

Turning Vane Bolt의 이종재(STS316L/IN X-750) 마찰용접에 관하여

신기석* · 공유식** · 김선진** · 류인일**

*부경대학교 산업대학원 기계설계학과

**부경대학교 기계공학부

On Dissimilar Friction Welded Joints(STS316L/IN X-750) of Turning Vane Bolt

KI-SUK SHIN*, YU-SIK KONG**, SEON-JIN KIM** AND IN-IL RYOO**

*Industrial Graduate School, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Reactor Coolant Pump 원자로 냉각펌프, Friction Welding: FRW 마찰용접, Heat Affected Zone: H.A.Z 열영향부, Weld Interface: W.I 용접계면, Tensile Strength 인장강도, Virkers Hardness 비커스 경도, Base Metal: B.M 모재

ABSTRACT: Dissimilar friction welding were produced using 10mm and 11mm diameter solid bar in Inconel ally(IN X-750) to Stainless steel(STS316L) to investigate their mechanical properties. The main friction welding parameters were selected to endure good quality welds on the basis of visual examination, tensile tests, Virkers hardness surveys of the bond of area and HAZ and macro-structure investigations. The specimens were tested as welded, not heat-treated. The tensile strength of the friction welded steel bars was increased up to 95% of the STS316L base metal under the condition of all heating time. Optimal welding conditions were $n=2,000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=4(\text{s})$ when the total upset length is 7(mm).

1. 서 론

RCP(reactor coolant pump)는 원자로 가동 시 원자로 내에서 발생하게 되는 고열을 1차 계통수를 이용하여 S/G(steam generator)로 순환시켜 2차 계통의 터빈으로 하여금 발전을 할 수 있게 도와주는 역할을 담당하고 있는 원자력 발전에서 없어서는 안 될 중요한 핵심 펌프이다. 이 RCP는 오랜 기간 동안의 고방사선 1차 구역에서의 운전으로 인해 RCP internal 자체가 방사능화 되어, O/H 기간 중 펌프교체 및 완전분해 작업을 담당하는 RCP 작업자들의 많은 피폭(被曝)을 초래하고 있으며, 현재 화학제염 및 차폐장치를 통한 피폭량 저감 등 많은 연구가 이루어지고 있다(KPS, 1998).

RCP중 W.H(Westing house)사에서 공급한 93A형 RCP의 TV bolt(turning vane bolt)에 대한 균열발생은 1987년 일본에서 RCP를 처음 분해하는 도중 보고 되었으며, 이것을 분석한 결과 TV bolt의 head부 및 shank부에서 발생된 균열이 IGSCC(Intergranular stress corrosion cracking)로 판명되었다. 이에 따라 국내 93A형 RCP모델의 TV bolt(합금강 A-286재질) 역시 제작사인 미국 W.H사로부터 TV bolt의 재질에 따른 IGSCC 발생을 확인하였으며, 미국 W.H사는 각종 기술 정보(Product update, Technical bulletin)등을 통하여 이 같은 사실을 전 세계 각 발전소에 공포하였다.

이러한 사실의 확인에 따라 일본의 경우 93A형 RCP가 설치된 발전소(Takahama, Ohi, Genkai, Mihama, Kata)의 TV bolt를 자체 설계 제작한 X-750 재질의 TV bolt로 전량 교체하였으며, 당시 분해된 TV bolt의 점검결과 약 75%이상의 볼트에서 균열이 발견되었다. 또한 미국의 경우 일부 발전소(Comanche peak, Mcguire, Zion)에서 W.H사에서 새로 설계, 제작한 TV bolt(STS316 재질)로 교체한 경험을 가지고 있어, 국내의 경우 이를 반영하여 모든 93A형 RCP에 New TV bolt(STS316 재질)로 교체 하였다. 또한 Diffuser adapter를 Diffuser에 고정 시키는 DACS(diffuser adapter cap screw : AISI 302, 303, 304, 305, 384 STS) 역시 IGSCC에 의한 크랙 및 절손 사고가 발생(North-anna, Ohi, Maansgan, 고리3, 영광1)하여 현재 새로 제작된 DACS(STS316 재질)로 교체한 경험을 가지고 있어 국내의 경우 이를 반영하여 STS316 재질로 교체 하였다. 그러나 최근 93A형의 RCP 교체 작업 후 수행하는 완전 분해 작업 수행 중, New TV bolt(STS316 재질)에서 STS bolt의 취약 현상인 고착(固着, stuck) 현상이 발생 되었으며, 이로 인해 작업시간 지연 및 RCP교체 작업자들의 많은 피폭량(被曝量)을 초래하고 있다(KPS, 1998; ASME SA-479/SA-479M; ASTM A 276-88a).

