

# 해양 플랜트 배관용 이종 소재(A105-A312) 및 이종 형상 마찰용접의 용접 특성 분석에 대한 연구

공유식\*, 김태완\*\*, 곽재섭\*\*, 안용식\*\*\*, 박영환\*\*.#

\*국립부경대학교 링크플러스사업단, \*\*국립부경대학교 기계공학과, \*\*\*국립부경대학교 재료공학과

## A Study on Weld Characteristics Analysis of Dissimilar Material (A105-A312) and Shape Friction Welding for Marine Plant Piping

Yu-Sik Kong\*, Tae Wan Kim\*\*, Jae Seob Kwak\*\*, Yong Sik Ahn\*\*\*, Young Whan Park\*\*.#

\*Region Collaboration Center of LINC+, Pukyong National Univ.,

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ.,

\*\*\*Dept. of Material Science & Engineering, Pukyong National Univ.

(Received 12 November 2019; received in revised form 20 November 2019; accepted 31 December 2019)

### ABSTRACT

This paper studies the main parameters of tube-to-bar dissimilar material and shape friction welding for piping materials. The weldability of joint parts was investigated with respect to tensile tests, micro-Vickers hardness, the bond of area, and optical microstructure. The specimens are tested as-welded. Optimal welding conditions are  $n = 2000$  rpm,  $HP = 50$  MPa,  $UP = 100$  MPa,  $HT = 5$  sec, and  $UT = 10$  sec when the metal loss (Mo) is 11 mm. Moreover, the same two materials for friction welding are strongly mixed with a well-combined structure of micro-particles without any molten material, particle growth, or defects. Therefore, the expected result of dissimilar material friction welding includes a reduction of cost and material in the welding process.

**Key Words** : Dissimilar Friction Welding(이종 마찰용접), Piping Material(배관재), Tensile Strength(인장강도), Tube to Bar(관 대 봉), Metal Loss(재료손실량)

### 1. 서 론

각종 플랜트 산업에서 마찰용접법은 자동차, 항공기, 선박 등 수송기계 부품의 동종 및 이종 재료의 접합법이며, 타 용접법에 비해 접합성능이 우수하고 기계적인 측면과 경제적인 측면에서 많은 이점이 있다. 특히 마찰용접(Friction Welding)은 복잡

한 제품의 단순화에 따른 공정수의 감소, 생산원가의 절감을 위한 이종 마찰접합에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성 높은 제품을 대량생산하는 등의 접합수단으로 많이 이용되고 있다. 이에 마찰용접법에 대한 최적화 기술개발과 더불어 실용적인 신뢰성 있는 평가 기법의 개발이 요구되는 실정이다<sup>[1-3]</sup>. 또한 마찰용접은 가스용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에서는 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며, 그 사용 범위와 목적도 광범위하다.

# Corresponding Author : parkyw@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6148, Fax: +82-51-629-6126

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Shape of piping materials for welded joint

한편, 플랜트용 배관재는 고정을 위한 플랜지 부품의 단조재와 파이프재를 용접 이음한 형태의 제품이 일반적이며, 기업체 한 곳에서만 년 평균 생산개수는 수십만 개에 이르며, 그 대표적인 형상이 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이음부 접합법과 가공공정 등의 제작비 절감이 요구되는 실정이며, 또한 이음부의 피로파괴에 따른 수명 저하 등의 문제점으로 인한 경제적 손실이 우려된다<sup>[4,5]</sup>.

따라서 본 연구에서는 파이프와 및 플랜지 부품의 배관재로 사용되는 A312 스테인레스 파이프강재와 A105 단조재를 이중 마찰용접하여, 마찰용접 변수 등의 기계적 특성을 고려한 최적 조건을 실험적으로 규명하고자 한다.

