

## AE기법을 이용한 JLF/STS304이종재료의 최적 마찰용접조건에 관한 연구

### A Study on the Optimal Conditions of Friction Welding for JLF & STS304 Using AE Technique

윤한기\*, 이진경\*<sup>†</sup>, 이상필\*, 공유식\*\*

Han-Ki Yoon\*, Jin-Kyung Lee\*<sup>†</sup>, Sang-Pill Lee\* and Yu-Sik Kong\*\*

**초 록** 저방사화 페라이트강인 JLF는 핵융합로의 블랭킷과 같은 열교환기의 재료로써 유용한 재료이다. 이 재료의 광범위한 적용을 위해서는 JLF강과 다른 재료와의 접합기술의 개발이 중요하다. 최근 두 이종재료간의 접합에는 마찰용접이 많이 이용되고 있으며 본 연구에서도 JLF강과 STS304 간의 마찰용접에 의한 용접특성을 평가하였으며 특히 비파괴기법중의 하나인 음향방출 기법을 이용하여 두 이종재료간의 용접특성 및 최적의 용접조건을 평가하였다. 음향방출 파라미터중의 하나인 카운트와 사상수 등이 최적용접조건 및 용접품질을 평가하는데 유효한 파라미터들이었다.

**주요용어:** 저방사화 페라이트강, 열교환기, 블랭킷, 브레이징, 마찰용접, 음향방출

**Abstract** Japanese low activation ferritic steel(JLF) is a good material for the parts of heat exchanger such as blanket and diverter. At first, JLF was developed as a candidate for structural materials in nuclear fusion applications. However, the development of the jointing technique of JLF steel to other materials is important for wide applications of this material to the industry fields. Recently the jointing technologies including diffusion bonding, brazing, roll bonding, explosive bonding and hot iso-static pressing have been studied for the heterogeneous materials of JLF-1 steel(Fe-9Cr-2W-V-Ta) and stainless steel(STS304). Friction welding is one of the most popular welding methods for two different kinds of materials. In this paper, the JLF-1 steel was jointed to STS304 by friction welding method and the optimal conditions of the friction welding discussed. Acoustic emission was used as a nondestructive technique to evaluate the weld quality in processing.

**Keywords:** Japanese low activation ferritic(JLF), heat exchanger, blanket, brazing, friction welding, acoustic emission

#### 1. 서 론

저방사화 페라이트 마르텐사이트강은 오스테나이트

강에 비해 열팽창계수가 낮고, 열전도도가 우수하므로 핵 융합로 블랭킷(blanket)과 같은 열교환기 구조용 재료로 사용하기 위해서 개발 중에 있다.

저방사화 페라이트강은 Cr-Mo 내열강을 기본으로 한 합금강으로써 Mo을 W과 V으로 대체하여 핵융합로 구조물의 블랭킷, 제 1 벽 (first wall) 등으로서 사용하기에 적합하도록 기계적 성질과 방사화 특성 등의 성질을 개선한 재료이다[1-3]. 내열 Cr-Mo강에서 Mo을 W, V, Ti으로 대체하면 고온 인장강도, 피로강도 및 크리프 강도 등이 향상되고 특히 W은 고용강화 및 석출경화 효과를 동시에 나타내며, V과 Ti은 석출강화 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다[1-3]. 한편, Fe-Cr-W형의 9~12 wt% Cr을 함유한 저방사화 페라이트강은 동일 계열 중 600°C 이하 온도에서의 고온강도가 오스테나이트계(STS304, 316)에 비해 우수한 페라이트강계 재료로 JLF (Japanese low activation ferritic steel)라 명명하고 있다. 저방사화 페라이트 강(JLF)의 기본조성은 Fe - 0.1C - XCr - 2W - 0.2V - 0.07Ta - 0.05N으로서 Cr 함량은 2.25 wt%에서 12 wt% 사이에 있다.

그리고 오스테나이트계 STS 304는 고온재료로 많이 사용되고 있는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 최근 핵융합로 구조용 재료로도 이용되고 있으며 특성에 따라 사용부분이 제한화되고 있다. 따라서 부분적으로 JLF-1강과 STS304를 접합한 구조물의 불가피성도 대두되고 있으며 이러한 용접시 용접부의 성질이 모재와 유사하게 요구되고 있다.

