

Optimization of Friction Welding Conditions for Production of Hose Nipple for Marine Transport

Dong-Gyu Kim*, Yeuk-Ran Kim** and Yu-Sik Kong**

*Specialized Graduate School Science & Technology Convergence, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

해양 수송용 호스니플 제작을 위한 마찰용접 조건의 최적화

김동규* · 김역란** · 공유식**

*부경대학교 과학기술융합전문대학원

**부경대학교 기계공학과

KEY WORDS: Friction welding 마찰용접, Post weld heat treatment(PWHT) 용접후열처리, As welded 마찰용접재, Base metal(BM) 모재, Heat affected zone(HAZ) 열영향부, Weld interface(WI) 용접계면, Welding condition 용접조건

ABSTRACT: In this study, for the tube-to-tube friction welding of hose nipple materials, the main parameters of friction welding were investigated using tensile tests, Vickers hardness surveys of the bond area (HAZ), and observations of the microstructure to increase the quality of friction welding based on visual examination. As-welded and post weld heat treated (PWHT) specimens were tested. The optimal welding conditions were found to be $n = 1000$ rpm, $HP = 10$ MPa, $UP = 15$ MPa, $HT = 9$ s, and $UT = 5$ s when the metal loss (Mo) was 7.5 mm. Furthermore, the peak of the hardness distribution of the friction welded joints could be eliminated by PWHT. Moreover, the two materials of the friction weld were thoroughly mixed with a well-combined structure of micro-particles, without any molten material, particle growth, or defects.

1. 서 론

마찰용접(Friction welding, FRW) (AWS, 1989; Irving, 1993; Jeong and Shinoda, 1997)은 동종재는 물론 가스용접, 저항용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법 적용이 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시킬 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 경제적인 면과 기술적인 면에서도 많은 장점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하면서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다(Kang and Min, 1998; Oh et al., 1988; Suh et al., 1995).

호스 니플(Hose nipple)이란 해양차량 등 수송기계의 유압 펌프에서 가압된 유체를 다양한 부품에 전달하는 유압 라인에서 고압 호스의 끝에 달려 커넥터 혹은 다른 지지대와 연결시키는 부품이다. 현재 해양 수송용 호스 니플을 제작하는 방법은 일체형 단조품 소재를 사용하여 선반 작업으로 내·외경 및 끝단

연결부를 가공하여 생산하고 있다. 현재 적용되고 있는 제작 과정은 재료의 손실이 많고, 형상이 복잡하여 내·외경 가공에 따른 가공 공정 수가 많기 때문에 소재 비용과 가공 시간이 많이 투입되고 있다. 예를 들면, 현재의 제작 공정을 이용하여 만든 호스 니플은 전체 소재 중에서 약 50% 이상이 내외부 가공시 잔해로 손실되고 있으며, 제작하는 시간 또한 많이 소요된다.

따라서 호스 니플의 제작 공정을 개선하기 위하여 파이프 혹은 중공 소재를 이용하여 이를 마찰용접으로 제작함으로써 가공 시간 및 소재의 손실을 최소화 하도록 제작공정을 개선하고자 한다. 더욱이 마찰용접법으로 호스 니플을 제작하게 되면 기존 대비 35% 이상의 소재비 감소뿐만 아니라 생산성 향상과 제품가격에 대한 경쟁력 확보가 가능하다는 보고도 제출되어 있다(Kong and Lee, 2013; Kong and Park, 2013).

