

BNi-2계 삽입금속에 의한 SUS304 스테인리스강 접합체의 강도와 조직에 미치는 브레이징 온도의 영향 : Ni기 삽입금속에 의한 브레이징 접합성의 기초적 검토(II)

이용원[†] · 김종훈^{*}

[†]ASE Korea Inc., Packaging Engineering

^{*}한국생산기술연구원 환경·에너지본부 신재생에너지팀

Influence of Brazing Temperature on Strength and Structure of SUS304 Stainless Steel Brazed System with BNi-2 Filler Metal : Fundamental Study on Brazeability with Ni-Based Filler Metal(II)

Yong-Won Lee[†] and Jong-Hoon Kim^{*}

[†]Packaging Engineering, ASE Korea Inc., Paju, Korea

^{*}Environmental Energy Division, Korea Institute of Industrial Technology, Chonan, Korea

(2007년 3월 3일 받음, 2007년 3월 19일 최종수정본 받음)

Abstract A plate heat exchanger (PHE) normally uses vacuum brazing technology for connecting plates and fins. However, the reliability of high temperature brazing, especially with nickel-based filler metals containing boron, the formation of brittle intermetallic compounds (IMCs) in brazed joints is of major concern, since they considerably degrade the mechanical properties. This research was examined the vacuum brazing of commercially SUS304 stainless steel with BNi-2 (Ni-Cr-B-Si) filler metal, and discussed to determine the influence of brazing temperatures on the microstructure and mechanical strength of brazed joints. In the metallographic analysis, it is observed that considerable large area of Cr-B intermetallic compound phases at the brazing layer and the brazing tensile strength is related to removal of this brittle phase greatly. The mechanical properties of brazing layer could be stabilized through increasing the brazing temperature over 100°C more than melting temperature of filler metals, and diffusing enough the brittle intermetallic compound formed in the brazing layer to the base metal.

Key words Vacuum brazing, BNi-2 filler metal, intermetallic compound, brazing temperature, brazing tensile strength.

1. 서 론

오늘날 과학기술 및 공업기술의 발달과 더불어 제품의 제조과정에서 브레이징 기술은 기초적 생산기술로서 필요 불가결한 접합기술로 이용되고 있다. 최근의 브레이징 기술의 응용으로 식품산업뿐 아니라 화학공업, 발전 설비, 일반공업 등 거의 모든 산업분야에 걸쳐 다양하고 광범위하게 적용되고 있는 판형열교환기(plate heat exchanger)가 있다.¹⁾ 판형열교환기는 얇은 판들로 구성되어 있는데 각각의 판과 판 사이에 유로가 형성되어있고 이 유로를 통해 가열유체와 피가열유체가 서로 교대

로 흐르게 되는데, 그 제작에 있어서 각각의 열 판과 기기 몸체의 실링기술이 상당히 중요하며 수밀, 기밀, 내식성 등이 요구된다. 진공 브레이징(vacuum brazing) 기술은 판형열교환기의 모든 이음부위를 gasket을 사용하지 않고도 유로 사이의 밀봉이 아주 확실하며, 열판관경 주위나 각 패턴의 교차점에도 접합이 이루어지기 때문에 기계적 강도 또한 아주 우수한 특성을 지닌다.²⁾ 한편, 판형열교환기의 제작에 있어서 구조체의 재료로는 표면이 수려하고 내식성, 내열성, 강성이 뛰어난 오스테나이트 계열의 스테인리스강이 적당하고, 그 스테인리스강의 브레이징에는 고온강도, 내산화성, 내식성이 우수하며 색상도 스테인리스강과 아주 흡사한 Ni기 삽입금속이 최적이라고 알려져 있다.^{3,4)}

본 연구에서는 Ni기 삽입금속에 의한 스테인리스강의

[†]Corresponding author

E-Mail : yongwonlee@asekr.com (Y. - W. Lee)

진공브레이징 기술개발에서 그 기초연구로서 브레이징 인장강도와 브레이징 공정온도와의 상호관계를 고찰하였다. 또한 접합 계면에서의 미세조직 및 금속간 화합물을 분석하여 그 생성과정을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용한 브레이징 시험편은 직경 10 mm의 SUS304 스테인리스강 환봉이며, 그 화학조성 및 모재 인장강도를 Table 1에 나타내었다. 브레이징 시험편은 직경 10 mm의 환봉을 고속 커터기에서 50 mm 길이로 커팅한 후 접합면을 220 mesh 연마지로 표면 연마한 후 (R_{max} 4.4 μ m), 아세톤 용액에서 3분 동안 초음파 세정하였다.

