

원자력 발전소용 이종재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 실시간 평가에 관한 연구

권상우 · 오세규 · 유인종 · 황성필 · 공유식
부경대학교 기계공학부

Study on Optimization of Dissimilar Friction Welding of Nuclear Power Plant Materials and Its Real Time AE Evaluation

SANG-WOO KWON, SAE-KYOO OH, IN-JONG YOO SUNG-PHIL HWANG AND YU-SIK K
School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Friction welding(FRW), Acoustic emission(AE), Weld interface(W.I), Weld quality, Heat affected zone, Tensile strength

ABSTRACT : In this paper, joints of Cu-1Cr-0.1Zr alloy to STS316L were performed by friction welding method. Cu-1Cr-0.1Zr alloy is attractive candidate as nuclear power plant material and exhibit the best combination of high strength, good electrical and thermal conductivity of any copper alloy examined. The stainless steel is a structural material which alloy acts as a heat sink material for the surface heat flux in the first wall. So, in this paper, not only the development of optimizing of friction welding with more reliability and more applicability but also the development of in-process real time quality (such as strength and toughness) evaluation technique by acoustic emission for friction welding of such nuclear component of Cu-1Cr-0.1Zr alloy to STS316L steel were performed.

1. 서 론

원자력 발전소에서 가장 중요하게 여겨지는 장치가 바로 원자로이다. 원자로는 우라늄의 연소로 인한 핵분열이나 핵융합을 일으켜 에너지를 생성하는 장치이다. 원자로 용기의 외부에는 높은 강도와 전도율을 가진 구리합금(Cu-alloy)을 사용한다^{1, 2)}. 특히 Cu합금(Cu-Cr-Zr Alloy)은 다른 구리합금보다 열적, 전기적인 전도율이 좋고, 강도면에서도 우수하다³⁾. 원자로 용기의 내부에는 내식성을 막기 위하여 스테인리스강을 사용한다. 그러므로 Cu합금(Cu-Cr-Zr Alloy)과 스테인리스강의 접합이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소의 핵심설비인 원자로에 사용되는 Cu합금(Cu-1Cr-0.1Zr Alloy)과 스테인리스강(STS316L)의 접합을 위해 마찰용접에 의한 최적화를 도출하고, 마찰용접중에 측정된 AE 총 누적량을 이용함으로써 실시간에 용접품질평가 가능성을 기대할 수 있다.

2. 재료 및 실험방법

Cu-alloy(Cu-1Cr-0.1Zr)는 0.8%의 Cr과 약 0.1%의 Zr을 함유하는 합금으로 높은 강도와 우수한 열적·전기적 전도성을 가지고 있다. 스테인리스강(STS316L)은 저탄소 스테인리스강으로 구조용 재료로 사용되며, 내식성이 뛰어나 원자로 내부의 부식을 방지하는 역할을 한다. Table 1과 Table 2에는 재료의 화학조성과 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of materials used(wt.%)

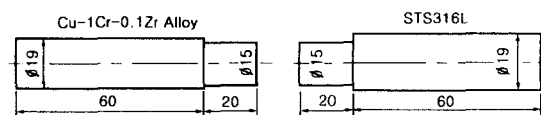
Comp. / Mts.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Zr	Pb
Cu-1Cr-0.1Zr	-	-	-	0.002	-	-	0.92	-	98.5	-	0.09	0.011
STS316L	0.017	0.36	1.36	0.025	0.029	10.080	16.23	2.16	0.19	0.04	-	-

Table 2 Mechanical properties of materials used

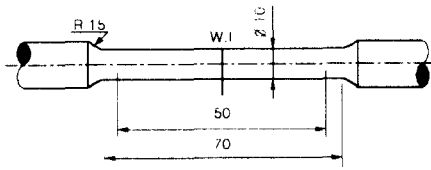
Prop. / Mts.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Hardness (Hv)	Reduction of Area (%)
Cu-1Cr-0.1Zr	420	-	24.1	160	-
STS316L	675	344	49.0	230	73

Fig. 1(a)는 마찰용접과 AE시험을 하기 위한 시험편의 형상과 치수를 나타내었다.