따라서 고가의 RCP 재사용을 위한 RCP 완전분해 점검작업 시 반드시 거쳐야 할 TV bolt 교체작업 중 발생하는 TV bolt 고착현상을 이종재 결합방법 중 가장 이상적인 방법으로 인식되고 있는 마찰용접을 적용하여 저감 및 방지하고자 한다(Ishii, 1997; Kikuchi, 1988; Fuji, 1992). 마찰용접은 접합성이 우수하고 품질개량과

제1저자 공유식 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-620-1608 kongys@mail1.pknu.ac.kr

생산원가의 절감이 입증됨으로써, 여러 선진국에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(대한용접학회, 1998; AWS, 1981; Tsuchiya, 1995; Tsuchiya, 1996). 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용하고 구조물 혹은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 실용적 평가방법에 의한 마찰용접재의 강도 특성 파악과 신뢰성 있는 데이터의 축적이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 축 재료 등에 이용되는 IN X-750과 내마모성 내 피로성 등이 우수한 STS316L의 이종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해, 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 인성 등)과의 상관관계를 고찰하고, 강도특성을 비교검토하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 마찰용접 실험재료는 STS316L과 IN X-750 합금강재에 대한 강도와 인성, 내마모성에 중점을 두었으며, 국내 C사와 K사의 제품이다. STS316L 및 IN X-750은 각종 내열, 내산성 재료로 많이 사용되고 있으며, 해수와 밀접한 관련이 있는 발전설비에 다양하게 사용되고 있다. 특히 해수 및 1차 계통수의 밀봉장치 부분이나 각종 발전설비의 체결용 볼트류에 많이 사용되고 있다.

Table 1과 Table 2에 STS316L과 IN X-750의 화학성분과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

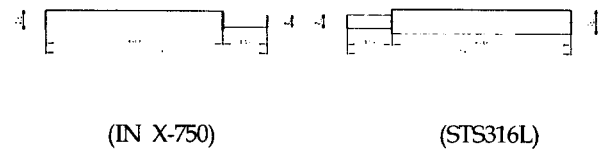
마찰 용접 시험을 위한 시험편은 Fig. 1(a)과 같은 형상과 치수로 가공하였다. 그리고 마찰용접 시험편의 강도를 알기 위한 인장 시험편의 형상 및 치수로서 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 Fig. 1(b)과 같은 형상으로 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 또한 경도 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 후 용접 부(직경10mm & 11mm)를 좌우 10mm로 절단하였고, 중심부를 따라서 절단(wire cutting)하였다. 절단 시 열 영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 듬뿍 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱 하였으며, 이는 Photo 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of materials (wt. %)

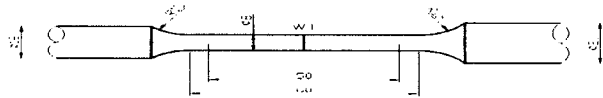
Materials	C	Si	Mn	P	S	Fe	Cu	Cr	Al	Ti	Ni
STS316L	0.023	0.48	1.37	0.027	0.004	-	0.27	16.99	-	-	12.20
IN X-750	0.05	0.10	0.10	-	0.001	6.01	0.04	15.45	0.61	2.51	bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness Hv
STS316L	867	684	42.4	21.4	293
IN X-750	1073	691	28	33	287