한편 마찰용접은 컴퓨터로 제어되는 마찰열, 진공, 순간압접으로 두 용접계의 표면입자까지 철저히 접합시키기 때문에 접합부의 인장강도는 각모재(母材)보다 높게 된다. 그리고 동종재는 물론, CO2 용접, 저항용접, 전자빔용접 등 기존의 용접방식에는 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며 극히 스피디한 마찰공정으로 열의 영향을 받는 부분이 적다. 또한 굵기와 크기가 서로 다른 ROD+ROD, ROD+PIPE, PLATE+PIPE, PLATE+ROD 등 어떤 형태까지도 접합이 가능하게 되어, 과거 복잡한 형상 등의 이

유로 용접이 불가능했던 부품까지 마찰용접법을 이용, 효과적으로 생산할 수 있다는 많은 장점을 가지고 있기 때문에 각종 자동차 및 중장비 부품의 축, 그리고 공구류, 기계부품의 다양한 분야에 마찰용접이 적용되고 있다. 그러나 핵 융합로의 블랭킷으로 많이 이용 가능한 JLF-1강과 STS304 스테인리스강과의 마찰용접 최적화를 위한 연구는 거의 이루어지고 있지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 핵융합로 내부의 내식성을 위해 쓰이는 스테인리스강과 JLF-1의 이종금속간의 접합방법 중 가장 많이 사용하고 있는 마찰용접을 도입하였다[7,8]. 또한 JLF-1강과 STS304스테인리스강의 최적의 마찰용접 조건을 이끌어 내고, 음향방출기법을 이용하여 비파괴적으로 용접품질의 성능을 평가하고자 하였다. 용접변수인 회전수, 가열압력, 가열시간, 가압시간 등의 복합적인 요인에 의한 기계적 응력과 열적 응력의 결과에 따른 마찰용접의 품질(강도, 인성)을 음향방출기법에 의해 실시간에 평가하였으며, 이들 용접변수에 의한 강도 및 인성의 최적조건을 음향방출기법에 의해서 품질평가를 할 수 있는 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1. 재료 및 시험편

본 연구에 사용하고 있는 JLF-1 (9Cr-2W-V-Ta)는 9%의 Cr과 약 2%의 W를 함유하는 합금으로 높은 강도와 우수한 열적·전기적 전도성을 가지고 있다[4-6]. 스테인레스강(STS304)은 저탄소 스테인리스강으로 구조용 재료로 사용되며, 내식성이 뛰어나 원자로 내부의 부식을 방지하는 역할을 한다.

Table 1은 JLF-1강과 스테인레스강 (STS304)의 화학조성을 나타내었고, Table 2에는 JLF-1강의 기계적 특성과 STS304 스테인레스강의 기계적 특성을 나타내었다.

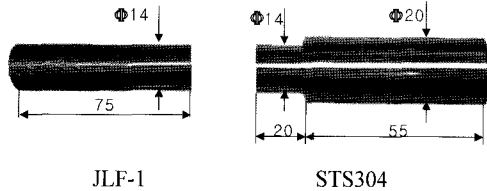
Table 1 Chemical composition of JLF-1 and STS304 steel (wt. %)

Composition Materials	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	W	V	N	B	Ni
JLF-1	0.10	0.05	0.45	0.003	0.002	0.003	8.85	1.99	0.20	0.0231	0.002	-
STS304	0.08	0.35	1.60	0.017	0.028	-	18.54	-	-	-	-	8.78

Table 2 Mechanical properties of JLF-1 and STS304 steel

Prop. Materials	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of Area (%)
JLF-1	622	461	27.9	81
STS304	728	491	38.5	79

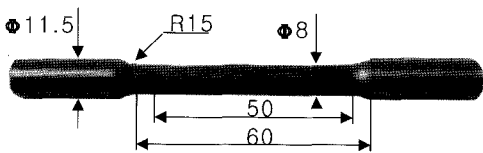
Fig. 1에서는 본 연구에 사용된 시험편의 규격을 나타낸 것으로 Fig. 1(a)는 마찰용접과 AE시험을 위한 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이며 Fig. 1(b)는 마찰용접이 완료된 시험편의 현상을 나타내고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 용접부 중앙에 둥근 형상의 용접흔적이 발생하며 이러한 흔적은 용접조건에 따라서 다양한 크기를 나타내었다. Fig. 1(c)는 마찰용접재의 용접부 인장강도, 인장흡수에너지, 연신률, 단면수축률을 측정하기 위하여 Fig. 1(b)의 용접된 시험편을 인장시험편으로 다시 가공한 형상을 나타낸다.