본 연구에서는 호스 니플의 제작에 마찰용접을 적용할 경우, 요구되는 동종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 도출하기 위해 마찰용접재(As-welded)에 대한 용접변수와 용접품질과의 상관관계를 고찰하였다. 또한 용접후열처리(Post-weld heat treatment, PWHT)

Received 15 January 2016, revised 5 February 2016, accepted 16 February 2016

Corresponding author Yu-Sik Kong: +82-51-629-7818, kongys@pknu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

를 시행하여 마찰용접재와 경도 및 조직을 비교하여 용접후열처리의 효과도 고찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 기계구조용강재(SM20C)이다. SM20C는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, 주된 용도는 일반기계, 자동차, 항공기 등의 수송기계 부품에 주로 이용된다. Table 1에 SM20C의 기계적 성질을 표시하고 있다. 또한 마찰용접 후 용접부의 잔류응력 제거를 위해 용접후열처리(PWHT)를 시행하였다. 후열처리 조건은 20°C/min의 승온 속도로 가열하여 780°C에서 4시간 유지 후 노냉(Furnace cooling)하

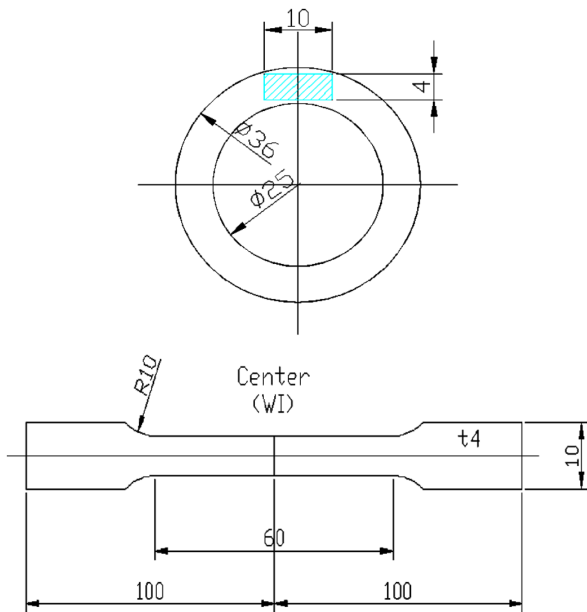
Table 1 Mechanical properties of SM20C

Tensile strength σ_t [MPa]	Yield strength σ_y [MPa]	Reduction of area ψ [%]	Elongation ϵ [%]	Hardness HV
490	320	37	17	150

Heat treatment conditions(PWHT): treatment(780°C/4h) → furnace cooling



(a) Specimen of O.D. 36 mm (I.D. 25 mm) tube-to-tube welded (L = 315 mm)



(b) Tensile test specimen of friction welded pipe (unit: mm)

Fig. 1 Tensile test specimen and cross section of friction welded pipe to make the specimen

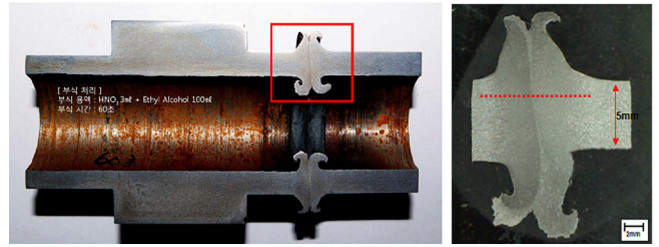


Fig. 2 Photograph showing section through friction welding specimen

였다. 이 조건은 A₁변태점 보다 높은 온도지만 Kong et al.(2010)의 동일한 조건으로서 경도 및 조직의 실험 결과를 비교하기 위한 기준으로 적용하였다.

마찰용접용 시편 형상은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 외경 36 mm×내경 25 mm, 길이는 용접계면을 기준으로 고정측은 205 mm, 회전측은 110 mm로 총 315 mm이다. Fig. 1(b)는 중공 봉 형태의 마찰용접 재료를 길이방향으로 절단하고 채취하여, 선삭가공 후 시편의 평행부를 사포로 1500번까지 연마한 KS규격(KS B0801) 14A호 인장 시험편의 모양이다.

또한 Fig. 2에 표시되어 있는 마찰용접부의 경도 및 조직을 조사하기 위하여 마찰용접재의 용접부위를 중심으로 관의 길이 방향으로 절단하였다. 절단 시 발생하는 열영향을 줄이기 위하여 방전가공 하였다.