Fig. 1(b)는 마찰용접재의 용접부 인장강도, 인장흡수 에너지, 연신률, 단면수축률을 측정하기 위한 인장시험편의 형상과 치수를 나타내었다.



(a) Friction welding and AE test specimen



(b) Room temperature tensile test specimen
Fig. 1 Shape and dimension of specimens

마찰용접의 최적화 실험은 Fig. 9(a)와 같은 시험편으로 Cu-alloy $\phi 15\text{mm}$ 봉 대 STS316L $\phi 15\text{mm}$ 봉의 이종재 마찰용접을 수행하였다. 실험에 사용한 재료는 Cu-1Cr-0.1Zr 합금강봉과 STS316L 스테인리스강봉이며 이들 재료의 적정 마찰용접조건을 문헌^{4, 5)}을 조사하여 회전수(n)를 결정한 후, 마찰 가열압력(P_1), 단조 가압력(P_2)을 계산하여 예비시험을 수행하여 용접조건을 선정하고, 가압시간(t_1)을 선택한 후에 가열시간(t_2)을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시하였다.

Table 3은 마찰용접시험의 다양한 조건을 나타낸다.

Table 3 Various Condition of dissimilar friction welding of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L

Case	Rotation speed n (rpm)	Heating pressu P_1 (MPa)	Forging pressu P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Forging time t_2 (sec)	Total upse l_1 (mm)
1	2000	20	30	3	5	4.9
		30	40			9.0
		40	60			11.9
		50	80			14.2
		60	100			17.1
		70	120			17.2
		80	140			17.7
		90	160			19.6
2	2000	80	140	0.5-6	5	872-24.8

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 변환기(R15-C 150kHz sensor)를 용접면에서 정지척(chuck) 방향으로 170mm 위치의 정지척 상에 연결된 웨이브 가이드에 부착하였다. 웨이브가이드에 부착한 변환기로부터 전달된 AE신호를 computer에 저장하여, 그 저장된 결과를 AE 누적총량의 형태로 표시하였다. 넓은 주파수 범위의 스펙트럼을 커버하는 다양한 AE발원(AE source)으로부터 AE가 발생하기 때문에 100kHz~300kHz 범위의 밴드패스 필터(band-pass filter)를 포함하는 고감도 센서용 전치증폭기(pre-amplifier)를 사용하여 저주파와 고주파의 소음(noise)을 제거하였으며 40dB로 증폭하여 측정된 AE신호가 시그널 케이블(signal cable)을 통과하여 장치에 원활히 전달되도록 하였다. 장치에 전달된 AE신호는 신호처리를 위하여 주증폭기(main-amplifier)에서 다시 40dB로 증폭하여 전체 시스템 이득(gain)을 80dB로 설정하였다. 또 외부 소음을 제거하기 위해 한계진압(threshold voltage)을 1.0V로 설정하여 이 이상의 진폭을 가지는 AE

펄스(pulse)만을 신호처리하였다.

본 연구에서는 초기 AE 누적량과 용접부 인장강도와와의 상관성을 고려하였다.

Table 4 AE instrumentation and operating parameters

Transducers	PZ Type R-15 150kHz resonance frequency
Pre-amplifier	Model 1220A 40dB fixed gain 100-300kHz filter
Main-amplifier	40dB gain
Threshold voltage at comparator	1.0V (80dB: gain + threshold)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원자력 발전소용 이종재 마찰용접의 최적화

3.1.1 용접변수간의 상관관계

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 단조가압시간(t_2)등이며, 이종재 Cu-1Cr-0.1Zr 과 STS316L의 마찰용접을 위한 최적 가열압력 P_1 과 최적 가압력 P_2 를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌과 실험 데이터⁴⁻⁶⁾를 참고로 마찰가열시간 $t_1=3\text{sec}$, 가압시간 $t_2=5\text{sec}$, 회전수 $n=2000\text{rpm}$ 으로 일정하게 하고 Table 3(Case 1)과 같이 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다.

Fig. 2는 P_1 , P_2 를 결정하기 위하여 t_1 , t_2 를 일정하게 하고 그 때의 인장강도를 구한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 용접재에서 이음효율이 거의 100%가 되는 인장강도값을 보았다.

