

### 압력용기용 고온재의 이종재 마찰용접과 AE평가

## Dissimilar Friction Welding of Elevated Temperature Materials for Pressure Vessels and Its AE Evaluation

공유식 · 이연탁 · 유인종 · 오세규 · 임만배

Y. S. Kong, Y. T. Lee, I. J. Yoo, S. K. Oh and M. B. Lim

**Key Words** : Friction wding (FRW;마찰용접), Acoustic emission (AE;음향방출), Heat affected zone (H.A.Z.;열영향부), Weld interface (W.I;용접계면), Cumulative AE counts (AE 누적총량)

**Abstract** : An opportunity to use the elevated temperature has been recently increasing in various elements of heat facilities or machines such as heat exchanger tubes, pressure vessels, engines of aircraft, boilers and turbines in power plants, and nuclear reactor components, etc. as machinery industry develops. Thus, the development of such elevated temperature heat resisting materials and the studies on their elevated temperature materials friction welding, creep design and analysis have been considered as an important and needful fact. In this paper, friction welding optimization for 1Cr0.5Mo to STS304 and AE applications for the weld quality evaluation were investigated. The important results of this study are as follows : The techniques for dissimilar friction welding optimization of the elevated temperature materials 1Cr0.5Mo and STS304 and its real time weld quality evaluation by AE were developed, considering on both strength and toughness. Quantitative relationship was identified among welding condition, weld quality and cumulative AE counts.

### 1. 서 론

마찰용접법에 대한 연구는 1957년 Vill<sup>1)</sup>에 의해 본격화된 이후 이에 대한 연구보고가 계속 증가하고 있다. 국내에서는 1970년대 초반부터 마찰용접의 최적조건결정과 응용 등에 관한 연구가 Oh<sup>2)</sup> 등에 의해 보고되는 등, 이종재료에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 오늘날 선진국을 비롯한 각국의 산업발전의 추세에 따라 마찰용접법은 일반 기계부품 및 각종 공구류는 물론 항공기 및 선박용 부품, 육상기관(engine)의 운송기계부품, 압력용기 부품 등 동종 및 이종재료의 접합법으로서 타 용접법에 비해 접합성능이 보다 우수하고 기계적인 면과 경제적인 면에서 많은 이점을 지니고 있음이 인정되고 있다. 특히 마찰용접은 기계공업

분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 생산원가 절감을 위한 이종재 마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성 높은 제품을 대량생산하는 등의 접합수단으로 많이 이용되고 있다<sup>2-5)</sup>. 그런데 화력발전소, 원자로, 보일러, 고압용기 등의 고온재(1Cr0.5Mo)와 내식고온강재(STS304강)와의 이종재 마찰용접 최적화와 AE에 의한 실시간 품질평가에 관한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고온강재와 내식강재와의 요소부품 간의 이종재 마찰용접 최적화를 회전수, 압력, 시간의 결정에 의한 용접부 강도와 인성을 고려하여 연구하였다. 또한 마찰용접부의 품질(강도와 인성)을 AE에 의한 실시간에 평가하므로써 이종재료의 제작에 대한 좋은 기초자료가 될 것으로 기대된다.

### 2. 재료 및 실험방법

#### 2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 S특수강에서 제작한

접수일 : 2001년 6월 21일

공유식, 오세규 : 부경대학교 기계공학부

이연탁, 유인종 : 부경대학교 대학원 기계공학과

임만배 : 동의대학교 산업기술개발연구소

것으로서 압력용기 및 화력발전소의 보일러 고온 배관과 열교환기 등에 쓰이는 고온재료 1Cr0.5Mo (STBA22)강봉과 내열성과 내식성이 강한 Ni C4 계 스테인리스강인 STS304 강봉이다. 사용재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 그리고 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt. %)

Mtls.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
1Cr0.5Mo	0.20	1.00	0.80	0.018	0.012	-	1.50	0.65
STS304	0.08	0.35	1.60	0.017	0.028	8.78	18.54	0.28

Table 2 Mechanical properties of materials

Mtls.	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon(\%)$	HB	H.T.
1Cr0.5Mo	745	637	11.7	185	*N, T
STS304	750	560	26.1	235	*N, T

\*N, T : 920°C Normalizing → 620°C Tempering

마찰용접과 AE시험을 위한 시험편은 모재를 Fig. 1(a)과 같은 형상 및 치수로 선삭가공 (lathe turning)한 후 마찰용접면은 연삭하였다.