2.2 실험장치 및 방법

마찰용접기(Model: FF-60 IIM-S1)는 Fig. 3에 나타난바와 같이 연속구동 브레이크형(Continuous drive brake type)이며, 마찰용접이 가능한 재료의 최대 직경은 회전축과 고정축이 각각 $\phi 60$ mm이다. 인장강도 시험기는 만능시험기(Model: KDMT-120)로서 인장속도는 2mm/min으로 각 모재 및 마찰용접재의 강도를 측정하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model: MVK-H1, Akashi)을 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g 및 하중시간 10sec이고, 0.5mm의 간격으로 용접계면으로부터 좌, 우 각각 9mm까지 측정하였다. 또한 마찰용접재와 후열



Fig. 3 Appearance of friction welding machine(Model: FF-60 II M-S1)

처리재의 현미경 조직을 관찰하기 위해 나이탈(Nital)용액 (HNO₃, 3mℓ+ethyl alcohol, 100mℓ)으로 2sec 동안 에칭하였고, 용접계면(Weld interface, WI), 열영향부(Heat affected zone, HAZ) 및 모재(Base metal, BM)를 각각 200배로 관찰하였다.

본 연구에 적용된 마찰용접의 변수는 회전속도(n), 가열압력 (HP), 업셋압력(UP), 가열시간(HT), 업셋시간(UT), 재료 손실량 (Mo)이다. 먼저 참고자료(Cho and Suh, 1997; Jeong and Shinoda, 1997; Kong and Ahn, 2012)를 바탕으로 본 연구에 적용 가능한 회전속도, 가열압력, 가열시간 등을 설정하였다. 그리고 마찰용접 변수가 재료 손실량(Mo)에 미치는 영향도 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰용접 변수

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수에서 먼저 참고자료(Kong et al., 2010; Kong and Park, 2013; Oh et al., 1988)를 기준하여 Table 2에서와 같이 1차적으로 회전속도(n), 업셋압력(UP) 및 업셋시간(UT)을 일정하게 설정한 후, 가열압력(HP)과 가열시간 (HT)의 변화(Table 2의 1번에서 9번까지의 실험조건)가 마찰용접재의 인장강도에 미치는 영향을 먼저 실험하였다. 그 결과로부터 가열압력(HP)에 대한 적정조건을 확립할 수 있었다. 2단계 실험(Table 2의 10번 실험조건)은 가열시간(HT)을 1초에서 17초까지 2초 간격으로 9가지로 변화시켜, 가열시간이 재료 손실량 (Mo)에 미치는 영향도 실험하였다.

Fig. 4는 Table 2의 9가지 실험조건의 마찰압력 변화(10, 15, 20 MPa)에 따른 마찰용접재의 인장강도를 표시하고 있다. Fig. 4에 표시되어 있는 바와 같이 Table 2의 1, 2 및 3번 조건 즉, $HP=10MPa$, $UP=10MPa$, $HT=5, 10, 15sec$, $UT=5sec$ 에 대한 마찰용접재의 인장강도가 498, 500, 536MPa로 나타났다. 이는 모재의 인장강도(490MPa)보다 증가하고 있으며, 적용된 마찰용접 시간도 모두 적정한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 가열압력을 증가시키면 인장강도가 감소되는 경향을 나타내며, 마찰용접재의 요구되는 인장강도에 마찰용접 시간도 영향을 미치고 있음

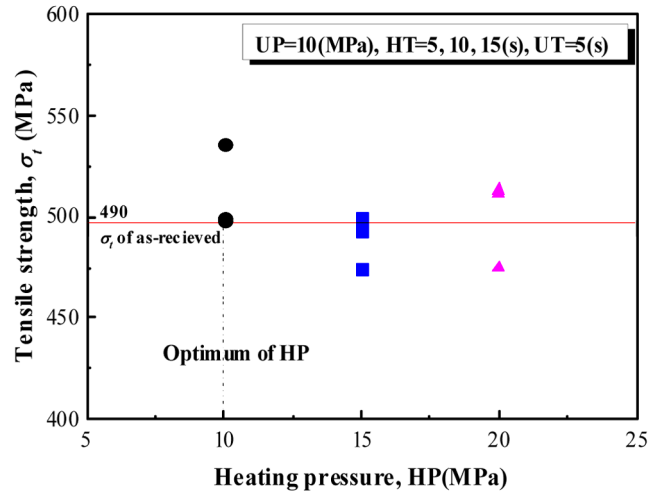


Fig. 4 Relationship between tensile strength and heating pressure of as-welded specimens