그 결과중에서 용접재 Cu-1Cr-0.1Zr - STS316L의 이음부 인장강도가 모재와 거의 같은 경우인 $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=140\text{MPa}$ 를 최적압력으로 정하였다.

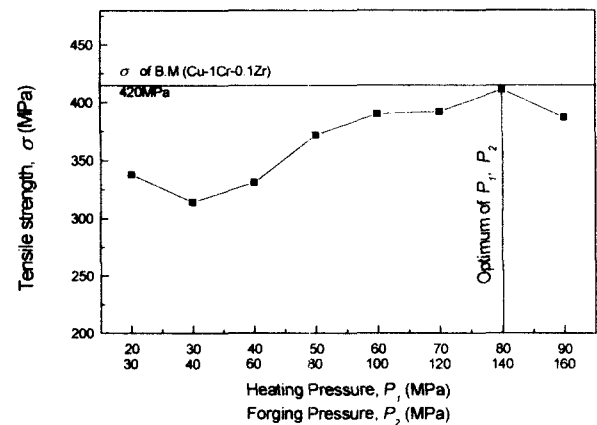


Fig. 2 σ_t vs. P_1 , P_2 in dissimilar friction welding of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L

Welding condition : as shown in Table 3 (Case 1)

Fig. 3은 $\phi 15\text{mm}$ 이종재 마찰용접에서 총업셋량 $U_T(\text{mm})$ 와 가열시간 $t_1(\text{sec})$, 가열업셋량 $U_1(\text{mm})$ 와 가열시간 $t_1(\text{sec})$, 단조가압업셋량 $U_2(\text{mm})$ 와 가열시간 $t_1(\text{sec})$ 간의 상관관계를 실험에 의해 구한 결과이다. 이에 대한 상관 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned} U_1 &= 2.99t_1 + 5.01 \\ U_2 &= -0.06t_2 + 2.31 \\ U_T &= 2.92t_1 + 7.32 \quad (R^2 = 0.99) \end{aligned} \quad (1)$$

총업셋량 $U_T(\text{mm})$ 와 마찰가열시간 $t_1(\text{sec})$ 의 상관관계는 그림에서 알 수 있듯이 마찰가열시간 t_1 이 증가할수록 총업셋량 U_T 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

이 그림에서 $O_{t_1}Z$ (optimum t_1 zone)는 $t_1=1\sim 3\text{sec}$ (Fig. 4)이며, 총업셋량은 $U_T=0.5\sim 5.2\text{mm}$ 를 나타내고 있다. U_1 는 U_T-U_2 이고, U_2 는 U_T-U_1 로서 마찰용접시 시간조정법에 대신에 업셋조정법으로 U_1 , U_2 를 최적조건으로 정하여 마찰용접시 실험을 할 수 있다.

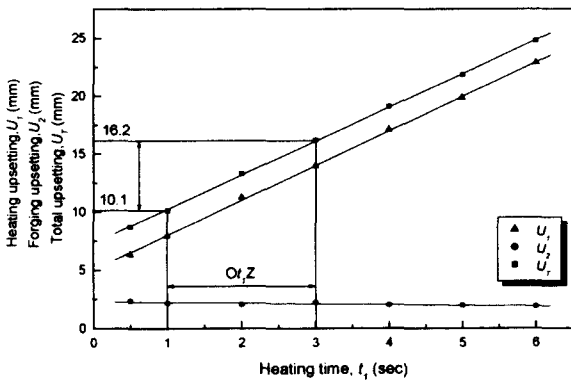


Fig. 3 U_1 vs. t_1 , U_2 vs. t_1 and U_T vs. t_1 for dissimilar FRW of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

3.1.2 용접변수와 강도간의 상관관계

Fig. 4는 Table 3(Case 2)와 같은 조건에서 $\phi 15\text{mm}$ 봉인 Cu-1Cr-0.1Zr과 $\phi 15\text{mm}$ 봉인 STS316L강을 마찰용접한 이종재 마찰용접재의 인장강도 $\sigma_t(\text{MPa})$ 와 가열시간 $t_1(\text{sec})$ 과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 용접재의 인장강도는 이종재중 낮은 쪽 인장강도인 Cu-1Cr-0.1Zr모재($\sigma_t=420\text{MPa}$)에 대해 이음효율이 약 95%이상인 값을 나타내는 구간인 $t_1=1\sim 3\text{sec}$ 를 마찰가열최적시간($O_{t_1}Z$)으로 정하였다. 이때 $\sigma_t - t_1$ 의 실험식은 데이터점으로부터 최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의해 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma_t = 2.01t_1^3 - 24.85t_1^2 + 73.87t_1 + 354 \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

여기서 R^2 은 기여도(coefficient of determination)로서 1에 가까우므로 실험식의 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있다⁷⁻¹⁰⁾.

