

## W92-Ni-Fe 소결툴을 이용한 Cu-Ni 합금의 용접부 미세조직과 경도 특성

윤태진 · 박상원<sup>a</sup> · 강명창<sup>a</sup> · 노중석<sup>b</sup> · 정성욱<sup>c</sup> · 강정윤\*

부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터(NCRC),

<sup>a</sup>부산대학교 융합학부, <sup>b</sup>태광테크 기술연구소

<sup>c</sup>대우조선해양 산업기술연구소 용접기술연구그룹

## Investigation for Microstructure and Hardness of Welded Zone of Cu-Ni Alloy using W92-Ni-Fe Sintering Tool

Tae-Jin Yoon, Sang-Won Park<sup>a</sup>, Myung-Chang Kang<sup>a</sup>, Joong-Suk Noh<sup>b</sup>,  
Sung-Wook Chung<sup>c</sup>, and Chung-Yun Kang\*

National Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University,  
San 30, Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea

<sup>a</sup>Pusan National Univ., Graduate School of Convergence Science, San 30, Jangjeon-Dong,  
Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea

<sup>b</sup>R&D Center, Taekwang Tech Co., LTD, 346-77 Hwasangongdan-gil, Chunbuk-myun,  
Kyoungju-si Kyoungsangbuk-do 780-872, Korea

<sup>c</sup>Welding Engineering R&D group, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd., 3370,  
Geoje-daero, Geoje-si, Gyeongsangnam-do 656-714, Korea

(Received June 1, 2015; Revised June 9, 2015; Accepted June 19, 2015)

---

**Abstract** In this study, the effect of the friction stir welding (FSW) was compared with that of the gas tungsten arc welding (GTAW) on the microstructure and microhardness of Cu-Ni alloy weldment. The weldment of 10 mm thickness was fabricated by FSW and GTAW, respectively. Both weldments were compared with each other by optical microstructure, microhardness test and grain size measurement. Results of this study suggest that the microhardness decreased from the base metal (BM) to the heat affected zone (HAZ) and increased at fusion zone (FZ) of GTAW and stir zone (SZ) of FSW. the minimum Hv value of both weldment was obtained at HAZ, respectively, which represents the softening zone, whereas Hv value of FSW weldment was little higher than that of GTAW weldment. These phenomena can be explained by the grain size difference between HAZs of each weldment. Grain size was increased at the HAZ during FSW and GTAW. Because FSW is a solid-state joining process obtaining the lower heat-input generated by rotating shoulder than heat generated in the arc of GTAW.

**Keywords:** Friction stir welding, Gas tungsten arc welding, Cu-Ni alloy, Microstructure, Micro hardness

---

### 1. 서 론

육상 및 근해에서의 신규유전 확보가 어려워지고, 석유 가격 상승에 따른 심해저 유전 개발이 확대됨에 따라 부유식원유생산저장하역설비(Floating Production Storage

& Offloading, FPSO) 시장이 급속히 성장하고 있다[1]. FPSO는 해저에서 에너지 자원을 탐사하고 시추하는 해양 플랫폼선 으로서 거의 모든 부분이 배관으로 이루어져 있으며, FPSO 1대에 약 7만개 이상의 파이프가 사용되고 있다. 조선 해양 분야 에서 사용되는 파이프의 소재는 강, 알

\*Corresponding Author: Chung-Yun Kang, TEL: +82-51-510-2428, FAX: +82-51-510-4457, E-mail: kangcy@pusan.ac.kr

루미늄, 동 등이 있다. 특히 해양플랜트 분야에서는 Cu-Ni 합금이 해수에 의한 충돌 부식과 탈 아연 부식이 일어나지 않으며 열전도성이 좋고, 저온 취성이 없기 때문에 주로 사용되고 있다[2]. 초기에는 Cu 70%-Ni 30%합금이 사용되었으나[3], 최근에는 내식성과 강도, 경제성이 우수한 Cu 90%-Ni 10%의 합금이 사용되고 있다.