(a) Specimen for friction welding and AE test



(b) After friction welding



(c) Specimen for tensile test

Fig. 1 Shape and dimension of specimens

2.2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 이용된 마찰용접은 Fig. 2에 보여주는 바와 같이 재료를 회전부 유압척(hydraulic chuck)

에 설치하여 일정한 회전수로 회전시킬 때, 상대 재료 시험편은 고정부 유압실(hydraulic chamber)의 척에 고정 설치하고, 일정한 마찰 추력을 사용하여 재료를 밀어 접촉시킨다. 양측 재료의 접촉면은 축 방향의 일정 가압 압력에 의하여 일정시간동안 가열됨으로써 접촉점이 확대되어 재료의 길이 방향으로 열이 전도됨과 동시에 고온 영역이 발생하며, 고온 영역이 용접에 필요할 정도의 높은 온도(단조 온도 정도)로 확대될때 회전을 급정지시키고 동시에 축 방향의 일정 압력을 일정시간 동안 가하여 용접을 완료한다. 마찰용접은 고온의 마찰 열원을 사용하기 때문에 접촉면의 온도는 통상 1200~1300℃ 정도이고 접촉부에서는 온도 상승에 의하여 소성 유동이 일어나며, 이때 마찰 추력을 사용함으로써 용접이 이루어지는 것이다. 본 연구에 이용된 마찰용접기는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)을 사용하였으며 용량은 최대 취부 재료치수로서 회전축은  $\phi 25$ 이고 슬라이드축은  $\phi 40$ 이다. 마찰용접시 시험편에 마찰 및 압력이 가해지면 접촉면에서는 온도상승에 의해 소성 유동이 발생하며 이때 탄성파가 발생한다. 이때 발생한 탄성파는 슬라이드축과 연결된 가이드에 접촉되어 있는 AE 센서에 의해 감지된 후 프리앰프(Pre amplifier)에 의해 40dB 증폭된다. 이렇게 증폭된 신호는 AE 시스템(MISTRAS 2001)내에서 AE 사상수(event), 진폭(amplitude), 에너지(energy) 등의 AE 파라미터들로 분석된다. 사용된 AE 센서는 광대역(100~1200 kHz) 센서를 사용하였으며 잡음을 제거하기 위한 문턱 전압값(threshold level)은 35dB로 설정하였다. 특히 AE 센서를 직접 시험편에 부착할 수 없어 지름 14mm, 길이 150mm의 가이드를 이용하여 센서를 부착하였다.

마찰용접의 최적화 실험은 Fig. 1(a)에 나타난 JLF-1  $\phi 14$  mm 봉 대 STS304  $\phi 14$  mm 봉의 이중 재를 사용하여 마찰용접을 수행하였다. 이들 재료의 적정 마찰용접조건을 기존의 연구 결과[11,12]를

바탕으로 조사하여 마찰용접 실험은 회전수( $n$ ), 가열시간( $t_1$ ) 및 가압시간( $t_2$ )을 결정한 후, 마찰 가열압력( $P_1$ ), 단조 가압력( $P_2$ )을 계산하여 예비시험을 수행하여 용접조건을 선정하였다. 또한, 가압시간( $t_2$ )을 선택한 후에 가열시간( $t_1$ )을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시하였다. 최적 가열시간 및 이음부의 강도는 인장강도를 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정하여 결정하였다. 마찰용접한 용접재 JLF-1과 STS304를 선삭 가공하고 연삭한 후 Fig. 1(c)와 같은 시험편으로 제작하여 마찰용접부재의 접합강도를 평가하였다. 마찰용접부의 강도특성 평가를 위하여 만능재료시험기(MTS 810, 10 ton)기를 사용하였으며 인장시험의 변위 속도는 2mm/min으로 하였다. 그리고 용접부재의 과단면의 미세조직을 관찰하기 위하여 주사전자현미경을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 용접변수와 강도