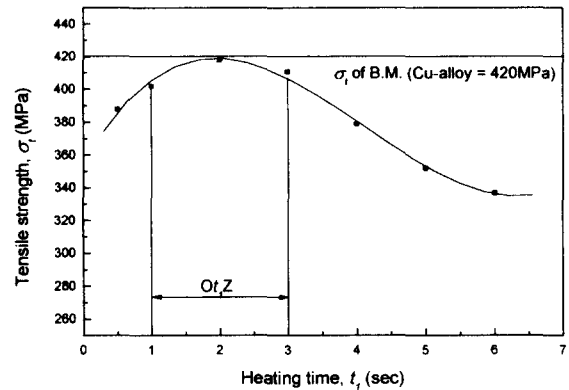


Fig. 4 σ_t vs. t_1 in dissimilar welding of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L ($\phi 15$ bar- $\phi 15$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

3.1.3 봉대봉 이종재 마찰용접의 최적화

Cu-1Cr-0.1Zr강과 STS316L강의 이종재 마찰용접 최적화를 위하여 가열시간 t_1 을 변수로 하여 이음효율이 100%가 되는 t_1 의 범위를 정할 수 있었다. 따라서 $O_{t_1}Z$ (optimum t_1 zone) 보다 t_1 이 낮거나 너무 높으면 인장강도(σ_t)가 낮아지며, 또한 이음효율이 훨씬 낮아진다. 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 강도와 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신율)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3(Case 2)의 용접조건에 따라 용접한 용접재의 인장시험을 한 후 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 흡수에너지, 단면수축율, 연신율과의 상관관계는 Fig. 5와 같이 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 4에서 구한 $O_{t_1}Z(1\sim 3\text{sec})$ 에서 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신율)이 높게 나타나므로, $O_{t_1}Z = 1\sim 3\text{sec}$ 는 강도와 인성면에서 모두 우수한 t_1 범위임을 알 수 있다. 마찰가열시간 t_1 이 증가함에 따라 연신율과 단위면적당 인장흡수에너지가 증가, peak치, 감소의 양상을 보이고, Cu-1Cr-0.1Zr과 STS316L의 이종재 마찰용접시 인장과단부분은 Cu-1Cr-0.1Zr측 열영향부에서 파단되었다. 따라서 앞에서 구한 $O_{t_1}Z$ 에서의 ϵ , ψ 및 E_a 를 고려해 볼 때 크게 염려될 만큼 낮지 않으면 인성면에서 문제되지 않음을 알 수 있다.

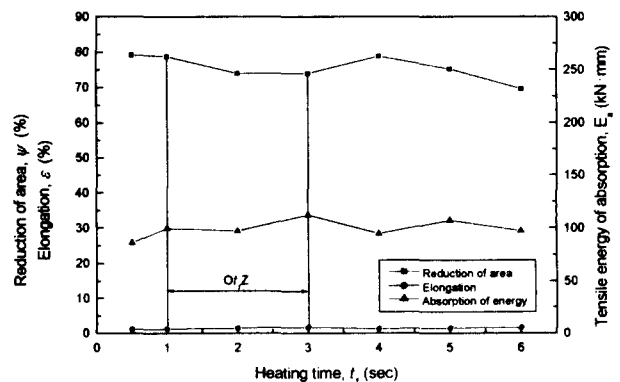


Fig. 5 E_a , ψ , ϵ vs. t_1 in dissimilar friction welding of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L ($\phi 15$ bar to $\phi 15$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

