

동-스테인리스 강 브레이징 접합부의 계면 조직과 접합강도에 관한 연구(Ⅱ)

李愚天·姜春植*·鄭在弼**·李普榮**

한국표준과학연구원 소재특성평가센터

*서울대학교 공과대학

**한국기계연구원

A Study on Bonding Strength and Interfacial Structure of Copper-Stainless Steel Brazed Joint(Ⅱ)

Woo-Chun Lee, Choon-Sik Kang*, Jae-Pil Jung** and Bo-Young Lee*

Center for Materials Evaluation, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-606

*Department of Metallurgical Engineering, Seoul National University, 151-732

**Korea Institute of Machinery and Metals, Daejeon 305-606

초 록 Cu-P계, 4종의 Cu-P-Sn계 및 3종의 Cu-P-Sn-Ag계 용가재를 사용해 Ar분위기 하에서 1003 및 1033K로 1.2ks동안 노브레이징한 STS304, STS430 및 저탄소강과 동 접합체들을 전단시험 및 조직시험하였다. 계면에서의 미세조직은 세 종류 즉 첫째, 균열을 포함하는 반응층 둘째, 분산층 셋째, 균열을 포함하는 반응층과 분산층으로 분류된다. 분산층만이 존재할때 40-60MPa 이상의 상대적으로 높은 전단강도가 얻어지며, 동모재파단을 일으킨다. 이 반응층이 형성되었을 때는 반드시 균열이 형성되며, 낮은 전단강도를 나타내고 접합부파단을 일으킨다. 이 반응층은 Fe-P계 화합물이다. 이러한 미세조직 및 강도 경향은 용가재내 Sn의 존재 및 모재내 Ni(또한 Cr)의 존재 유무에 따라 변화한다.

ABSTRACT The microstructural and shear tests of STS304/, STS430/ and low-C steel/Cu joints brazed using Cu-P, Cu-P-Sn(four type) and Cu-P-Sn-Ag(three type) filler metals at 1003 and 1033K for 1.2ks in Ar atmosphere were performed. Interfacial microstructures were divided into three type ; first, reaction layer contained cracks second, dispersed layer without cracks third, dispersed layer and reaction layer contained cracks. The joints composed only of dispersed layer without cracks have the high shear strength of above 40-60 MPa and result in failure in copper base metal. Low shear strength and joint failure result from the formation of reaction layer which induced cracks. The reaction layer is a Fe-P compound. This tendency of microstructure and shear strength depends on the existence and/or nonexistence of Sn in filler metals as well as Ni (and Cr) in base metals.

1. 서 론

동과 동합금의 토오치 및 노브레이징용 용가재(filler metal)로는 일반적으로 BCuP 계열을 상용하고 있으나, 동 및 동합금에 철계 금속의 브레이징접합에는 접합부 계면에 취약한 인화철(Fe₃P 및 Fe₂P)이 형성¹⁾되므로 BCuP계를 사용하지 않고 BAg, BAu, BNi 및 BCu계에 용가재가 추천^{2,3)}되어 오고 있다. 그러

나, 이들 용가재는 고가의 Ag 및 Au가 다량 함유되어 있어 가격이 비싸거나, 용융범위가 높아 에너지적으로 불리하다. 따라서, BCuP계에 Sn등을 합금화시키거나⁴⁾ BAg계에 Ag함량을 크게 줄여⁵⁾ 그 대체재료로서의 가능성이 조사되어 왔다. 본고의 저자들에 의해 STS430 스테인리스 강을 대상으로 BCuP계에 Sn등을 합금화시킨 5종의 용가재에 대한 조사⁴⁾는 이미 이루어진 바 있다. 본 연구에서

는 모재를 STS430은 물론 STS304 및 저탄소강(SM15C)에까지 확대시켜 이미 오래전부터 상품화되어 있는 BCuP-1과 이 합금에 Sn과 P의 함량을 변화시킨 4종의 용가재 및 이들 Cu-P-Sn계(상품명: BCPT계)에 Ag를 소량 첨가시킨 3종의 용가재를 사용해서 브레이징하여 그 접합강도와 계면조직에 대해 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 모금속 및 용가재의 화학조성은 표 1 및 2에 나타난 바와 같다. 모금속은 Cr-Ni계의 304, Cr계의 430 스테인리스강, SM15C의 저탄소강 및 상업용 전기동을 사용하였고, 용가재는 BCuP계(상품명 BCP)와 이 BCuP계에 P함량은 5-7%, Sn함량은

Table 1. Chemical composition of base metal(wt%).

	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
STS304	0.08	19.3	8.6	2.0	1.0	0.045	0.030
STS430	0.12	17.2	-	1.0	1.0	0.040	0.030
SM15C	0.14	-	-	0.35	0.20	0.030	0.035

Table 2. Chemical composition of brazing alloy(wt%); powder type, -60/+200 mesh.

	P	Sn	Ni	Cu
BCP	7.0	-	-	Bal.
BCPT2	5.0	6.0	-	Bal.
BCPT3	5.0	8.0	-	Bal.
BCPTS	7.0	7.0	-	Bal.
BCPTN	7.0	7.0	2.0	Bal.