(a) Friction welding test workpiece



(b) Tensile test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of specimens (unit:mm)

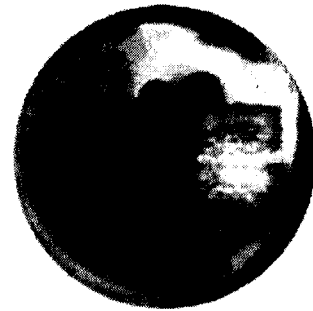


Photo. 1 Photograph showing section through FRW specimen

2.2 실험장치 및 실험방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model : TOHO TH-25)는 연속구동 브레이크 형 (continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은 $\phi 25$ mm이고 고정축은 $\phi 40$ mm이다. 그리고 이음부의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (Model : KDU-50)로서 인장속도는 2mm/min으로 각 모재와 용접재를 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기 (Model : MXT-a7e)를 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g/10초의 0.5mm 등간격으로 좌우 각각 8mm씩 측정하였으며, 중심부와 원주부의 경도분포를 조사하기 위해 2가지로 구분해서 조사하였다.

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수 (n), 가열압력 (P_1), 업셋압력 (P_2), 가열시간 (t_1), 업셋시간 (t_2) 등이다. 먼저 참고문헌(번, 2000; 오 등, 1995)을 통하여 Table 3의 조건으로 실험 후 가열압력 P_1 과 업셋압력 P_2 의 최적조건을 결정하였다. 그리고 이 조건을 기준으로 가열시간 (t_1) 변화에 따른 상관관계와 총업셋량 (U_T)의 변화를 조사하였다.

Table 3 Various condition of dissimilar friction welding

case	Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Upsetting pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (s)	Upsetting time t_2 (s)	Total upset U_T (mm)
1	2000	80	100	5	4	1.6
		100	120			2.6
		140	180			4.7
		180	220			6.9
		200	240			7.6
		220	260			9.5
2	2000	220	260	1-7	4	1.1-14

3. 결과 및 고찰

3.1 육안 및 단면조사

모든 시험편은 시험전에 육안 검사를 행하였다. 플래쉬(flash)를 제거한 시험편의 용접 영역에서 어떠한 표면 결함도 관찰할 수 없었으며 육안으로는 잘 접합이 되었음을 알 수 있었다. 일례로 Photo. 2는 마찰용접된 그대로의 사진을 보여준다. 이전의 Photo. 1은 이 시험편을 장방향으로 절단하여 나타낸 것으로 플래쉬의 형상, 용접계면 및 열영향부의 형상을 보여주고 있다. 본 사진에 의하면 열영향부의 폭은 STS316L 측에서 약간 크게 나타났고, 외주에서 중심부로 갈수록 그 폭은 감소하고 있다.



(IN X-750) (STS316L)

Photo. 2 Photograph showing friction welded specimen in the as-received condition

다음에 나타낸 Photo. 3은 $P_1=220$ (MPa), $P_2=260$ (MPa), $t_2=4$ (s)의 동일 조건에서 t_1 을 1~7(s)로 변화하여 용접한 것을 각각 인장 시험하여 파단 된 사진을 나타낸 것이다.

