

< 논문 >

## 이종 마찰용접 강봉재의 후열처리에 따른 기계적 특성

공 유 식\* · 김 선 진†

(2005년 8월 26일 접수, 2006년 2월 24일 심사완료)

### Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars in Relation to Post Weld Heat Treatment

Yu-Sik Kong and Seon-Jin Kim

**Key Words:** Friction Welding(FRW;마찰용접), As-Welded(용접재), Heat Affected Zone(H.A.Z;열영향부), Post Weld Heat Treatment(PWHT;용접후열처리), Weld Interface(W.I;용접계면)

#### Abstract

Dissimilar friction welding were produced using 15(mm) diameter solid bar in chrome molybdenum steel(KS SCM440) to carbon steel(KS S45C) 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, Vickers hardness surveys of the bond of area and H.A.Z and microstructure investigations. The specimens were tested as-welded and post-weld heat treated(PWHT). The tensile strength of the friction welded steel bars was increased up to 100% of the S45C base metal under the condition of all heating time. Optimal welding conditions were  $n=2,000(\text{rpm})$ ,  $P_1=60(\text{MPa})$ ,  $P_2=100(\text{MPa})$ ,  $t_1=4(\text{s})$ ,  $t_2=5(\text{s})$  when the total upset length is 5.4 and 5.7(mm), respectively. The peak of hardness distribution of the friction welded joints can be eliminated by PWHT. Two different kinds of materials are strongly mixed to show a well-combined structure of macro-particles without any molten material and particle growth or any defects.

#### 1. 서 론

기계공업의 발전과 더불어 각종 자동차, 항공기 및 선박용 디젤엔진 부품의 축, 그리고 각종 공구류, 기계부품의 다양한 분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 고가품과 저가품의 이종재 용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성이 좋은 제품의 대량 생산, 자동화의 용이성, 가공시간의 단축, 재료절약, 에너지의 고효율화 등에 마찰용접을 적용하려는 연구가 활발히 추진되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

마찰용접(friction welding, FRW)은 동종재는 물론 가스용접, 저항용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에는 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며, 또한 경제적인 면과 기술적인 면에서도 많은 이점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압 하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다.<sup>(3-5)</sup>

국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적조건의 결정과 응용 및 강도에 관한 연구가 Oh,<sup>(6)</sup> Jeong,<sup>(7)</sup> Kang<sup>(8)</sup> 등에 의하여 보고되는 등 이종재료의 마찰용접에 관한 연구가 증가되고 있

† 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부  
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr  
TEL : (051)620-1608 FAX : (051)620-1405  
\* 회원, 부경대학교 기계공학부

**Table 1** Chemical composition of materials (wt.%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
SCM440	0.39	0.21	0.78	0.012	0.012	10.3	0.18	0.06	0.17
S45C	0.45	0.18	0.67	0.015	0.016	0.15	0.19	0.08	0.19

다. 그러나 마찰용접조건과 인장강도간의 관계에 관하여 많이 보고되고 있지만, 실용상 중요한 피로강도의 관점에서 이것을 평가하고, 또 신뢰성 제고를 위한 통계적 해석을 연구한 보고는 드물다. 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용하고 구조물 혹은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 실용적 평가방법에 의한 마찰용접재의 강도특성 파악과 신뢰성 있는 데이터의 축적이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 각종 축 재료 등에 적용되는 S45C와 내마모성 내 피로성 등이 우수한 SCM440의 이종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해, 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질(특히 인장강도, 연성 등)과의 상관관계를 고찰하고자 하며, 또한 마찰용접 후 열처리를 시행하여, 용접재(as-welded)와 후열처리재(post-weld heat treatment, PWHT)의 강도특성을 비교검토하고자 한다.

**2. 실험재료 및 실험방법**

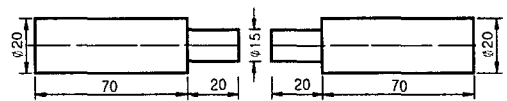
**2.1 재료 및 시험편**

본 연구에 사용된 마찰용접 실험재료는 S45C와 SCM440 강재에 대한 강도와 연성에 중점을 두었으며, 국내 P사의 제품이다. 기계구조용 탄소강재(S45C)는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, Cr-Mo강재(SCM440)는 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하며, 주된 용도는 일반기계, 자동차, 선박용, 항공기 등의 축류, 기어류, 냉간단조품, 볼트류 등에 많이 이용된다. Table 1은 SCM440과 S45C의 화학성분을 나타내었고, Table 2는 이들 재료의 모재에 대한 용접재와 후열처리재의 기계적 성질을 각각 나타내었으며, 이는 각 용접조건별 결과와 비교할 수 있다.

