

## 내열강재의 마찰용접과 AE에 의한 실시간 평가

김일석\* · 공유식\*\* · 황성필\* · 김현경\* · 이연탁\* · 오세규\*\*

\*부경대학교 대학원, \*\*부경대학교 기계공학부

### Study on Friction Welding of Heat Resisting Steel Materials and Its Real Time Evaluation by AE

IL-SUG KIM\*, YU-SIK KONG\*\*, SUNG-PHIL HWANG\*, HUN-KYONG KIM\*, YEON-TAK LEE\*

AND SAE-KYOO OH\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

**KEY WORDS:** Heat resisting steels 내열강, Acoustic emission (AE) 음향방출법, Friction welding (FRW) 마찰용접, Optimum welding condition 최적용접조건, Real time evaluation 실시간평가, Weld quality 용접품질, Weld interface (W.I) 용접계면

**ABSTRACT:** 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 weld quality (such as strength and toughness) evaluation technique by acoustic emission for friction welding of the engine exhaustive valve (SUH3-SUH35 dissimilar steels of  $\phi 12.3\text{mm}$ ,  $\phi 16\text{mm}$ ,  $\phi 20\text{mm}$  and  $\phi 24\text{mm}$  in diameters) were performed, comparing with the other FRW matches of materials such as SUH3 to SUH31, SUH3 to STS303 and SUH3 to STS304. As an important result, the techniques for dissimilar friction welding optimization of engine heat resisting steels SUH3 and SUH35 ( $\phi 12.3\text{mm}$ ,  $\phi 16\text{mm}$ ,  $\phi 20\text{mm}$ ,  $\phi 24\text{mm}$ ) and its real-time weld quality evaluation by AE were developed, considering on both diameter and carbon equivalent effects.

## 1. 서 론

최근 선진국을 비롯한 각국의 산업발전의 추세에 따라 마찰용접법은 일반기계부품 및 각종 공구류는 물론 항공기 및 선박용 부품, 육상기관의 운송기계부품 등 동종 및 이종재료의 접합법으로 타 용접법에 비해 접합성능이 보다 우수하고 기계적인 면과 경제적인 면에서 많은 이점을 지니고 있음이 인정되고 있다. 특히 마찰용접은 기계공업분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 생산원가의 절감을 위한 이종마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성 높은 제품을 대량 생산하는 등의 접합수단으로 많이 이용되고 있다(오, 1986; 마찰압접연구회, 1979).

그런데 선박, 자동차 등의 내연기관 배기밸브의 이종재 마찰용접에 있어서는 그 재료와 크기(직경)가 달라지면 그 용접조건도 달라져야 하기 때문에 마찰용접의 최적화를 위하여 여러 재료와 직경 및 탄소당량의 영향 등을 고려하여야 하며, 최신 첨단기법인 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가 기술개발이 매우 필요하나, 아직 이에 대한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 배기밸브의 stem부 SUH3과 head부 SUH35의 여러 지름에 대한 마찰용접 최적화와 AE에 의한 용접품질 실시간 평가 기술을 개발하고, 이들 용접재 SUH3-SUH35와 다른 유사 용접재 SUH3-SUH31, SUH3-SUH303 및 SUH3-SUS304의 탄소당량과 직경의 영향을 조사하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 엔진 배기밸브용 강재가 가져야 할 내열성과 내산화성, 내마모성 및 인성에 중점을 둔 내열강을 선택하였다. 사용된 실험재료는 국내 S사에서 제작된 배기밸브 재료로서 head부는 내식성, 내산화성, 고온강도가 높은 오스테나이트(austenite)계의 내열강 SUH31과 SUH35(고 Ni-Cr)강이고, stem부는 소입경화성 및 내마모성이 우수한 마르텐사이트(martensite)계의 내열강 SUH3(Si-Cr)강과 내식내열성의 스테인리스강 STS303, STS304가 사용되었다. 마찰용접부의 직경이 각각  $\phi 12.3$ ,  $\phi 16$ ,  $\phi 20$ ,  $\phi 24\text{mm}$ 인 시험편의 형상과 치수가 Fig. 1에, 그리고 다섯 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2와 같다.

마찰용접과 AE시험을 위한 시험편은 모재를 Fig. 1(a)와 같은 형상치수로 선삭가공한 후 마찰용접면은 선삭하였다.

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

Fig. 1(c)는 경도 및 조직 시험편으로서 직경 10mm의 용접부를 중심으로 좌우 25mm로 횡절단하고 중심선을 따라 종방향

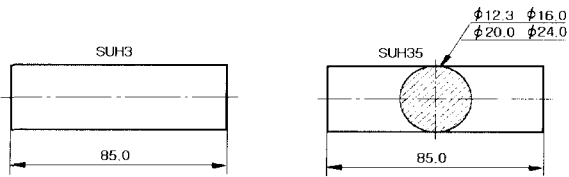
**Table 1** Chemical composition of materials used (wt.%)

Comp. Mtls.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ceq.
SUH3	0.42	2.00	0.23	0.026	0.010	10.34	0.25	0.75	1.51
SUH35	0.57	0.13	9.26	0.036	0.007	40.34	3.38	0.15	7.09
SUH31	0.41	1.90	0.60	-	-	15.16	14.00	-	2.78
STS303	0.08	0.49	1.67	0.024	0.275	17.86	8.70	-	2.72
STS304	0.08	0.35	1.60	0.017	0.028	18.54	8.78	0.28	2.77

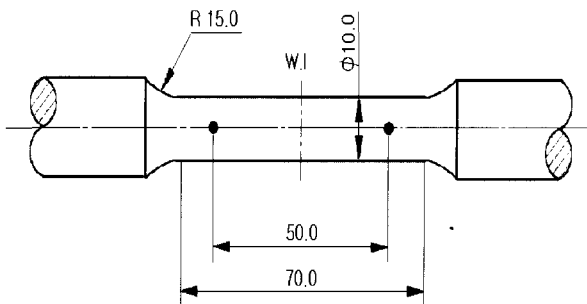
Note : Ceq. = Carbon equivalent

**Table 2** Mechanical properties of base materials

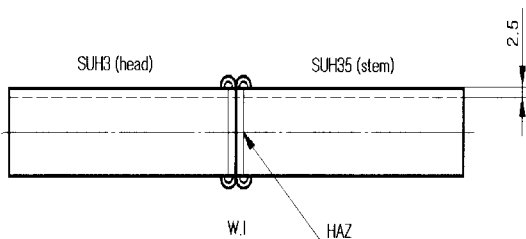
Prop. Mtls.	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of area $\psi$ (%)	Hardness (Hv)
SUH3	941	512	29.8	48.0	411
SUH35	1082	796	23.4	28.4	484
SUH31	895	720	30.0	40.0	310
STS303	638	263	64.0	50.0	200
STS304	687	435	61.4	60.0	235



(a) Friction welding and AE test specimen



(b) Room temperature tensile test specimen



(c) Hardness and micro structure specimen

**Fig. 1** Shape and dimension of test specimens

으로 두께 2.5mm만큼 밀링가공과 연삭한 후 경면연마하였다.