3.2 원자력 발전소용 이종재의 마찰용접시 AE의 총량과 용접품질(인장강도)과의 상관성

3.2.1 용접조건과 AE와의 상관성

일반적으로 가열시간(t_f)의 증가에 따라 마찰용접부의 소성 변형이 계속해서 크게 일어나기 때문에 AE(acoustic emission)도 증가한다. Fig. 6은 Table 3 (Case 2)와 같은 용접조건하에서의 마찰용접 중 AE시험을 수행하여, 용접시작에서 용접종료까지의 AE누적총량 N 을 구한 결과로 t_f 의 증가와 더불어 AE량도 증가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 5에서 구한 Ot_fZ (1~3sec)에서의 AE 총량(N)은 16200 ~ 42600(count)으로 확인되었다. 이때의 AE총량 N (counts)과 t_f (sec)사이의 $N-t_f$ 관계 실험식은 다음과 같다.

$$N = 3436.75t_f^2 - 671.19t_f + 13338 \quad (R^2=0.99) \quad (3)$$

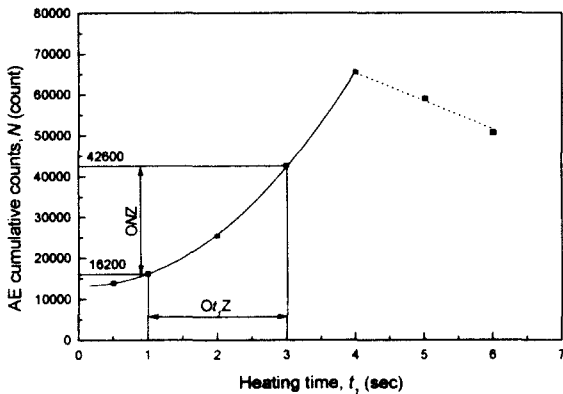


Fig. 6 N vs. t_f in dissimilar friction welding of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L ($\phi 15$ bar to $\phi 15$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3(Case 2)

3.2.2 AE 총량과 용접품질의 상관성

Table 3(Case 2)와 같은 용접조건으로 마찰용접할 때 용접강도 및 AE 총량과의 상관관계는 Fig. 7과 같다.

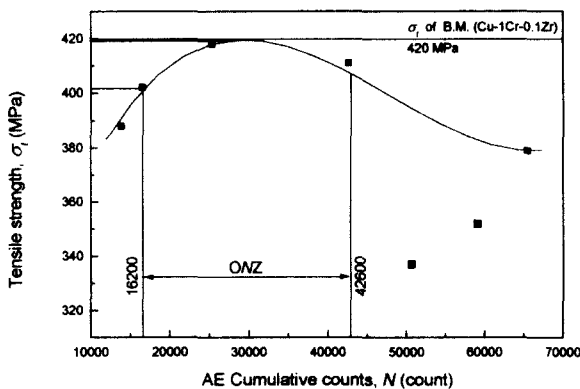


Fig. 7 σ_t vs N in dissimilar friction welding of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L ($\phi 15$ bar to $\phi 15$ bar)
Welding condition : as shown in Table 4(Case 2)

이 그림은 AE 시험을 수행한 결과 AE총량과 용접품질(강도)과의 상관관계를 실험적으로 구한 결과이다. 그림에서와 같이 Fig. 6에서 구한 ONZ가 16200 ~ 42600 counts 일때의 인장강도는 402~418MPa로서 이때의 이음효율이 모재와 비교해 볼 때 거의 100%임이 확인되었다.

이때의 σ_t-N 관계식은 다음과 같이 구해졌다.

$$\sigma_t = 1.64 \times 10^{-12} N^3 - 2.35 \times 10^{-7} N^2 + 9.58 \times 10^{-3} N + 299 \quad (R^2=0.96) \quad (4)$$

여기서 주어진 최적용접조건하에서 마찰용접시 측정된 AE누적총량 N (count)이 최적 ONZ 사이에 있는 경우 이음효율이 거의 100%가 되는 최적의 이음강도임을 비파괴적으로 즉시 실시시간에 예측 평가할 수 있다. 이는 마찰용접 실시시간에 AE량의 측정만으로 용접부 강도의 최적 여부를 비파괴적으로 평가할 수 있음을 뜻하며 식(4)를 통하여 이를 정량적으로 규명할 수 있음을 뜻한다.