**Table 2** Mechanical properties of materials

Materials		Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Reduction of area $\psi$ (%)	Elongation $\epsilon$ (%)	Hardness Hv
PWHT	SCM440	837	471	58.7	13.4	229
	S45C	658	429	53.8	27	183
As-welded	SCM440	1029	799	32.6	13.6	270
	S45C	749	672	42.7	16	238

Post weld heat treatment: annealing(780℃×4h)→furnace cool



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

마찰용접을 위한 시험편은 Fig. 1에 나타난 바와 같은 형상과 치수로 가공하였고, 이들 시험편의 강도특성을 실험하기 위한 인장 시험편의 형상 및 치수로서 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 CNC선반 가공 후 연삭가공 하였다. 또한 경도분포 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 후 용접부(직경 15mm)를 용접계면으로부터 좌우 15mm 절단하였고, 축방향의 중심부를 따라서 절단(wire cutting)하였다. 절단 시 열영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱 하였다.

또한, 마찰용접 후 용접부의 잔류응력을 제거하기 위하여 후열처리(post-weld heat treatment, PWHT)를 시행하였으며. 후열처리 조건은 기계구조용 탄소강재(S45C)의 열처리 기준으로 설정은 780℃까지 20℃/min으로 가열하였고, 4시간 유지 후, 노(furnace)에서 서냉하였다.

**2.2 실험장치 및 실험방법**

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model : TOHO TH-25)는 연속구동브레이크형(continuous drive brake type)이며, 용량은 척에 장착할 수 있는 최대 재료치수로서 회전축은  $\phi 25$  mm이고 고정축은  $\phi 40$  mm이다. 그리고 용접재의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (Model :

KDU-50)로서 인장속도는 2 mm/min으로 각 모재와 용접재를 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model : MVK-H1, Akashi)를 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g/10초의 0.5mm 등간격으로 좌우 각 8mm 까지 측정하였고, 용접재와 후열처리재에 대한 경도분포를 3가지로 구분해서 비교 조사하였다. 또한 경도분포에 따른 현미경 조직은 2%의 나이탈(nital) 용액으로 에칭(etching)하여, 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(H.A.Z) 및 모재부(B.M)로 각각 200배로 관찰하였다.

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수( $n$ ), 가열압력( $P_1$ ), 업셋압력( $P_2$ ), 가열시간( $t_1$ ), 업셋시간( $t_2$ ) 등이다. 먼저 참고문헌<sup>9)</sup>을 통하여 Table 3의 조건으로 마찰용접 후 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 결정하였다. 그리고 압력조건을 기준으로 하여, 가열시간의 변화에 따른 상관관계와 총업셋량( $U_T$ )의 변화를 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 용접조건과의 상관성

Fig. 2는 Table 3(Case 1)의 압력변화에 따른 인장강도 결과를 나타낸다. 그림에서 보면 가열압력( $P_1$ )과 업셋압력( $P_2$ )이 각각 40, 80(MPa)에 비해 60, 100(MPa)의 인장강도가 약 10(MPa) 정도 높게 나타났다. 또한 이 결과치는 타 문헌<sup>(6,9)</sup>의 결과와도 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적조건은  $P_1$ 과  $P_2$ 를 각 60, 100(MPa)으로 결정하였고, 2차 실험에서는 Table 3(Case 2)과 같이 가열시간( $t_1$ )을 변화시켜, 용접재와 후열처리재의 강도 특성의 결과를 각각 비교 고찰하였다.

#### 3.2 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, 두 번의 실험결과의 총업셋량은 5.4mm, 5.7mm, 7초일 때 9.8mm, 10mm로 각각 나타났다. 따라서 마찰용접과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수, 정밀도 등을 요구할 때 매우 효율적인 방법이라고 판단된다.