을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4의 가열압력과 마찰용접재의 인장강도와의 관계로부터 가열압력(HP)에 대한 최적조건을 10MPa로 설정할 수 있다. 한편, 업셋압력(UP)은 참고문헌(Kong and Lee, 2013; Kong and Park, 2013)의 소재별 압력비율에 의해 15MPa로 결정할 수 있으며, 이들 조건을 2단계 실험(Table 2의 10번 조건)에 적용하였다.

3.2 가열시간과 재료 손실량과의 상관성

Fig. 5는 Table 2의 2단계 실험(10번 조건)에서 얻어진 마찰용접재의 재료 손실량(Mo)과 가열시간(HT)과의 관계를 표시한 그림이다. 가열시간이 9초일 때 재료 손실량은 7.5mm이고, 가열시간이 최대인 17초일 때는 12.1mm로 측정되어 재료 손실량이 가장 크다. 그림에 표시되어 있는 바와 같이 가열시간이 증가할수록 재료 손실량(업셋량)이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

이로부터 알 수 있듯이, 재료 손실량과 가열시간 사이에는 강한 양(Positive)의 선형적인 상관관계가 있음이 확인되었다. 이는 다른 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형

Table 2 Similar friction welding conditions and the results

No.	Rotating speed, n [rpm]	Heating pressure, HP [MPa]	Upsetting pressure, UP [MPa]	Heating time, HT [sec]	Upsetting time, UT [sec]	Metal loss, Mo [mm]
1				5		3.3
2		10		10		7
3				15		10
4				5		3.5
5	1300	15	10	10	5	7.2
6				15		10
7				5		3.7
8		20		10		6.6
9				15		9.4
10	1000	10	15	1~17	5	0.5~11.7

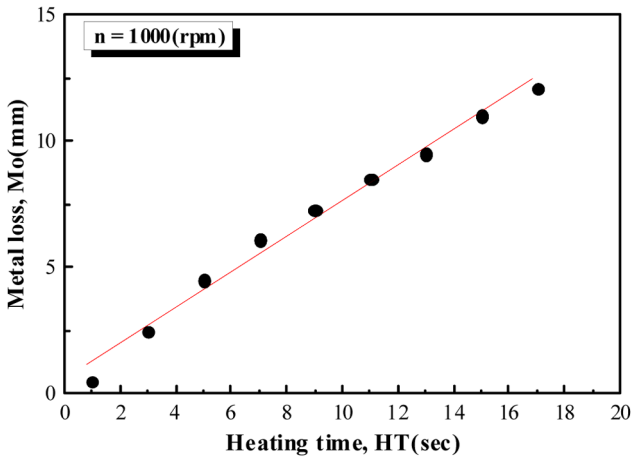


Fig. 5 Relationship between metal loss and heating time of as-welded specimens

적인 증가관계의 결과가 나타났으며, Fig. 5의 가열시간(HT)과 재료 손실량(Mo)에 대한 상관관계는 다음과 같은 직선회귀식이 성립되고 있다.

$$Mo(mm) = 0.7025HT(sec) + 0.99 \quad (R = 0.99) \quad (1)$$

여기서 R 은 상관계수(Coefficient of correlation)이며, 이 값이 1에 접근할수록 상관관계가 크다.