이상에서 알 수 있듯이 이종재 마찰용접에서 Ot_fZ 에서의 ONZ의 범위를 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5 Optimum N zone for dissimilar FRW of Cu-1Cr-0.1Zr ($\phi 15$) \times STS316L ($\phi 15$)

Dissimilar FRW		Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L
Optimum zone	ONZ/ (total AE counts)	16200 ~ 42600

결과적으로 이종재 마찰용접은 Fig. 7, 식(4)에서 알 수 있듯이 마찰용접중의 AE 총량 N 을 측정하면 즉시 실시시간에 그 용접부의 σ_t 를 구하고 이것이 이음효율이 100%인 Ot_fZ 범위내의 것인지 아닌지를 평가할 수 있고 또한 품질을 조정 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.2.3 용접부의 경도검사 및 미시조직 검사

Fig. 8은 최적 마찰용접 조건하에서 마찰용접한 시험편의 경도 분포를 나타낸 것이다. 이 그림을 보면 용접계면(weld interface)에서 경도치가 최고이다. 그 이유는 용접면 부근에서 마찰용접시 국부 가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 또한 Cu-1Cr-0.1Zr의 용접계면에서 약 2.0mm의 위치에서 인장파단되었는데 이곳이 바로 hardness-valley이다. Cu-1Cr-0.1Zr 및 STS316L의 모재 경도는 각각 약 Hv 230, 160정도로서 매우 낮고 마찰용접 경계면(W.I)의 경우는 Hv 350정도로서 STS316L의 모재부 경도보다 큰 값으로 상승했으며, HAZ(heat affected zone)는 경계면에서 Cu-1Cr-0.1Zr의 경우에는 약4mm, STS316L의 경우에는 약 2mm정도이다. 이러한 경도의 peak는 후 열처리로써 완화시킬 수 있을 것이다.

Fig. 9는 모재와 열영향부(HAZ) 및 마찰용접계면의 조직을 검사코져 중심 축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접계면(W.I) 좌우 6mm 부근의 조직사진이다. Cu-1Cr-0.1Zr의 마찰용접계면에서는 모재부보다 미세한 결정립을 가지는 것을 확인할 수

가 있었다. 또한 STS316L의 경우에도 마찰용접계면에서 모재부와 열영향부보다 미세한 결정립을 보이고 있다. 마찰용접부 및 용접계면에서는 어떠한 조직적인 결함이 발견되지 않았다.

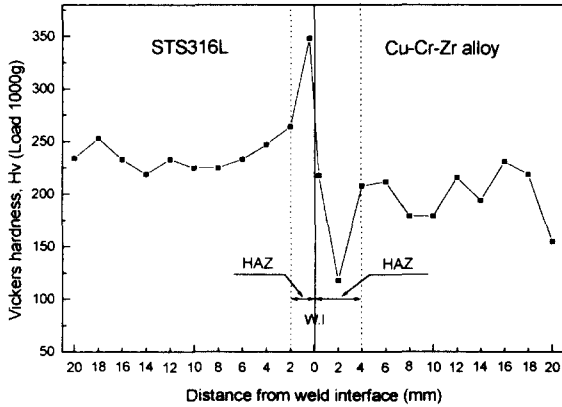


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of Cu-1Cr-0.1Zr ($\phi 15$) to STS316L ($\phi 15$)
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=80$ MPa, $P_2=140$ MPa, $t_1=2$ sec, $t_2=5$ sec

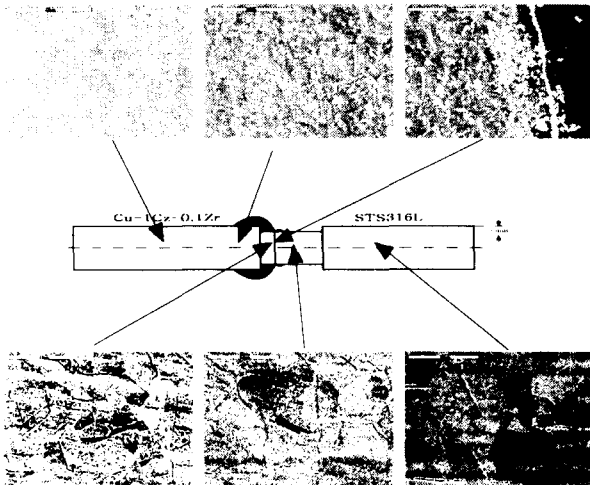


Fig. 9 Micro-structures of B.M, HAZ and weld interface of friction welded joint of Cu-1Cr-0.1Zr to STS316L
Welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=80$ MPa, $P_2=140$ MPa, $t_1=2$ sec, $t_2=5$ sec