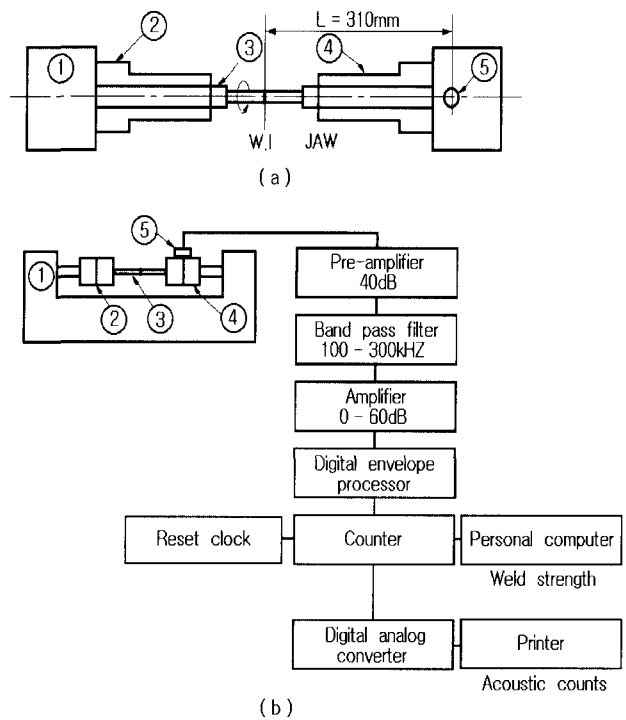
또한, 엔진 배기밸브의 스템부와 헤드부의 접합을 각각 SUH3-SUH35( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24mm), SUH3- SUH31( $\phi$  9,  $\phi$  10.3mm), SUH3-STS303( $\phi$  11mm) 및 SUH3-STS304( $\phi$  11mm) 로 하여 마찰용접과 AE시험을 수행한 후 마찰용접부(W.I, weld interface)의 인장시험을 수행하였다.

**2.2 실험방법**

**2.2.1 이종재 마찰용접시험**

본 연구 중 마찰용접시험에 쓰인 마찰용접기계는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은  $\phi$  25이고 슬라이드축은  $\phi$  40이다.

AE시험에 사용된 음향방출 시험장치(LOCAN 320, 4 channel) 는 14 채널까지 확장이 가능하며, Fig. 2에서는 AE 시험기를 마찰용접기에 결합한 block diagram을 나타내었다.



- ① Brake type friction welding machine
- ② Rotational hydraulic chuck
- ③ Workpieces
- ④ Stationary hydraulic chuck
- ⑤ Acoustic emission transducer

**Fig. 2** (a) AE transducer location

(b) Block diagram of AE monitoring equipment and computer aided strength and toughness evaluation

본 실험에 사용된 SUH3과 SUH35에 대한 적정마찰용접 조건을 결정하기 위해 참고문헌(오, 1986; 마찰압접연구회, 1979; Vill, 1962; Tasako, 1970; Okita, 1979; Oh, 1974; Oh, 1980; Oh, 1982; Gelifman, 1965)에 의해 구한 여러 실험조건 중에서 Table 3과 같이 회전수 2,000rpm, 마찰가열압력( $P_1$ )을 60~180MPa, 업셋 압력( $P_2$ )을 120~360MPa 그리고 업셋 시간( $t_2$ )을 3sec로 하여 압력을 변화시키고 용접부의 이음강도(인장강도)를 모재강도와 비교하기 위하여 가열시간( $t_1$ )을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시하였다. 이음부의 강도는 인장강도, 흡수에너지, 연신을 등을 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적가열시간( $t_1$ )을 결정 하였다(박, 1999).

SUH3 시험편은 고정부 유압척에 고정 설치하였고, 그의 시험편은 회전부 유압척에 설치하였다.

한편, 시험데이터의 비산범위(scatter)를 고려해서 예비시험, 마찰용접(friction welding, FRW)시험, AE시험 등에 있어서 동일한 조건에 대해 각각 3개의 시험편을 사용하여 데이터의 평균을 구해 데이터 정리 및 곡선피팅(curve fitting)하였다. 그리고 실험식은 최소자승법을 이용한 회귀해석법(regression analysis)에 의해서 구하였으며, 마찰용접에서 얻어진 강도와 AE양과의 상관관계를 도출하였다(Oh, 1983; 오, 1982).

용접시간 중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료 중에 검출된 초기 AE누적량과 용접 후 냉각기간 중에 검출된 후기 AE의 두 가지가 사용될 수 있는데(Oh, 1982; Oh et al., 1983; 오, 1982; Oh, 1983), 본 연구에서는 초기 AE양과 용접강도 상관실험식을 만들기 위하여 전자에 관하여만 해석하였다(박, 1999).

마찰용접시에 발생하는 AE양을 측정하기 위하여 Fig. 2의 (a) 및 (b)와 같이 고감도 센서(R15 150kHz sensor)를 마찰용접 기계의 마찰접합부에서 310mm인 위치의 정지척(chuck)에 부착하였고, 음향 연결재(acoustic couplant)로는 그리스(grease)를 사

용하여 테이프로 센서를 고정시켰다.

측정조건들을 Table 4에 나타내었으며, 취약한 정도(level)에 신호전압을 높이기 위해서 주증폭기(post amplifier)에서 35dB gain을 제공하였고, 외부 소음(noise)을 제거하기 위해서 한계전압(threshold voltage)은 1.0V로 설정하여 실험을 수행하였다.