Fig. 1(b)은 용접부의 인장강도와 흡수에너지를 알기 위한 시험편으로 KS규격 (KSB 0801 14A)에 따라 선삭한 후 원통 연삭가공을 하였고, 평행부 표면은 사포 600번에서 1500번까지 연마하여 폴리싱 (polishing) 하였다.



(a) Friction welding and AE test specimens



(b) Room temperature tensile test specimens

Fig. 1 Shape and dimension of specimens. (unit : mm)

## 2.2 실험방법

본 연구의 마찰용접시험에 사용된 마찰용접기는 TOHO TH 25 연속구동브레이크형 (continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은  $\phi 25$  mm이고 슬라이드축은  $\phi 40$  mm이다. AE 시험에 사용된 시험기는 AE system (LOCAN 320, 4 channel)이며, 용접계면과 AE 센서와의 거리는 180 mm, Gain 35dB, Threshold 40 dB이며, Sensor는 R15를 사용하였다. 그리고 이음부의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (UTM 25T)로서, 인장속도는 2 mm/min으로 하였고, 모재와 용접재를 Fig. 1(b)와 같은 형상과 치수에 의한 인장 시험편을 선반 가공한 후 연삭 가공하여 인장시험을 행하였다.

본 실험에 사용된 1Cr0.5Mo과 STS304에 대한 최적 마찰용접 조건을 결정하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 가공한 시험편을 참고문헌<sup>2-4)</sup>에 의해 구한 여러 실험조건 중에서 Table 3과 같은 조건으로 마찰용접한 후 용접부의 인장강도 시험을 통해  $P_1$ ,  $P_2$ 를 구하였다. 여기서 구한 최적압력하에서  $t_2$  2s로 고정하였으며, 가열시간( $t_1$ )을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시한 후 용접부의 이음강도(인장강도)를 모재강도와 비교하고자 하였다. 그리고 STS304 시험편은 회전부 유압척에 고정하였고 1Cr0.5Mo 시험편은 정지척에 설치하였다.

한편, 시험데이터의 비산범위 (scatter)를 고려해서 예비시험에 있어서 동일한 조건에 대해 각각 3개의 시험편을 사용하여 데이터의 평균을 구한 후 데이터 정리 및 곡선피팅 (curve fitting)하였다. 그리고 실험식은 실험 데이터를 통하여 최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의해 전산화하였으며, 마찰용접에서 얻어진 강도와 AE총량과의 상관관계식을 도출하였다.

Table 3 Welding condition for dissimilar friction welding of 1Cr0.5Mo bar to STS304 bar

Case	Rotation $n$ (rpm)	Heating pressure $P_1$ (MPa)	Forging pressure $P_2$ (MPa)	Heating time $t_1$ (s)	Forging time $t_2$ (s)
1	2,000	60	180	5	2
		80	200		
		100	220		
		110	230		
		120	240		
		140	280		
2	2,000	120	240	1~7	2

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 마찰용접 최적화

##### 3.1.1 마찰용접조건에의 영향

본 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수 ( $n$ , rpm), 마찰가열압력( $P_1$ , MPa), 마찰단조 가압력 ( $P_2$ , MPa), 마찰가열시간( $t_1$ , s), 마찰단조 가압시간 ( $t_2$ , s)등이며, 고온강재 이중재(1Cr0.5Mo, STS304)의 마찰용접 최적가열압력  $P_1$ 과 최적가압력  $P_2$ 를 결정하기 위하여 여러 문헌<sup>2, 3, 5)</sup>과 실험 데이터<sup>6, 7)</sup>를 참고하여 가열시간  $t_1$ 과 가압시간  $t_2$ 를 각각 5s, 2s로 정하고 Table 3의 Case 1과 같이 마찰용접조건을 변화시키면서 마찰용접을 하였다.