Cu-Ni 합금 용접에는 ER Cu-Ni filler wire를 이용한 GTAW 방법이 주로 사용되고 있다[4]. GTAW 적용 시, 용접부와 HAZ에서 균열이 발생하는 것이 가장 큰 문제이다. 선행연구에서는 용접부와 HAZ에서 발생하는 균열의 종류를 용접부 내의 응고균열 (solidification cracking), HAZ 내의 액화균열 (liquation cracking) 그리고 다층용접 시 패스 간 용접 전 HAZ내에서 발생하는 연성저하균열(ductility-dip cracking) 3 가지로 보고하고 있다[5].

상기 3가지 균열이 발생하는 원인은 모재에 포함된 불순물 원소와 용접 중 발생하는 잔류응력 때문이라고 보고되고 있다. 따라서 크랙 발생을 억제하기 위하여 용접 시 불순물을 제거할 수 있는 청정용접 및 저입열 조건에서 용접이 가능한 용접프로세스가 필요하다[6].

한편 마찰교반용접은 비소모식 회전 툴을 피 용접재에 삽입한 후 툴과 피 용접재 사이에서 발생하는 마찰열에 의하여 연화된 재료가 프로브에 의하여 강제로 교반되어 용접이 되는 용접방법이다[7]. 이 때 용접부 온도는 피 용접재의 용점 이하 온도에서 고상 상태로 용접이 진행되기 때문에 기존 용융용접에서 발생하는 기공, 균열과 같은 응고 결함 발생을 방지할 수 있는 장점이 있다[8]. Cu-Ni 합금에 일반적으로 적용하고 있는 GTAW를 적용한 경우와 다른 용융용접을 하여 비교한 논문은 있으나[3], 고상용접인 마찰교반용접을 적용하여 비교한 연구는 한 편이 보고되었다. Lee 등은 Ni 코팅된 Cu-Ni 합금과 탄소강의 겹치

기 이음부에 마찰교반용접을 열원으로 사용하여 계면에 존재하는 Ni 원자의 확산을 유도하여 확산접합이 가능하다고 보고하였다[9]. 그러나 Lee의 연구는 마찰열을 열원으로 이용하여 확산접합을 한 연구이고, 재료의 소성유동에 의하여 용접이 된 것이 아니기 때문에 마찰교반용접의 원리와는 전혀 다르다[10]. 따라서 Cu-Ni 합금에 마찰교반용접이 적용된 연구는 전무하다.

본 연구에서는 Cu-Ni 합금의 맞대기 이음부에 GTAW와 FSW를 각각 적용하여 각각 용접부의 미세조직과 경도분포를 비교하고 차이가 나는 이유를 고찰 하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 재료는 두께 10 mm의 90Cu-10Ni 합금(Cu:Ni = 90:10 wt%; UNS C70600) 판재로, 합금조성 및 기계적 특성을 표 1에 나타내었다. 두 합금 판재는 맞대기 이음부로 gas-tungsten arc welding(GTAW)와 friction stir welding(FSW) 프로세스를 이용하여 각각 용접되었고, 두 용접법을 나타내는 모식도는 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 90Cu-10Ni 합금의 맞대기 이음부에 GTAW를 적용할 경우, 맞대기 이음부는 V 형상으로 개선하고 모재와 다른 합금성분의 70Cu-30Ni 합금(Cu:Ni = 70:30 wt%; UNS 71600)의 용가재를 이용하여 다층용접을 한다고 알려져 있고, 본 연구에서도 같은 방법으로 용접하였다. 한편 FSW는 별도의 용가재가 필요 없지만, 재료의 소성유동을 유도할 수 있는 툴이 필요하다. 사용된 툴은 솔더의 직경 22 mm, 프로브의 직경 8 mm, 프로브의 길이 5.5 mm 크기의 W92-Ni-Fe 합금이 사용되었다. 툴의 회전속도는 600 rpm, 용접속도는 200 mm/min이며, 툴의 전진각은 0°로 용접을 하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of wrought CuNi 90/10[3]

Elements	Cu	Ni	Mn	Fe	Pb	Zn	Others	T.S (MPa)	Y.S (MPa)	E.L (%)
Wt(%)	Bal.	9-11	1.0	1.0-1.8	0.05	1.0	0.5	338	125	20