상온인장시험에 사용된 인장시험기(Toyo Bawldwin UTM-25T)에서의, 인장속도는 2mm/min으로 수행하였다.

Table 3의 용접조건에 따라 마찰용접한 용접재 SUH3-SUH35를 Fig. 1(b)와 같은 형상의 치수로 가공한 후 인장시험을 수행하여 인장시험편의 인장강도를 마찰용접조건에 따라 조사함으로써 최적마찰용접조건을 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 내열강 이종재의 마찰용접 최적화

##### 3.1.1 마찰용접조건에의 영향

본 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수( $n$ , rpm), 마찰가열압력( $P_1$ , MPa), 단조가압력( $P_2$ , MPa), 마찰가열시간( $t_1$ , sec), 단조가압시간( $t_2$ , sec) 등이며, 내열강 이종재(SUH3, SUH35)의 마찰용접 최적가열압력  $P_1$ 과 최적단조가압력  $P_2$ 를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌과 실험 데이터(오, 1996; 마찰용접연구회, 1979)를 참고로 가열시간  $t_1$ 과 가압시간  $t_2$ 를 각각 5sec, 3sec 정하였다. 그리고 Table 3(Case 1)과 같이 마찰용접조건을 변화시키면서 마찰용접을 하였다.

Fig. 3은 SUH3과 SUH35 강 of  $\phi 12.3$ ,  $\phi 16$ ,  $\phi 20$ ,  $\phi 24$ mm 이종재 마찰용접에서 마찰가열압력( $P_1$ ), 마찰단조가압력( $P_2$ )의 변화에 따른 용접부 인장강도의 변화를 나타낸 실험결과를 보여 준다.

Fig. 3에서 압력이 가장 낮은 경우의 파단위치는 용접경계면(W.I)에서 SUH3측 측으로 28mm되는 위치로서 모재부의 파단이고, 그 외의 압력에서는 용접계면 W.I에서 SUH3측으로 수 mm 떨어진 HAZ부 파단이였다. 모든 압력의 경우 용접재의 인장강도는 SUH35의 모재 인장강도(1082MPa) 보다는 훨씬 낮지만, SUH3의 모재의 인장강도(741MPa) 보다는 훨씬 높음을 알 수 있다. 용접 이음부의 인장강도로 볼 때,  $P_1=160$ MPa,  $P_2=320$ MPa일 때가 가장 인장강도가 높게 나타났으므로 이 때가 가장 적정한  $P_1$ ,  $P_2$ 값으로 생각된다. 압력이 증가함에 따라 인장강도가 증가하다가  $P_1=160$ MPa,  $P_2=320$ MPa일 때가 피크

**Table 3** Welding condition for dissimilar friction welding of bar-to-bar

Case	Rotation speed $n$ (rpm)	Heating pressure $P_1$ (MPa)	Forging pressure $P_2$ (MPa)	Heating time $t_1$ (sec)	Forging time $t_2$ (sec)	FRW materials match
1	2,000	60	120	5	3	SUH3-SUH35 ( $\phi 12.3$ , $\phi 16$ , $\phi 20$ , $\phi 24$ )
		100	200			
		140	280			
		160	320			
		180	360			
2	2,000	160	320	1~12	3	
3	3,000	120	300	4~5	2.5	$\phi 9$
		95	220	4~5	2.5	$\phi 10.3$
4	2,000	80	180	1.5	2	SUH3-ST303 ( $\phi 11$ )
5	2,000	80	180	1.5	2	SUH3-ST304 ( $\phi 11$ )

**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
Post-amplifier	35dB gain
Threshold voltage at comparator	1.0V (80dB : gain + threshold)

(peak)이고, 그 후 인장강도가 떨어지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 과(過)입열량에 의한 강도저하와 열화의 영향에 기인한 것이며, 이는 Oh(Oh, 1974; Oh, 1980; Oh, 1983)등의 결과와도 일치함을 보이고 있다.

3.1.2 용접조건과 용접부 강도(인장강도)와의 상관성

Table 3(Case 2)과 같은 조건에서 SUH3과 SUH35( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24mm)를 마찰용접한 결과로서, Fig. 3에서 구한 마찰가열압력( $P_1$ )과 단조가압력( $P_2$ )을 각각 160, 320(MPa),  $t_2 = 3(sec)$ 으로 하여 마찰가열시간( $t_1$ )을 변화시키면서 마찰용접시험을 수행한 그래프가 Fig. 4이다.

Fig. 4에서 인장파단은 대부분 SUH3 측에서 파단되었고, 일부만이 SUH35 접합부 근방의 모재부에서 파단되어 일반적으로 양호한 접합임을 알 수 있었다. 마찰가열시간  $t_1$ 이 증가함에 따라 인장강도가 증가하여  $t_1 = 5 \sim 7sec$ ,  $5 \sim 7.5sec$ ,  $6 \sim 8sec$  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  $t_1 = 7sec$  이상에서는 인장강도가 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 가열을 오래 지속시키면 입열량이 과도하게 되어 용접부의 담금질 효과에 의한 강도증가를 충분히 기대하기 어렵고 오히려 과열에 의한 열화 때문이며, 이것은 Oh 등(Oh, 1980; 1982; Gelifman, 1965; 박, 1999)의 결과와도 일치함을 보이고 있다.