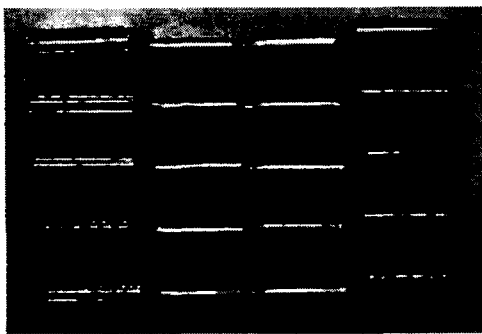


Photo. 3 Photograph showing fractured specimens after tensile test

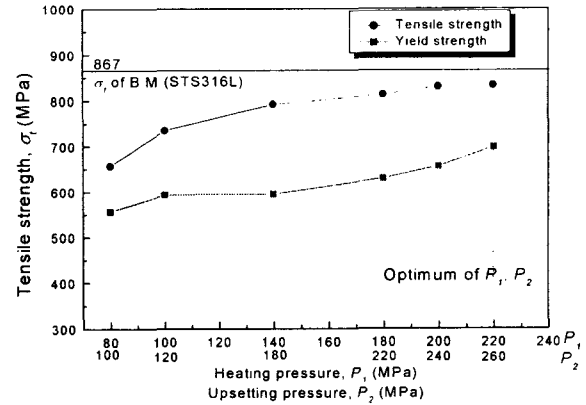


Fig. 2 Relationship between tensile strength and pressure in FRW of IN X-750 to STS316L

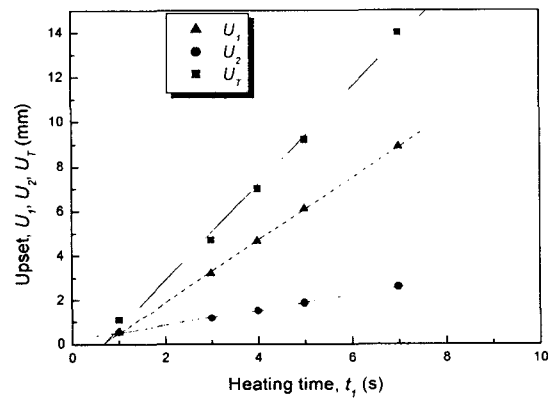


Fig. 3 Relationship between upset length and heating time in FRW of IN X-750 to STS316L

3.2 인장강도와 용접조건과의 상관성

Fig. 2는 Table 3(Case 1)의 압력변화에 따른 인장강도 결과를 나타낸다. 이 그림에서 보면 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2)이 각각 80, 100(MPa)에 비해 220, 260(MPa)의 인장강도가 약 176(MPa) 정도 높게 나타났다. 또한 본 실험 결과 치는 타 문헌(변, 2000; 오 등, 1995; Oh *et al*, 2000)의 결과와도 비교적 잘 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적조건으로 P_1 과 P_2 를 각각 220, 260(MPa)로 결정하였다.

3.3 가열시간과 업셋량과의 상관성

Fig. 3은 마찰용접에서 업셋량(U_1 , U_2 , U_T)과 가열시간(t_1)의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이, 가열시간이 증가할수록 각 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서

가열시간이 4초일 때, 총업셋량은 7mm로 나타났고, 7초일 때 14mm가 되었다. 따라서 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 매우 효율적인 방법이라고 판단된다.

가열시간과 각 업셋량과의 ($U_1-t_1, U_2-t_1, U_T-t_1$)의 실험적 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$U_1 = 1.398t_1 - 0.91, (R^2 = 0.99)$$

$$U_2 = 0.343t_1 + 0.18, (R^2 = 0.99)$$

$$U_T = 2.16t_1 - 1.44, (R^2 = 0.99)$$

위 식으로부터 알 수 있듯이, 업셋량과 가열시간 사이에는 강한 양(positive)의 선형적인 상관관계가 있음이 확인되었다. 여기서 R^2 은 데이터의 커브피팅에서 구한 기여율을 의미한다. 타의 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형적인 관계를 나타내는 결과가 많이 보고되고 있다.