## 2. 용접 재료 및 실험 방법

### 2.1 실험 재료 및 시험편

본 실험에 적용된 재료는 A105 단조재와 A312 스테인레스 파이프강재(ASTM 재료명칭)로서 국내 제품이다. A105 단조재는 각종 기계부품에 다양하

Table 1 Chemical composition of A105 and A312 steel (wt%)

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



Fig. 2 Shape of Friction welding specimens(unit: mm)

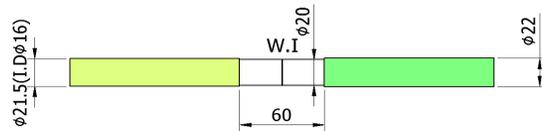


Fig. 3 Schematic shape of tensile test specimen of friction welded joints(unit: mm)

게 사용되는 재료이며, A312 스테인레스 강재는 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하다.

마찰용접 시험편은 Fig. 2와 같이, 좌측은 직경 21.5mm(내경 16mm)의 A312 스테인레스 파이프강재로, 시험편의 형상은 강재의 속이 비어있는 파이프 형상이다. 우측은 직경 22mm의 A105 단조재로서 이것은 솔리드의 봉형 소재이다. 각각의 이중 형상의 용접 실험 시험편 길이는 각 150mm로 적용하였다. 또한 실험에 사용된 재료의 화학조성 및 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타낸다. Fig. 3은 마찰용접부의 인장시험편을 나타내며, 접합부의 플래시(flash)를 선반가공으로 제거 후 용접계면(weld interface, W.I)에서 좌우 30mm씩 직경 20mm로 가공하여 인장시험을 수행하였다.

### 2.2 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에 사용된 마찰용접기는 연속구동 브레이크 형식(TOHO Controls Co. TH-25)이며, 용량은 최대 재료의 외경치수로 나타내며, 회전축은  $\phi 25$ mm이고 고정축은  $\phi 40$ mm이다. Fig. 4는 실제 마찰용접

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	A105	A312
Tensile strength, $\sigma_t$ (MPa)	494	760
Yield strength, $\sigma_y$ (MPa)	348	332
Reduction of area, $\phi$ (%)	62	-
Elongation, $\epsilon$ (%)	35	54
Hardness (HV)	192	176

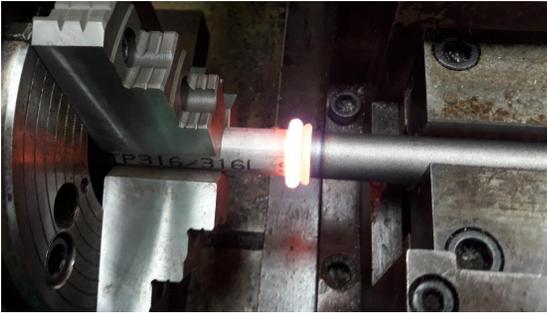


Fig. 4 Photo of friction welding experiment

을 수행하는 사진으로 그림의 왼쪽이 회전축, 오른쪽이 고정척이며, 마찰 가열 (Heating Process) 후 업셋 공정 (Upsetting Process)이 끝난 사진이다.

마찰용접부의 인장강도 시험에 사용된 인장 시험기는 만능시험기(SHIMADZU UH-F500kNX)로서 인장속도는 2mm/min으로 수행하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Mitutoyo HV-100)를 사용하였으며, 비커스 경도시험은 ASTM E384-05 규격(6)에 준하여 경도시험을 수행하였다. 시험하중의 조건은 10g, 가압시간 10sec, 0.5mm 등간격으로 측정하였다. 인장시험과 경도측정 및 조직검사는 한국인정기구(KOLAS)의 공인시험 결과이다.

마찰용접은 고온의 마찰 열원으로 접촉부분의 온도는 약 1300°C 정도이며, 접합부의 온도상승에 의해 소성 유동이 발생하며, 이 때 마찰력을 이용하여 접합이 이루어진다. 또한 본 연구에 사용된 브레이크 방식은 재료의 한쪽을 우측의 고정척에 부착하고, 다른 재료 한쪽은 좌측의 회전척에 부착하여 일정한 회전수로 가압하면서 두 재료를 마찰시키며, 마찰부가 적당한 온도로 가열되었을 때 브레이크에 의해 회전척을 급정지시키고 가압하여 접합을 시행한다<sup>2,3)</sup>.