따라서  $OptZ$ (optimum  $t_1$  zone) (by  $\sigma_t$ ), 즉, 최적 가열시간의 범위는 시험편 직경  $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24mm에 따라 각각  $5 \sim 7sec$  ( $\phi$  12.3),  $5 \sim 7.5sec$  ( $\phi$  16,  $\phi$  20),  $6 \sim 8sec$  ( $\phi$  24)임을 알 수

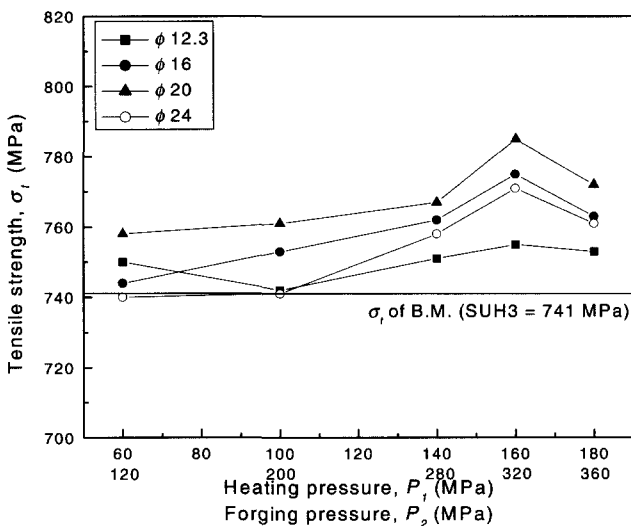


Fig. 3 Typical relationship between heating or forging pressure and tensile strength for the welded joints of SUH3 to SUH35( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24)

Welding condition : Same as those in Table 3, Case 1

있다. 이 때의 인장강도는 모재 SUH3의 인장강도보다 높으며, 평균 이음효율이 104%가 된다. 따라서  $\phi$  16과  $\phi$  24mm의 SUH3과 SUH35의 엔진 배기밸브재의 적정 마찰용접조건은 회전수  $n = 2000rpm$ , 마찰가열압력  $P_1 = 160MPa$ , 단조가압력  $P_2 = 320MPa$ , 마찰가열시간  $t_1 = 5 \sim 7.5sec$  ( $\phi$  20) 및  $6 \sim 8sec$  ( $\phi$  24), 단조가압시간  $t_2 = 3sec$ 라 할 수 있다.

이와 같이 여러 가지 내열강의 용접재와 상이한 직경에 따라  $OptZ$ 에서의 평균 용접부 인장강도와 이음효율을 Table 5에 나타내었다.

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

$\phi$  12.3 :

$$\sigma_t = -0.480t_1^3 + 6.167t_1^2 - 18.544t_1 + 749 \quad (R^2 = 0.99) \quad (1)$$

$\phi$  16 :

$$\sigma_t = 1.28t_1^3 - 30.74t_1^2 + 225.65t_1 + 266 \quad (R^2 = 0.97) \quad (2)$$

$\phi$  20 :

$$\sigma_t = -4.652t_1^2 + 56.978t_1 + 611 \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

$\phi$  24 :

$$\sigma_t = -0.318t_1^3 + 2.251t_1^2 + 18.305t_1 + 645 \quad (R^2 = 0.97) \quad (4)$$

여기서,  $R^2$ 은 기여도(coefficient of determination)를 나타낸다.

3.1.3 용접조건과 용접부 인성과의 상관성

마찰용접의 최적화를 위하여, 이음부의 강도(이음효율 100% 이상)와 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신율)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3(Case 2)의 마찰용접조건

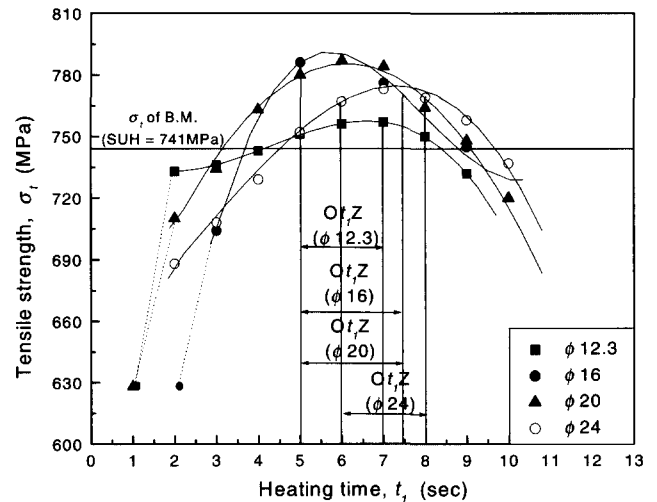


Fig. 4 Relationship between heating time and tensile strength for the welded joints (SUH3-SUH35) ( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24)

Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

에 따라 SUH3과 SUH35를 마찰용접할 때 마찰가열시간에 대한 마찰용접부의 인장흡수에너지, 단면수축율 및 연신율과의 상관관계는  $\phi 12.3$ 의 경우 Fig. 5와 같았다.

Fig. 5에서 SUH3과 SUH35의 마찰용접부의 흡수에너지 그래프를 보면, 마찰가열시간  $t_1 = 1\text{sec}$ 에서부터 증가하는 경향을 나타낸다.

흡수에너지는 용접조건  $t_1$ 의 증가에 따라 가열로 인한 연화성때문에 대체로 증가하다가 Fig. 4에서 구한  $O_t/Z$ 인  $t_1 = 5 \sim 7\text{sec}$ 일 때가 가장 양호한 것으로 나타났다. 이 때 연신율과 단면수축율은 약간 증가한 상태이나, 거의 일정하게 나타난다.

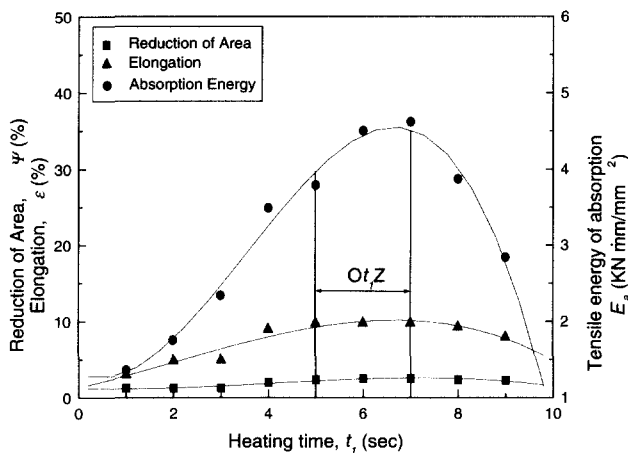
이상에서 알 수 있듯이, 마찰용접부의 인성(인장흡수에너지, 연신율, 단면수축율)을 고려하여 도출한 마찰용접 적정조건인 마찰가열시간  $t_1 = 1 \sim 7\text{sec}(O_t/Z)$ 에서 인성을 고려할 때 큰 문제가 되는 것은 전혀 없다고 생각되며, 다른 직경과 다른 재료의 마찰용접의 경우도 같은 경향이 나타났다.