6-8%까지 변화시킨 -60/+200 mesh의 Cu-P-Sn계 합금분말(아주화금 제품) 및 이 Cu-P-Sn계 합금(BCPT 2)에 Ag를 2, 4 및 6wt% 첨가한 합금분말(각각의 상품명은 BCPT A2S, BCPT A4S 및 BCPT A6S)들을 사용하였다. 용제(flux)로는 봉사제에 불화물이 첨가된 분말형태의 것을 사용하였다. 접합부위는 사포 220번으로 일방향 연마한 후 아세톤에 깨끗이 세척하고, 알코올로 세척해 건조시킨 다음 그림 1과 같은 치구를 사용해서 접합부길이(lap length)를 10-11mm, 접합부간극(joint clearance)은 0.08-0.1mm를 유지하도록 고정시키고, lap joint의 한쪽 끝에 용가

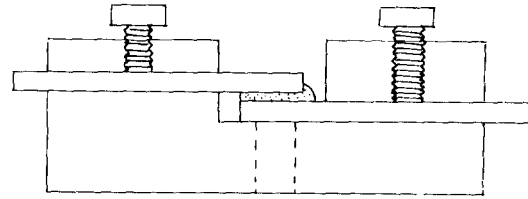
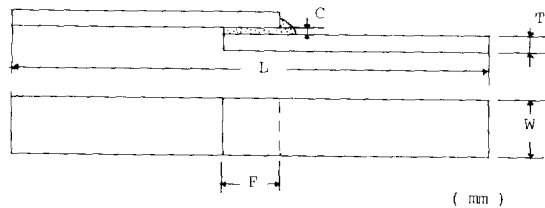


Fig. 1. Type of jig.

재와 용제 분말을 알코올에 개이 올려놓은 후 아르곤 분위기 하의 전열로에서 1003 및 1033K의 온도로 1.2Ks로 유지하여 접합하였다. 그림 2는 사용된 시편의 규격인 AWS Single Lap Shear Test Specimen을 나타낸다. 그림 3은 브레이징 과정을 나타낸다. 최종 접합된 전단시험편은 인장시험기의 grip축과 시편의 중심축과 일치하도록 한 후 최대하중 1-2ton, crosshead speed는 20mm/min로 전단시험을 하였다. 전단강도 값은 파괴전단하중



Symbol	Designation	Dimension
W	Width of test piece	24
L	Length of test piece	250
T	Thickness of test piece	3.0
C	Joint clearance	0.08 - 0.1
F	Lap length	10 - 11

Fig. 2. Type of shear test specimen; AWS single lap shear test specimen.

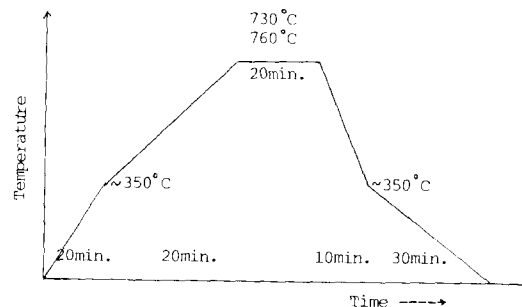


Fig. 3. Brazing temperature and time.

값을 접합부면적(lap area)로 나눈 값을 취하였다. 접합부의 조직 관찰은 광학 및 주사전자현미경을 이용하였고, 조성분석은 스테인리스강과 용가재 계면에 초점을 두어 EPMA 및 EDX를 이용해서 점 및 선분석을 통해 조성 및 정량분석을 하였다.

3. 실험결과 및 검토

3-1. 접합강도(전단강도)

그림 4는 BCP(이상 BCuP계로 명명)와 4종의 BCPT계 합금을 사용해서 1003K의 온도로 브레이징한 접합체의 전단강도를 나타낸 그림이다. BCuP계에 Sn첨가 유무에 관계없이 저탄소강/동 접합체는 약 10MPa 이하의 낮은 강도를 보이고 있다. 또한, BCuP를 사용해서 브레이징한 접합체들의 경우-STSS304/Cu 접합체의 경우가 STS430 및 SM15C 접합체의 경우보다 다소 전단강도값이 높다 하더라도-모두 약 20MPa 이하의 낮은 강도 값을 보이고 있다. 반면, 스테인리스강/동 접합체의 경우 Sn이 첨가된 BCPT계열로 접합한 경우 모두 약 40-50MPa의 상대적으로

증가된 값의 전단강도를 보였으며, 접합부 파단보다는 동 모재 파단 경향이 두드러지게 나타났다. 또한, STS304의 경우가 STS430의 경우보다 강도 값은 전반적으로 약간 높게 나타났다. 결국 용가재에는 BCuP계에 Sn의 존재가 그리고, 모재에는 Ni 및 Cr의 존재가 강도 증가 요인이라고 할 수 있다. 그림 5는 1033K에서의 전단강도시험 결과로서, 역시 저탄소강/동 접합체의 경우 BCuP계에 Sn첨가 유무에 관계없이 약 10MPa 이하의 낮은 강도를 나타내었으며, BCuP를 사용해서 브레이징한 접합체의 경우 1003K의 경우보다 모두 약간 증가된 강도 값을 보였으나, 약 33MPa 이하의 강도 값을 나타내었다. 또한 BCPT2 용가재를 사용했을 경우 STS304이던 STS430 접합체이던 약 65MPa의 가장 높은 강도 값을 보였으며 동 모재 파단을 나타내었고, 이 보다 Sn의 함량이 증가되거나 P함량이 증가된 용가재를 사용한 경우 강도 값은-전술한 약 60MPa보다-STSS304의 경우는 약 10-15MPa 정도 감소하는 반면 STS430의 경우는 약 40MPa 이상 급격히 감소하는 경향을 보였다. 결국 STS304에 존재하는 Ni는 브레이징 온도의 증가에 따른 강도열화현상을

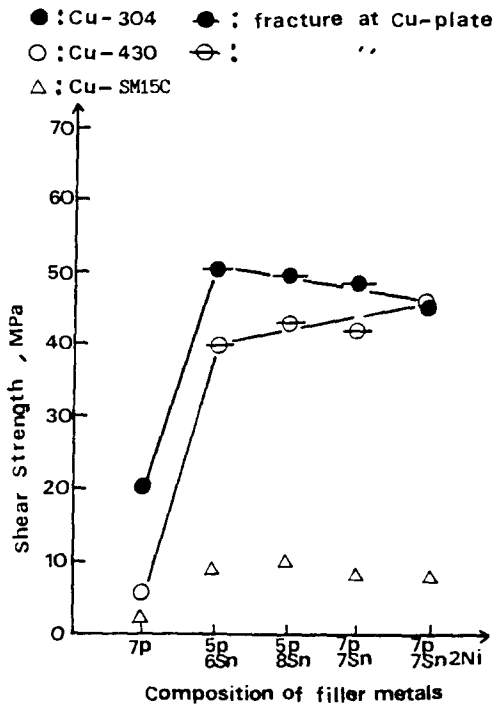


Fig. 4. Shear strength of copper/steel joints brazed with Cu-P-Sn filler metals at 1003K for 1.2Ks.