Table 4는 연구에 사용된 마찰용접 변수와 용접 조건을 표시하였다. Table 4에서 마찰용접의 변수로는 회전수(rotating speed, n), 마찰가열압력(heating pressure, HP), 업셋압력(upsetting pressure, UP), 마찰가열시간(heating time, HT), 업셋시간(upsetting time, UT) 등이다. 먼저 마찰용접의 압력 조건을 선정하기 위해 마찰용접기의 사용 설명서, 참고문헌 및 예비실험<sup>4,5)</sup> 등을 통하여 여러 가지 조건으로 실험

Table 3 Friction welding parameters and experimental conditions

Ex. No.	n (rpm)	HP (MPa)	UP (MPa)	HT (sec)	UT (sec)
1	2000	10	20	5	5
2	2000	20	30	5	5
3	2000	30	60	5	5
4	2000	40	80	5	5
5	2000	50	100	5	5
6	2000	60	120	5	5
7	2000	50	100	1~9	10

후 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 결정하였고, 재료손실량(Mo)의 변화를 조사하였다. 그리고 2단계 실험에서는 최적 압력조건에서 가열시간을 변화시켜 마찰용접 후 용접부의 강도 특성 등을 검토하여 최적 가열시간을 규명하였다.

### 3. 마찰용접 실험 결과 및 특성 분석

#### 3.1 마찰 압력 변화에 따른 특성 분석

Table 3에서와 같이 1차적으로 가열시간(HT)과 업셋시간(UT)을 각 5초로 고정하고 가열압력(HP)과 업셋압력(UP)을 변화시켜 6가지 조건(1번-6번)으로 실험을 수행하였고, 그 결과 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 도출하였다. 그리고 2단계 실험(7번 조건)은 가열시간을 1초에서 9초까지 1초 간격으로 아홉종류의 조건으로 변화를 주어서 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 Table 3의 1~6번까지의 조건에서 압력변화에 따른 인장강도의 실험적인 결과를 나타낸다. 먼저 가열시간(HT)과 업셋시간(UT)을 각각 5초로 고정하고, 가열압력(HP)과 업셋압력(UP)을 변화시켜 실험을 수행하였다. 그래프에서와 같이 HP(UP)=10(20), 20(40)MPa의 인장강도는 230, 244MPa로 비교적 낮게 나타났고 용접계면에서 파단되었다. 반면에 HP=30, 40, 50, 60MPa의 인장시험 결과는 A105 모재의 인장강도(494MPa)에 비해 높게 나타났다. 특히 HP(UP)=40(80), 50(100)MPa의 인장강도

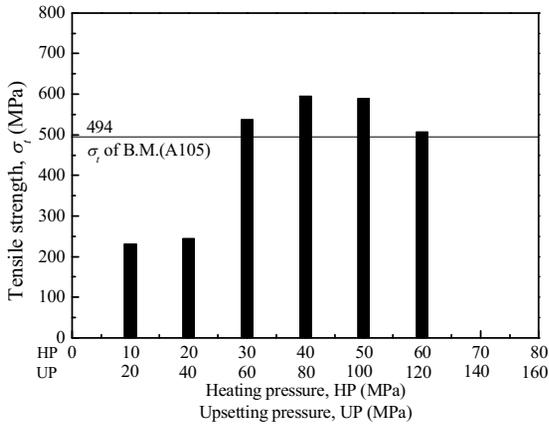


Fig. 5 Tensile strength of welded specimen according to HP and UP combination

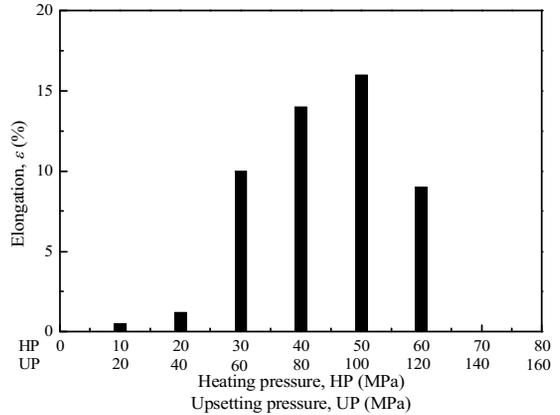


Fig. 7 Elongation of welded specimen according to HP and UP combination



Fig. 6 Fracture shape of tensile specimen  
(Condition : HP=50MPa and UP=100MPa)

가 596와 589MPa로 높게 나타났으며, HP(UP)=60(120)MPa의 인장강도는 508MPa로 낮아지는 경향으로 나타났다.

