후열처리에 따른 A105/A312 배관재의 이중 마찰용접 최적화

공 유 식* · 박 영 환*,†

*부경대학교 공과대학 기계공학과

Optimization of PWHT on Dissimilar Friction Welding for Piping Material of A105 to A312

Yu-Sik Kong*, and Young Whan Park*,†

*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

†Corresponding author : parkyw@pknu.ac.kr

(Received February 24, 2019 ; Revised April 8, 2019 ; Accepted April 15, 2019)

Abstract

A study on dissimilar friction welded joints were performed using 22 mm diameter tube-to-bar in forging bar steel(ASM A105) to stainless pipe steel(ASM A312) for piping materials. 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 HAZ, and macrostructure investigations. The specimens were tested as-welded and post-weld heat treated(PWHT). The tensile strength of the friction welded joints was increased up to 100 % of the A105 base metal under the condition of heating time(HT). Optimal welding conditions were $n=2,000$ rpm, $HP=50$ MPa, $UP=100$ MPa, $HT=5$ sec and $UT=10$ sec when the total metal loss(Mo) is 11 mm. 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. In addition, the results of the radiological examination(RT) showed that there was no blowhole in the friction welding area.

Key Words : Friction welding, As-welded, Post weld heat treatment(PWHT), Base metal(BM), Heat affected zone(HAZ), Weld interface(WI), Radiographic examination(RT)

1. 서 론

국내외적으로 각종 융합부품소재 및 공구류, 기계부품 등의 다양한 분야에서 복잡한 제품의 단순화를 위한 마찰용접(Friction welding)을 적용하는 연구가 진행되고 있다. 마찰용접은 융합부품소재 분야에서 제품의 제작에 필요한 공정수 감소, 이중 접합에 의한 생산원가의 절감, 신뢰성 높은 제품의 대량 생산 등의 접합수단으로 주로 적용되고 있다. 또한 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용하고 이중 마찰용접재의 강도특성 평가와 피로수명 향상 방안이 필요한 실정이다^{1,2)}.

또한 마찰용접은 동종재는 물론 가스용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에서는 곤란한 이중금속, 비철금속

까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며, 경제적인 면과 기술적인 측면에서도 많은 장점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이중금속의 용접에 많이 응용되고 있다^{3,4)}.

각종 배관재는 Fig. 1에서와 같이 일반적으로 단조품과 파이프를 용접 이음한 제품으로 적용되며, 일반 기업체에서만 년 평균 생산개수는 수십만개에 이른다. 한편 Fig. 1의 파이프와 플랜지 접합부의 가공이 난이하고 또한 접합부의 피로수명 저하 등의 문제점이 발생되기 때문에 이를 마찰용접으로 해결할 수 있다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 각종 배관재로 사용되는 A105

Fig. 1 Shape of piping materials for welded joint

단조재와 A312 스테인레스 파이프강재(ASTM 재료명칭)에 대한 이종 마찰용접을 수행하고, 최적 조건을 규명하기 위해 마찰용접 변수 등의 상호작용에 의한 마찰용접 품질의 상관관계를 고찰하고자 한다. 또한 마찰용접재(As-welded)와 후열처리재(PWHT)와의 강도특성 및 방사선투과시험(RT) 등을 고찰하였다.

2. 사용 재료 및 실험방법

2.1 사용 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 각종 플랜트용 배관재로 사용되는 A105 단조용 환봉재와 A312 스테인레스 파이프강재로써 국내 제품이다. A105 단조재는 각종 배관재의 플랜지 부분에 다양하게 사용되는 재료이며, A312 스테인레스 강재는 파이프 강재로서 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하다.

Fig. 2(a)는 마찰용접 시험편으로 좌측은 직경 21.5 mm의 A312 스테인레스 강재이며, 우측은 직경 22 mm의 A105 단조재이며, 소재의 길이는 각 150 mm로 적용하였다. Fig. 2(b)는 두 이종재료를 마찰용접 후열처리재의 형상을 나타낸다.

Table 1과 Table 2에 A105와 A312의 화학조성 및 기계적 성질을 각각 나타낸다. 또한, 마찰용접 후 용접부의 잔류응력 제거를 위해 A105 단조재를 기준으로 후열처리(PWHT)를 시행하였다. 후열처리 조건은 설정온도까지 140 °C/h로 가열하였고, 608~618 °C에서 35 분간 유지 후, 노냉(furnace cooling) 하였다.

Fig. 3(a)는 마찰용접 과정을 나타내고 있고, (b)는 가열시간 변화에 따른 9가지의 마찰용접재를 나타낸다.

(a) Friction welding specimens

(b) Post welded heat treatment specimens

Fig. 2 Shape of specimens

또한 (c)는 마찰용접부의 인장시험편을 나타내며, 이는 마찰용접부의 플래시 부위를 선반가공으로 제거 후 용접계면에서 좌우 30 mm씩 직경 20 mm로 가공하였다.