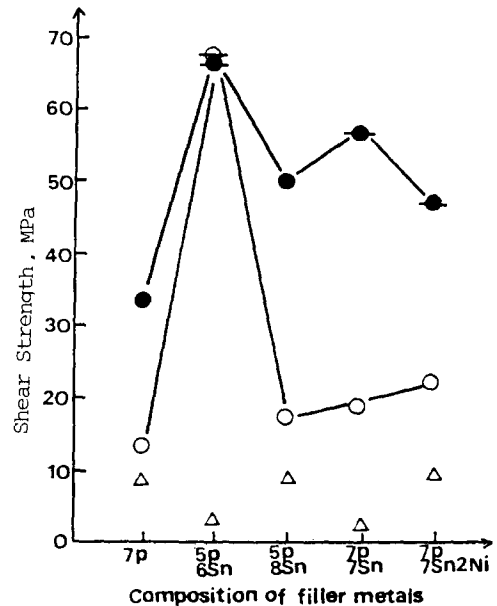


Fig. 5. Shear strength of copper/steel joints brazed with Cu-P-Sn filler metals at 1033K for 1.2ks.

감소시키는 효과가 있다고 할 수 있겠다. 그림 6 및 7은 BCPT계에 Ag를 2-6wt% 첨가한 3종의 합금을 사용해서 각각 1003 및 1033K의 온도로 브레이징한 각 접합체의 전

단강도 값을 도식한 것이다. 이들 용가재를 사용한 접합체의 전단강도 경향은 거의 BCPT계 합금을 사용한 경우와 유사하게 나타났다. 즉, BCPT계 합금에 Ag를 2-6wt% 첨가한 경우 BCPT계를 사용했을 경우에 비해 전단강도 값의 큰 변화는 일어나지 않으며, 강도에 대한 Ag첨가효과는 거의 없음을 알 수 있다.

3-2. 접합부의 미세조직

사진 1은 BCP, BCPT-2 및 BCPTN계 용가재를 사용해서 1003K로 브레이징한 STS304/Cu, STS430/Cu 및 SM15C/Cu 접합체의 접합부에 대한 광학현미경조직이다. 사진 1a)는 BCP(Cu-7%P)로 접합시킨 STS304/Cu의 조직으로 STS304와 Braze사이에 두께가 약 14 μm인 반응층(A로 표시)이 형성되어 있음을 알 수 있고, 이 반응층의 경계선을 따라 균열(B로 표시)이 형성되어 있음을 알 수 있다. d)는 STS430/Cu의 경우이며, 위와 같은 반응층은 형성되어 있지 않으며, 분산상(C로 표시)들이 존재하고 계면에 균열(B로 표시)이 존재함을 알 수 있다. g)는 SM15C/Cu의 경우로서, SM15C와 Braze사이에 A와 같은 반응층이 존재하고, SM15C와 반응층 사이에 B와 같은 커다란 균열이 형성되어 있음을 알 수 있다. 반응층은 EDX분석에 의하면 67.8Fe, 26.0P, 6.0Cu, 0.2Sn(at%)으로 구성된 Fe와 P를 다량 함유하는 Fe-P계 화합물(Fe₂P 또는 Fe₃P)로서, 이 화합물의 본질적인 취약성과 모재와의 비부피(specific volume)차이로 인해 유발된 내부응력이 균열을 생성시키는 것¹⁾으로 판단된다. 사진 1b)는 BCPT2로 접합한 STS304/Cu접합체의 조직으로 반응층은 없어지고 계면부위에 분산층(영역 D로 표시)이 존재하며, 이때 균열은 형성되지 않는다는 것을 알 수 있다. e)의 STS430/Cu 시편도 b)의 경우와 유사한 경향을 보이며, BCPT3, BCPTS 및 BCPTN으로 브레이징한 STS304/Cu 및 STS430/Cu 접합체의 경우 유사한 경향을 보였다[BCPTS에 의한 STS304/Cu의 경우는 사진 1의 c), BCPTN에 의한 STS430/Cu는 f)에 나타냄]. 그러나 h)의 SM15C/Cu의 경우는 g)의 경우와 거의 유사하게 반응층과 균열이 함께 형성되어 있음을 알 수 있다.

사진 2는 1033K일 경우의 광학현미경 조직

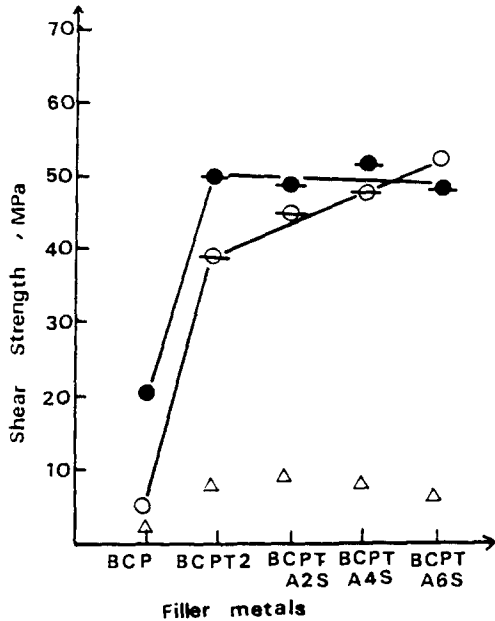


Fig. 6. Shear strength of copper/steel joints brazed with Cu-P-Sn-Ag filler metals at 1003K for 1.2ks.