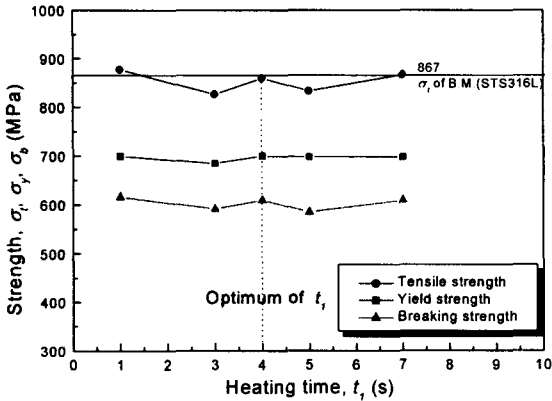


Fig. 4 Relationship between strength and heating time in FRW of IN X-750 to STS316L

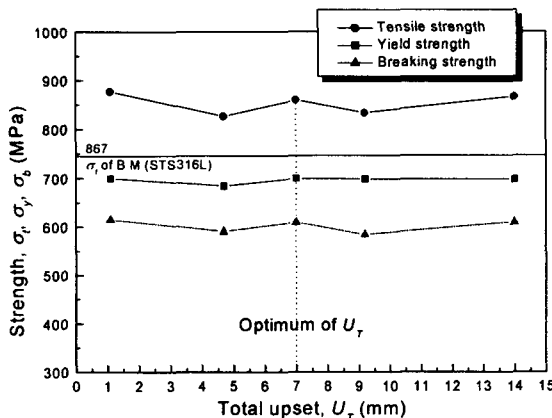


Fig. 5 Relationship between strength and total upset in FRW of IN X-750 to STS316L

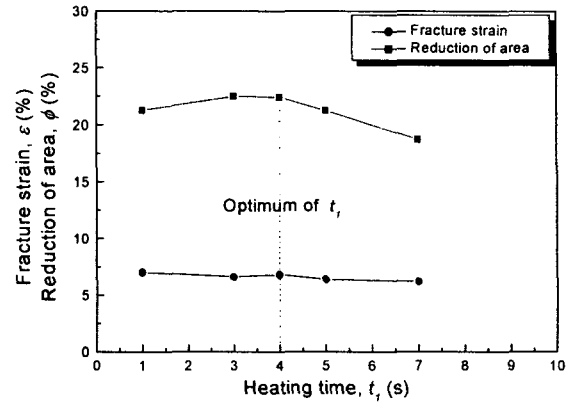


Fig. 6 Relationship between toughness and heating time in FRW of IN X-750 to STS316L

3.4 용접변수와 강도와의 상관성

Fig. 4는 가열시간과 각종 강도(인장강도, 항복강도, 파괴강도)와의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 인장강도는 STS316L 모재의 인장강도(867MPa)에 비교했을 때 $t_1=4$ (s)조건에서 99.2% 수준으로 높게 나타났으며, 평균적으로 가열시간이 증가하면 다소 증가하는 경향을 보였다. 그러나 항복강도와 파괴강도는 가열시간이 거의 비슷한 결과를 보였고, 4초의 경우가 다소 높게 나타났다. 따라서 최적조건을 정적 강도적인 측면에서 고려해 볼 때, 가열시간은 4초 정도가 적합하다고 판단된다. 다만, 마찰용접 시 건전한 접합(인장강도만을 중심으로)이 되는 최적조건 범위는 비교적 넓었고, Fig. 2에서와 같이, 비교적 높은 용접압력에서의 결과가 실험적으로 우수하였다. 이는 타의 실험결과에서도 비슷한 결과를 보고하고 있다.

Fig. 5는 총업셋량과 각종 강도(인장강도, 항복강도, 파괴강도)와의 관계를 나타낸다. 그림에서의 결과치는 Fig. 4와 같이 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 마찰용접시 업셋량과 강도와의 상관성이 존재하며, 업셋량이 증가할수록 인장강도가 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 업셋량이 7mm(가열시간 4초)일 때 각종강도 또한 비교적 높게 나타났기 때문에 4초가 적합하다고 판단된다.

Fig. 6은 마찰 가열시간과 인성(연신율, 단면수축율)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 가열시간 7초의 경우를 제외한 가열시간이 1-6초인 경우, 연신율은 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 단면수축율도 약 20(%)로 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 앞절의 강도적인 측면과 더불어 인성적인 측면에서 고려해 볼 때, 최적 마찰 가열시간은 4초가 적합하다고 판단된다. 이는 마찰용접제의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고, 연성이 높은 편이 우수하기 때문이다.