**Table 5** Tensile strength and joint efficiency and Ceq. of each dissimilar friction welded joint with different diameters

Dissimilar FRW joint	SUH3-SUH35				SUH3-SUH31	
	$\phi 12.3$	$\phi 16$	$\phi 20$	$\phi 24$	$\phi 9$	$\phi 10.3$
Mean Ceq. (%)	4.30				2.15	
Diameter (mm)	$\phi 12.3$	$\phi 16$	$\phi 20$	$\phi 24$	$\phi 9$	$\phi 10.3$
$\sigma_t$ of B.M (SUH3)(MPa)	741	741	741	741	800	800
Av. $\sigma_t$ at $O_t/Z$ (MPa)	755	775	785	771	805	831
Joint efficiency	102	105	106	104	101	104

Note : Av. = Average Av.  $\sigma_t = 736\text{MPa}$   
 Ceq. = Carbon equivalent Av. joint efficiency = 104%  

$$C_{eq.} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Cu}{40} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10}$$



**Fig. 5**  $E_a$  vs.  $t_1$ ,  $\epsilon$  vs.  $t_1$  and  $\psi$  vs.  $t_1$  of friction welded joints of SUH3-SUH35 in case of  $\phi 12.3$  bar-to-bar  
 Welding condition : Same as those in Fig. 4

3.1.4 내열강의 이종재 마찰용접의 최적화

Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 여러 가지 재료의 경우 강도와 인성을 고려하여 마찰용접의 최적화 즉, 최적용접조건을 구한 결과는 Table 6과 같다.

3.2 용접부의 경도분포와 미세조직

Fig. 6은 이종재의 마찰용접 계면으로부터 일정한 간격으로 비커스 경도시험을 한 결과를 나타내고 있다. 용접계면(weld interface)에서 가장 높은 경도를 나타내고 있으며 W.I(weld interface)에서 멀어지면서 차츰 경도가 낮아짐을 알 수 있다. 또한 용접계면에서 어느 정도 떨어진 이후에는 거의 변화하지 않고 일정한 값을 유지함을 알 수 있었다. 그림에서 SUH3이 SUH35에 비해 열영향부가 크며, 모재쪽에서는 SUH35에 비해 경도가 낮게 나타남을 알 수 있었다. 용접계면에서 경도치가 최고가 되는데, 가압에 의한 미세치밀한 조직 때문에 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 모재의 경우 각각 SUH3은 Hv411, SUH35는 Hv484의 경도값을 가지는데, 용접계면의 경우 Hv560 정도로서 SUH3보다 약 36% 상승했으며, HAZ(heat affected zone)는 용접계면에서 좌우 각각 3~4mm 정도이다. 이러한 경도의 peak는 용접 후 열처리로써 완화시킬 수 있을 것으로 생각된다(Oh, 1982).

Fig. 7은 모재와 열영향부(HAZ) 및 마찰용접부의 조직을 검사하기 위해 중심축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접계면(W.I)과 열영향부 및 모재부의 조직사진이다. 시험편의 경우 최적마찰용접조건인  $n=2000\text{ rpm}$ ,  $P_1=160\text{ MPa}$ ,  $P_2=230\text{MPa}$ ,  $t_1=5\text{sec}$ ,  $t_2=3\text{sec}$ 로 용접된 시험편을 사용하였고, 파단이 대부

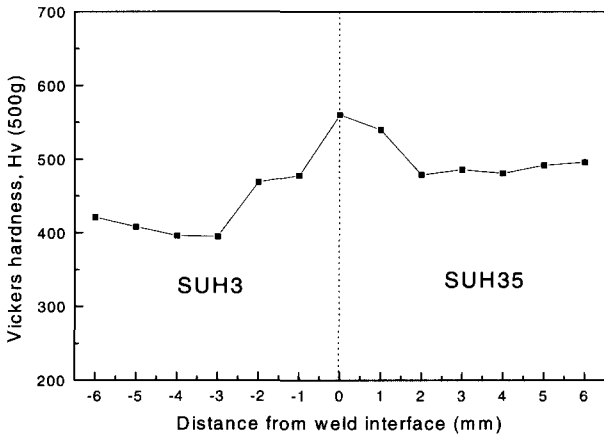
**Table 6** Optimum welding conditions of FRW for each dissimilar friction welded joint

Dissimilar FRW joints	SUH3-SUH35				SUH3-SUH31		
	Diameter (mm)	$\phi 12.3$	$\phi 16$	$\phi 20$	$\phi 24$	$\phi 9$	$\phi 10.3$
Optimum welding condition	$n$ (rpm)	2000	2000	2000	2000	3000	3000
	$P_1$ (MPa)	160	160	160	160	120	95
	$P_2$ (MPa)	320	320	320	320	300	220
	$t_1$ (sec)	5~7	5~7.5	5~7.5	6~8	4~5	4~5
	$t_2$ (sec)	3	3	3	3	2.5	2.5

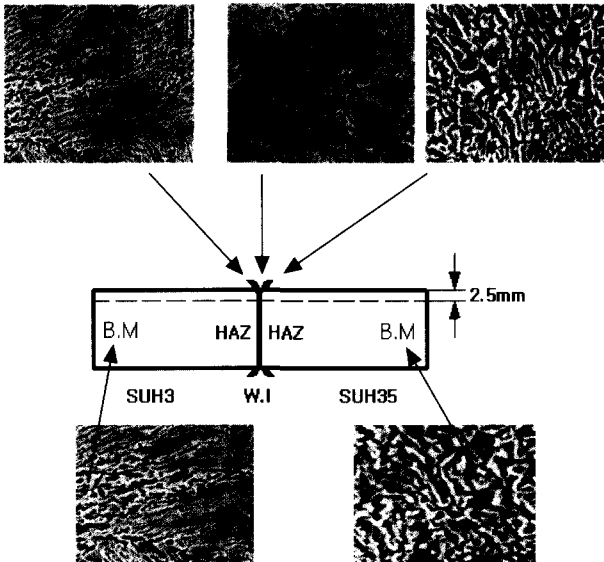
  

Dissimilar FRW joints	SUH3-ST3303	SUH3-ST3304	
	Diameter (mm)	$\phi 11$	$\phi 11$
Optimum welding condition	$n$ (rpm)	2000	2000
	$P_1$ (MPa)	80	80
	$P_2$ (MPa)	180	180
	$t_1$ (sec)	1.5	1.5
	$t_2$ (sec)	2	2

본 SUH3 모재측에서 파단되므로 HAZ부와 W.I의 미세조직 결합은 없다고 생각된다. 전반적으로 조직은 소르바이트(sorbite) 상태로 나타나 있으나, 마찰가열시간의 변화에 따라 HAZ부와 W.I의 조직이 조금씩 상이함을 확인할 수 있었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 용접계면과 열영향부는 같은 소르바이트(sorbite) 조직이지만 미세 치밀한 조직부인 W.I에 따라 원주방향으로 약간의 금속 이동의 흐름(metal flow)을 볼 수 있다. 즉 마찰용접부는 모재에 비해서 미세한 결정립을 가진 조직으로 되며 조직상 아주 양호함을 알 수 있다.