또한 HP(UP)=40(80), 50(100)MPa의 항복강도가 343, 363MPa이며, HP(UP)=50(100)MPa의 항복강도는 Table 2의 A105 모재의 항복강도(348MPa)에 비해 실험적으로 높게 나타났다. 이것은 용접부의 조직 변화에 의하여 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 HP(UP)=50(100)MPa의 조건에서 파단된 형상을 나타낸다. 압력의 조건의 비교적 낮은 HP(UP)=10(20), 20(40)MPa의 시험편은 용접계면에서 파단되었고, 나머지 4개의 시험편은 그림에서와

같이 두 이종재료의 인장강도가 비교적 낮은 A105 단조재의 용접계면측 열영향부에서 파단되었다. 이는 절단된 내부의 형상에서 보는 바와 같이 A105 단조재측 방향으로 업셋이 진행되었고, 파단시에 단면적이 적은 파이프의 단면적(A312) 편에서 파단되면서 찢어짐 현상이 발생되었다.

Fig. 7은 Table 3의 1~6번까지의 조건에서 압력변화와 연신율의 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 압력변화에 따라 연신율의 차이가 크게 나타나고 있다. 가열압력이 HP(UP)=10(20), 20(40)MPa를 제외한 다른 조건에서는 연신율이 10% 이상으로 나타났다. 이는 HP(UP)=10(20), 20(40)MPa의 조건은 적용 압력이 비교적 낮아서 입열량의 부족으로 Fig. 6의 파단양상과는 다르게 용접계면에서 파단되었다.

특히 가열압력 HP(UP)=50(100)MPa에서 연신율 16%로 가장 높게 나타났고, HP(UP)=60(120)MPa에서 급격히 낮아지는 경향으로 나타났다. 결과적으로 HP(UP)=50(100)MPa의 조건이 적정 조건으로 판단된다.

### 3.2 가열시간과 용접변수의 상관성

Fig. 8은 마찰용접재의 가열시간과 재료손실량과의 상관관계 결과를 나타낸다. 실험 조건은 업셋압력이 각각 50, 100MPa, 업셋시간 10초, 가열시간을 1초에서 9초까지 변화시켜 마찰용접을 수행한 결과

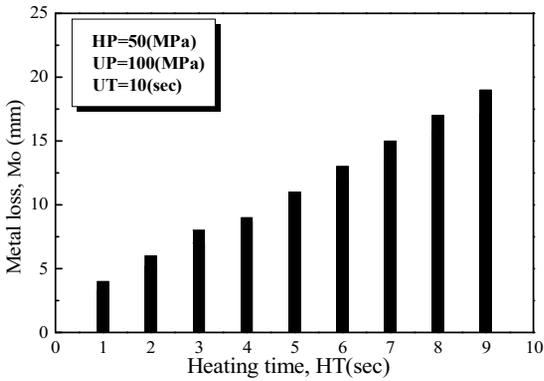


Fig. 8 Metal loss of welded specimen according to heating time

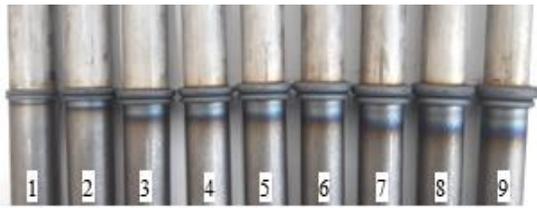


Fig. 9 Effect of heating time on shape of the friction welded flash

이다. 그래프에서 보면 가열시간이 증가할수록 재료손실량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 타의 실험결과에서도 일반적으로 가열시간(또는 가열압력)과 재료손실량의 사이에는 선형적인 관계를 나타내는 결과가 보고<sup>[7-9]</sup>되고 있다.