브레이징 삽입금속은 Ni기 합금에서 AWS규격의 BNi-2계 합금(TB-902, Tokyo Braze Co.)을 사용하였고, 그 삽입금속의 화학조성 및 용융온도를 Table 2에 나타내었다.⁵⁾ Ni기 삽입금속의 용융점이 높기 때문에 삽입금속에는 용점강하를 목적으로 B성분이 3.0 wt% 가량 함유되어 있는 두께 30 μ m의 아몰퍼스 삽입금속이다.

브레이징 시험편은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 특수 제작된 그래파이트 지그에서 양 접합 시편 사이에 삽입금속을 장착한 후 맞대기 이음방식으로 체결하였다. 이때 접합 가압력은 지그에 장착된 세라믹 스프링에 의해 0.8 MPa이 주어지도록 설계되어있다.

Fig. 2는 본 연구에 사용한 고진공 브레이징 장비(high-vacuum brazing furnace, Qualiflow Nara Tech Co.)의 외관 사진을 나타낸 것이다. 브레이징 공정은 1×10^{-4} Torr 이상의 고진공 분위기 하에서 각각의 브레이징 피크온도에서 30분 동안 가열하였다.

브레이징 시험편의 기계적 성능평가는 인장시험에 의해 평가하였고 사용한 인장시험편의 형상은 Fig. 3(b)와 같다. 인장시험은 KS B0802에 나타난 금속재료 시험법에 따라 수행하였고 각 조건별로 얻어진 5개 데이터에 대한 그 평균치를 인장강도 값으로 나타내었다. 접합 계면에서의 조직관찰은 광학현미경(optical microscope)과 주사전자현미경(scanning electron microscope)을 사용하였

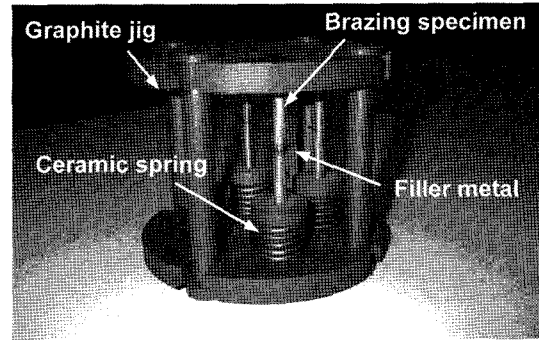


Fig.1. Graphite jig for specimen assembly and vacuum brazing.

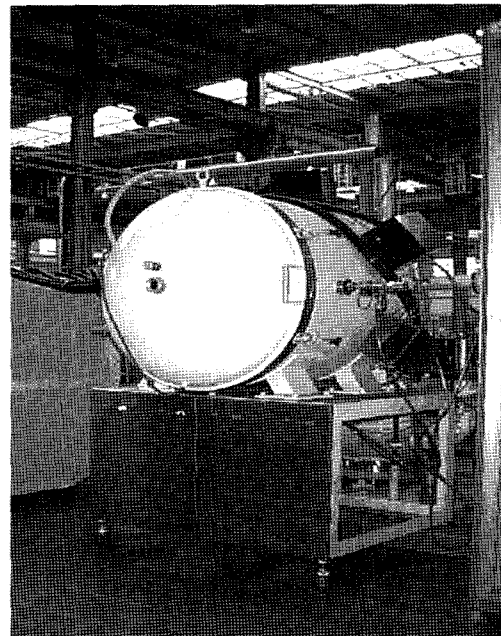


Fig. 2. A general view of the high vacuum brazing furnace.

고, 계면반응 생성물에 대한 원소의 분석은 주사전자현미경에 장치된 파장 분산형 X선 분광기(wave dispersive x-ray spectrometer)를 사용하여 정성분석 하였다. 조직관찰을 위한 에칭용액은 HCl 15 ml + HNO₃ 5 ml의 혼합용액이 사용되었다.