**Fig. 6** Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of SUH3 to SUH35 ( $\phi 16$ )  
Welding condition :  $n=2000\text{rpm}$ ,  $P_1=160\text{MPa}$ ,  $P_2=230\text{MPa}$ ,  $t_1=5\text{sec}$ ,  $t_2=3\text{sec}$



**Fig. 7** Micro-structures of B.M, HAZ and weld interface of friction welded joints of SUH3 to SUH35 ( $\phi 16$ )  
Welding condition :  $n=2000\text{rpm}$ ,  $P_1=160\text{MPa}$ ,  $P_2=230\text{MPa}$ ,  $t_1=5\text{sec}$ ,  $t_2=3\text{sec}$

**3.3 재료(탄소당량) 및 직경이 용접품질 및 평가에 미치는 영향**

**3.3.1 재료(탄소당량)의 영향**

마찰용접에 있어서 재료가 용접부의 품질(강도, 인성 등)이나 품질평가를 위한 AE양에 큰 영향을 미치는 것은 당연하다고 할 수 있다. 동일 강종인 탄소강에서도 그 탄소함량이 증가함에 따라 마찰용접부의 강도는 증가하고 그 때의 총 AE양도 증가한다. 이 때 AE양의 증가는 용접시간중 대량의 소성변형에 의한 초기 AE양의 증가보다 용접후 냉각중에 발생하는 마르텐사이트(martensite)조직의 증가(탄소양이 많을수록 증가함)에 기인하여 AE양이 증가하기 때문이다. 동종강이나 이종강의 마찰용접에서도 탄소당량의 증가에 따라 기계적 성질에 미치는 영향이 크므로, 역시 AE양에도 그 영향이 클 것으로 예측된다. 따라서, 각종 재료에 따른 마찰용접 최적화와 품질평가를 위한 AE 시험결과와 데이터가 많이 축적되어야 할 것이다.

Fig. 8은 Table 5에서 구한 탄소당량이 증가함에 따라 마찰용접부의  $O_t, Z$ 에서의 평균인장강도(Table 5)가 약간 증가하는 경향이 있으며, 탄소당량에 무관하게 최적용접조건하의 경우에는 이음효율이 100%이상임을 확인할 수 있었다.

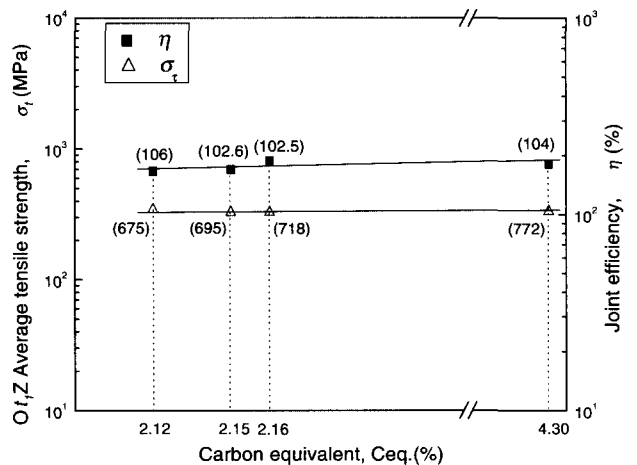
**3.3.2 시험편 직경이 마찰용접 및 품질평가에 미치는 영향**

본 연구에서 사용된 직경은  $\phi 9$ ,  $\phi 10.3$ ,  $\phi 11$ ,  $\phi 12.3$ ,  $\phi 16$ ,  $\phi 20$ ,  $\phi 24\text{mm}$ 로서 직경의 증가에 따라 용접조건의 압력, 가열시간 또는 가열업셋양 등의 값을 대체로 증가시켜 설정한다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 직경이 마찰용접부의 품질(인장강도) 및 음향방출(AE)에 미친 영향을 나타낸다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 직경 D의 증가에 따라 용접부강도가 근소하게 증가하다가 감소하는 경향이, 대체로 큰 변화가 없다.

Fig. 10에서 직경 D의 증가에 따라 용접부의 AE 누적총량이 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.



**Fig. 8**  $\sigma_t$  vs.  $C_{eq}$  and  $\eta$  vs.  $C_{eq}$  of dissimilar FRW joints of SUH3 to SUH35( $C_{eq}$  4.30 %), SUH3 to SUH31( $C_{eq}$  2.15%), SUH3 to STS303( $C_{eq}$  2.12%) and SUH3 to STS 304( $C_{eq}$  2.14%)

Welding condition : Same as those in Table 5, Case 2-5

따라서, 용접 후의 강도나 용접중 AE양에도 직경의 크기가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.3.3 AE에 의한 마찰용접 품질(인장강도)의 실시간 평가

Fig. 11은 SUH3-SUH35 마찰용접재(φ12.3, φ16, φ20, φ24)에 대하여 마찰가열시간  $t_1$ 의 증가에 따른 AE총량의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 가열시간( $t_1$ )의 증가에 따라 마찰용접부의 소성변형이 계속해서 크게 일어나기 때문에 AE(acoustic emission)도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 본 실험에서는 AE총량의 증가가 2차 곡선의 형태를 나타냄을 알 수 있다. 그 관계식은 아래와 같이 도출되었다.