한편, 재료손실량은 1초에서 4mm, 5초에서 11mm로 나타났고, 7초일 때 15mm, 9초일 때 19mm로 나타났으며, 가열시간에 따른 재료손실량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 직경 20mm 강재의 재료손실량은 10~15mm로 보고<sup>[4,5]</sup>되는 점을 감안하면 19mm의 재료손실량은 비교적 손실량이 큰 편이며, 대체적으로 7초 이상은 과잉 조건으로 판단된다.

결과적으로 본 실험의 데이터는 마찰용접과정에서 업셋량을 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 매우 유용하게 이용할 수 있다.

Fig. 9는 가열압력과 업셋압력이 각 50, 100MPa, 업셋시간 10초에서 가열시간(1-9초)의 변화에 따른

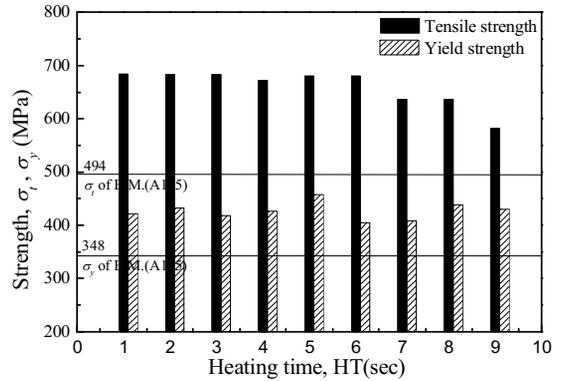


Fig. 10 Strength of welded specimen according to heating time

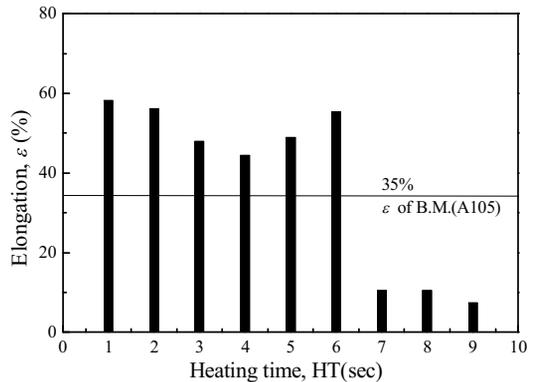
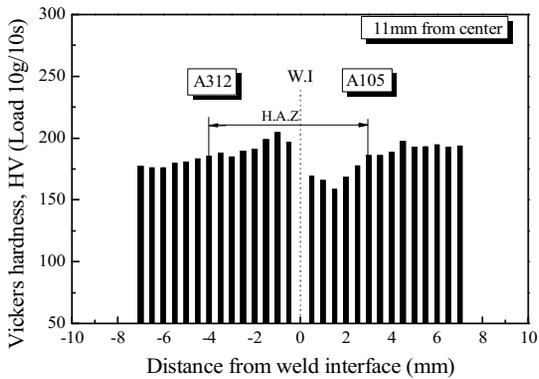


Fig. 11 Elongation of welded specimen according to heating time

플래시(flash)의 형상을 나타낸다. 즉, 가열시간이 증가하면 재료손실량도 증가하고 플래시 형상이 우산 모양으로 나타남을 알 수 있다. 이는 동일한 가열압력과 업셋압력에서 가열시간이 증가하면 재료의 표면상태, 온도구배, 표면온도와 속도의 급격한 변화에 따라 이와 같은 형상으로 플래시가 형성된다<sup>[7,8]</sup>.