마찰용접의 변수는 회전수( $n$ ), 마찰가열압력( $P_1$ ), 단조가압력( $P_2$ ), 마찰가열시간( $t_1$ ), 단조가압시간( $t_2$ ) 등이 고려되고 있다. 본 실험에서는 이중재 JLF-1 / STS304의 마찰용접을 위한 최적 가열압력  $P_1$ 과 최적 단조가압력  $P_2$ 를 결정하기 위하여 종래의 연구결과와 실험 데이터를 참고로 하여 마찰가열시간  $t_1=4$ s, 가압시간  $t_2=5$ s, 회전수  $n=2000$  rpm으로 일정하게 하고 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다. 먼저 마찰가열압력( $P_1$ ) 및 단조압력( $P_2$ )을 결정하기 위하여 Table 3과 같은 조건으로 예비시험을 한 결과 용접재 JLF-1 / STS304의 이음부 인장강도가 모재보다 높게 나타난  $P_1=80$  MPa,  $P_2=180$  MPa인 경우를 최적의 압력조건으로 결정하였다.

Fig. 4는  $P_1=80$  MPa,  $P_2=180$  MPa와 같은 조건에서 JLF-1과 STS304강을 마찰용접한 이중재 마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t$ (MPa)와 가열시간  $t_1$ (s)과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 용접부의 인장강도는 가열시간에 따라 다양한 값을 나타내고 있으며 특히 이중재 중 인장강도가 낮은 JLF-1( $\sigma_t=622$  MPa)보다 높은 인장강도값을 나타내는 가열시간 ( $t_1=1\sim3$ 초)의 시험편에 대하여 마찰가열최적시간(OhZ)으로 정하였다. 이때 인장강도( $\sigma_t$ )와 가열시간( $t_1$ )의 실험식은 데이터점으로부터 최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의해 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma_t = -0.54 t_1^2 - 1.08 t_1 + 638.6 \quad (1)$$

#### 3.2. 이중재 마찰용접의 최적화

JLF-1강과 STS304강의 이중재 마찰용접 최적화를 위하여 가열시간  $t_1$ 을 변수로 하여 이음효율이 모재보다 우수하게 되는  $t_1$ 의 범위를 정할 수 있었다. OhZ(optimum  $t_1$  zone) 보다  $t_1$ 이 너무 높으면 인장강도( $\sigma_t$ )가 낮아지며, 또한 이음효율이 훨씬 낮아진다. 따라서 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 강도와 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신률)의 영향을 고려할 필요성이 강조된다. 앞에서 언급한

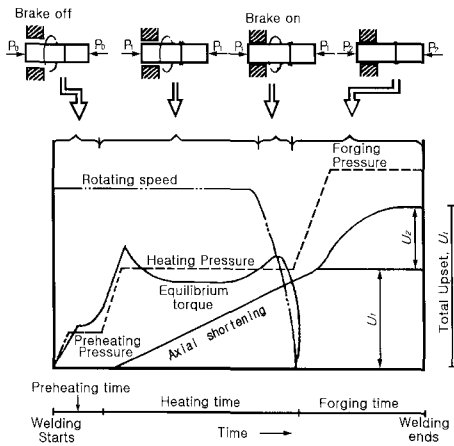


Fig. 2 Principle of continuous drive type friction welding process

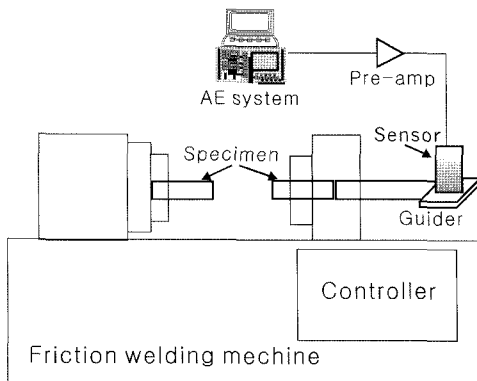


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

Table 3 Preliminary tests for the optimal pressure condition

Case	Rotating speed n(rpm)	Heating pressure $P_1$ (MPa)	Forging pressure $P_2$ (MPa)	Heating time $t_1$ (s)	Forging time $t_2$ (s)	Total upset $U_T$ (mm)
------	--------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