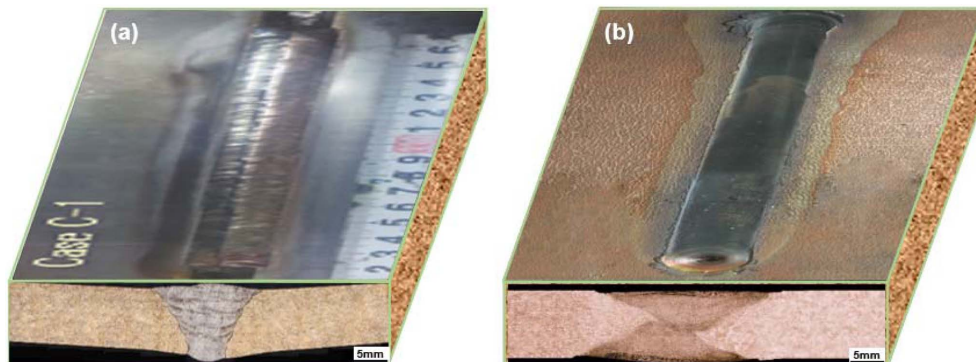


Fig. 1. Comparison of bead appearance and cross section of (a) GTAW and (b) FSW.

GTAW와 FSW 후 시험편은 용접 방향과 수직방향으로 절단한 후 그 단면의 미세조직을 관찰하였다. 미세조직은 단면을 1 μm 폴리싱 한 후 증류수 80 ml, 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 5 ml, 중크롬산 칼륨(potassium dichromate) 10 g를 혼합한 에칭액에 수 초간 담구어 에칭한 후 광학현미경(optical microscopy; OM)으로 관찰하였다. 각각의 용접부의 경도 분포를 알아보기 위하여 미세조직 관찰 위치와 동일한 영역의 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 경도는 용접부 표면으로부터 0.5 mm 아래 부분에서 GTAW의 용접부와 FSW의 교반부를 시작으로 모재까지 하중 200 g, 압입 시간 10초로 하여 1 mm 간격으로 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 경도 분포를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 용접 프로세스에 따른 결함발생 유무 및 변형도 비교

그림 1(a)와 (b)는 Cu-Ni 합금 GTAW와 FSW 후 시편 표면의 사진과 단면의 OM사진을 3차원 화하여 각각 나타낸 것이다. 그림 1(a)의 GTAW 용접부 표면사진으로부터 용접 후 비드 표면은 은색의 미려한 비드를 나타내었고, 표면결함은 발생하지 않았다. 단면사진으로부터 표면 비드와 이면 비드가 볼록한 형상의 안정적인 용접부가 나타났으며 기공과 균열 등의 내부 결함이 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

그림 1(b)의 FSW 용접부 표면사진으로부터 비드 표면은 모재 보다 어두운 색으로 변색되었지만, 플래쉬(Flash)와 표면 균열(insufficient crack) 등 표면결함은 발생하지 않았다. 단면사진으로부터 모재와 같은 높이의 비드를 나타냈으며 키싱본드(Kissing bond)와 보이드(Void)[11] 등의 내부 결함이 발생하지 않았다.

한편 GTAW 용접 후 시험편은 용접부를 중심으로 양쪽의 모재가 두께 방향으로 변형되었고, 시험편이 V자 형상으로 변형된 것을 알 수 있다. FSW 용접 후 시험편은 모재형상과 차이가 거의 없는 것을 알 수 있고, 이것으로부터 Cu-Ni 합금에 FSW를 적용할 경우 변형이 없는 용접부를 얻을 수 있다.

Cu-Ni 합금에 GTAW와 FSW 적용 시 용접 프로세스에 따른 용접 시편의 변형도를 측정하기 위하여 변형된 형상을 모식도로 정의하였고, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 각 용접시편의 변형율을 측정하기 위하여 그림 2(a), (b)와 같이 변형된 시험편의 한 쪽 면을 바닥에 고정시킨 후 고정된 반대쪽에서 바닥으로부터 떨어진 시편의 높이를 측정하였다. 그림 3는 그림 2(a), (b)에서 정의한 방법으로 용접 프로세스에 따른 시편의 변형율을 정량화한 결과이다. 여기서 변형율은 모재 두께 대비 시편의 변형된 높이

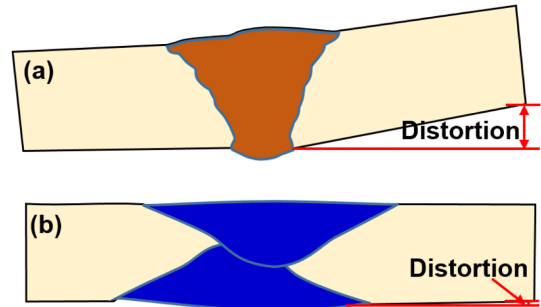


Fig. 2. Illustration for weld distortion of (a) GTAW and (b) FSW.