Fig. 10은 가열시간 변화에 따른 인장강도 및 항복강도와와의 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 인장강도는 A105 모재의 인장강도(494MPa)에 비해 다소 높게 나타났으며, 가열시간 1초에서 6초의 결과는 680MPa 정도로 거의 일정하게 나타났고, 7초에서부터 인장강도치가 다소 낮아



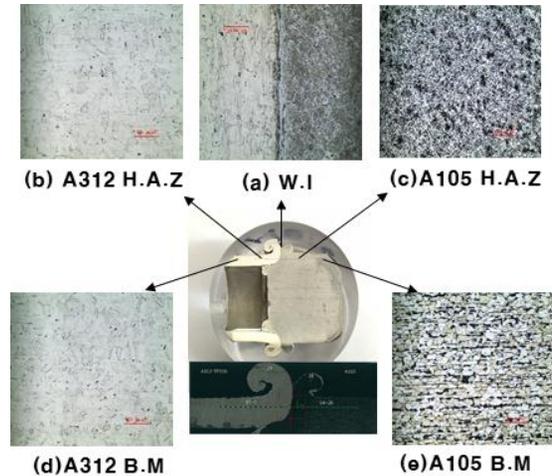
**Fig. 12 Hardness distribution near the weld interface**  
(welding condition : n=2000(rpm), HP=50 (MPa), UP=100(MPa), HT=5(sec), UT=10(sec))

지는 경향으로 나타났다. 특히 가열시간이 9초일 때 582MPa로 가장 낮게 나타났다.

그리고 항복강도(A105 모재의 항복강도 348MPa) 역시 인장강도 결과와 비슷한 경향으로 나타났으나 가열시간 5초에서 457MPa로 가장 높게 나타났고, 6초와 7초일 때 약 405MPa로 가장 낮게 나타났다. 하지만 강도적인 측면에서 고려하면 가열시간의 모든 조건에서 100%에 도달하는 결과이다.

이상의 결과에서와 같이 마찰용접시 건전한 접합이 되는 최적의 가열시간 범위는 4초에서 6초 사이로 판단된다.

Fig. 11은 가열시간과 연신율과의 실험 결과를 나타낸다. 가열시간 변화에 따라서 연신율의 결과가 뚜렷하게 구분되어 나타나고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 가열시간이 1초와 6초까지는 연신율 40% 이상으로 모재의 연신율(35%)에 비해 높은 결과로 나타났다. 반면에 가열시간이 7초 이상에서는 연신율이 10% 이하로 모재의 연신율보다도 낮게 나타났다. 또한 1초와 2초의 조건은 가열시간이 짧아 입열량의 부족으로 인한 재료손실량은 적게 나타났으나 파이프 내부의 플래시부의 용착과 가열에 따른 경화로 인하여 오히려 A105 단조재의 모재부에서 파단 되었다. 따라서 연신율은 모재에 비해 높게 나타났다. 특히 가열시간 6초에서 연신율 58%로 A105 모재의 연신율(35%)에 비해 가장 높게 나타났다.



**Fig. 13 Microstructure of friction welded joint**  
(welding condition : n=2000(rpm), HP=50 (MPa), UP=100(MPa), HT=5(sec), UT=10(sec))

따라서 강도적인 측면에 이어 연성적인 측면에서 고려해 볼 때 최적 가열시간은 5초가 적합하다고 판단되며, 7초는 5초와 6초에 비해 재료손실량이 많고, 또한 7초에서는 연신율이 급격히 저하되기 때문이다.

### 3.3 경도분포 및 조직 관찰

마찰용접부의 경도 측정은 마이크로비커스 경도 시험기를 사용하여 설정된 하중조건하에 0.5mm의 등간격으로 파이프 두께(A312 소재)의 중간부에서 좌우 각 7mm까지 각각 측정하였다. 구체적인 경도 측정 위치는 마찰용접부의 길이방향으로 절단 및 연마한 후, 마찰접합부를 기준으로 판의 중심에서 11mm 거리에 있는 원주방향의 내측부 용접계면 영역이다.

Fig. 12는 마찰용접부의 경도분포이며, A105 모재의 경도는 약 HV 192, A312 모재의 경도는 약 HV 176으로 나타났다. 용접계면(Weld interface, WI)부에서 A105 측의 경도는 약 HV 170, A312 측의 경도는 약 HV 196으로 나타났다. 특히 A312 플래시부의 경도 HV168, A105 플래시부의 경도 HV175로 나타났다. 열영향부(heat affected zone, HAZ)는 용접

계면에서 A312 측으로 약 4mm, A105 측으로 약 3mm로 총 7mm 정도인 것으로 판단된다. 이는 용접계면에서 국부가열과 급냉 및 가공경화 효과 등에 의해 경도의 변화의 차이가 나타났다<sup>[2]</sup>.