Table 1. Chemical compositions and tensile strength of base metal used

SUS304	Composition(wt-%)				Tensile Strength (MPa)	
	C	Cr	Ni	Fe	As received	After annealing(1050°C)
	0.08	18	8	Bal.	869	611

Table 2. Chemical compositions, melting temperature and brazing temperature range of filler metal used

BNi2 (AWS)	Chemical Composition, wt%						Solidus, °C	Liquidus, °C	Brazing Temperature Range, °C
	Ni	Cr	B	Si	Fe	C			
	Bal.	7.0	3.0	4.5	3.0	0.05			

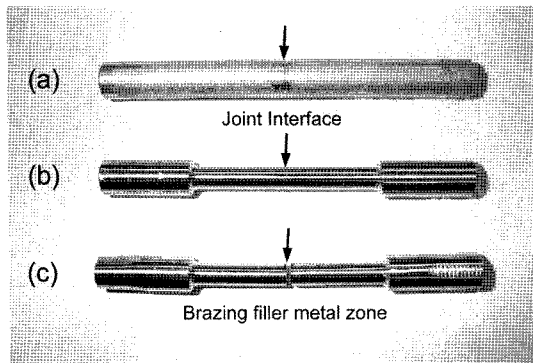


Fig. 3. Photographs of test specimen. (a) joint made by vacuum brazing, (b) tensile test specimen, and (c) after tensile test (fracture occurred in brazing filler metal zone).

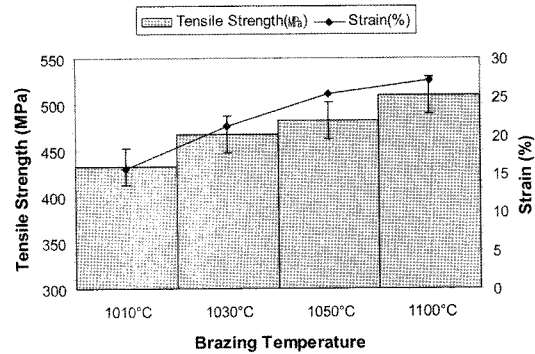


Fig. 4. Influence of brazing temperature on tensile strength at the SUS304 brazed joints with BNi-2 filler metal. The brazing condition was 1010–1100°C for 30 min. at 0.8 MPa.

3. 결과 및 고찰

3.1 브레이징 접합체의 인장강도평가

브레이징 온도가 인장강도에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 4는 SUS304/BNi-2 접합체의 인장강도와 브레이징 온도와의 관계를 나타낸 것이다. 본 실험에서 인장시험편의 파괴는 모두 브레이징층(삽입금속층)에서 일어났다. 브레이징 인장강도는 1010°C 온도에서 약 432 MPa로서 최저가 나타났으며, 전체적인 경향은 삽입금속의 용점 부근에서부터 브레이징 온도가 상승하는 것에 따라서 인장강도가 증가하였다. 최고 인장강도는 1100°C 온도에서 나타났으며 이때 인장강도는 약 510 MPa이다. 이것은 모재의 59%, 열처리재의 84%에 각각 해당하는 인장강도이다.

전자현미경(SEM) 조직상의 대표적인 브레이징 시험편의 파괴 형태를 Fig. 5에서 (a), (b)에 각각 나타내었다. 최저 인장강도가 얻어진 (a) 1010°C 온도의 파괴조직 형태는 미시적으로 소성변형 없이 파괴되어 삽입금속층에서 분리가 된 것으로 보여지며 전형적인 취성파괴 형태를 보인다. Hisamory의 연구보고에 따르면 삽입금속에서의 용점저하성분이 모재와 반응하여 입계층에서 취약한 화합물을 생성시켜 이것이 파괴의 기점이 되어 취성파괴가 일어난다고 하였다.⁶⁾ 본 연구에서도 이 같은 이유로 인장파괴가 모두 브레이징층(삽입금속층)의 입계층에서 취성파괴 형태로 일어난 것이라고 생각한다. 한편, 최고 인장강도가 나타난 (b) 1100°C 온도에서는 파괴 조직 내 dimple이 생성된 것으로 보아 접합층에 연성이 풍부하여 파괴 시 상당한 소성변형이 일어나 이 때문에 최고 인장강도가 나타났다고 판단된다.