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	40	80	2	3	2.5
		60	100	4	5	5.5
		40	80	4	5	4.6
		60	100	4	5	5.7
2	2000	60	100	1~7	5	1.9~10

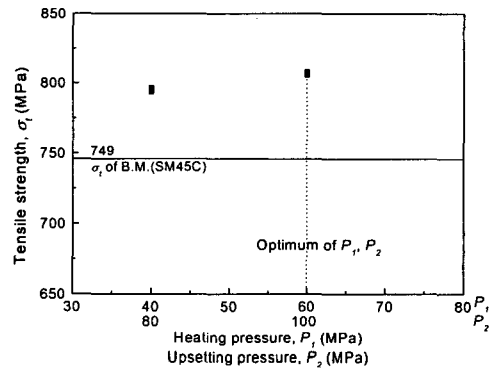


Fig. 2 Relationship between tensile strength and pressure in FRW of SCM440 to S45C

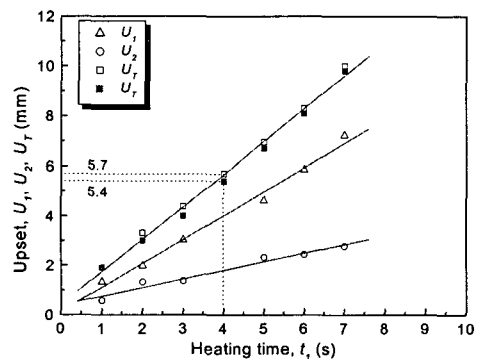


Fig. 3 Relationship between upset length and heating time in as-welded

#### 3.3 용접변수와 강도와와의 상관성

Fig. 4는 용접재와 후열처리재의 가열시간과 인

장강도와와의 관계를 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 용접재의 경우, S45C 모재의 인장강도(749 MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났고, 또한 후열처리재의 경우에서도, S45C 모재의 인장강도(658MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났다. 그리고 용접재와 후열처리재의 인장강도는 비슷한 경향으로 나타났으며, 용접재에 비해 후열처리재의 인장강도가 약 100MPa이상 낮게 나타났다.

그림에서 특이한 사항은 가열시간이 4초일 때, 용접재의 인장강도(807.9MPa)는 비교적 높게 나타났으나, 후열처리재의 인장강도(667.1MPa)는 가장 낮게 나타났다. 이는 모재의 인장강도에 비해 높게 나타나므로 문제가 되지 않는 것으로 판단된다. 따라서 마찰용접 시 건전한 접합(인장강도만을 중심으로)이 되는 최적조건의 범위는 비교적 넓었고, 비교적 모든 조건의 결과가 실험적으로 우수하였다.

Fig. 5는 총업셋량과 인장강도와와의 관계를 나타낸다. 그림에서의 결과치는 Fig. 4와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 마찰용접 시 업셋량과 강도와도 상관성이 존재함을 알 수 있다. 여기서 가열시간이 4초일 때, 용접재의 총업셋량(5.7mm)은 비교적 높게 나타났으나, 후열처리재의 총업셋량(5.4mm)은 가장 낮게 나타났다.

Fig. 6은 용접재와 후열처리재의 가열시간과 연성(연신율, 단면수축률)과의 관계를 나타낸다. 용접재의 결과에서 특이한 사항은 가열시간 1초에서 인성적 측면은 가장 낮게 나타났지만, 강도적인 측면은 비교적 높게 나타났다. 또한 타 조건에서는 S45C측 모재에서 파단 되었으며, 파단양상은 일반적인 컵 앤 콘(cup and cone) 형태의 연성파단 양상으로 나타났다. 하지만 1초에서는 이와 달리 용접계면에서 취성파단 되었다. 이는 가열시간이 짧기 때문에 용입 불량으로 사료된다. 따라서 모든 조건에서 강도적인 측면과 연성적인 측면을 조합하여 고려해 볼 때, 가열시간이 2초 이하는 마찰용접 조건으로 타당하지 않다고 판단된다.