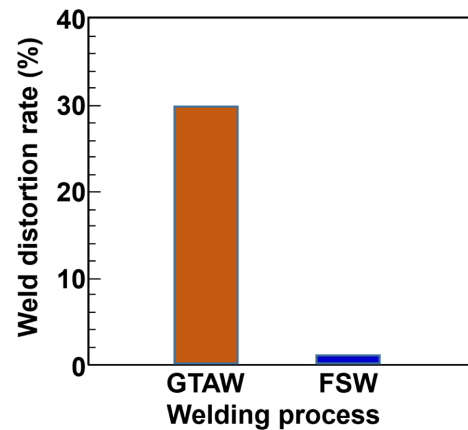


Fig. 3. Comparison for weld distortion of GTAW and FSW specimens.

로 계산되었다. 용접 후 시편의 변형율은 GTAW의 경우 모재대비 약 30%로 매우 컸고, FSW의 경우 약 1% 이하로 모재와 차이가 거의 없었다.

#### 3.2. 용접 프로세스에 따른 용접부 경도분포 비교

GTAW, FSW 용접 후 경도분포를 알기 위하여 용접부의 각 영역별 경도를 측정하여 보았다. 각각의 용접 프로세스에 따른 용접부 경도분포를 조사하기 위하여 GTAW, FSW 용접시편의 표면에서 500 μm 아래영역의 용접부 중심에서부터 모재까지 마이크로 비커스 경도를 측정하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

한편 용융용접인 GTAW와 고상용접인 FSW는 용접영역이 분류되는 것이 다르다. 일반적으로 GTAW와 같은 용융용접인 경우 용접부 영역은 모재(Base met-al: BM), 열영향부(Heat affected zone: HAZ), 용융부(Fuzion zone: FZ)로 구분된다. 반면 고상용접인 FSW의 경우 용접부 영역은 모재, 열영향부(Heat affected zone: HAZ), 열-기계적영향부(Thermo-mechanical affected zone: TMAZ), 교반부(Stir zo-:ne: SZ)로 구분되며, 교반부와 TMAZ가 나타나는 것이 특징이다[7]. 따라서 그림 4에 GTAW의 용접 영역은 표 하부 (◆)에 FSW의 용접영역은 표 상부 (■)에 따

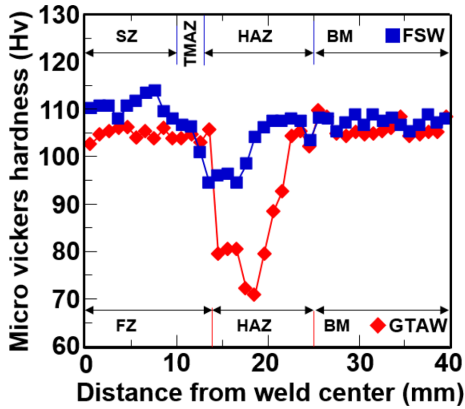


Fig. 4. Micro-vickers hardness of GTAW and FSW.

로 표기하였고, 그 영역에 해당하는 경도값을 나타하였다.

이것으로부터 두 용접 프로세스 모두 HAZ 영역에서 연화부 (Softening zone) 가 발생한 것을 알 수 있다. 또한 FSW를 적용한 용접시편의 HAZ 영역 경도값이 GTAW를 적용한 용접시편의 HAZ 영역 경도값 보다 더 높았고, 연화부의 폭도 좁은 것을 알 수 있다. 또한 용접부에서는 FSW 용접부 경도값이 GTAW 용접부 보다 약간 높은 것을 알 수 있다.