대한 AE 카운트가 3초 이전의 가열시간에 발생한 AE 신호의 카운트보다 훨씬 많이 발생함을 알 수 있다. 따라서 앞의 Fig. 6에서 언급한 바와 같이 AE 신호의 사상수와 카운트의 실험결과에서도 AE 사상수의 증가율보다도 AE 카운트의 증가율이 급격히 증가하는 결과를 보인 것도 이와 같이 발생한 AE 신호의 파형의 특성 때문인 것으로 사료된다. 따라서 JLF-1과 STS304의 마찰용접의 최적조건을 평가하기 위하여 위와 같이 파형과 주파수 특성을 비교함으로써도 평가할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 회전수 2000 rpm, 마찰가열압력  $P_1 = 80$  MPa, 단조가압력  $P_2 = 180$  MPa, 마찰가열시간  $t_1 = 2$  s, 단조가압시간  $t_2 = 5$  s의 최적 마찰용접 조건으로 JLF-1과 STS304를 마찰용접한 용접부의 열영향부와 모재와의 경계에서 파단된 인장시험편에 대한 파단면을 주사 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 나타낸다. 또한 JLF-1측의 파단면을 30배로 확대해서 각 부분별 1000배로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전형적인 소성변형에 의한 연성파괴인 덤플(dimple) 형상이 나타났다.

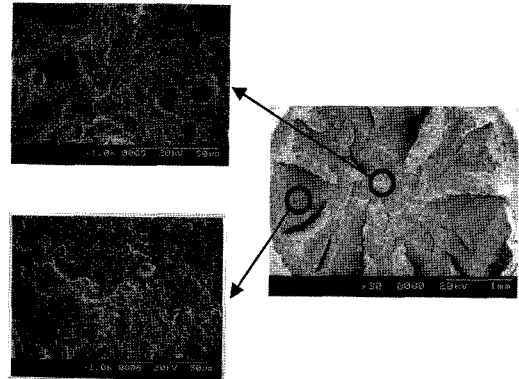


Fig. 10 Fractography of a surface fractured by tensile load in a dissimilar friction welded joint (JLF-1 & STS304) using SEM

4. 결 론

핵융합로용 블랭킷에 사용되는 JLF-1과 STS304의 이종재 마찰용접시 마찰용접 조건의 최적화와 AE 신호에 의한 최적용접조건에 대한 연구결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) JLF-1과 STS304의 마찰용접시 용접부의 이음효율이 모재보다 우수한 최적 마찰용접 조건은 회전수(n)=2,000 rpm, 마찰가열압력( $P_1$ )=80 MPa, 단조압력( $P_2$ )=180 MPa, 마찰가열시간( $t_1$ )=1~3 s, 단조시간( $t_2$ )=5 s이었다.
- (2) 마찰용접 실시간 중 측정된 AE신호의 사상수 및 누적카운트총량의 최적범위에서 마찰용접 이음효율이 가장 좋은 용접 품질을 얻을 수 있었으며 마찰용접시 AE에 의한 실시간 용접성 평가가 가능하였다.
- (3) JLF-1과 STS304의 마찰용접시 발생하는 AE 신호의 파형과 주파수 특성에서 최적용접조건인 1-3초의 가열시간에서는 완만한 돌발형 신호와 110kHz의 주파수 특성을 나타내며 3초 이상의 가열시간에서는 연속형 신호와 150kHz에서 가

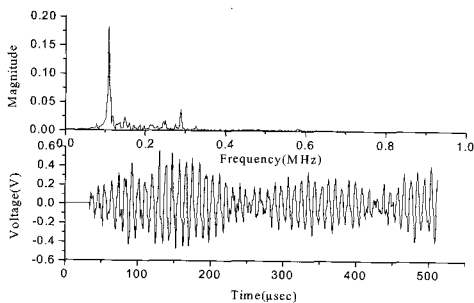
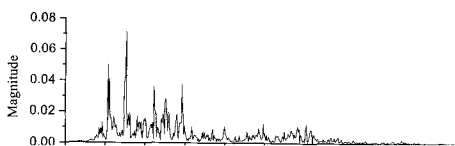