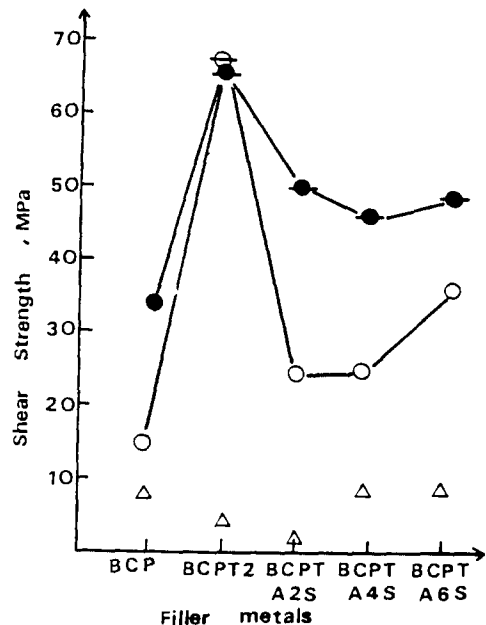


Fig. 6. Shear strength of copper/steel joints brazed with Cu-P-Sn-Ag filler metals at 1033K for 1.2ks.

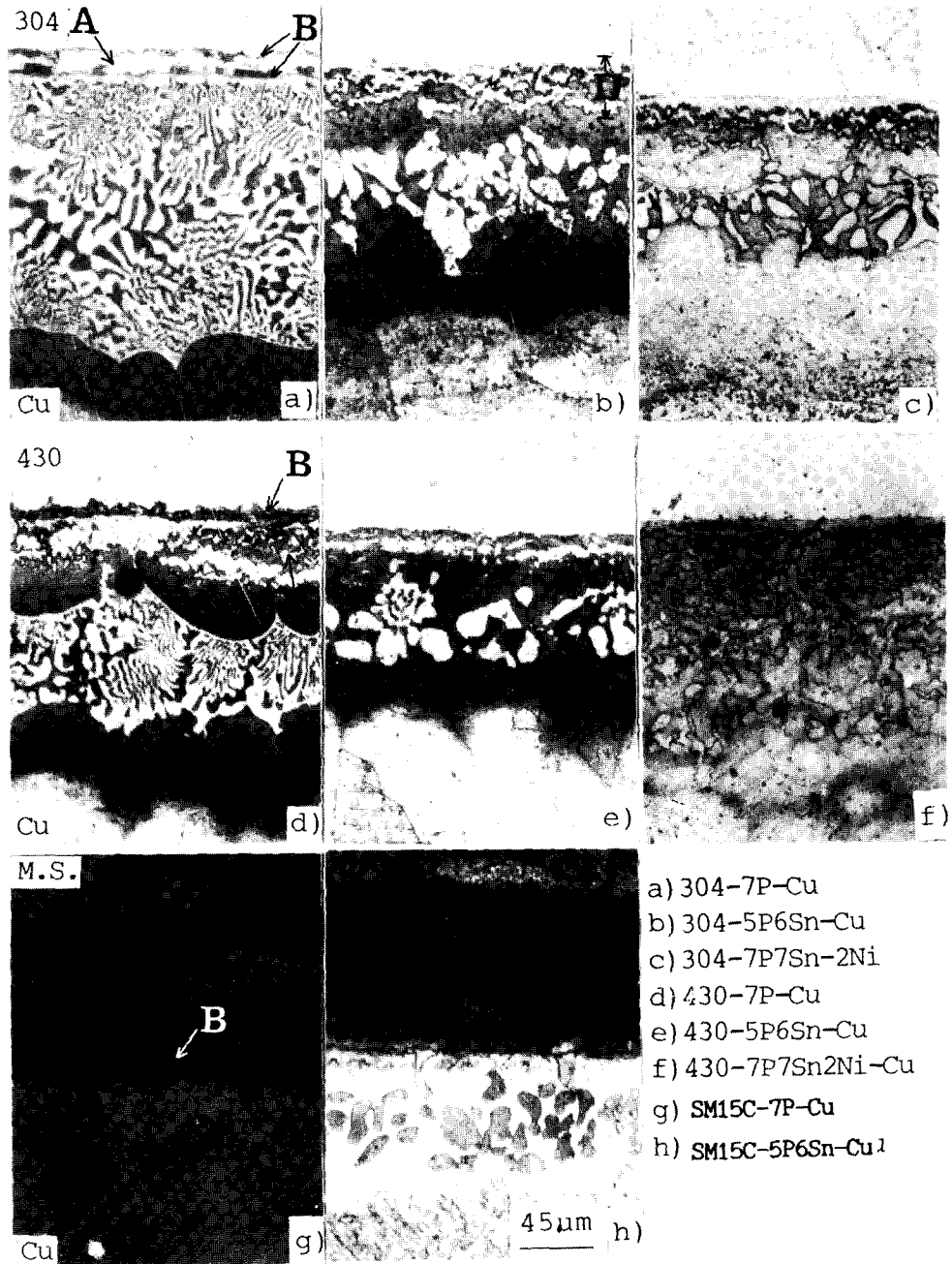


Photo 1. Optical microstructure of brazement for the joints brazed with Cu-P and Cu-P-Sn filler metals at 1003K for 1.2ks.