3.3. 용접 프로세스에 따른 용접부 경도분포와 미세조직과의 상관관계

그림 5(a)는 GTAW 용접부의 경도변화에 따른 미세조직

의 상관관계를 알아보기 위하여 GTAW 용접시편을 용접금속 중심영역에서부터 열영향부를 지나 모재영역까지 광학현미경으로 촬영한 연속사진과 모재(그림 5의 P영역), 모재 보다 경도값이 낮아지는 HAZ(그림 5의 Q영역), 최저 경도값을 나타내는 용융경계부(Bond line) 근처의 HAZ(그림 5의 R영역) 그리고 용융부 영역의(그림 5의 S영역) 확대사진을 각각 그림 5(b), (c) 그리고 (d)에 나타낸 것이다. 이것으로부터 모재조직은  $\alpha$  고용체 결정립 내부에 쌍정(Twin) 이 존재하는 것을 알 수 있다. Cu-Ni 합금은 냉간가공 후 850-950°C에서 어닐링(Annealing) 처리를 하여 제작하기 때문에 발생한 어닐링 쌍정(Annealing twin)이라고 생각된다.

한편 모재에서 용융부 쪽으로 갈수록 쌍정의 수는 줄어들고, 결정립이 커지는 경향이 있으며 용융경계부에 근접한 HAZ의 결정립 크기가 가장 커진 것을 알 수 있다. 따라서 용융경계부 근처의 HAZ 영역의 경도가 가장 낮은 것으로 생각된다. GTAW의 HAZ 영역은 아크의 영향을 직접적으로 받은 영역은 아니지만, 용접 하는 동안 용융금속 속에 접촉해 있으면서 국부적으로 가열된 후 냉각한 영역으로서 결정립이 조대화 되고 성질이 변한 영역이라고 알려져 있고, HAZ 영역 중에서도 용융부에 가까운 영역이 열을 더 많이 받아 결정립이 상대적으로 더 많이 성장한 것으로 생각된다. 한편 용융부에서는 응고조직인 덴드라이트(Dend-rite) 조직이 미세하게 생성된 것을 알 수 있고, 경

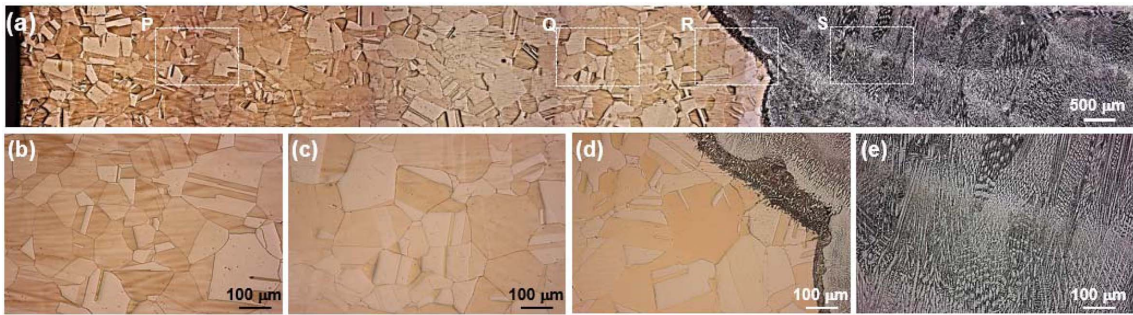


Fig. 5. (a) OM images of the GTAWed specimens cross section, magnified OM images : (b) base metal, (c) HAZ, (d) Hvmin HAZ and (e) Fusion zone.

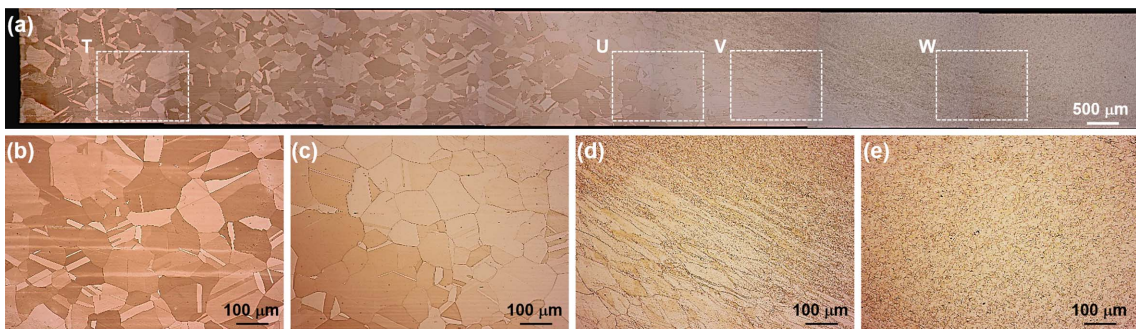


Fig. 6. (a) OM images of the FSWed specimens cross section, magnified OM images : (b) base metal, (c) Hvmin HAZ, (d) TMAZ and (e) Stir zone.