이상에서 알 수 있듯이, 강도적인 측면과 인성적인 측면을 조합하여 고려해 볼 때, 가열시간이 7초 이상에서는 마찰용접 조건으로 타당하지 않다고 판단된다.

3.5 마찰용접부의 경도분포

Fig. 7은 본 연구에서 얻은 최적의 마찰용접 조건 [$n=2000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=4(\text{s})$]하에서 용접한 시험편의 경도분포를 나타낸 것이다. 경도 측정은 용접계면에서 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주부의 경도 분포를 조사하기 위해 2가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경(15mm)의 중심부(#1), 두 번째는 센터에서 3mm인 지점(#2)에서 각각 조사하였다.

모재의 경도는 IN X-750이 Hv 287로 STS316L의 Hv 293보다 다소 낮은 편이며, 이들 재료의 용접계면(weld interface, W.I)의 경도는 Hv 225로서 두 재료의 모재보다 낮게 나타났다. 그리고 IN X-750측 열영향부 이후에서는 다소 차이가 있으나 모재와 비슷한 경도 값을 나타내고 있다. 그 이유는 용접경계면 부근에서 마찰용접 시 국부가열온도가 풀림온도범위 내에 위치해 있었던 것으로 사료된다(오 등, 1995; Cho and Suh, 1997). 또한 열영향부(heat affected zone, HAZ)를 두가지로 구분해서 조합해 보면, IN X-750측 1.0mm+STS316L측 2.5mm=3.5mm로 판단된다. 여기서 열영향부가 중심부와 원주부의 경도치가 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 대부분의 마찰용접에서는 원주 속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이로 인해 마찰온도가 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달되어 풀림을 촉진하여 원주부의 경도치가 높게 나타나지만 여기서는 직경이 비교적 작기 때문에 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

경도시험에서 특이한 사항은, 대부분은 용접계면에서 피크(peak)치를 유지 후 급격히 저하하는 현상을 나타내는데 비해, 그래프에서 알 수 있듯이 HAZ부의 경도가 일반 이종재 마찰용접 시 나타나는 경향과 반대 현상을 나타내고 있다. 이는 국부가열과 마찰압접 시 인장강도가 높은 IN X-750과 STS316L의 이종재간 접합성에 따른 특성이라 생각되며, 추가 실험을 통해 원인 규명이 필요하겠다.

3.6 마찰용접부의 현미경 조직

Photo. 4는 현미경 조직 검사를 하기 위한 시험편은 경도시험과 같은 적정 용접조건으로 용접한 상태의 것을 사용하였다. 부식방법으로는 Kalling 용액을 사용하였고, STS 316L은 90초, IN X-750은 660초로 각각 부식하였다.

조직검사는 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ) 및 모재부(B.M)로 하였으며, 각각 200배로 확대 관찰 하였다. 그림에서 용접계면(b)은 두 재료가 강렬히 혼합되어, 계면의 형태가 단조롭고 직선상에 가깝게 나타났다. (c)는 STS316L 열영향부로 조대한 결정립 구조이며, (e)는 STS316L 모재부로 펄라이트(Pearlite)와 페라이트(Ferrite) 조직이 혼합되어 나타나고 있다. 또한 그림 (a)는 IN X-750 열영향부로서 마치 단조한 조직과 같은 치밀한 미세조직을 나타내며, (d)는 IN X-750 모재부로 마르텐사이트(Martensite) 조직을 나타내고 있다.