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 마찰용접기는 연속구동 브레이크

Table 1 Chemical compositions of materials (wt.%)

Mat.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
A105	0.35	0.20	0.6	0.035	0.04	0.3	0.12	0.4	0.4	Bal.
A312	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	16.0	2.0	10.0	0	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Mat.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area ϕ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness (HV)
A105	494	348	62	35	192
A312	760	332	-	54	176

Post weld heat treatment : annealing(608~618 °C×35min.)→furnace cool

(a) Friction welding specimens

(b) Appearance of finished goods of friction welds

(c) Tensile test specimen of welded

Fig. 3 Shape and dimension of specimens

형식(TH-25)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은 $\phi 25$ mm이고 고정축은 $\phi 40$ mm이다. 그리고 마찰용접부의 인장강도 시험기는 난능시험기(KDU-50)로서 인장속도는 2 mm/min으로 수행하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(HM-124)를 사용하였으며, 비커스 경도시험은 ASTM E384-05 규격⁶⁾에 준하여 경도시험을 수행하였고, 시험하중의 조건은 10 g, 가압시간 10 sec, 0.5 mm 등간격으로 측정하였다. 또한 방사선투과시험(RT)은 용착부의 건전성 확인을 위해 마찰용접재와 후열처리재의 각 9개 시험편을 각각 세 가지 방향으로 검사를 수행하였다. 시험장비는 880DELTA이며, 최대장전 허용 용량은 150Ci이다^{7,8)}.

마찰용접은 고온의 마찰 열원으로 접촉부분의 온도는 약 1300°C 정도이며, 접합부의 온도상승에 의해 소성유동이 발생하며, 이 때 마찰력을 이용하여 접합이 이루어진다. 또한 본 연구에 사용된 브레이크 방식은 재료의 한쪽을 우측의 고정축에 부착하고, 다른 재료 한쪽은 좌측의 회전축에 부착하여 일정한 회전수로 회전하여 축방향으로 가압하면서 두 재료를 마찰시키며, 마찰부가 적당한 온도로 가열되었을 때 브레이크에 의해 회전을 급정지 시키고 업셋하여 접합을 시행한다.

마찰용접의 변수로는 회전수(n), 마찰가열압력(HP), 업셋압력(UP), 마찰가열시간(HT), 업셋시간(UT) 등이다. 먼저 마찰용접의 압력 조건을 선정하기 위해 마찰용접기의 사용 설명서와 참고문헌⁹⁻¹²⁾을 통하여 여러 가지 조건으로 실험 후 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 결정하였으며, 이 조건에서 재료손실량(Mo)의 변화를 조사하였다. 또한 2단계 실험에서는 최적 압력조건에서 가열시간을 변화시켜 마찰용접 후 용접부의 강도 특성 등을 검토하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 강도특성

Fig. 4는 가열시간 변화에 따른 마찰용접재를 잔류응력 제거를 위한 후열처리(PWHT)를 시행하여 인장강도와 실험결과를 마찰용접재(As-welded)와 비교하여 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 가열시간 1초에서 9초의 인장강도는 A105 모재의 인장강도(494 MPa)에 비해 모든 조건에서 높게 나타났다. 가열시간 1초일 때 649 MPa, 5초일 때 596 MPa, 9초일 때 487 MPa로 가장 낮게 나타났다. 또한 항복강도의 결과도 인장강도 결과와 비슷한 경향으로 나타남을 확인하였다. 이는 강도적인 측면에서 고려하면 가열시간 변화는 모든 조건에서 100%

Fig. 4 Relationship between strength and heating time in the PWHT of A105 to A312

이상의 값으로 나타났다. 결과적으로 용접재에 비해 후열처리재의 인장강도는 5초에서 약 14% 낮게 나타났으며, 파단양상은 1-3초는 입열량이 다소 부족하여 용접계면에서 파단되었고, 5-9초는 열영향부의 A105쪽에서 나타났다. 따라서 강도적인 측면에서 고려할 때 가열시간이 6초 이상은 강도값이 낮아지는 경향이므로 가열시간 5초가 최적조건으로 판단된다.

Fig. 5는 마찰용접재와 후열처리재의 가열시간과 연신율과의 실험결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 후열처리재의 연신율은 모재의 연신율(35%)에 비해 전체적으로 낮게 나타났으며, 가열시간 1초를 제외하면 모든 조건에서 비슷한 경향으로 나타남을 알 수 있다. 가열시간 5초의 마찰용접재의 연신율은 48%, 후열처리재의 연신율은 13%로 나타났다. 따라서 후열처리시 용접품질(강도, 연성)이 되는 최적 조건의 범위는 대체적으로 넓게 나타났다.