도값이 모재와 거의 같은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

FSW를 적용한 용접시편의 HAZ 영역 경도값이 GT-AW의 HAZ 영역보다 더 높은 것을 알기 위하여 FSW

용접 시험편의 용접부에서 모재까지 미세조직을 연속적으로 조사하여 보았다.

그림 6(a)는 FSW 용접시험편을 교반부 중심영역에서부터 TMAZ 와 HAZ를 지나 모재영역까지 광학현미경으로 촬영한 연속사진과 모재(그림 6의 T영역), 최저 경도값을 나타내는 HAZ(그림 6의 U영역), 모재보다 경도값이 증가하며, 최대경도값을 나타내는 TM-AZ(그림 6의 V영역) 그리고 교반부(그림 6의 W영역)영역의 확대사진을 각각 그림 6(b), (c) 그리고 (d)에 나타낸 것이다. 이것으로부터 HAZ의 결정립 크기가 모재보다 약간 큰 것을 알 수 있고, 따라서 HAZ의 경도값이 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

한편 교반부는 미세한 결정립이 나타나는 것을 알 수 있다. 교반부의 미세조직은 FSW 공정 중에 회전하는 틀에 의하여 발생된 응력(Strain)과 마찰열에 의하여 동적재결정이 발생하고, 이에 따라 수 마이크로미터의 등축정 형상으로 결정립이 초미세립화 되는 영역이기 때문에 경도값이 가장 높은 것으로 생각된다. 또한 TMAZ에서는 교반부에 바로 인접해 있는 소재가 틀의 회전력에 의하여 소성 변형이 일어나 연신된 결정조직이 관찰된다. TMAZ의 미세조직은 틀의 회전방향으로 연신되고, 틀의 마찰열에 의하여 국부적인 재결정이 동시에 일어나는 영역이다. 따라서 결정립이 국부적으로 연신되고, 재결정이 발생한 TMAZ 영역의 결정립 크기가 감소하기 때문에 경도값은 모재와 비슷하거나 모재보다 약간 상승하는 것으로 생각된다.

따라서 용접 프로세스와 각 영역별 결정립 크기를 측정하여 비교하여 보았다. 결정립 크기는 ASTM E-112의 결정립 크기 측정법을 이용하여 측정하였고, 식 (1)으로 나타낼 수 있다.

$$n = 2^{G-1} - 1 \quad (1)$$

여기서 G는 결정립 크기 넘버를 나타내고, 용접 프로세스 및 용접부의 영역별로 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 이것으로부터 용융용접인 GTAW 용접을 적용한 경우, 용융용접부에 인접한 HAZ 영역이 조대화된 결정립 때문에 경도값이 가장 낮은 것으로 생각된다. 한편 고상용접인

Table 2. ASTM grain size number at HAZ of FSW and GTAW

Specimens	G of base metal	G of HAZ
GTAW	7.2	5.8
FSW	7.2	6.3

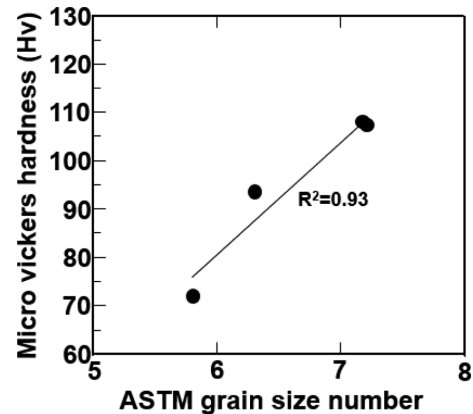


Fig. 7. Hall-petch Relationship between grain size and hardness.