Fig. 2는 1Cr0.5Mo강과 STS304 강과의 이중재 마찰용접에서 마찰가열압력( $P_1$ ), 마찰단조가압력( $P_2$ )의 변화에 따른 용접부 인장강도의 변화를 나타낸 실험결과를 보여 준다. Fig. 2에서 파단위치는 용접 경계면(W.I)에서 떨어진 1Cr0.5Mo 모재측의 열영향부가 되는 위치로서, 모두 1Cr0.5Mo 모재의 인장강도 745MPa보다 높은 범위가  $P_1$  110~130 MPa,  $P_2$  230~260 MPa로 구해졌다. 따라서 용접 이음부의 인장강도를 볼 때,  $P_1$  120 MPa,  $P_2$  240 MPa일 때가 가장 인장강도가 높게 나타났으므로 이 값이 가장 적절한 조건( $P_1, P_2$ )으로 사료된다. 그리고 압력이 증가함에 따라 인장강도가 증가하다가  $P_1$  120 MPa,  $P_2$  240 MPa일 때가 피크(peak)이고, 그 후 인장강도가 떨어지는 경향을 보이고 있는데, 이는 재료 자체의 특성과 과입열량의 영향에 의한 것으로 생각된다.

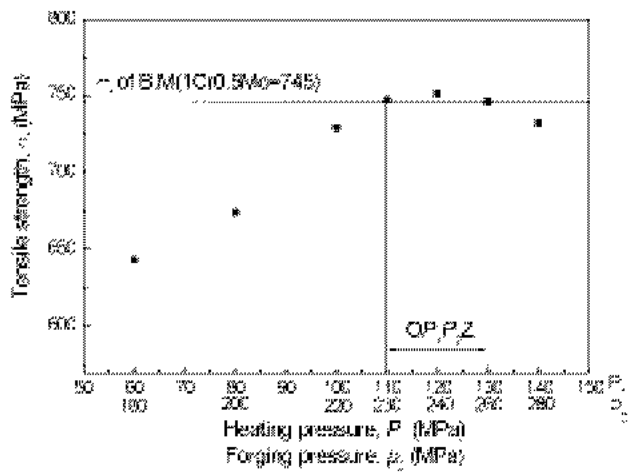


Fig. 2 Relationship between heating pressure and tensile strength for the welded joints. Welding condition : Table 3, Case 1

##### 3.1.2 용접조건과 용접부 강도와와의 상관성

Table 3의 Case 2와 같은 조건에서 1Cr0.5Mo강과 STS304강( $\phi 14$ mm)을 마찰용접한 결과로서, Fig. 2에서 구한 마찰가열압력( $P_1$ )과 마찰단조 가압력( $P_2$ )을 각각 120, 240 MPa,  $t_2$  2s로 하여 마찰가열시간( $t_1$ )을 변화시키면서 마찰용접을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

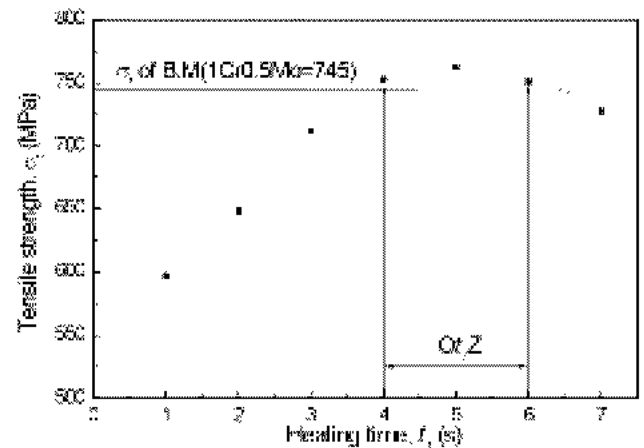


Fig. 3 Relationship between heating time and tensile strength for the welded joints. Welding condition : Table 3, Case 2

Fig. 3에서 인장파단은 대부분 1Cr0.5Mo강측의 열영향부에서 파단되었고, 일부만이 STS304의 열영향부에서 파단되어 일반적으로 양호한 접합임을 알 수 있었다. 마찰가열시간  $t_1$ 이 증가함에 따라 인장강도가 증가하여  $t_1$  4~6s 사이가 이음효율 100% 이상인 가장 양호한 상태를 나타내고 있다.  $t_1$ 이 낮은 경우는 용접 자체가 불완전한 용접이고 가열시간이 짧아 충분한 입열량 효과를 얻기 힘들기 때문에 인장강도는 낮게 나타났고,  $t_1$ 이 증가함에 따라 입열량 영향에 의해 인장강도가 증가하다가  $t_1$  7s 이상에서는 인장강도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 가열을 오래 지속시키면 입열량이 과도하게 되어 재료의 열전도에 의한 강도증가의 열효과를 충분히 기대하기 어렵기 때문으로 생각된다.