제 5 장 결 론

원자력 발전소에 사용되는 Cu-1Cr-0.1Zr과 STS316L의 봉($\phi 15$) 대 봉($\phi 15$) 이종재 마찰용접을 수행하여 마찰용접 최적화와 AE평가, 용접품질(강도, 인성)에 미치는 영향 및 AE에 의한 마찰용접부의 비파괴적 평가에 대한 연구 결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) 원자력 발전소용 Cu-1Cr-0.1Zr과 STS316L의 우수한 이종재 마찰용접이 가능함을 확인하였다.

(2) 두 이종재의 인장시험에서 인장강도가 약한 Cu-1Cr-0.1Zr측의 열영향부에서 파단이 되었고, 최적 마찰용접 조건에서의 용접부 이음효율은 모재의 강도에 비교해 볼 때 거의 100%를 나타내었으며, 용접강도, 인성을 고려한 최적 마찰용접 조건은 다음과 같다.

$$n=2,000 \text{ rpm}, P_1=80 \text{ MPa}, P_2=140 \text{ MPa}, t_1=1\sim 3\text{sec}, t_2=5 \text{ sec}$$

(3) 적정 마찰가열시간 t_1 이 1~3sec일 때, 용접실시간에 용접시작에서 종료까지 측정된 AE 누적총량 $N(\text{count})$ 의 범위는 $N = 16200 \sim 42600$ counts이었고, 이때의 인장강도 $\sigma_t(\text{MPa})$ 는 이음효율 거의 100%를 나타낸 402~418MPa이었다.

σ_t-N 의 상관관계 실험식은

$$\sigma_t = 1.64 \times 10^{-12} N^3 - 2.35 \times 10^{-7} N^2 - 9.58 \times 10^{-3} N + 299$$

이며, 마찰용접 실시간에 N 의 측정만으로 용접재의 인장강도 $\sigma_t(\text{MPa})$ 를 알 수 있음으로써 비파괴적으로 용접품질의 실시간 평가가 가능하게 되었다.

참 고 문 헌

- 1) Butterworth, G. J., Journal of Nuclear Materials p.160, 1985
- 2) Butterworth, G. J. and C.B.A. Forty, Journal of Nuclear Materials 189, p.237, 1992
- 3) Grant, N. J., O. K. Harling, G. Kohse, J. Megusar T. Lee, Journal of Nuclear Materials 141-143, p.427, 1
- 4) 摩擦壓接硏究會, "摩擦壓接," コロナ社, pp.32-34, 46 145,-150, 184, 1979
- 5) 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會 20年誌", pp.31, 1984
- 6) AWS, "Welding Handbook-Vol.1, Fundamentals Welding", 7th edition, Vol.1, p.153-220, 1981
- 7) 오세규, 장홍근, 이향동, 신국식, 정문식, 송윤섭, "로켓 모터용 노즐의 동종재 마찰용접의 최적화와 고온 크리프 예측 및 AE평가(2)-고온 크리프 예측 및 AE평가" 한국해양공학회 추계 학술강연 논문집, pp. 90-96, 1996
- 8) 오세규, 장홍근, 장지훈, "Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴 검사학회지, 제 15권 제 4호, pp. 511-519, 1995
- 9) Oh, S. K., H. K. Chang and J. W. Oh, "Development Real Time Quality Evaluation of Friction Welding Acoustic Emission ; 2nd Report - Effects of Weld Parameters on Weld Strength and AE", Proc. Int. Off and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp. 177-184, 1996
- 10) Oh, Sae-Kyoo, Hong-Keun Chang, Hyung-Dong Par Bae-Sub Lee, "Development of Real-Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission Report. Effects of Initial AE Counts during Plastic Deformation in FRW", Proc. The 7th Int. Offshore Polar Eng. Conf., ISOPE. Vol.4-S37, pp. 11-17, 1997