FSW 용접을 적용한 경우 입열이 낮은 고상용접이기 때문에 HAZ 영역의 결정립이 조대화 되는 것을 방지할 수 있고, 회전하는 틀에 의하여 결정립이 연신되고 재결정되는 TMAZ 영역이 생기기 때문에 HAZ의 폭이 더 작아지는 것을 알 수 있다.

일반적으로 결정립 크기와 항복강도와의 상관관계는 Hall-petch 방정식[12, 13]으로 나타낼 수 있다. 이 방정식은 가공경화를 무시하는 경우 경도와 결정립 크기의 상관관계로 다시 나타낼 수 있고, 식 (2)와 같다 [14].

$$H_v = H_o + k_H d^{-1/2} \quad (2)$$

여기서  $H_v$ 는 경도값,  $H_o$ 와  $k_H$ 는 경도에 따른 상수,  $d$ 는 결정립의 크기를 나타낸다. 이 식을 이용하여 얻은 상관관계를 그림 7에 나타내었다. 이것으로부터 Hall-petch 방정식에 의하여 결정립 크기와 경도와의 상관관계는  $R^2$  값이 0.93로 높은 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

Cu-Ni 합금 맞대기 이음부에 GTAW와 FSW 용접법을 적용한 경우 용접프로세스에 따른 변형도, 경도분포와 미세조직과의 상관관계를 검토한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Cu-Ni 합금에 GTAW 용접 후 시편의 변형율은 모재 대비 약 30%로 매우 컸지만, FSW 용접 후 약 1% 이하로 변형이 없는 용접부를 얻을 수 있었다.
- 2) 두 용접 프로세스 모두 용접 시 열영향을 받은 HAZ 영역에서 최소경도값을 나타내는 연화부가 발생하였고, FSW 용접 시편 HAZ의 경도값이 상대적으로 더 높았다.
- 3) 회전하는 틀에 의하여 간접 가열된 FSW의 HAZ는 아크열에 의하여 가열된 GTAW의 HAZ에 비하여 가해지는 입열이 작고 결정립 성장을 억제하기 때문에 상대적으

로 경도가 높다.

### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단-글로벌프론티어사업(재) 하이브리드 인터페이스기반 미래소재연구단과 부분적으로 한국산업기술평가관리원 융복합소재부품개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2013M3A6B1078874).

### References

- [1] C. S. Dimbylow and R. J. C. Dawson, **46** (1978) 461.
- [2] M. S. Wiener and B. V. Salas: Corro. Eng. Sci. Tech., **40** (2005) 137.
- [3] H.-G. Seo and S.-T. Oh: J. Korean Powder Metall. Inst., **21** (2014) 34 (*Korean*).
- [4] S. H. Gutierrez: Weld J., (1991) 76.
- [5] M. G. Collins, J. C. Lippold and J. M. Kikel: Proc. of 6th International Trends in Welding Research Conference ASM International, (2003) 586.
- [6] S. A. Gavin, J. Billingham, J. P. Chubb and P. Hancock: Metals Tech., **5** (1978) 397.
- [7] R. S. Mishra and Z. Y. Ma: Mater. Sci. Eng. R., **50** (2005) 1.
- [8] T.-J. Yoon, M.-C. Kang and C.-Y. Kang: J. Korean Powder Metall. Inst., **20** (2013) 302 (*Korean*).
- [9] R. T. Lee, C. T. Liu, Y. C. Chiou and H. L. Chen: J. Mater. Process Tech., **213** (2013) 69.
- [10] T.-J. Yoon and C.-Y. Kang: Mater. Lett., **142** (2015) 253.
- [11] T.-J. Yoon, S.-J. Kim, S.-W. Song, J.-K. Hong and C.-Y. Kang: J. of KWJS, **29** (2011) 99 (*Korean*).
- [12] E.O. Hall: Proc. Phys Soc. B, **64** (1951) 747.
- [13] N. J. Petch: J. Iron. Steel Inst., **174** (1953) 25.
- [14] Tomotake Hirata, Taizo Oguri, Hideki Hagino, Tsutomu Tanaka, Sung Wook Chung, Yorinobu Takigawa and Kenji Higashi: Mater. Sci. Eng. A, **456** (2007) 344.