OptZ(optimum  $t_1$ , zone) (by  $\sigma$ ), 즉, 최적 가열시간의 범위는 시험편 직경  $\phi 14$ mm일 때 4~6s임을 알 수 있다. 이 때의 인장강도는 모재 1Cr0.5Mo강의 인장강도보다 높게 나타났다.

따라서 최적용접 조건은  $\phi 14$ mm의 1Cr0.5Mo과 STS304강의 최적마찰용접 조건은 회전수  $n$  2000 rpm, 마찰가열압력  $P_1$  120 MPa, 마찰단조 가압력

$P_2$  240 MPa, 마찰가열시간  $t_1$  4~6 s, 마찰단조 가압시간  $t_2$  2 s라 할 수 있다.

마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t$  (MPa), 마찰가열시간  $t_1$  (s)과의 사이에는 정량적 상관성이 존재한다. 이때,  $\sigma_t$   $t_1$  상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

ø14 :

$$\sigma_t = -9.666t_1^2 + 100.547t_1 + 498 \quad (R^2 = 0.99) \quad (1)$$

여기서  $R^2$ 은 데이터의 커브피팅에서 기여율 (determination coefficient)을 나타내며, 1에 가까워 나타남으로 신뢰성이 매우 높다.

### 3.1.3 용접조건과 용접부 인성과의 상관성

마찰용접의 최적화를 위하여 이음부의 강도(이음 효율 100% 이상)와 인성(인장흡수에너지, 단면수축률, 연신율)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3(Case 2)의 마찰용접조건에 따라 1Cr0.5Mo 강과 STS304강을 마찰용접할 때 마찰가열시간에 대한 마찰용접부의 인장흡수에너지, 단면수축률 및 연신률과의 상관관계는 Fig. 4에 나타내었다.

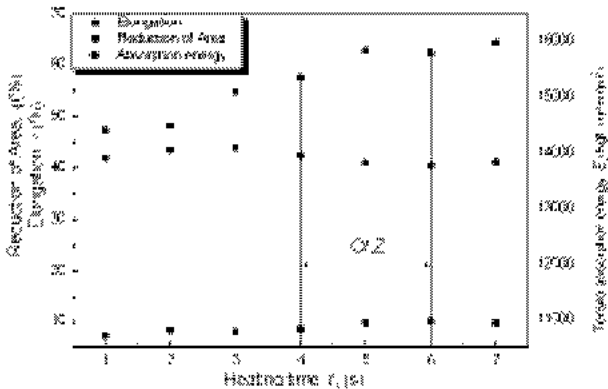


Fig. 4  $E_a$  vs.  $t_1$ ,  $\epsilon$  vs.  $t_1$  and  $\Psi$  vs.  $t_1$  of friction welded joints of 1Cr0.5Mo STS304. Welding condition : Table 3, Case 2

Fig. 4에서 마찰용접부의 흡수에너지 그래프를 보면, 마찰가열시간  $t_1$  1 s에서부터 증가하는 경향을 나타낸다. 흡수에너지는 용접조건  $t_1$ 의 증가에 따라 가열로 인한 연화성 때문에 대체로 증가하다가 Fig. 4에서 구한 Opt Z인  $t_1$  4~6 s일 때, 다소 감소하지만 문제될 정도는 아니다. 이 때 연신율과 단면수축률은 거의 일정하게 나타난다.

이상에서 알 수 있듯이, 마찰용접부의 인성(인장흡수에너지, 연신율, 단면수축률)을 고려하여 도출한 마찰용접 적정조건인 마찰가열시간  $t_1$  4~6 s

(Opt Z)에서 인성을 고려할 때 큰 문제가 되지 않을 것으로 생각되며, 다른 직경과 다른 재료의 마찰용접의 경우와도 같은 경향으로 나타났다<sup>6-10</sup>.