Fig. 6은 마찰용접에서 압력변화에 따른 가열시간과 재료손실량과의 상관관계를 나타낸다. 가열압력과 업셋압력이 각각 50, 100 MPa, 업셋시간 10초에서 가열시간을 1초에서 9초까지 변화시켜 마찰용접을 수행한 결과이다. 그래프에서 보면 가열시간이 증가할수록 재료

Fig. 5 Relationship between elongation and heating time in the PWHT of A105 to A312

Fig. 6 Relationship between metal loss and heating time of A105 to A312 specimens

손실량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 타의 실험 결과에서도 일반적으로 가열시간과 재료손실량은 선형적인 관계로 나타나는 결과가 보고^{11,12)} 되고 있다.

한편, 재료손실량은 1초에서 4 mm, 5초에서 11 mm로 나타났고, 9초일 때 19 mm로 나타났다. 일반적으로 직경 20 mm 강재의 재료손실량은 10~15 mm로 보고^{11,12)} 되는 점을 감안하면 19 mm의 재료손실량은 비교적 손실량이 많으며, 따라서 7초 이상은 과잉 조건으로 판단된다. 결과적으로 마찰용접 과정에서의 압력량을 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 이 결과의 데이터를 이용할 수 있다.

3.2 경도분포

Fig. 7은 최적 마찰용접 조건에서 마찰용접재(As-welded)와 후열처리재(PWHT)의 경도분포를 비교하여 나타낸다. 경도측정은 마찰용접재와 동일 조건으로 0.5mm의 등간격으로 파이프 두께의 중간부에서 좌우 각 7mm

Fig. 7 Hardness distribution near the weld interface of As-welded & PWHT, welding condition : n=2000 (rpm), HP=50(MPa), UP=100(MPa), HT=5(sec), UT=10(sec)

까지 각각 측정하였다. 또한 용접계면 중에서 관의 중심으로부터 11mm 거리의 원주방향의 내측부 용접계면 영역이다.

Fig. 7의 경도분포에서 나타난 바와 같이 A105 모재의 경도는 약 HV 168, A312 모재의 경도는 약 HV 180으로 나타났다. 용접계면(Weld interface, WI)부에서 경도는 A105 측의 경도는 약 HV 148, A312 측의 경도는 약 HV 209로 나타났다. 특히 A312 플래시부의 경도 HV179, A105 플래시부의 경도 HV155로 나타났다. 열영향부(Heat affected zone, HAZ)는 용접계면에서 A312 측으로 약 4mm, A105 측으로 약 3mm로 총 7mm 정도인 것으로 판단된다. 이는 용접계면에서 국부가열과 급냉 및 가공경화 효과 등에 의해 경도의 변화가 큰 것으로 사료된다.

또한 용접후열처리를 시행하여 경도분포를 조사한 결과, 그림에서와 같이 A312의 경도값은 약간 상승하였고, 이에 비해 A105의 경도값은 전반적으로 낮은 수준으로 완화됨을 알 수 있다.

3.3 조직관찰

Fig. 8은 최적조건에서 마찰용접한 재료의 후열처리(PWHT)에 따른 현미경 조직을 나타내고 있다. 이를 위해 2%의 나이탈(nital) 용액으로 에칭(etching) 후 두 이종재의 용접계면(WI), 열영향부(HAZ) 및 모재부(BM)를 각각 200배로 확대하여 관찰하였다.

전반적으로 마찰용접재의 A105측 보다 A312측의 용접계면과 용접열영향부 조직에 탄화물형성이 다소 많이 나타나는 것은 마찰용접시의 고온가열에 의해 A312에 함유되어 있는 크롬(Cr)이 편석되어 있기 때문으로

Fig. 8 Macrostructures of PWHT (x200), welding condition : n=2000(rpm), HP=50(MPa), UP=100(MPa), HT= 5(sec), UT=10(sec)

사료된다⁵⁾. 또한 A105의 용접계면부에서 상대적으로 경도가 다소 낮게 나타나고 있다.

결과적으로 거시 및 미시적으로 두 이종재료의 접합부를 관찰한 결과, 어떤 계재물이나 기공, 균열 등이 발견되지 않았고, 이종금속간의 강렬히 혼합된 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 양호한 상태임을 알 수 있다.

3.4 방사선 투과시험

Fig. 9는 방사선투과시험(Radiographic examination, RT)의 결과 사진을 나타낸다. X선 및 감마선은 시험편을 투과하는 성질이 있는데, 투과하는 정도는 재료를 구성하는 원소와 두께에 따라 달라지며, 시험편 중에서 방사선의 흡수가 달라지면, 방사선 투과사진 상에 나타나며, 이것을 관찰함으로써 시험편 내부의 결합 유무를 탐지한다. 또한 방사선 및 필름을 이용하여 내부 결합의 실상을 검사하는 방법으로 재질 및 형상에 관계없이 내부 결합 검출에 적용된다.