3.2 브레이징 접합체의 미세조직 특성

브레이징 온도에 대한 SUS304/BNi-2 접합체의 브레이징 단면조직 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 광학 조직상에서, (a) 1010°C, (b) 1030°C, (c) 1050°C 온도의 브레

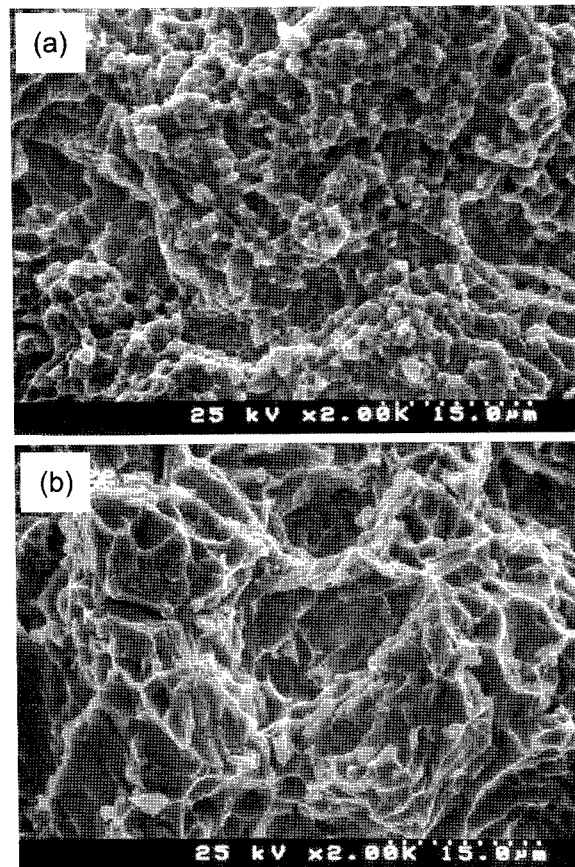


Fig. 5. SEM micrographs of fracture surfaces after tensile test showing the influence of brazing temperature in SUS304 brazed joints with BNi-2 filler metal. (a) 1010°C and (b) 1100°C.

이징 층 조직에서 검은 생성 화합물이 관찰되며 모재 양측으로는 용융 삽입금속의 일부원소가 확산되어 입계 생성물들이 형성된 것이 관찰된다. 미세조직에서의 전체적인 경향은 브레이징 온도가 상승하는 것에 따라서 조직

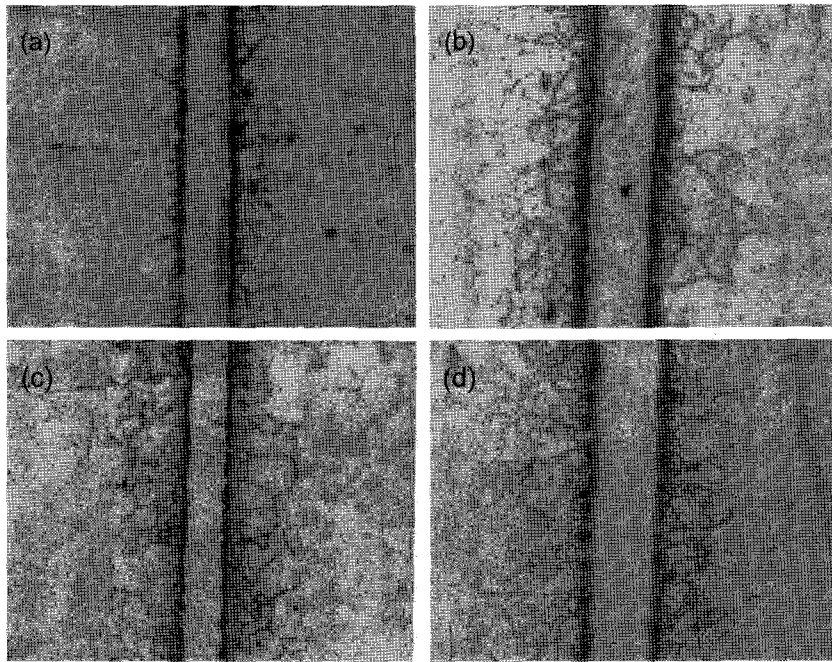


Fig. 6. Microstructure showing the influence of brazing temperature in SUS304 stainless steel brazed joint with BNi-2 filler metal. All 100X magnification. (a) 1010°C, (b) 1030°C, (c) 1050°C, and (d) 1100°C.