### 3.1.4 이종재 마찰용접의 최적화

Fig. 3과 Fig. 4에서와 같이 여러 가지 재료의 경우 강도와 인성을 고려하여 마찰용접의 최적화 즉, 최적용접조건을 구한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Optimum welding conditions of FRW for friction welded joints of 1Cr0.5Mo to STS304

Dissimilar FRW joints		1Cr0.5Mo-STS304
Diameter (mm)		ø14
Optimum Welding Condition	$n$ (rpm)	2000
	$P_1$ (MPa)	120
	$P_2$ (MPa)	240
	$t_1$ (s)	4~6
	$t_2$ (s)	2

## 3.2 마찰용접부의 AE에 의한 실시간 평가

### 3.2.1 용접조건과 AE와의 상관성

Fig. 5는 1Cr0.5Mo STS304 마찰용접재(ø14)에 대하여 마찰가열시간  $t_1$ 의 증가에 따른 AE총량 (total AE count)의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 가열시간 ( $t_1$ , s)의 증가에 따라 마찰용접부의 소성변형이 계속해서 크게 일어나기 때문에 AE (acoustic emission)도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 본 실험에서는 AE 총량( $N$ , count)의 증가가 2차 곡선의 형태를 나타냄을 알 수 있으며, 그 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

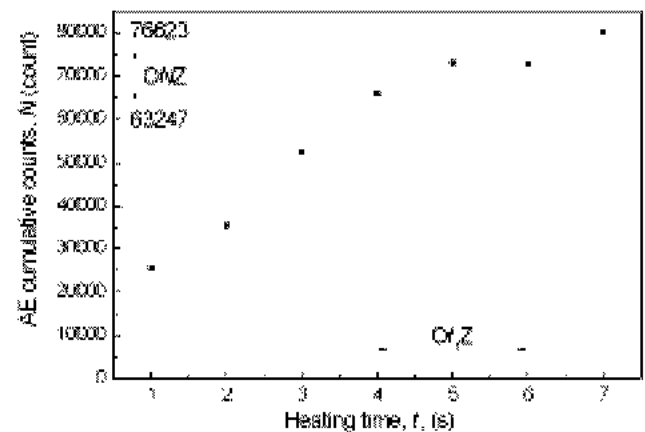


Fig. 5  $N$  vs.  $t_1$  in friction welding of 1Cr0.5Mo to STS304(ø14). Welding condition : Table 3, Case 2

ø14 :

$$N = -1336.84 t_1^2 + 9928.44 t_1 + 4925 \quad (R^2 = 0.98) \quad (2)$$

Table 5 Optimum  $N$  zone for dissimilar friction welded joints of 1Cr0.5Mo STS304

Materials	1Cr0.5Mo-ST304
Diameter (mm)	ø14
Optimum $t_1$ Zone (s)	4~6
Optimum $N$ Zone by $O_{t_1}Z$	63247 ~ 76623
Optimum $N$ Zone compensated by 100% joint effect	64463 ~ 76623

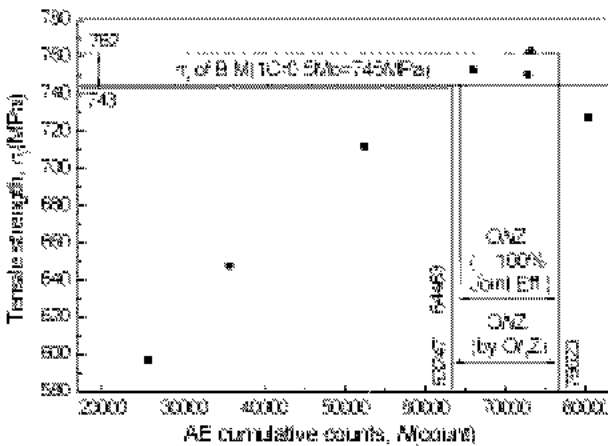


Fig. 6  $\sigma_t$  vs.  $N$  in friction welding of 1Cr0.5Mo to STS304(ø14).

Welding condition : Table 3, Case 2

### 3.2.2 용접 품질(인장강도)과 AE와의 상관성

Fig. 6은  $\sigma_t-N$ 의 관계를 보여주고 있다. 또한  $\sigma_t-N$ 의 상관실험식은 다음과 같이 도출되었다.