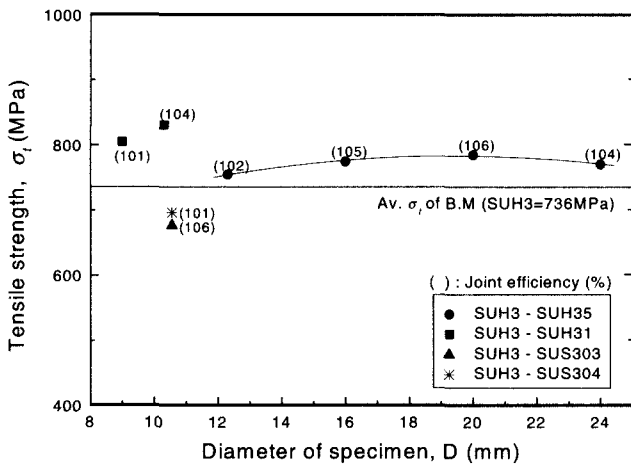


Fig. 9 Tensile strength vs. Diameter (φ9, φ10.3, φ11, φ12.3, φ16, φ20, φ24) of each FRW material

Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2-5

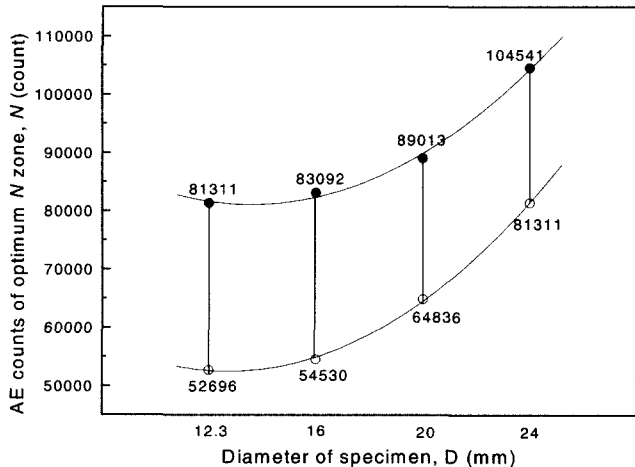


Fig. 10 AE counts vs. Diameter of specimen (φ12.3, φ16, φ20, φ24) of FRW SUH3 to SUH35

Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

φ12.3 :

$$N = 759.01 t_1^2 + 6643.39 t_1 - 645 \quad (R^2=0.98) \quad (5)$$

φ16 :

$$N = 1026.61 t_1^2 - 1759.81 t_1 + 37427 \quad (R^2=0.99) \quad (6)$$

φ20 :

$$N = 724.86 t_1^2 + 1313.64 t_1 + 38387 \quad (R^2=0.99) \quad (7)$$

φ24 :

$$N = 424.42 t_1^2 + 4107.6 t_1 + 43108 \quad (R^2=0.99) \quad (8)$$

Fig. 12는  $\sigma_t - N$ 의 관계를 보여주고 있다. 또한  $\sigma_t - N$ 의 상관실험식은 다음과 같이 도출되었다.

φ12.3 :

$$\sigma_t = -3.2617 \times 10^{-9} N^2 + 6.78 \times 10^{-4} N + 724 \quad (R^2=0.94) \quad (9)$$

φ16 :

$$\sigma_t = 8.432 \times 10^{-13} N^3 - 2.5624 \times 10^{-7} N^2 + 0.023N + 134 \quad (R^2=0.94) \quad (10)$$

φ20 :

$$\sigma_t = 3.712 \times 10^{-13} N^3 - 1.393 \times 10^{-7} N^2 + 0.015N + 306 \quad (R^2=0.99) \quad (11)$$

φ24 :

$$\sigma_t = 1.769 \times 10^{-13} N^3 - 9.908 \times 10^{-8} N^2 + 0.014N + 190 \quad (R^2=0.99) \quad (12)$$

결과적으로 이종재 마찰용접은 Fig. 11, Fig. 12와 식 (9)~(12)에서 알 수 있듯이 마찰용접 중의 AE 총량  $N$ 을 측정함으로써, 즉시 실시간에 그 용접재의 인장강도  $\sigma_t$ 를 예측할 수 있고, 이로써 타재료와 마찬가지로 본 연구에서도 AE에 의해 마찰용접시 용접품질에 대한 실시간 제어가 가능함을 알 수 있었다(Oh, 1982; 박, 1999; Oh et al., 1983; Oh, 1983). 즉, 마찰용접 중에  $N$ 의 측정이 ONZ 범위 내이면 그 마찰용접재는 이음부 인장강도가 모재 SUH3의 것보다 높으며, 그 이음효율은 100% 이상임을 용접 실시간에 비파괴적으로 예측 및 확인이 가능함을 뜻한다.

Fig. 11, Fig. 12에서 각 용접재에 대한 최적  $t_1$ 의 범위( $OptZ$ )를 식 (5)~식 (12)에 대입하여 구한 최적 AE 총량의 범위(ONZ)를 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Optimum N zone for dissimilar friction welded joints

Materials	SUH3-SUH35				
	Diameter (mm)	φ12.3	φ16	φ20	φ24
Optimum $t_1$ Zone (sec)	5~7	5~7.5	5~7.5	6~8	
Optimum N Zone (counts)	~	52696	54530	64836	73938
	~	81311	83092	89344	104541

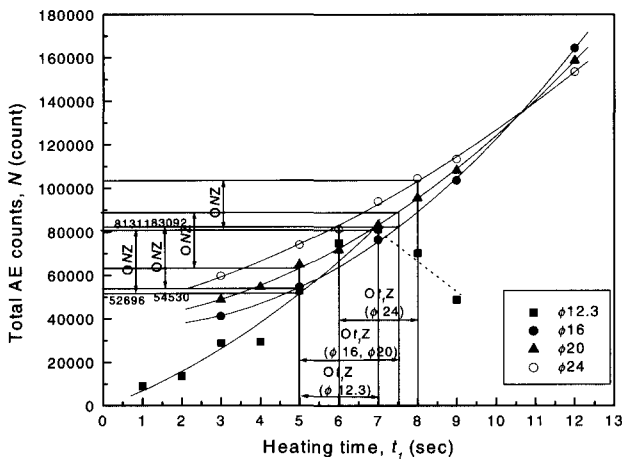


Fig. 11  $N$  vs.  $t_1$  in friction welding of SUH3 to SUH35 ( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24)

Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

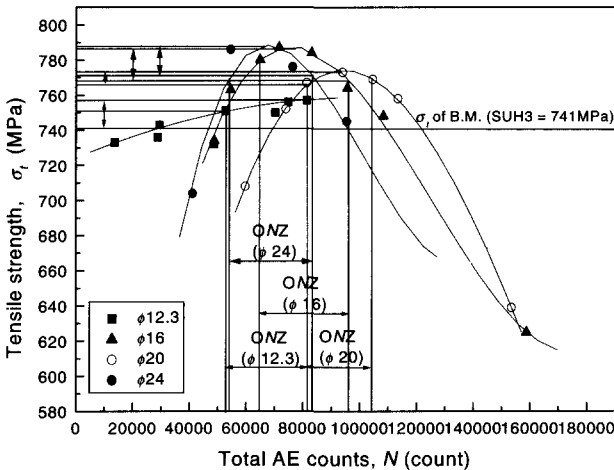


Fig. 12  $\sigma_t$  vs.  $N$  in friction welding of SUH3 to SUH35 ( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24)

Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

### 4. 결 론

엔진용 배기밸브 재료 내열강 이종재 SUH3과 SUH35( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24mm)의 마찰용접 최적화 연구와 AE에 의한 마찰용접부의 품질(강도, 인성)에 대한 비파괴적 실시간평가법에 관하여, 연구한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 엔진용 내열강 SUH3과 SUH35( $\phi$  12.3,  $\phi$  16,  $\phi$  20,  $\phi$  24)의 이종재 마찰용접 최적화 기술과 AE에 의한 용접 실시간중 비파괴적으로 평가할 수 있는 기술이 개발되었다.
- (2) 최적용접조건은 회전수 2000rpm, 마찰가열압력 160 MPa, 업셋 단조가압력 320MPa, 업셋 단조시간 3sec일 때, 마찰가열 시간이  $\phi$  12.3일 때 5~7sec,  $\phi$  16,  $\phi$  20일 때 5~7.5sec,  $\phi$  24일 때 6~8sec임이 밝혀졌다.
- (3) 마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t$ (MPa)와 가열시간  $t_1$ (sec)사이

정량적 상관관계가 존재하며, 그 상관실험식은 다음과 같다.

$$\phi 12.3 : \sigma_t = -0.480t_1^3 + 6.167t_1^2 - 18.544t_1 + 749$$

$$\phi 16 : \sigma_t = 1.28t_1^3 - 30.74t_1^2 + 225.65t_1 + 266$$

$$\phi 20 : \sigma_t = -4.652t_1^2 + 56.978t_1 + 611$$

$$\phi 24 : \sigma_t = -0.318t_1^3 + 2.251t_1^2 + 18.305t_1 + 645$$

4)  $t_1$ 의 최적범위  $0t_1Z = 5 \sim 7\text{sec}(\phi 12.3)$ ,  $5 \sim 7.5\text{sec}(\phi 16, \phi 20)$ ,  $6 \sim 8\text{sec}(\phi 24)$ 일 때의 이음효율 100%이상되는 최적 AE 총량의 범위 ONZ는 각각 52696~81311, 54530~83092, 64836~89344, 73938~104541 counts임이 밝혀졌으며, 마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t$ (MPa)와 용접 중의 AE총량  $N$ (counts)와의 실험적 상관관계 식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\phi 12.3 : \sigma_t = -3.2617 \times 10^{-9}N^2 + 6.78 \times 10^{-4}N + 724$$

$$\phi 16 : \sigma_t = 8.432 \times 10^{-13}N^3 - 2.5624 \times 10^{-7}N^2 + 0.023N + 134$$

$$\phi 20 : \sigma_t = 3.712 \times 10^{-13}N^3 - 1.393 \times 10^{-7}N^2 + 0.015N + 306$$

$$\phi 24 : \sigma_t = 1.769 \times 10^{-13}N^3 - 9.908 \times 10^{-8}N^2 + 0.014N + 190$$

### 후 기

본 연구 논문은 1999년도 부경대학교 대학원생 연구 지원비에 의해 연구된 논문임.

### 참 고 문 헌

박형동(1999). "과급기 터빈 임펠러-축의 이종재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 실시간 평가 및 Creep특성예측에 관한 연구", 부경대학교 대학원 공학박사 논문, pp 1~105.

오세규(1982). "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석 (1)", 대한기계학회지, 제22권, 제3호, pp 184~190, 202.

오세규(1986). "Application of Friction Welding to parts of industrial machinery", 韓國船舶用機關學會誌, 第10卷, pp 32~34.

Gelifman, E. Y. and Temirov, M. D.(1965). "The Friction Welding of Marine Engine Valves", J. Auto Weld. 18, pp 55~58.

Oh, S. K.(1974). "Study on Friction Welding of Valve Materials SUH3-SUH31", J. Korean. Soc. Mech. Eng., 14, pp 221~232.

Oh, S. K., Lee, K. Y. and Kim, H. J.(1980). "A Study on Fatigue Strength of Friction-Welded Heat-Resisting Steels at High Temperature(1)", Proc. KSME June, pp 130~138.

Oh, S. K.(1982). "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.

Oh, S. K. and Wang, K. K.(1983). "Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic Emission in Friction Weld", J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp 22~33.

Oh, S. K.(1983). "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength



- by Acoustic Emission”, Transaction of KSME, Vol.7, No.2, pp 226~236.
- Oh, S. K.(1986). “Application of Friction Welding to parts of industrial machinery”, 韓國舶用機關學會誌, 第10卷, pp 32~34.
- Okita, K. and Kishimoto, W.(1979). “Studies on Friction Welding of SUS304 Austenitic Stainless (Report I)”, J. Weld. Soc. 48, pp 991~995.
- Tasako, Y. and Nakayama, N.(1970). “Friction Welding of Ni-Based Super Alloyed Nitriding Steel”, J.prec. Mech. Mar., 36, pp 707~711.
- Vill, V. I.(1962). “Friction Welding of Metals”, Svarochoe Proizvodstvo, 3, pp 19~23.
- 摩擦壓接研究會(1979). “摩擦壓接”, コロナ社, pp 46, pp 145~150, pp 184.
- 
- 2000년 11월 29일 원고 접수  
2001년 5월 2일 수정본 채택