Fig. 8 Typical waveform and frequency spectrum at the beginning of fraction welding(low temperature)



연속형 형태의 파형이 발생함에 따라 카운트수가 사상수보다 더욱더 급격히 증가함을 알 수 있었다. 또한 AE 신호가 발생하는 영역은 단지 마찰가열시간  $t_1$ 일때만 발생하고 단조가열시간  $t_2$ 에서는 발생하지 않았다. 이것은 두 재료 JLF-1과 STS304가 마찰가열되면서 온도가 최대 1300℃까지 상승하며 서로 용융되어 결합됨에 따라 다수의 AE 신호가 발생하지만 용융된 상태에서 단지 가압만 할 경우에는 AE 신호가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4에서 구한  $OHZ(1\sim 3s)$ 에서의 AE 카운트 총량(N)은 20654 ~ 35386이며 AE 사상수는 350 ~ 570으로 나타났으며 이는 마찰용접시 발생하는 AE 신호의 카운트 누적량 및 사상수만을 측정함으로써 실시간에 용접성 평가가 가능함을 알 수 있다.

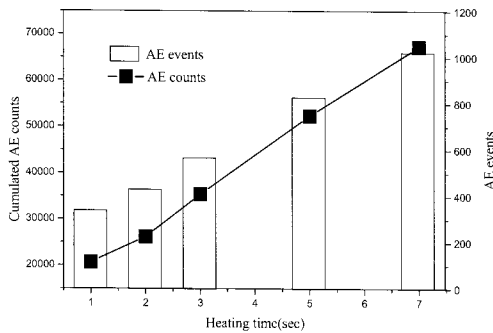


Fig. 6 Cumulated AE counts and events according to the heating time in the friction welding of JLF-1 and STS304

3.4. AE 신호특성과 용접품질의 상관성

마찰용접된 시험편을 다시 인장시험편으로 가공하여 용접강도와 발생한 AE신호의 누적된 카운트 총량과의 상관관계는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보여주는 바와 같이 발생한 AE신호의 누적된 카운트의 총량이 증가함에 따라 인장강도는 점차적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, JLF-1와 STS304의 마찰용접시 일정한 범위의 누적된 AE 카운트를 나타내는 영역에서는 최적의 용접상태를 얻을 수 있으며 그 영역을 벗어나면 용접상태 및 인장강도가 저하함을 알 수 있다. 이는 발생한 AE 신호의 발생경향 및 카운터의 누적량 등의 비파괴적 기법으로 JLF-1과 STS304의 마찰용접된 재료의 인장강도를 구할 수 있음을 의미한다. 여기서 주어진

최적용접 조건하에서 마찰용접시 측정된 AE신호의 카운트 누적총량이 최적의 누적카운트량 영역 (ONZ) 사이에 있는 경우 이음효율이 모재보다 우수하게 되는 최적의 이음강도라는 것을 비파괴적으로 실시간에 예측 평가할 수 있다. 이는 마찰용접 후 시험편을 가공하여 인장시험을 하지 않더라도 실시간에 발생한 AE신호 및 카운터량만 측정함으로써 용접부 강도의 최적 여부를 비파괴적으로 평가할 수 있음을 의미한다.

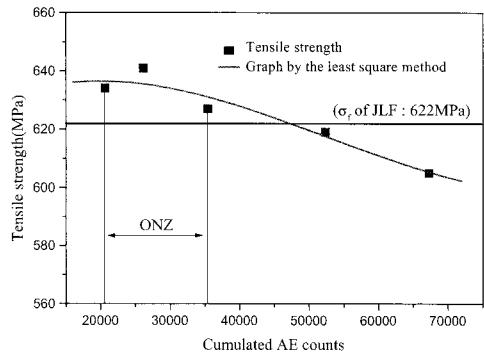


Fig. 7 Relationship between the AE cumulative count and the tensile strength for the friction welded joint of JLF-1 and STS304