특히 연강의 경우 마찰용접재의 직경이 20mm 부근일 때 재료 손실량이 6~9mm가 적정하다는 연구결과가 보고되고 있다 (Kong et al., 2010; Lee et al., 2005; Oh et al., 1988). 따라서 마찰용접 과정에서의 업셋량을 조절하여 용접제품의 길이치수를 요구할 때 본 연구로부터 얻어진 식 (1)은 매우 유효하게 적용할 수 있다. 한편, 가열시간이 증가할수록 재료 손실량이 증가되는 이유는 마찰용접은 최종 공정이 외부 가압력에 의해 업셋(Upset)하는 공정을 통해 이루어지므로 가열시간 동안에 재료가 모재 밖으로 토출되어 플래시 형상으로 변화하면서 길이가 수축되기 때문이다. 이 때 모재의 길이는 용접전과 후가 다르게 되며, 이러한 용접 전후의 모재 길이의 차이를 재료 손실량(Metal loss)으로 정의한다.

3.3 가열시간과 기계적 성질과의 상관성

Fig. 6은 Table 2의 2단계 실험(10번 조건)에 대한 결과이며, 마찰용접재의 가열시간과 각종 강도와와의 관계를 표시하고 있다. 그림에 표시되어 있는 바와 같이 마찰용접재의 인장강도는 가열시간에 관계없이 모재의 인장강도(490MPa)의 약 90% 범위내로 나타났으며, 특히 가열시간 7sec와 9sec에서는 485MPa로 모재와 비슷한 결과를 얻었다. 또한 항복강도와 파단강도(Breaking strength)도 가열시간이 7sec 이상에서는 가열시간에 관계없이 모재와 비슷한 결과를 보였다.

Fig. 7은 마찰용접재의 가열시간과 연신율과의 관계를 나타낸다. 그림에서 가열시간이 가장 장시간인 17sec에서는 연신율이 14.4%로 모재에 비해 낮게 나타났으며, 이를 제외한 모든 가열

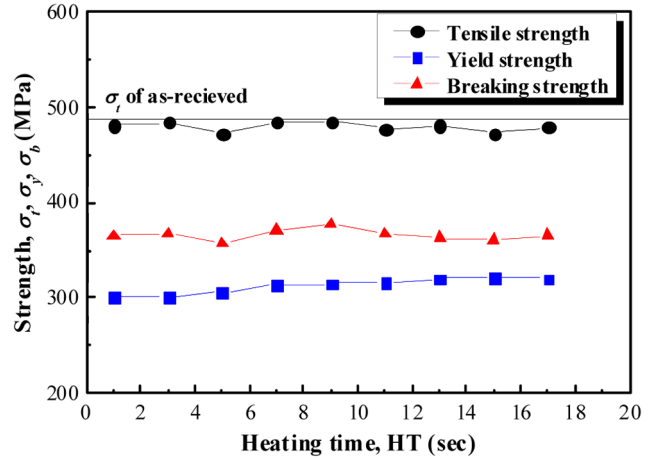


Fig. 6 Relationship between strength and heating time of as-welded specimens

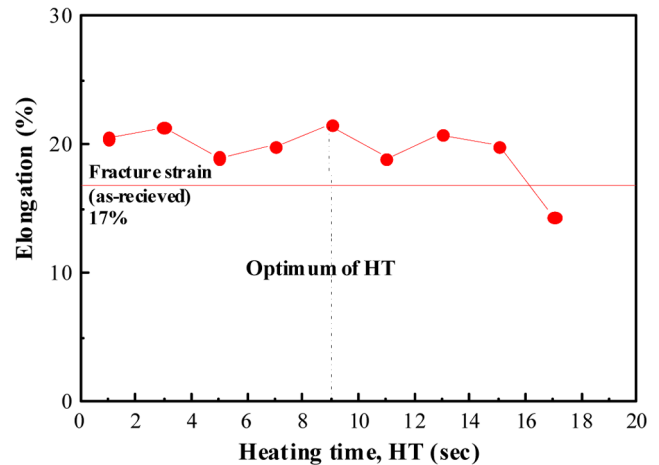


Fig. 7 Relationship between elongation and heating time of as-welded specimens

시간의 조건에서는 모재의 연신율(17%) 보다 높게 나타났다. 특히 가열시간이 9sec인 경우에는 연신율이 21.5%로 가장 높게 나타났다.