Fig. 9(a)는 마찰용접재의 가열시간 5초의 조건에서 검사한 결과를 대표적으로 나타낸다. 표면 및 금속내부의 타당성과 기공(blowhole)의 흔적이 없음이 확인되었고, 모든 접합부에서 어떠한 결함의 흔적이 없고 이종금속의 용착이 우수한 것으로 판단된다. 또한 마찰용접시 발생하는 불순물이 파이프 내부로 도출되면서 플래시가 이음매 외부에 형성되었음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 9(b)는 후열처리재의 가열시간 5초의 조건에서 검사한 결과를 대표적으로 나타낸다. 9개의 시험편 표면 및 금속내부의 기공이나 결함이 검출되지 않았으며, 이종재 용착부에 변화가 없으며, 이는 계재물 및 산화막이 플래시로 도출되어 용착이 잘 되었음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 9 Results of RT tests in the as-welded & PWHT of A105 to A312, welding condition : n=2000(rpm), HP=50(MPa), UP=100(MPa), HT=5(sec), UT=10(sec)

4. 결 론

각종 배관재에 사용되는 A312관재와 A105단조재의 이종 마찰용접 후열처리에 대한 최적화의 결과는 다음과 같다.

1) 마찰용접 후열처리재의 이음효율이 대체로 100 % 이상으로 나타났으며, 후열처리재의 기계적 특성을 고려한 최적조건은 회전수 2000 rpm, 가열압력 50 MPa, 업셋 압력 100 MPa, 가열시간 5 sec, 업셋시간 10 sec, 재료손실량 11 mm의 결과로 나타났다.

2) 열영향부는 용접계면에서 좌우 약 7 mm 로 나타났으며, 후열처리에 대한 최적조건에서 마찰용접부의 미세조직을 관찰한 결과 두 이종재가 강렬히 혼합하여 계재물이나 기공, 균열 등이 없는 양호한 접합상태임을 확인할 수 있었다.

3) 방사선투과 시험에서 마찰용접부에 기공의 존재가 없었고, 후열처리재의 표면 및 접합부의 건전성에 있어 결함이 검출되지 않았다. 결과적으로 종전의 아크 용접법을 마찰용접법으로 생산하면 공정수 및 재료절감 등의 경제적 파급효과가 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음

ORCID: Yu Sik Kong: <https://orcid.org/0000-0003-1114-183X>

ORCID: Young Whan Park: <https://orcid.org/0000-0002-5280-2764>

References

1. L. Wenya and W. Feifan, Modeling of continuous drive friction welding of mild steel, *Materials Science and Engineering A*, 528 (2011), 5921-5926
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.001>
2. M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail, Advances in friction welding process: a review, *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (7), (2010), 534-558
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889550064>
3. G. S. Chander, G. M. Reddy and A. V. Rao, Influence of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar metal AISI 304-AISI 4140 continuous drive friction welds, *Journal of Iron and Steel Research*, 19 (10) (2012), 64-73
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60154-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60154-X)
4. H. S. Cho and S. J. Suh, Friction welding of Inconel 713C and SCM440, *Journal of KWJS*, 15 (6) (1997), 78-84
5. Y. S. Kong and S. H. Ahn, Optimization of friction welding for motor vehicle safety belts: mechanical properties and microstructure, *Journal of KSOE*, 26 (1) (2012), 64-69

- <https://dx.doi.org/10.5574/KSOE.2012.26.1.064>
6. ASTM, ASTM E384-05 standard test method for micro-indentation hardness of materials, *ASTM Standard*, (2005)
 7. S. K. Park, Y. S. Ahn and D. S. Gil, An assessment of the accuracy for digital radiography image, *Journal of KWJS*, 27 (2) (2009), 169-174
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.2.051>
 8. Y. Lee, Method of radiographic testing and industrial application, *Journal of KWJS*, 12 (4) (1994), 35-40
 9. B. H. Min, H. T. Lim and T. K. Min, A study on the friction welding for light piston-rod(SM45C/SM45C-pipe), *Journal of KWJS*, 26 (2) (2008), 157-163
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2008.26.2.055>
 10. Y. Byun, S. W. Lee, C. H. Park, J. T. Yeom, N. H. Kang and J. K. Hong, The effects of PWHT on tensile properties and microstructures for laser welds of Ti-6Al-4V alloys, *Journal of Welding and Joining*, 35 (4) (2017), 305-309
<https://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.4.1>
 11. Y. S. Kong and S. J. Kim, Mechanical properties of dissimilar friction welded steel bars in relation to post weld heat treatment, *Trans. of the KSME(A)*, 30 (4) (2006), 402-408
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2006.30.4.402>
 12. AWS, Welding Handbook-Vol1, Fundamentals of Welding, 7th edition, 1 (1981), 153-220