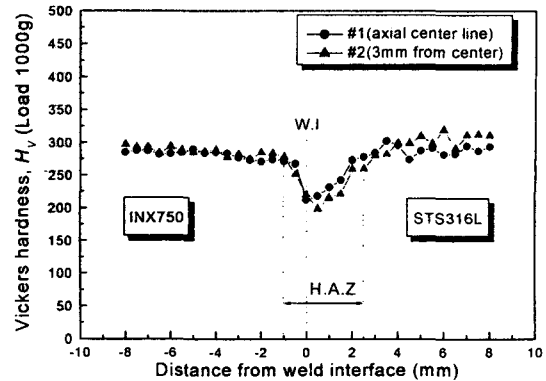


Fig. 7 Hardness distribution near the weld interface of FRW of IN X-750 to STS316L, welding condition : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=4(\text{s})$

4. 결 론

원자력 발전소에 사용되고 있는 RCP용 TV bolt에 적용되는 STS316L과 IN X-750의 봉 대 이종재 마찰용접을 수행한 결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- (1) IN X-750과 STS316L의 이음부 강도가 모재보다 양호한 이종재 마찰용접이 가능하게 되어, 재료의 기계가공에 따른 공정수와 비용 및 재료의 절감이 가능하게 되었다.
- (2) 두 이종재의 인장시험에서 인장강도가 비교적 낮은 STS316L측의 열영향부에서 파단이 되었고, 최적 마찰용접 조건에서의 용접부 이음효율은 모재의 강도와 비교해 볼 때 거의 95% 이상 나타났으며, 용접강도, 인성을 고려한 적정마찰용접 조건은 다음과 같다.

$$n=2,000(\text{rpm}), P_1=220(\text{MPa}), P_2=260(\text{MPa}), t_1=4(\text{s}), t_2=4(\text{s})$$

- (3) 가열시간에 대한 업셋량(U_1, U_2, U_T)을 구할 수 있었고, 이는 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 및 정밀도 등을 요구할 경우에 효율적인 방법이라고 판단된다. 여기서 U_T-t_1 의 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$U_T = 2.16t_1 - 1.44$$

- (4) 최적조건에서 마찰용접한 용접부의 미세조직을 관찰한 결과는 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태를 알 수 있었다.