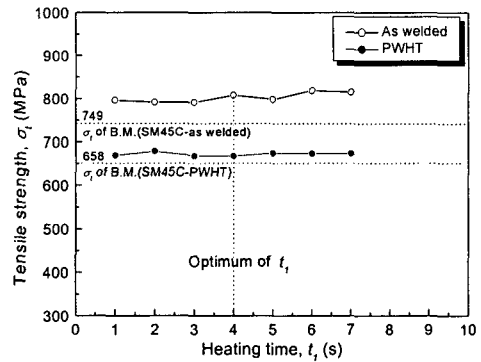


Fig. 4 Relationship between strength and heating time in as-welded and PWHT

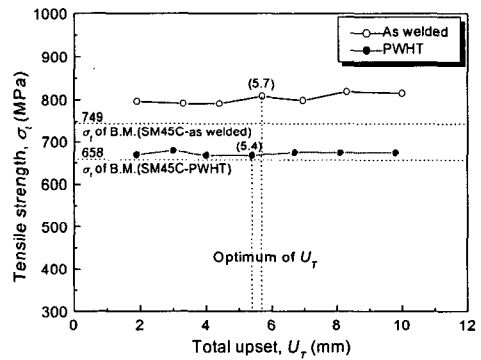


Fig. 5 Relationship between strength and total upset in as-welded and PWHT

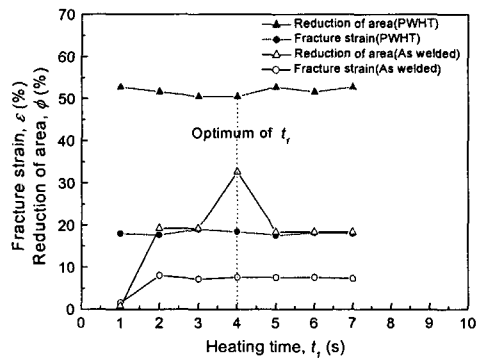


Fig. 6 Relationship between ductility and welded heating time in as-welded and PWHT

또한 용접재의 결과를 보면, 연신율은 약 7(%)로 거의 비슷한 경향을 보이고 있고, 단면수축률도 약 19(%)로 비슷하지만 4초에서 33.4(%)로 높게 나타나고 있다. 이는 모재(S45C)의 연신율(16%), 단면수축률(42.7%)에 비해 훨씬 낮게 나타났다. 따라서 앞에서 강도적인 측면과 더불어 최적조건을 연성적인 측면에서 고려해볼 때, 가열시간은 4초가 적합하다고 판단된다. 이는 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고, 연성이 높은 편이 우수하기 때문이다.

후열처리재의 연신율과 단면수축률은 용접재에 비해 거의 두 배 이상 높게 나타났다. 연신율 약 19(%), 단면수축률 약 52(%)로 모재보다 높게 나타남을 알 수 있으며, 모든 용접조건에서 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서 마찰용접 후열처리 시 용접품질(인장강도, 인성)이 되는 최적조건 범위는 넓었고, 용접재에 비해 모든 조건의 결과가 실험적으로 우수하였다.

3.4 마찰용접부의 경도분포

Fig. 7은 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편의 경도와 이를 후열처리 한 경도분포를 비교하여 나타내었다. 경도 측정은 좌우 0.5mm 간격으로 중심부와 원주부의 경도분포를 각각 조사하기 위해 3가지로 구분해서 조사하였다. 첫 번째는 시험편 직경(15mm)의 중심부(원주끝에서 7.5mm), 두 번째는 중심부에서 2.5mm인 지점, 세 번째는 중심부에서 5mm인 지점으로 구분하여 조사하였다.

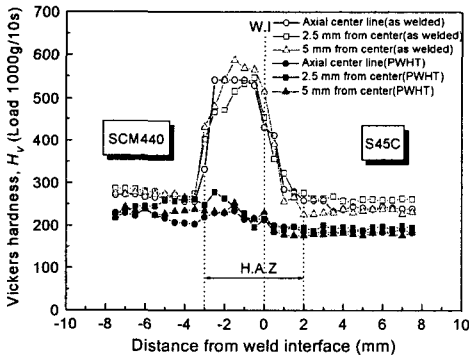


Fig. 7 Hardness distribution near the weld interface of as-welded and PWHT, Welding condition :n=2000(rpm), P<sub>1</sub>=60(MPa), P<sub>2</sub>=100(MPa), t<sub>1</sub>=4(s), t<sub>2</sub>=5(s)

용접재의 경도분포 그래프를 보면, 모재의 경도는 SCM440이 Hv 270으로 S45C의 Hv 238보다 다소 높은 편이며, 이들 재료의 용접계면(weld interface, W.I)의 경도는 Hv 430으로서 두 재료의 모재보다 아주 높게 나타났다. 그리고 SCM440측 열영향부에서 최고의 경도값(Hv 587)을 나타내고 있다. 그 이유는 용접계면 부근에서 마찰용접 시 국부가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료된다.<sup>(10)</sup>