Fig. 8과 Fig. 9는 마찰용접시 발생한 전형적인 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로 Fig. 8에서는 1-3초 사이의 가열시간에 마찰에 의해 시험편에 온도가 높지 않을 경우에는 발생한 파형의 형태와 주파수 특성을 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 완전한 돌발형 신호가 발생하며 주파수 대역도 110kHz 정도의 낮은 주파수 특성을 나타낸다. 그러나 3초 이상의 가열시간이 진행된 상태에서 시험편에 온도가 약 1200℃정도 상승함에 따라 발생하는 파형은 Fig. 9와 같이 연속형 형태의 파형이 발생하며 주파수 대역은 150kHz에서 가장 높은 주파수 특성을 나타낸다. 따라서 1~3초의 가열시간을 나타내는 최적 용접조건에서는 Fig. 8과 같이 110kHz의 주파수 특성을 나타내는 신호가 다수 발생하며 3초 이상의 가열시간을 나타내는 시험편에서는 Fig. 9와 같은 연속형 신호와 150kHz에서 주파수 특성을 나타내는 신호가 다수 발생한다. 이와 같이 마찰용접시 발생하는 AE 신호의 파형특성을 관찰한 결과 가열시간이 증가함에 따라 발생하는 신호가 연속형 형태이기 때문에 하나의 AE 신호에

대한 AE 카운트가 3초 이전의 가열시간에 발생한 AE 신호의 카운트보다 훨씬 많이 발생함을 알 수 있다. 따라서 앞의 Fig. 6에서 언급한 바와 같이 AE 신호의 사상수와 카운트의 실험결과에서도 AE 사상수의 증가율보다도 AE 카운트의 증가율이 급격히 증가하는 결과를 보인 것도 이와 같이 발생한 AE 신호의 파형의 특성 때문인 것으로 사료된다. 따라서 JLF-1과 STS304의 마찰용접의 최적조건을 평가하기 위하여 위와 같이 파형과 주파수 특성을 비교함으로써도 평가할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 회전수 2000 rpm, 마찰가열압력  $P_1 = 80$  MPa, 단조가압력  $P_2 = 180$  MPa, 마찰가열시간  $t_1 = 2$  s, 단조가압시간  $t_2 = 5$  s의 최적 마찰용접 조건으로 JLF-1과 STS304를 마찰용접한 용접부의 열영향부와 모재와의 경계에서 파단된 인장시험편에 대한 파단면을 주사 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 나타낸다. 또한 JLF-1측의 파단면을 30배로 확대해서 각 부분별 1000배로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전형적인 소성변형에 의한 연성과괴인 딩플(dimple) 형상이 나타났다.

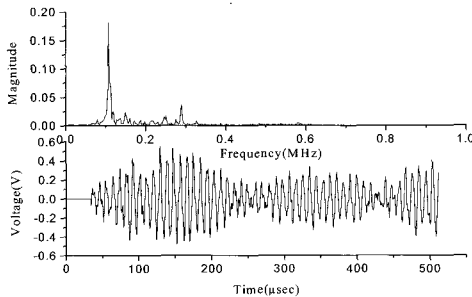


Fig. 8 Typical waveform and frequency spectrum at the beginning of friction welding (low temperature)

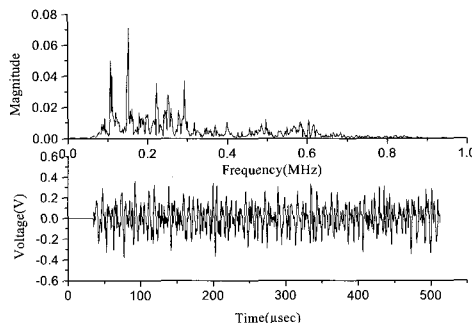


Fig. 9 Typical waveform and frequency spectrum during friction welding (high temperature)

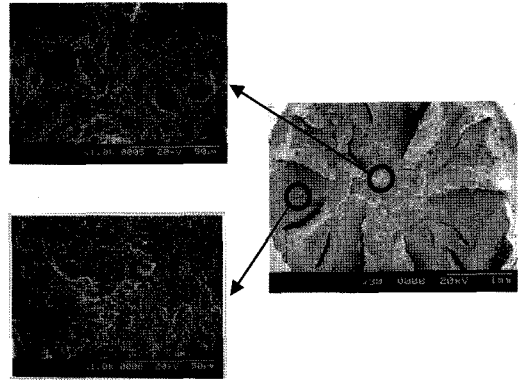


Fig. 10 Fractography of a surface fractured by tensile load in a dissimilar friction welded joint (JLF-1 & STS304) using SEM

