으로 뚜렷한 연성파괴를 보였다. 이때 보이는 석출물은 Fig.2에 나타낸 바와 같이 Ag rich한 Cr과 Si를 포함한 상으로 석출물 주위 파단

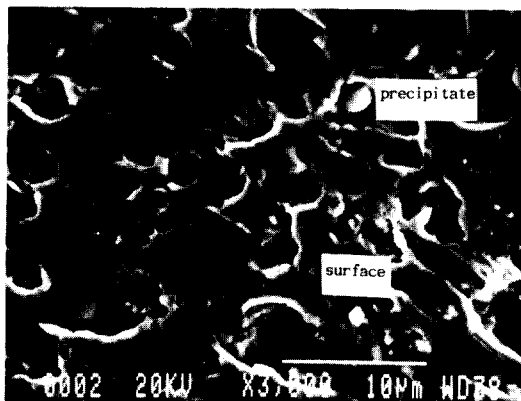


Photo.4 Fracture surface of brazement occurred along the filler metal (BCZC-A15)-STS430 at 810°C, 10 min

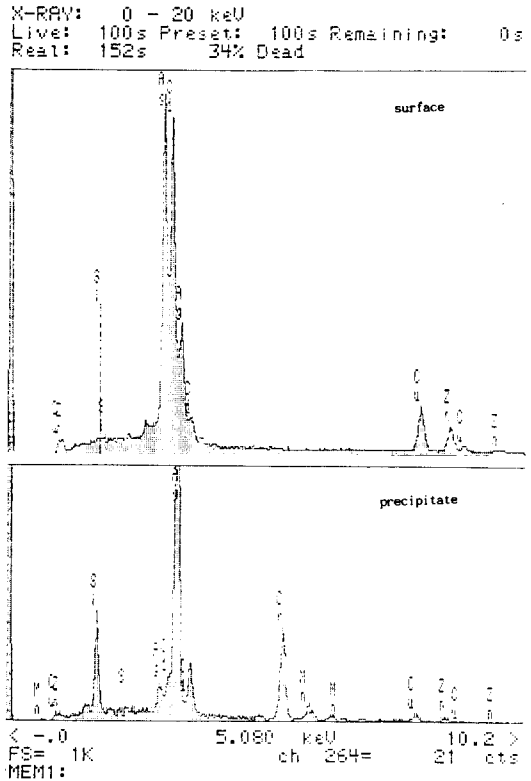
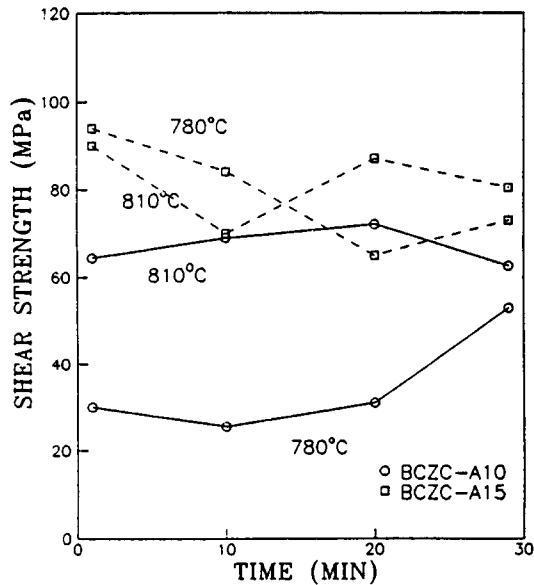


Fig. 2 EDS analysis of fracture surface and precipitate by filler metal (BCZC-A15) at 810, 10 min

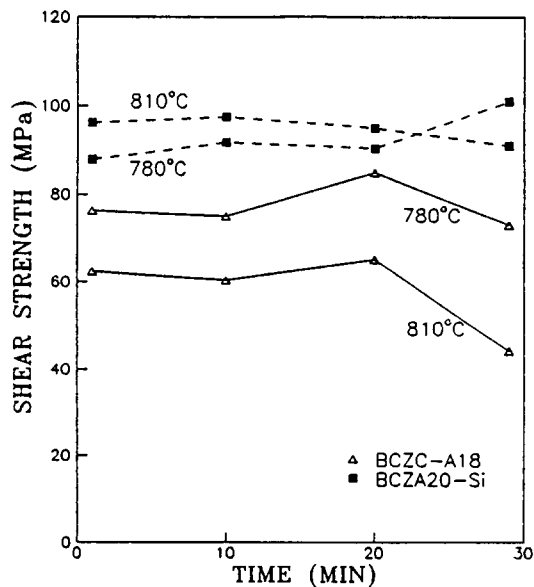
면의 EDS 분석과 비교해볼때 Cr, Si는 모재에서 용가재로 확산한것으로 보인다.