이며, 역시 BCP계로 접합한 경우는 스테인리스강 및 저탄소강과 Braze 사이에 반응층(사진 a) d)와 g)의 A로 표시] 또는 반응층과 분산상[사진 d)의 D로 표시]이 균열(B로 표시)과 함께 형성되어 있음을 알 수 있다. BCPT2로 접합한 SM15C/Cu[사진 h)],

STS304/Cu[사진 b)] 및 STS430/Cu[사진 e)] 접합체와 BCPTN으로 접합한 STS304/Cu 접합체[사진 c)]의 경우는 균열의 존재없이 분산상만이 형성되어 있다. 그러나, BCPTN[사진 f)] 및 BCPT[사진 i)]로 접합한 STS430/Cu 접합체의 경우는 분산층(D로

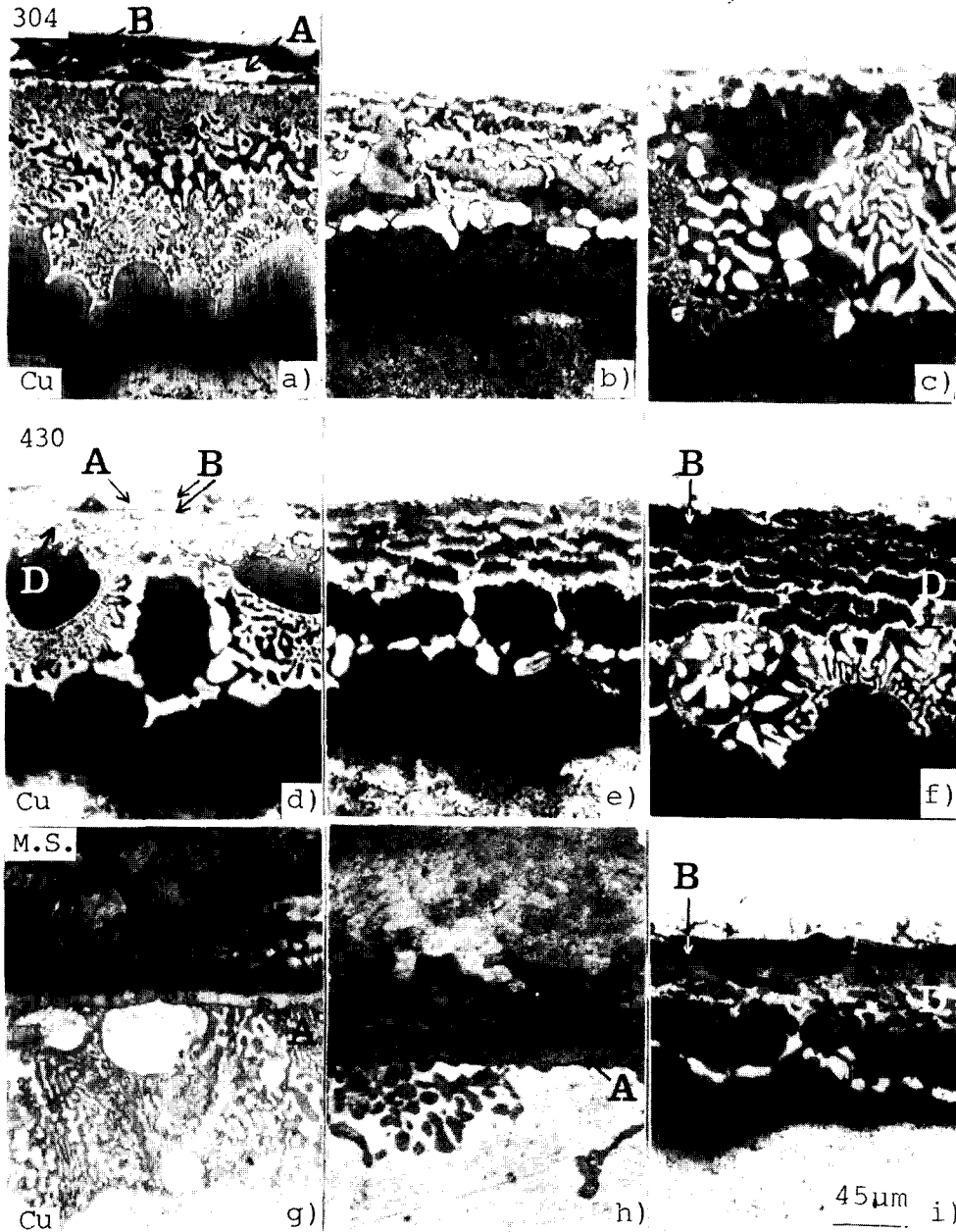


Photo 2. Optical microstructure of brazement for the joints brazed with Cu-P and Cu-P-Sn filler metals at 1033K for 1.2ks.

표시)과 함께 커다란 균열층(B로 표시)이 관찰되었다. 대개 분산층만이 존재할때 균열은 존재하지 않는데 이 경우는 후에 언급하겠지만 균열부위에 원래 반응층이 존재해 있었음을 암시해 준다.

결론적으로 철계 금속과 동을 Cu-P 및 Cu-P-Sn계 용가재로 브레이징할 경우 철계 금

속과 Braze사이의 미세조직은 첫째, 반응층과 균열이 형성되는 경우 둘째, 반응층 및 분산상과 함께 균열이 형성되는 경우 셋째, 균열의 존재없이 분산상만이 존재하는 경우로 분류되며, 균열의 존재없이 분산상만이 존재하는 세번째의 경우 접합체의 전단강도는 상대적으로 높게 얻어지고, 전단시험 후 파괴는