Fig. 13은 최적조건( $n=2000\text{rpm}$ ,  $HP=50\text{MPa}$ ,  $UP=100\text{MPa}$ ,  $HT=5\text{sec}$ ,  $UT=10\text{sec}$ )에 대하여 마찰용접계의 조직을 나타낸다. 먼저 나이탈 용액으로 에칭한 후, 용접계면(WI), 열영향부(HAZ) 및 모재(BM)를 각각 배율 200배로 관찰한 광학현미경 사진(Olympus STM-6)이며, 스케일은 빨간선으로 표기하였고, 이는  $100\mu\text{m}$ 를 의미한다.

그림에서 용접계면(weld interface, WI) 부근(a)에서 두 재료가 강렬히 혼합되어 계면의 형태가 잘 구분되어 나타났다. 이는 두 금속의 결정립이 재결정으로 인하여 더욱 미세화 되었기 때문이다. A105 모재부(c)는 펄라이트(pearlite) 조직으로 구성되어 있고, 열영향부(c)는 다소 미세한 결정립 구조를 보인다.

거시 및 미시적으로 관찰한 결과 개재물이나 기공, 균열이 발견되지 않았고, 마찰용접 계면에서도 개재물 및 산화막이 플래시로 토출되어 접합부가 건전한 상태의 조직을 형성하기 때문에 양호한 접합상태가 됨을 확인할 수 있었다<sup>[2]</sup>.

#### 4. 결 론

해양 플랜트 배관을 위한 중공형 파이프 A312 소재와 봉형의 단조 A312 소재의 마찰용접에 대한 특성 분석의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적 마찰용접조건에서 용접부의 이음효율이 100% 이상으로 나타났으며, 용접계의 강도 등의 기계적 특성을 고려한 최적조건은 회전수 2000rpm, 가열압력 50MPa, 엷압력 100MPa, 가열시간 5sec, 엷시간 10sec, 재료손실량 11mm의 결과를 얻었다.
2. 열영향부는 용접계면에서 좌우로 총 7mm로 나타났으며, 최적조건에서 마찰용접부의 미세조직을 관찰한 결과 두 이중재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 아주 양호한 접합상태임을 알 수 있었다.

3. 종전의 배관재 용접법에 대하여 마찰용접법을 적용할 경우에는 피로수명향상, 기계가공에 따른 공정수 및 재료절감 등의 경제적 과급효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 2019학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비와 2018년 부경대학교 링크플러스 사업단 산학연구과제의 지원에 의하여 연구되었음.

#### REFERENCES

1. Cho, H. S. and Suh, S. J., "Friction Welding of Inconel 713C and SCM440," Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, pp. 78-84, 1997.
2. Uday, M. B., Ahmad Fauzi, M. N., Zuhailawati, H. and Ismail, A. B., "Advances in Friction Welding Process: a Review," Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 15, No. 7, pp. 534-558, 2010.
3. American Welding Society, "Welding Handbook -Vol. 2," AWS, pp. 672-763, 1991.
4. Kong, Y. S., Yoon, S. P. and Kim, S. J., "Mechanical Properties of Friction Welded SM45C-SF45 Joints for Automobile Reverse Idle Gear Shaft Applications," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 34, No. 1, pp. 85-90, 2010.
5. Kong, Y. S. and Kim, S. J., "Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars in Relation to Post Weld Heat Treatment," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 30, No. 4, pp. 402-408, 2006.
6. ASTM, "ASTM E384-05 Standard Test method for Microindentation Hardness of Materials," ASTM Standard, 2005.
7. Chung, N. Y. and Park, C. H., "Establishment of Fracture Criterion on Friction Welded Dissimilar Materials," Transactions of the Korean Society of Automotive , Vol. 14, No. 5, pp. 164-171, 2006.