#### 4. 결 론

핵융합로용 블랭킷에 사용되는 JLF-1과 STS304의 이종재 마찰용접시 마찰용접 조건의 최적화와 AE 신호에 의한 최적용접조건에 대한 연구결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) JLF-1과 STS304의 마찰용접시 용접부의 이음효율이 모재보다 우수한 최적 마찰용접 조건은 회전수( $n$ )=2,000 rpm, 마찰가열압력( $P_1$ )=80 MPa, 단조압력( $P_2$ )=180 MPa, 마찰가열시간( $t_1$ )=1~3 s, 단조시간( $t_2$ )=5 s이었다.
- (2) 마찰용접 실시간 중 측정된 AE신호의 사상수 및 누적카운트총량의 최적범위에서 마찰용접 이음효율이 가장 좋은 용접 품질을 얻을 수 있었으며 마찰용접시 AE에 의한 실시간 용접성 평가가 가능하였다.
- (3) JLF-1과 STS304의 마찰용접시 발생하는 AE 신호의 파형과 주파수 특성에서 최적용접조건인 1-3초의 가열시간에서는 완만한 돌발형 신호와 110kHz의 주파수 특성을 나타내며 3초 이상의 가열시간에서는 연속형 신호와 150kHz에서 가장 높은 주파수 특성을 나타내었다.

#### 참고문헌

- [1] A. Kohyama, Y. Kohno, M. Kuroda, A. Kimura and F. Wan, "Production of Low Activation Steel (JLF-1)," Large Heats-Current

- Status and Future plan, *Journal of Nuclear Materials*, 258-263, pp. 1319-1323, (1998)
- [2] A. Kohyama, A. Hishimura, Y. Kohno, K. Shiba and A. Sagara, "The Development of Low Activation Ferritic Steel for fusion Application", *SCI, Rep. Ritu A45* pp. 137-141, (1997)
- [3] Dong-Su, Bae, "Effect of Interaction between Dislocation and Nitrides on High Temperature Deformation Behavior of 12% Cr-15%Mn Austenitic Steels", *한국해양공학회지*, 제15권 제3호, pp. 58-62, (2001)
- [4] K. Asakura, et al., "Mechanical properties and microstructure changes of low-activation 3Cr-2W-V-Ti ferritic steels developed for nuclear applications", *ISIJ Int.* Vol. 30, No. 11, pp. 947-954, (1990)
- (5) T. Hasegawa, et al., "Influence of tantalum and nitrogen contents, normalizing condition and TMCP process on the mechanical properties of low-activation 9Cr-2W-0.2V-Ta steels for fusion application" *J. of Nuclear Materials*, Vol. 258-263, No. 2, pp. 1153-1157, (1998)
- [6] A. Kohyama, et al., "R&D of low activation ferritic steels fusion in Japanese universities", *J. of Nuclear Materials* Vol. 212-215, pp. 684-689, (1994)
- [7] F. Contreras, EA. Trillo, and LE. Murr, "Friction-stir welding of a beryllium-aluminum powder metallurgy alloy", *Journal of Materials Science*, Vol. 37 No. 1, pp. 89-99, (2002)
- [8] R. L. Klueh, D. S. Gelles, M. Okada. and N. H. Packan, "Reduced Activation Materials for Fusion Reactors", *ASTM-STP 1047*, (1990)
- [9] 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會20年誌", pp. 1-106, (1984)
- [10] AWS, "Welding Handbook", Vol. 2, pp. 672-763, (1991)
- [11] 오세규, 공유식, 박일동, 유인중, "열간금형제의 마찰용접 최적화와 AE평가", *한국동력기계공학회지*, 제4권, 제4호, pp. 54-58, (2000)
- [12] S. K. Oh, Y. S. Kong, I. J. Yoo and I. S. Kim, "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*, Seattle, USA, pp. 203-207, (2000)