동 모재파단을 일으키는 경향이 현저해진다. 이러한 계면에서의 미세조직 경향은 그림 4 및 5의 전단강도 경향과 일치함을 알 수 있다. 즉 첫째, Sn이 첨가되지 않은 Cu-P용가재로 브레이징한 경우 모재의 종류에 무관하게 모두 반응층과 균열이 계면에 존재하고, 전단강도는 상대적으로 매우 낮은 10MPa를 보이며 접합부파단을 일으킨다. 둘째, 반면 Sn이 첨가된 Cu-P-Sn계 용가재로 스테인리스강을 브레이징한 경우 반응층과 균열은 없어지고 분산층이 나타나며, 전단강도는 40~50MPa 이상으로 높게 얻어지고 동 모재파단을 일으킨다. 그러나, 이 경우도 $P > 5\text{wt}\%$, $\text{Sn} > 6\text{wt}\%$ 이상인 Cu-P-Sn계 용가재로 고온부(1033K)에서 STS430을 브레이징할 경우 반응층과 균열이 분산층과 함께 나타나며, 다시 전단강도는 급격히 감소하고 접합부파단을

보인다. 셋째, 저탄소강 접합체의 경우는 Sn이 첨가된 Cu-P-Sn계 용가재를 사용했다고 하더라도 분산층은 관찰되지 않으며 반응층과 균열만이 관찰되고, 전단강도는 매우 낮은 10MPa이하 값을 보이며 접합부파단을 나타낸다. 즉, 용가재에는 BCP계에 Sn의 첨가가 또한 모재에는 Ni(또한 Cr)의 존재가 전술한 균열 및 반응층을 억제하고 분산층을 형성시키는 주 요인일 수 있으며, 이것이 접합체의 강도증가 요인일 수 있다. 또한, 여기에 나타내지는 않았으나 이러한 조직적(및 전단강) 경향은 BCPT계에 Ag를 첨가한 경우의 미세조직은 거의 BCPT계의 경우와 유사하다.

전술한 미세조직의 분류를 단적으로 나타내는 조직이 사진 3이며, a)와 c)의 경우는 분산상[B로 표시]만이 존재하는 경우로서 균열은 관찰되지 않으며, b) 및 d)의 경우는 조직

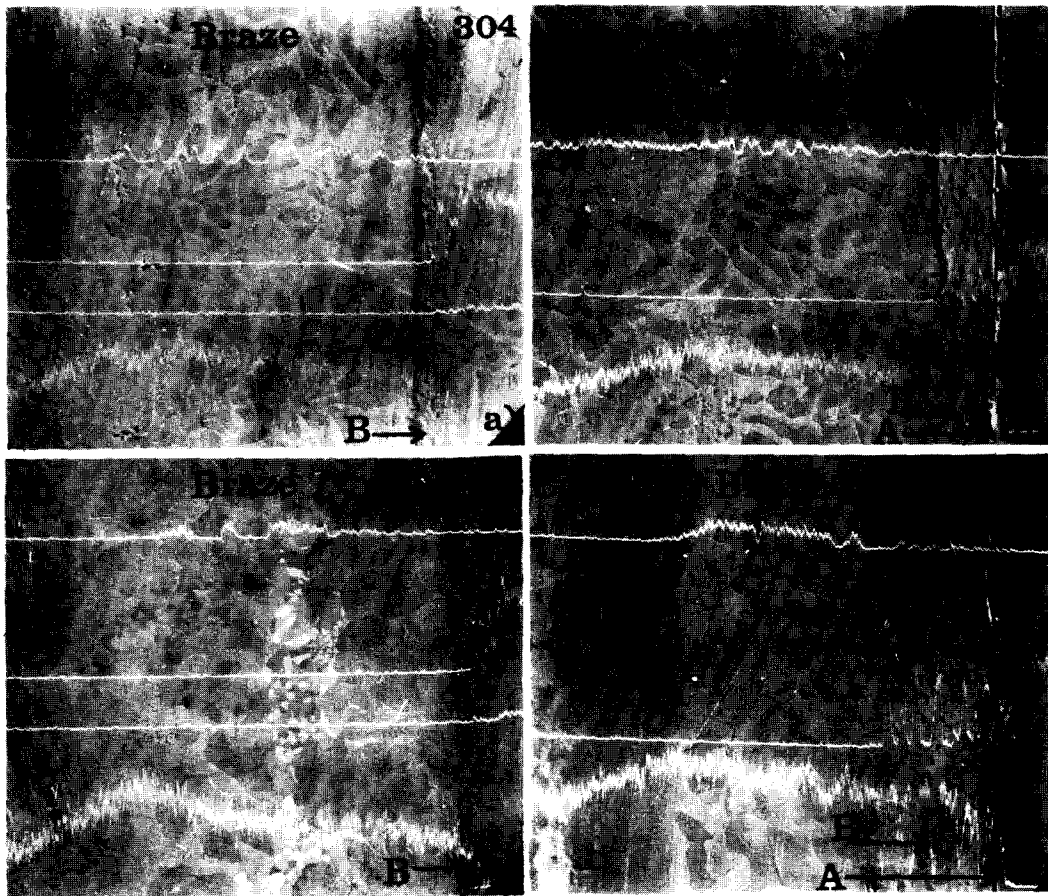


Photo. 3. SE micrographs of brazement for the joints brazed with (a, b) Cu-7P-6Sn and (c, d) BCPT A4S filler metals at 1033K for 1.2ks.