또한 열영향부(heat affected zone, HAZ)를 두 가지로 구분해서 보면, 시험편 중심부는 SCM440측 3.0mm+S45C측 2.3mm=5.3mm 이고, 원주끝 부분은 SCM440측 3.1mm+S45C측 2.9mm=6.0mm 로 판단된다. 여기서 열영향부가 중심부보다 원주부가 크게 나타나고, 피크치의 경도치가 원주부에 가까울수록 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 마찰용접 시 원주속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이로 인해 마찰온도가 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달된다. 따라서 원주부의 온도가 중심부보다 급격히 상승함에 따라 냉각속도가 더욱 빠르게 되어 담금질 효과가 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 참고로 플래시(flash)부의 경도분포는 SCM440측 안쪽이 Hv 753, 바깥쪽이 Hv 595이며, S45C측 안쪽이 Hv 496, 바깥쪽이 Hv 430으로 나타났다.

경도시험에서 특이한 사항은, S45C측 열영향부의 경도분포가 용접계면에서 급격히 감소하는 반면에, SCM440측은 경도분포가 약 3mm정도의 피크치를 유지 후 급격히 저하하는 현상을 나타내고 있다. 이는 국부가열과 마찰압접 시 인장강도가 높은 SCM440의 이종재간 접합성에 따른 특성이라 생각된다. 따라서 용접후열처리를 시행하여 경도분포를 조사한 결과, 그림에서와 같이 용접부의 피크치가 모재의 경도치 이하로 완화됨을 알 수 있다. 이는 용접 시에 발생한 잔류응력이 후열처리를 시행하여 완전히 제거되었음을 의미한다.

3.5 마찰용접부의 조직검사

Fig. 8은 최적조건에서 마찰용접을 시행하여 후열처리한 시험편의 현미경 조직을 나타내고 있다. 먼저 2%의 나이탈(nital) 용액으로 에칭(etching)하여, 두 이종재의 용접계면(W.I), 열영향부(HAZ) 및 모재부(B.M)로 각각 200배로 확대 관찰하였다.

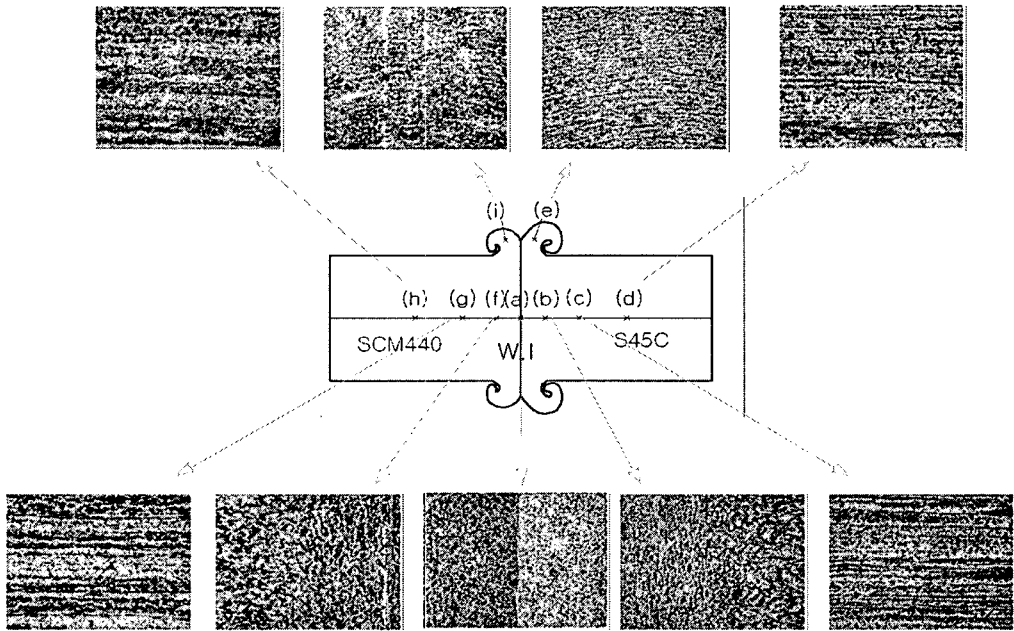


Fig. 8 Macrostructures and hardness distribution near the weld interface of PWHT

Welding condition :  $n=2000(\text{rpm})$ ,  $P_1=60(\text{MPa})$ ,  $P_2=100(\text{MPa})$ ,  $t_1=4(\text{s})$ ,  $t_2=5(\text{s})$

그림에서 용접계면부(a)는 두 이종재료가 강렬히 혼합되어 계면의 형태가 단조롭고 직선상에 가깝게 나타났다. (b)는 S45C 열영향부로 조대한 결정립 구조이며, (c)와 (d)는 S45C 모재부로 펄라이트(Pearlite)와 페라이트(Ferrite, 백색으로 표시되는 부분) 조직이 혼합되어 나타나고 있고, (e)는 S45C flash부로서 원주방향으로 금속이동 흐름(metal flow)을 볼 수 있다.