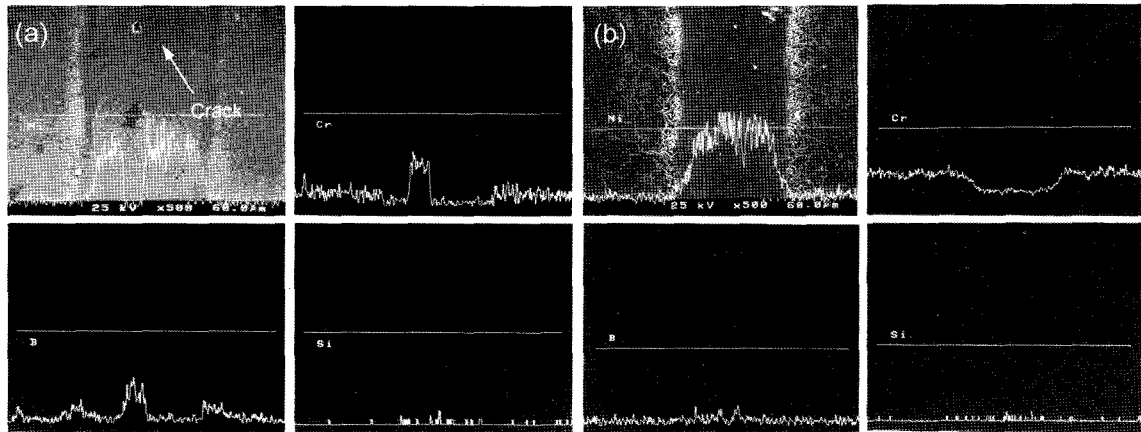


Fig. 7. The result of SEM/WDX analysis showing the influence of brazing temperature in SUS304 brazed joints with BNi-2 filler metal. (a) 1010°C and (b) 1100°C.

내 검은 생성 화합물의 크기는 작아졌으며 모재 입계 생성물은 더욱 성장되었다. 한편, (d) 1100°C 온도의 경우 검은 생성물들이 관찰되지 않았으며 조직 내에서 완전히 소멸된 것으로 추측된다.

접합기구를 규명하기 위하여 대표 시험편에 대한 전자현미경(SEM)과 파장분산형 X선 분광기(WDX)의 분석결과를 Fig. 7의 (a), (b)에 각각 나타내었다. 전자현미경(SEM) 조직상을 관찰하면, 1010°C 온도에서의 브레이징층 두께는 약 80 μm 정도로 매우 두꺼우며 조직 내 검은 생성 화합물의 길이는 약 25 μm 으로 최대크기가 나

타났다. 또 (Fig. 7a) 접합부에는 미세한 고온균열이 관찰되었는데 그 위치 및 발생형태는 브레이징층 중심부에 생성된 검은 화합물을 기점으로 종 방향으로 길게 나타나 있다. 대표적인 성분(Ni, Cr, B, Si)에 대해 파장분산형 X선분광기(WDX)를 사용하여 정성 분석한 결과, 조직 내 생성된 검은 화합물에서 Cr성분과 B성분이 높게 검출되는 것으로 보아 생성 화합물에 Cr, B성분들이 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 모재 양측의 입계 생성물에서도 삼입금속의 용점 저하성분 B가 아주 낮게 검출되었는데 이것은 B성분의 확산진행에 의한 것으로 생

각한다. 한편, 1100°C 온도에서는 브레이징 층 두께가 35 μm 정도로 대폭 감소되어있고 (Fig. 7b) 브레이징 조직의 검은 생성 화합물은 더 이상 관찰되지 않았다. 또 브레이징 조직은 매우 안정적인 공정조직 형태를 보이고 있으며 결정립은 미세화 되어있다.

브레이징 조직의 검은 생성 화합물에 대해 이하에 고찰하였다. 검은 생성 화합물은 이상의 분석결과를 바탕으로 삽입금속의 용점저하성분과 모재의 상호반응에 의해 생성된 Cr-B의 금속간 화합물인 것으로 판명되었다. 현재까지 보고된 연구문헌에 의하면 이 같은 생성 화합물은 경도가 높아 상당히 취약하기 때문에 브레이징 접합부의 기계적 성질을 떨어뜨리고 외부 하중이 작용하게 될 때 파괴의 원인이 되는 것으로 알려져 있다.^{6,12)} 본 연구에서는 삽입금속의 용점에 아주 가까운 온도인 1010°C에서 Cr-B의 금속간 화합물이 최대 크기로 생성되었는데, 이때 브레이징 인장강도는 최저가 되었으며 취성파괴가 나타났다. 또한, 고온균열이 발생된 것으로 보아 접합부가 상당히 불안정한 상태인 것으로 추측되는데 이것은 취약한 생성 화합물이 브레이징 조직 내에서 균열을 급속히 촉진시킨다는 Lugscheider 등의 연구보고와도 일치하는 결과이다.¹¹⁾ 한편, 브레이징 온도가 상승하는 것에 따라서 모재와 용융 삽입금속의 충분한 상호 반응에 의하여 모재 결정립이 빠르게 성장되고 더욱 미세해졌으며, 생성 화합물은 모재로 확산 진행하여 삽입금속의 용점에서 약 100°C 높은 1100°C 온도에서 완전히 사라지게 되면서 등온응고 반응을 완료하였다. 또한, 삽입금속의 용점저하 성분들이 액상에서 모재중에 모두 확산됨에 따라서 접합부가 균질화 처리되고 취약한 생성 화합물들이 브레이징 조직에서 완전히 소멸되었기 때문에 연성 dimple 파괴가 일어나 높은 브레이징 인장강도가 얻어진 것으로 판단된다.