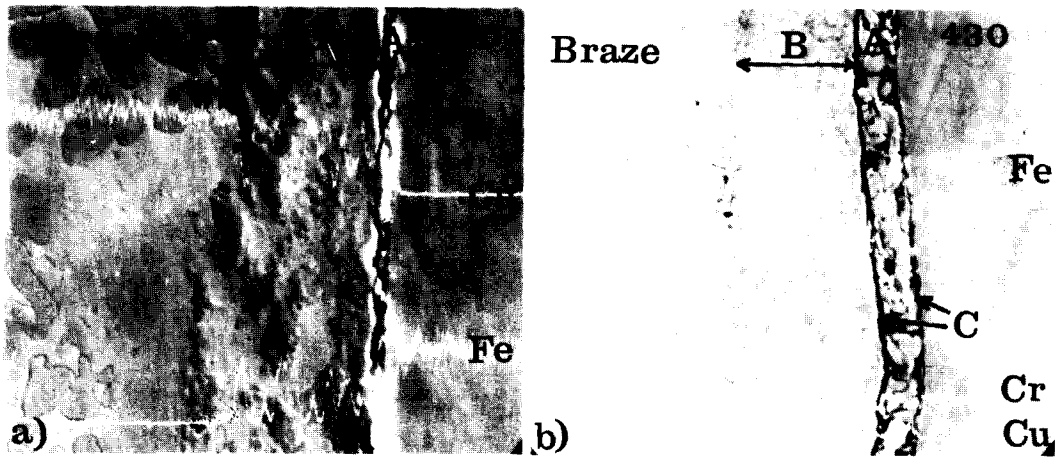


Photo 4. EPMA line profile and SE micrographs of brazement for the joints brazed with (a) Cu-7P-6Sn and (c, d) BCPT A2S filler metals at 1033K for 1.2ks.

상으로는 분산상만이 관찰되나 균열(A로 표시)이 형성되어 있는 것으로 보아 분산상과 STS430모재 사이에 반응층의 존재를 시사해 준다. 이는 사진 4를 통해서도 단적으로 알 수 있다. STS430과 Braze사이에 분산상[B로 표시]과 두께가 다른 반응층[A로 표시] 및 이 반응층과의 경계선에 균열[C로 표시]의 존재를 확인할 수 있다. 즉, 분산상과 스테인리스강 사이에 막 형태의 반응층이 존재할 때 이 막을 통해 또한 막의 경계를 통해 균열이 일어날 수 있음을 나타낸다. 결국 철계 금속과 동을 Cu-P 및 Cu-P-Sn계 용가재로 브레이징할 때 접합부(brazement)의 계면조직의 특징을 도식화하면 그림 8 a)와 같고, 각 상에 대한 EPMA선분석 결과를 나타낸 것이 b)이다. 모재가 저탄소강일 경우 접합부(brazement)의 조직은 균열(D)을 내포하는 반응층(A)과 Cu-rich phase로 구성되며, STS304의 경우는 분산층 (B)와 Cu-rich phase, STS430의 경우는 반응층(A)과 분산층(B)이 균열(D)과 함께 존재하는 구조를 갖는다. 여기서 균열을 유도하는 층은 반응층 (A)으로서 전술한 낮은 전단강도를 나타내는 접합체의 경우 모두 이러한 반응층의 형성에 따른 균열의 존재 때문임을 알 수 있다.

1033K에서 브레이징한 STS430/Cu 접합체에 대해 이러한 각 계면상(그림 8의 반응층, 분산상 및 주변조직)에 대한 EDX점분석 결과를 도식화한 것이 그림 9이다. 분산상과 주

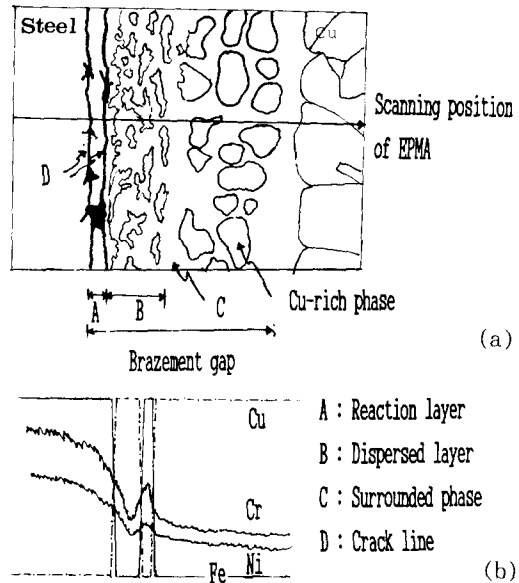


Fig. 8. Schematic representation of brazement microstructure for copper/steel joint brazed with Cu-P, Cu-P-Sn and Cu-P-Sn-Ag filler metals.

변조직의 경우 용가재에 따라 비교 가능한 특징없이 대체로 유사한 원소분포를 보이나, 반응층(BCPT2의 경우는 계면에 최인접해 있는 층에 대한 분석 결과임)의 경우 BCPT2용가재를 사용한 경우 Cu의 양이 약 56at%이고, Fe의 양이 약 23at%인데 비해 BCuP 및 BCPT3, BCPTS 및 BCPTN 용가재를 사용한 경우 Cu는 19-21at%, Fe는 47-55at%로