ø14 :

$$\sigma_t = 4.618 \times 10^{-8} N^2 + 0.00797 N + 423 \quad (R^2 = 0.99) \quad (3)$$

결과적으로 이종재 마찰용접은 Fig. 5와 Fig. 6 및 식 (3)에서 알 수 있듯이, 마찰용접 중의 AE 총량  $N$ 을 측정함으로써, 실시간에 그 용접재의 인장강도  $\sigma_t$ 를 예측할 수 있고, 이로써 마찰용접시 용접품질에 대한 실시간 제어가 가능함을 알 수 있다. 즉, 마찰용접 중에  $N$ 의 측정이 ONZ 범위 내이면 그 마찰용접재는 이음부 인장강도가 모재 1Cr0.5Mo의 것보다 높으며, 그 이음효율은 100% 이상임을 용접 실시간에 비파괴적으로 예측 및 확인이 가능함을 뜻한다. 그런데, 여기서 ONZ는

Fig. 3과 Fig. 4에서 구한  $O_{t_1}Z$ 에 해당하는 ONZ를 Fig. 5에서 구하였고, 이 ONZ(by  $O_{t_1}Z$ )를 Fig. 6에서 100%이상의 이음효율을 얻을 수 있는 ONZ ( $\geq 100\%$  joint efficiency)로 보정하여야 한다. 즉, Fig. 5, Fig. 6에서 각 용접재에 대한 최적  $t_1$ 의 범위( $O_{t_1}Z$ )를 식(2), 식(3)에 대입하여 구한 최적 AE 총량의 범위(ONZ by  $O_{t_1}Z$ )와 이음효율 100%이상의 ONZ를 구한 값(ONZ by 100% joint eff.)을 Table 5에 나타내었다.

## 4. 결 론

압력용기 및 열교환기용 고온재료의 이종재 1Cr0.5Mo강과 내식·내열강 STS304(ø14 mm)의 마찰용접 최적화 연구와 AE에 의한 마찰용접부의 품질(강도, 인성)에 대한 비파괴적 실시간 평가법을 연구한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 1Cr0.5Mo과 STS304(ø14)의 이종재 마찰용접 최적화 기술과 AE에 의한 용접 실시간 중 비파괴적으로 평가가 가능함이 강도와 인성의 영향을 고려하여 규명되었다.
- 2) 최적용접조건은 회전수 2000 rpm, 마찰가열압력 120 MPa, 엷셋 단조가압력 240 MPa, 엷셋 단조 시간 2s일 때, 마찰가열시간이 4~6 s임이 밝혀졌다.
- 3) 마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t$  (MPa)와 가열시간  $t_1$  (s) 사이에 정량적 상관관계가 존재하며, 그 상관실험식은 다음과 같다.

$$\sigma_t = -9.666 t_1^2 + 100.547 t_1 + 498$$

- 4)  $t_1$ 의 최적범위  $O_{t_1}Z$  4~6 s(ø14)일 때의 이음효율 100%이상되는 최적 AE 총량의 범위 ONZ는 64463~76623 counts임이 밝혀졌으며, 마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t$  (MPa)와 용접 중의 AE 총량  $N$  (counts)와의 실험적 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = -4.618 \times 10^{-8} N^2 + 0.00797 N + 423$$

## 참 고 문 헌

1. Vill, V. I., "Friction welding of metals," Svarochoe proizvodstvo, 3, pp. 19 23, 1962
2. Oh, S. K., "Application of friction welding to parts of industrial machinery," 한국박용기관 학회지, 제 10권, pp. 34 32, 1986

3. 摩擦壓接研究會, “摩擦壓接,” コロナ社, pp. 46, 145 150, 184, 1979
4. Ibid of Ref. (3), pp. 146, 1979
5. Tasako, Y.& N. Nakayama, “Friction welding of Ni based super alloyed nitriding steel,” J.prec. Mech. Mar., 36, pp. 707 711, 1970
6. Oh, S. K., “Studies on strength analysis of friction welded joints and inprocess monitoring of the welding using acoustic emission technique,” Ph D. thesis, Keio University, part I, pp. 27 42, pp. 73 84, pp. 85 98, pp. 122 134, 1982
7. 양형태, “내열강재의 SUH3과 SUH35의 마찰용접 특성과 Creep 수명예측에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp. 1 133. 2000
8. 오세규, “FW에 의한 유공압밸브스폴의 개발 및 실시간 품질 평가 자동화에 관한 연구”, 과학기술처 91년도 특정연구 개발사업부 연구 보고서, pp. 1 111, 1993
9. 오세규, 이경우, 전태연, 오명석, 이원석, “유공압밸브스폴용강 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접의 최적화와 용접강도 특성 및 AE품질평가, 한국해양공학회지 10권 2호, pp. 69 76, 1996
10. 오세규, 장지훈, 장홍근, “유공압 밸브스폴용 Cr Mo강봉의 동종재 마찰용접과 AE평가”, 대한용접학회지 13권 4호, pp. 103 112, 1995