3.3 브레이징부의 전단 시험

Fig.3-(a)는 BCZC-A10과 BCZC-A15의 용가재를 사용하여 Cu와 430 스테인리스강을 접합시킨 시험편의 전단 강도를 나타낸 것으로 BCZC-A10의 경우 780°C에서는 20-60 MPa의 낮은 전단강도를 나타내나, 810°C에서는 60MPa이상의 값이 얻어졌으며 BCZC-A15의 경우 시간과 온도 증가에 따른 강도값의 변화는 적었다. 그 원인을 살펴보면 실온에서 Zn(39.7 micro-in/°C), Fe(11.7 micro-in/°C), Ag(19.7 micro-in/°C)의 열 팽창 계수를 가지게 되어 열 팽창의 차이가 큰 성분이 많이 포함되게되면 응고시 용가재의 내부균열 및 잔류응력으로 모재와



(a)



(b)

Fig. 3 Relation between shear strength and brazing time for pure Cu-ST5430 brazed joint at 780°C, 810°C

용가재사이의 균열 발생이 쉽게 된다.⁶⁾ 그래서 Ag

10%, Zn 40% 함유한 BCZC-A10 보다는 Ag 15%, Zn 30% 함유한 BCZC-A15 용가재가 두 모재의 열 팽창계수에 가까우므로 더 높은 강도가 얻어졌다. Fig. 3-(b)는 BCZC-A18과 BCZA20-Si를 사용한 용가재의 전단 강도값을 나타낸 것으로 BCZA20-Si 경우 전 범위에 걸쳐 90MPa 이상의 높은 강도가 얻어졌다. 이는 Ag의 첨가량이 20% 정도로 다량이고 Si는 Ag-Si 계에서 적은 임계 농도의 한계를 가지게 되므로 용가재 용융시 Si는 스테인리스강으로 이동하게 된다. 이때 계면에서 $Fe + Si = FeSi + 19200$ (cal)의 국부적인 반응열이 생기게 되어 확산을 촉진시켜 결합력을 증가시킨다. 그 결과 0.2% Si를 함유한 시편은 모든 파단이 Cu 모재에서 발생했지만 Si가 첨가되지 않은 용가재를 사용한 시편은 파단의 3/4이 모재와 용가재 계면에서 발생했다. 이번 실험을 통해 Si의 첨가가 강도 증가에 기여한다는 기존의 보고⁷⁾를 확인했다. 한편 Si는 0.1% Si 함량이 1% Zn 효과에 해당하고 Fe와의 반응열이 크므로 1% 이상 사용은 강도를 오히려 저하시킨다는 보고⁷⁾가 있으므로 첨가시 주의해야 한다. 확산층을 형성하기 위해서는 어느 정도 시간이 필요하며 그 시간이 너무 길면 확산층이 두꺼워져 응고시 열 팽창율의 차이에 의해 균열 발생이 쉬워진다. BCZA20-Si의 경우 Ag가 20% 함유되어 있고 Zn이 36% 함유되어 Zn의 첨가량이 커서 응고시 취약해질 것이나 조직 관찰을 통해 Ag가 스테인리스강과 Zn 사이에 위치하여 응고시 열 팽창계수의 차이를 완화시켜 줌으로써 높은 강도를 얻게 하였다. 용가재의 성분에서 Ag는 유동성을 좋게 하는 성질이 외에 취약한 계면 주위에서 연성을 유지하여 잔류응력을 줄여 줌으로써 균열의 발생을 억제하는 효과가 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

네가지 종류의 Ag-Cu-Cd계 용가재를 사용해 SM15C강 및 스테인리스강과 Cu를 접합시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도 증가에 따라 퍼짐성은 증가하였으며 Ar의 Cd, Zn 증발 억제 효과로 인해 Ar 분위기보다 N₂ 분위기보다, SM 15C강에 비해 304 스테인리스강이 우수한 퍼짐성을 나타내었다. 한편 브레이징 온도는 780°C 이상이 적합하였다.

2. 계면 반응층은 Cu-Zn상과 Ag-Cd상으로 분리되었다. 스테인리스강계면쪽에 띠 형태의 Ag-Cd상이 분포함으로써 응고시 열 팽창계수의 차이에 의한 잔류응력을 완화시켜 높은 강도를 얻었다.

3. 전단 강도의 값은 많은 시편들이 60-90MPa의 강도가 얻어졌으며, BCZA20-Si가 가장 높은 전단 강도 값을 나타냈다.

4. 파단면은 연성 파괴를 나타냈으며 석출물은 Ag rich한 Cr, Mn과 Si를 포함한 상이었다.

참 고 문 헌

1. AWS : Brazing manual, 3rd edition, 1976, AWS, p.1
2. G.M.Z.Blanc, J.Colbus, C.G.Keel : Brazing filler metals and alloys, welding J., Vol.40, 1961, p.138
3. P.C.S.Wu, T.J.O'Keefe, and F.Kisslinger : The inert gas effect on the rate of evaporation of zinc and cadmium, Metalurgical Trans.A, Vol.11A, 1980, p.123
4. W.F.Savage & E.F.Nippes : Intergranular attack of steel by molten copper, Welding J., Vol.57, 1978, p.9
5. T.A.Siewert, R.W.Heine, and M.G.Lagally : brazing alloy spreading on steel, Welding J., Vol.57, 1978, p.134
6. I.Kawakatsu & T.Osawa : Furnace brazing of steel with brass filler metal, Weldning J., Vol.56, 1977, p.56
7. J.Colbus C.G.Keel and G.M.Blanc : Note on the strength of brazed joint, Welding J., Vol.41, 1962, p.413