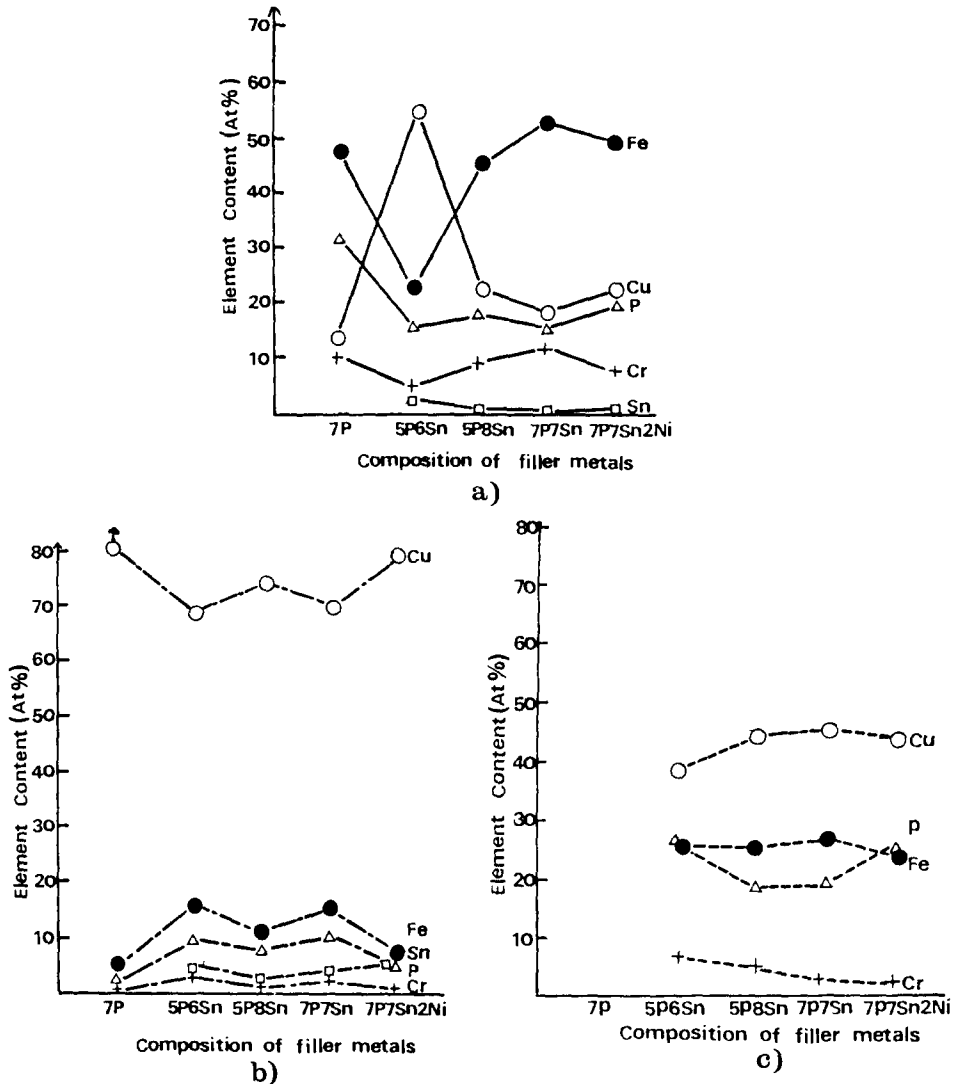


Fig. 9. Distribution of elements at the interface between STS430 and braze analysed by EDX for the joint brazed at 1033K for 1.2ks; (a) reaction layer, (b) dispersed layer and (c) surrounded phase.

구성된 반대 양상을 나타내고 있다. 즉, 계면에 최인접해서 균열과 함께 존재해 있는 반응층은 Fe함량이 증가된 형태의 Fe-P계 화합물임을 알 수 있으며, 균열이 없는 최인접 계면층은 Fe함량이 매우 감소되고 Cu함량이 현저히 증가된 형태를 보이며, 이때 전단강도가 높게 얻어지고 동 모재파단을 일으킨다는 것을 알 수 있다. 즉, 반응층내에 Fe함량이 상대적으로 많은 BCuP 및 BCPT3, BCPTS 및 BCPTN 용가재를 사용해 접합한 STS430/Cu

접합체의 경우의 반응층과 균열의 존재 및 낮은 전단강도 양상은 이미 전술한 광학현미경 조직(사진 2) 및 전단강도 결과(그림 5)에서 언급한 바 있다.

4. 결 론

Cu-P계, 4종의 Cu-P-Sn계 및 3종의 Cu-P-Sn-Ag계 용가재를 사용해 Ar분위기 하에서 1003 및 1033K로 1.2ks 동안 노브레이징한 스테인리스 강 및 저탄소강과 동 접합체를 전

단시험 및 조직시험 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 실험영역 내에서 Cu-P 및 Cu-P-Sn 계 용가재로는 저탄소강과 동을 접합시킬 수 없다. 이는 저탄소강과 용가재의 계면에 취약한 피상의 계면층(반응층)이 형성되어 계면분리를 일으키기 때문이다. 이 상은 Fe와 P의 비율이 1003K에서는 75.1 : 15.9(at%로 67.8 : 26.2)이고, 1033K에서는 64.9 : 35.1(at%로 57.6 : 31.2)인 Fe-P계 화합물이다.

2) 본 실험영역 내에서 Cu-P-Sn계 용가재로는 STS304와 동을 접합시킬 수 있다. STS304의 경우 Sn이 첨가된 용가재를 사용해 브레이징 할 경우 피상의 계면층이 없어지며 오히려 계면에 분산층이 형성된다. 이러한 분산층만이 형성될 때 계면분리가 없어지고 강도를 나타내고 동 모재과단을 보였다. 이 분산층의 구성물질은 at%로 46.4Fe, 11.5Cr, 19.6P, 14.2Cu, 4.8Ni 및 0.7Sn으로 나타났다.

3) STS430의 경우도 Sn을 첨가한 용가재를 사용한 경우 분산층만을 형성하는 경향을

보이나, 1033K에서는 분산층과 계면층이 균열과 함께 존재한다. 즉, 이러한 계면균열의 형성을 초래하는 취약한 피상의 계면층이 형성되는 1033K에서는 $P > 5\text{wt}\%$, $\text{Sn} > 6\text{wt}\%$ 함유하는 용가재로는 접합시킬 수 없다.

감사의 글

본 연구가 이루어지도록 물질·심적 지원을 아끼지 않으신 아주화금 김연 사장님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Boughton, J. D. and Sloboda, M. H. : Welding and Metal Fabrication, 335 (1970)
2. AWS : Brazing Manual, 3rd ed., (1976)
3. AWS : Welding, Brazing and Soldering, Metals H/B, Vol.6, 9th (1987)
4. 정재필, 이보영, 이우천, 강춘식 : 대한용접학회지, 3, 36 (1989)
5. 박종혁, 이우천, 강춘식 : 대한용접학회지, 4 (1993) 발행중