따라서 강도 및 연신율의 기계적 성질과 앞 절에서 재료 손실량(9초에서 7.5mm)의 결과 등을 고려해볼 때, 최적 가열시간은 9sec가 적합하다고 판단된다. 왜냐하면 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 작고, 연신율이 높으면 용접재의 취성 발생이 감소될 수 있을 것이다.

3.4 경도분포 및 조직관찰

마찰용접부의 경도 측정은 마이크로비커스 경도시험기를 사용하여 설정된 하중조건하에 0.5mm의 등간격으로 중심부와 원주부에 대하여 경도를 각각 측정하였다. 구체적인 경도 측정 위치는 다음과 같다. 마찰용접된 관의 길이 방향으로 절단 및 연마한 후, 용접계면 중에서 관의 중심으로부터 18mm 거리에 있는 원주방향의 내측부 용접계면(WI) 영역과 관의 중심으로부터 20mm 거리에 있는 원주방향의 외측부 용접계면 영역이다.

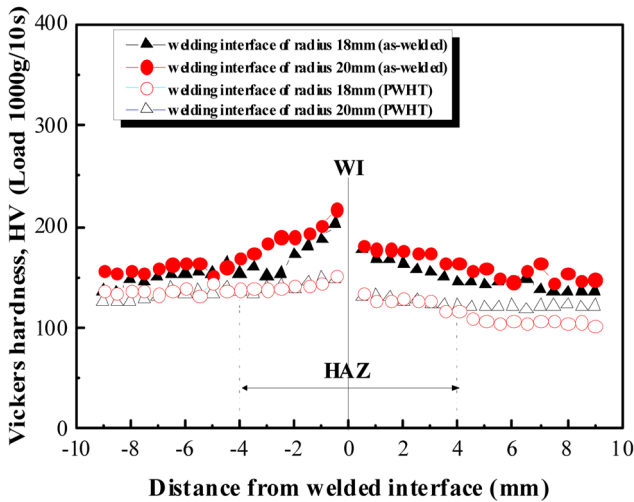


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of as-welded and PWHT specimens, welding conditions : $n = 1000$ rpm, $HP = 10$ MPa, $UP = 15$ MPa, $HT = 9$ sec, $UT = 5$ sec

Fig. 8은 마찰용접재와 후열처리재에 대한 각각의 경도분포를 표시하고 있다. 모재의 경도는 약 HV 150으로 나타나고 있다. 용접재의 경우, 용접계면을 포함한 열영향부의 경도는 약 HV 200으로서 모재보다 다소 높게 나타나고 있으며, 특히 용접계면에서는 약 HV 230으로 가장 높게 나타났다. 이는 용접계면에서 국부가열과 급냉 및 가공경화 효과 등에 의해 경도가 증가한 것으로 사료된다. 그러나 용접계면부 부근에 발생하는 경도 증가는 후열처리 실시에 의해 일반적으로 완화된다(Kong and Park, 2013; Mary and Jahazi, 2006).

Fig. 8의 오픈 스케터(Δ , \circ) 표시는 후열처리재에 대한 경도 분포를 표시하고 있다. 그림에서와 같이 용접부 부근에 발생한 경도증가 현상은 후열처리에 의해 모재의 경도값 이하(약 HV 130)로 완화됨을 알 수 있다. 이는 마찰용접시 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 제거되었음을 의미한다. 그리고 광학현미경 관찰과 경도분포에 근거하면 열영향부는 용접계면에서 좌우로 각각 4mm 정도인 것으로 판단된다. 또한 마찰용접된 관의 열영향부에서 관의 내경 부위와 외경 부위에 대한 각각의 경도분포가 거의 비슷하게 표시되고 있음을 알 수 있다. 이는 마찰용접 후 대기 중으로의 열방출에 의한 냉각속도가 중심부보다 원주부로 갈수록 증가하여 냉각속도가 증가하기 때문이다. 냉각속도는 미세조직변화에 영향을 미치며 냉각속도가 증가할수록 응고조직은 미세화 되고, 열처리성도 증가된다. 따라서 Fig. 8에 표시되어 있는 바와 같이 마찰용접 관의 용접영역 경도가 내경부보다 외경부의 경도가 약간 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 9는 본 연구에서 설정한 최적조건($n=1000$ rpm, $HP=10$ MPa, $UP=15$ MPa, $HT=9$ sec, $UT=5$ sec)에 대하여 마찰용접재(a, b, c)와 후열처리재(d, e, f)의 광학현미경 조직을 표시하고 있다. 먼저 나이탈 용액으로 에칭한 후(Kong et al., 2010), 용접계면(WI), 열영향부(HAZ) 및 모재(BM)를 각각 배율 200배로 관찰한 광학현미경 사진이다.