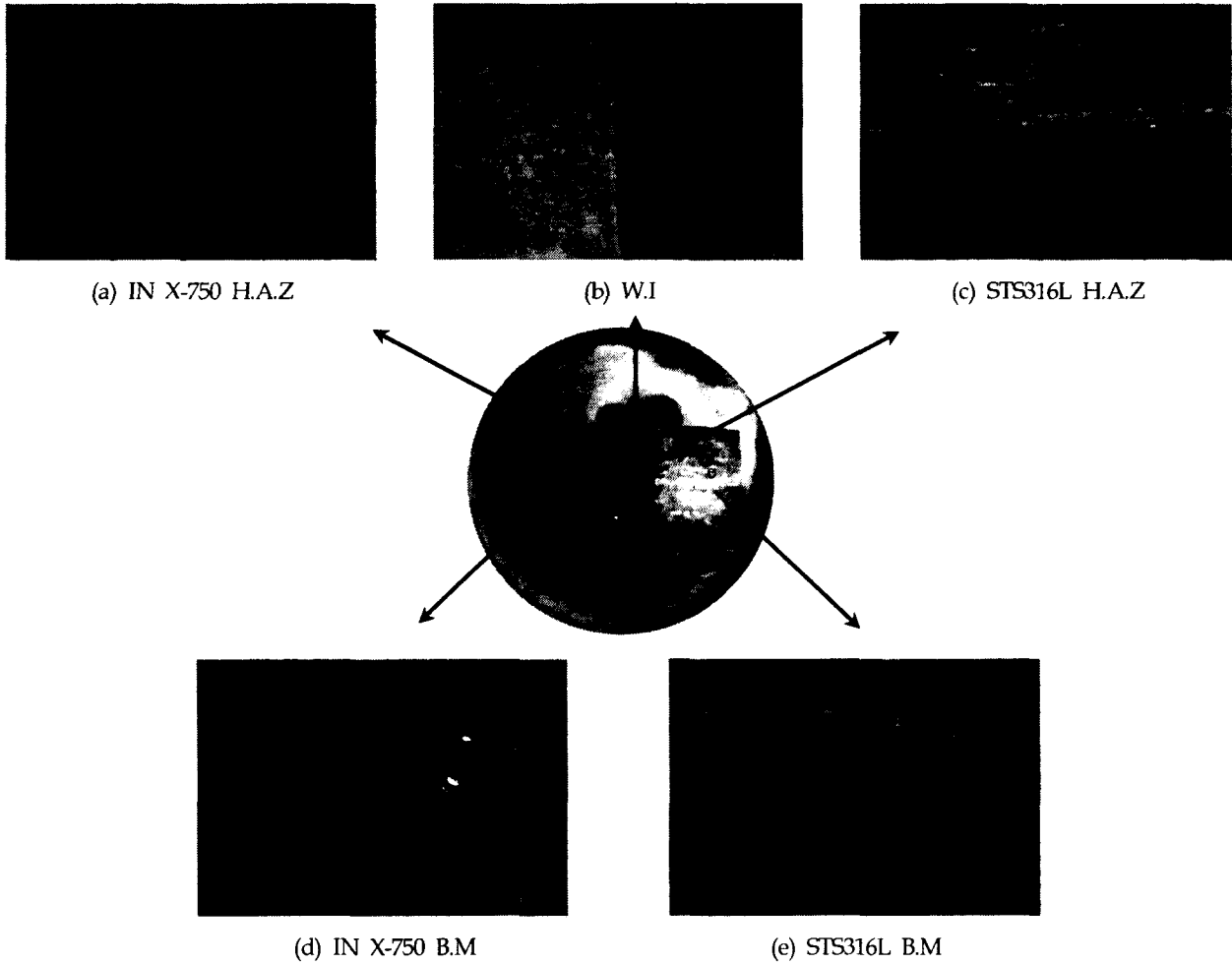


Photo. 4 Macro-structures of welded joint ($\times 200$), welding condition : $n=2000(\text{rpm})$, $P_1=220(\text{MPa})$, $P_2=260(\text{MPa})$, $t_1=4(\text{s})$, $t_2=4(\text{s})$

참고문헌

- 대한용접학회(1998). "용접·접합편람", pp 663~664.
- 변권수(2000). "자동차 Shock Absorber용 강재의 이종재 마찰용접의 최적화와 실시간 AE 평가에 관한 연구", 부경대학교 공학석사학위논문, pp 21~24.
- 오세규, 장홍근, 장지훈(1995). "Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴검사학회지, 제 15권, 제 4호, pp 511~519.
- KPS/NTSC-RCP(1998). "KORI 2/RCP-1 수행 보고서", 1998년 02월 고리2호기 상반기 보고서.
- ASME SA-479/SA-479M : Specification for stainless steel bars and shapes for USE in boilers and other pressure vessels.
- ASTM A 276-88a : Standard specification for stainless and heat-resisting steel bars and shapes.
- AWS(1981). "Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals of Welding", 7th edition, Vol. 1, pp 153~220.
- Fuji, A., T. H. North, K. Ameyama and M. Futamata(1992). Materials Science Technology, 8, pp 219.
- H. S. Cho and S. J. Suh(1997). "Friction Welding of Inconel 713C and SCM440", Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp 78~84.
- Ishii, T. and I. Tanaka(1997). JAERI-M 7152.
- Kikuchi T. and H. Kawamura(1988). JAERI-M 88-150.
- S. K. Oh, Y. S. Kong, I. J. Yoo and I. S. Kim(2000). "Creep Life Prediction for Dissimilar Friction-Welded Joints of Turbine Impeller Heat Resisting Steels and AE Evaluation(1)-FRW and AE Evaluation", Proc. of International Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Seattle, USA, pp 203-207.
- Tsuchiya, K., h. Kawamura and M. Saito(1995). "Fusion Technology", SOFT-18, pp 447.
- Tsuchiya, K., h. Kawamura(1996). "Mechanical Properties of Cu-Cr-Zr alloy and STS316 Joints Fabricated by Friction Welding Method", Journal of Nuclear Materials 233-237, pp 913-917.