이상으로 Cr-B 금속간 화합물의 생성이 브레이징 인장강도에 크게 영향을 미치는 것을 알았다. 일반적으로 취약한 생성 화합물의 크기가 커질수록 인장강도 및 접합신뢰성은 더욱 저하된다고 생각한다.^{6,7)} 따라서 브레이징 조직내 발생하는 이 같은 취약한 화합물의 생성을 억제하거나 소멸시키는 것이 브레이징 공정에서 아주 중요하다고 생각하는데, 그 개선책으로서 최대한 브레이징 두께를 얇게 가져가는 것으로 하여 브레이징 균질화 시간은 최대한 단축시키고 브레이징 온도는 삽입금속의 용점에서 최소 100°C 이상에서 진행하는 것이 고온균열의 위

험성을 배제할 수 있고 확산에 의한 균질화 처리로 인하여 높은 강도를 얻을 수 있으므로 고온 브레이징 부품의 수명을 연장시킬 수 있다고 판단된다.

3. 결 론

BNi-2(Ni-Cr-B-Si)계 삽입금속을 사용한 스테인리스강의 진공 브레이징은 접합 계면에 반응층이 형성됨으로써 이루어지며 브레이징 인장강도는 브레이징 온도가 상승할수록 증가한다. 브레이징 조직 내에서의 취약한 Cr-B 금속간 화합물의 생성 크기가 인장강도에 크게 영향을 미치었으며 일반적으로 화합물의 크기가 작을수록 높은 브레이징 인장 강도가 얻어진다. 본 연구에서는 취약한 Cr-B의 금속간 화합물이 삽입금속의 용점에 가까운 브레이징 온도인 1010°C에서 최대 크기로 나타났으며, 1100°C 브레이징 온도에서 완전하게 소멸되었다. 따라서 높은 브레이징 강도 및 접합 신뢰성을 얻기 위해서는 브레이징 온도를 삽입금속의 용점에서 최소 100°C 이상 높게 설정하여 접합부를 균질화 시키고 취약해진 조직을 연성으로 바꾸는 것이 중요하다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. T. Takemoto, J of Japan Welding Society, **61(4)**, 67 (1992).
2. H. S. Ryu, Transaction of the KSME, **35(9)**, 794 (1995)
3. M. D. Bellware, Welding J, **37**, 683 (1958).
4. A. Rabinkin, E. Wenski and A. Ribaud, Welding J, **77(2)**, 66 (1998).
5. Brazing Manual, Third Edition, AWS Committee on Brazing and Soldering, American Welding Society, 45 (1975).
6. Y. Hisamory, J. of Japan Welding Society, **10(2)**, 3 (1992).
7. Y. Hisamory, H. Nishiura and K. Machida, Transactions of JSME-Series A, **56(523)**, 85 (1990).
8. I. Kawakatsu, T. Osawa and H. Saito, J of Inst. of Metals, **43(11)**, 1001 (1979).
9. T. Watanabe, K. Ohhara, A. Yanagisawa and S. Konuma, J of Japan Welding Society, **13(3)**, 404 (1995).
10. T. Onzawa, A. Suzumura and Y. Murata, J of Japan Welding Society, **4(1)**, 187 (1986).
11. E. Lugscheider, K. Klohn and R. Lison, Welding J, **59(10)**, 296 (1979).
12. E. Lugscheider and K. D. Partz, Welding J, **62(6)**, 160 (1983).