(a)는 마찰용접재의 용접계면부에 대한 광학현미경조직이며,

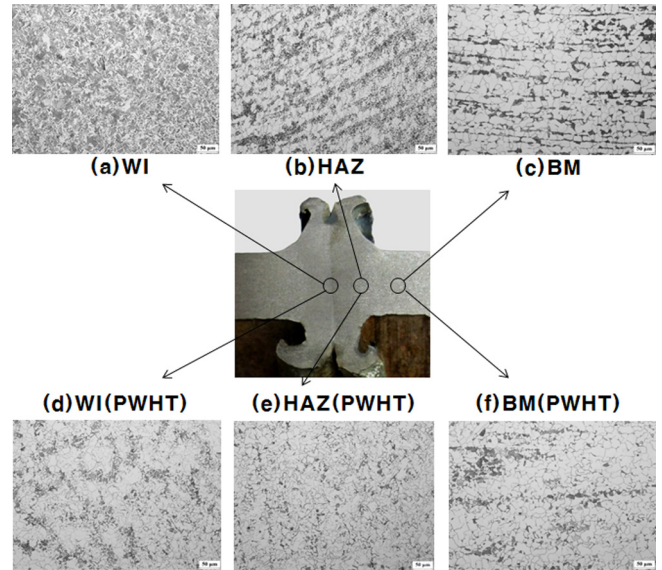


Fig. 9 Microstructures of as-welded and PWHT($\times 200$), welding conditions : $n = 1000$ rpm, $HP = 10$ MPa, $UP = 15$ MPa, $HT = 9$ sec, $UT = 5$ sec

급냉에 의해 침상 마르텐사이트(Lath martensite) 경화조직이 형성되고 있으며, (b)는 열영향부로서 용접 열에 의해 용융점 부근까지 급속 가열된 후 급냉됨에 따라 결정립이 미세해지고 모재 중 띠 형태의 퍼얼라이트(Pearlite)가 구상화된 형태로 출현되고 있다. (c)는 모재의 미세조직이며, 페라이트(Ferrite)와 퍼얼라이트가 밴드(Band) 형태를 형성하고 있다. 이것은 모재 중에 함유된 인 등과 같은 불순물 성분의 영향으로 탄소성분이 편석되기 때문이다.

(d)는 후열처리부의 용접계면, (e)는 열영향부 조직을 각각 나타낸다. 전반적으로 유사한 조직의 양상을 나타내고 있으며, 마찰용접부에 비해 후열처리부의 조직이 다소 조대화됨을 알 수 있다. (f)는 후열처리된 모재의 조직을 나타낸다. 열영향부의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 특히 후열처리한 모재의 조직은 마찰용접재의 모재에 비해 균질화가 많이 발생한 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 8의 경도 분포에서도 표시되어 있는 바와 같이 마찰용접재에 비해 후열처리재의 경도가 낮게 표시되는 이유는 후열처리에 의해 결정립 조대화 및 미세조직변화가 발생하여 연화되기 때문인 것으로 사료된다.