또한 그림 (f)는 SCM440 열영향부로서 마치 단조한 조직과 같은 치밀한 미세조직을 나타내며, (g)는 SCM440 열영향부와 모재의 경계부분으로써 미세한 슬바이트(Sorbite, tempered martensite)조직을 보이고 있다. (h)는 SCM440 모재부로 마르텐사이트(Martensite) 조직을 나타내고 있고, (i)의 SCM440 플래쉬(flash)부는 반지름방향의 소성유동이 발생하여 슬립선이 형성되어 있음이 관찰되었다.

결과적으로 전 용접부는 두 이종재료가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태를 알 수 있다.

#### 4. 결론

각종 축 재료 등에 사용되는 SCM440과 S45C의 이종재 마찰용접의 기계적 특성에 대한 결과는 다음과 같다.

(1) SCM440과 S45C의 이음부 강도가 모재보다 양호한 이종재 용접이 가능함을 알 수 있었고, 모든 용접조건에서 용접부의 이음효율이 100% 이상 되었으며, 용접부의 강도 및 인성을 고려한 최적 마찰용접조건은 다음과 같은 결과를 얻었다.

$n=2000(\text{rpm})$ ,  $P_1=60(\text{MPa})$ ,  $P_2=100(\text{MPa})$ ,  $t_1=4(\text{s})$ ,  $t_2=5(\text{s})$

(2) 가열시간과 업셋량은 선형적인 상관관계를 알 수 있었고, 이는 마찰용접과정에서의 업셋 길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 경우에 효율적인 방법이라고 판단된다.

(3) 용접재에 비해 후열처리재의 연성치가 두 배 이상 높았고, 후열처리를 시행하여 경도분포를 조사한 결과, 용접부의 피크치가 모재의 경도치 이하로 완화됨으로써 용접 시 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 완전히 제거되었음을 확

인하였다.

(4) 최적마찰용접 조건에서 후열처리재의 미세 조직을 관찰한 결과는 두 이종재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태임을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) AWS, 1991, "Welding Handbook," Vol. 2. pp. 747, pp. 672~763.
- (2) AWS, 1981, "Welding Handbook," Vol. 1, Fundamentals of Welding," 7th edition, Vol. 1, pp. 153~220.
- (3) Suh, C. M., Suh, D. Y. and Lee, D. J., 1995, "A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM55C Carbon Steel(1)," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 19, No. 4, pp. 918~928.
- (4) Suh, C. M., Suh, D. Y. and Lee, D. J., 1995, "A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM55C Carbon Steel(2)," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 19, No. 4, pp. 929~940.
- (5) Tsuchiya, K. and Kawamura, H., 1996, "Mechanical Properties of Cu-Cr-Zr Alloy and SS316 Joints Fabricated by Friction Welding Method," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 233, No. 237, pp. 913~917.
- (6) Oh, S. K., Kong, Y. S., Yoo, I. J. and Kim, I. S., 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*, pp. 203~207.
- (7) Jeong, H. S. and Shinoda, T., 1997, "Fundamental and Basic Application of Friction Welding," *Journal of KWS*, Vol. 15, No. 6, pp. 1~12.
- (8) Kang, S. B. and Min, T. K., 1988, "A Study on the Friction Weldability of Carbon Steel(S45C) to Aluminum Alloy(A6063)," *Journal of KWS*, Vol. 16, No. 2, pp. 153~220.
- (9) Oh, S. K., Kim, B. A., Kim, S. J. and Nam S. H., 1988, "A Study on Friction Welding of SM45C to SCM4 Steel Bars and the Fatigue Properties," *Journal of KSOE*, Vol. 2, No. 2, pp. 312~321.
- (10) Cho, H. S. and Suh, S. J., 1997, "Friction Welding of Inconel 713C and SCM440," *Journal of KWS*, Vol. 15, No. 6, pp. 78~84.