전체적으로 마찰용접재와 후열처리재의 거시 및 미시적으로 관찰한 결과 개재물이나 기공, 균열이 발견되지 않았으며, 마찰용접시 다양한 개재물 및 산화막이 플래시(Flash)로 토출되어 건전한 용접면의 접합이 가능하였다. 결과적으로 마찰용접재와 후열처리재의 마찰용접 계면에서도 두 재료가 강렬히 혼합된 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태를 알 수 있었다.

4. 결 론

해양차량 등 수송기계 분야에 사용되는 호스 니플의 제작공

정 개선을 위해서는 마찰용접 적용이 유리하며, 마찰용접 조건의 최적화를 위한 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최적 용접조건에서 용접부의 이음효율이 100%에 근접하게 나타났으며, 용접재의 강도 등 기계적 특성을 고려한 최적 조건은 회전속도 1000rpm, 가열압력 10MPa, 압셋압력 15MPa, 가열시간 9sec, 압셋시간 5sec, 재료손실량 7.5mm의 결과를 얻었다.

(2) 마찰용접부의 증가된 경도분포는 용접후열처리에 의해 모재의 경도 수준으로 완화되며, 이는 마찰용접 시에 발생한 잔류응력이 후열처리에 의해 제거되기 때문이다.

(3) 마찰용접재와 후열처리재의 거시 및 미시적으로 관찰한 결과 개재물이나 기공, 균열이 발견되지 않았으며, 마찰용접 계면에서도 개재물 및 산화막이 플래시로 토출되어 접합부가 건전한 상태의 조직을 형성하기 때문에 매우 양호한 접합상태가 됨을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014)에 의하여 연구되었음.

References

- American Welding Society (AWS) 1989. Recommended Practices for Friction Welding. ANSI/AWS C6. 1-89.
- Irvine, B., 1993. Sparks Begin to Fly in Nonconventional Friction Welding and Surfacing. *Welding Journal*, 72(5), 37-40.
- Cho, H.S., Suh, S.J., 1997. Friction Welding of Inconel 713C and SCM440. *Journal of KWS*, 15(6), 78-84.
- Jeong, H.S., Shinoda, T., 1997. Fundamental and Basic Application of Friction Welding. *Journal of KWS*, 15(6), 1-12.
- Kang, S.B., Min, T.K., 1998. A Study on the Friction Weldability of Carbon Steel(S45C) to Aluminum Alloy(A6063). *Journal of the Korean Welding Society*, 16(2), 57-63.
- Kong Y.S., Ahn, S.H., 2012. Optimization of Friction Welding for Motor Vehicle Safety Belts: Part 1-Mechanical Properties and Microstructure. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(1), 64-69.
- Kong Y.S., Lee, J.K., 2013. Application of Acoustic Emission Technique and Friction Welding for Excavator Hose Nipple. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 33(5), 436-442.
- Kong Y.S., Park, Y.W., 2013. Mechanical Property and Process Variables Optimization of Tube-to-Tube Friction Welding for Steel Pipe with 36mm External Diameter. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 33(5), 436-442.
- Kong, Y.S., Yoon, S.P., Kim, S.J., 2010. Mechanical Properties of Friction Welded SM45C-SF45 Joints for Automobile Reverse Idle Gear Shaft Applications. *Transactions of the KSME A*, 34(1), 85-90.
- Lee, B.S., Kong, Y.S., Kim, S.J., 2005. Dissimilar Friction Welding for Marine Shock Absorber Steels and its Evaluation by Acoustic Emission. 19(1), 44-48.
- Mary, C., Jahazi, M., 2006. Linear Friction Welding of IN718 Process Optimization and Microstructure Evolution. *Advanced Materials Research*, 15, 357-362.
- Oh, S.K., Kim, B.A., Kim, S.J., Nam, S.H., 1988. A Study on Friction Welding of SM45C to SCM4 Steel Bars and the Fatigue Properties. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2(2), 312-321.
- Suh, C.M., Suh, D.Y., Lee, D.J., 1995. A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM 55C Carbon Steel(1). *Transactions of the KSME A*, 19(4), 918-928.