한국해양공학회 2000년도 추계학술대회 논문집 PP. 12~19

내열강재 SUH3과 SUH35의 마찰용접 특성과 AE에 의한 실시간 평가

양형태* · 오세규** · 황성필* · 김일석*

* 부경대학교 대학원, ** 부경대학교 기계공학부

Study on Friction Welding of Heat Resisisting Steel Materials of SUH3 and SUH35, and Its Real Time Evaluation by AE

Hyung-Tae Yang* · Sae-Kyoo Oh** · Sung-Phil Hwang* · Il-Sug Kim** · Yu-Sik Kong**

* *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, Acoustic emission(AE), Friction welding(FRW), Optimum welding condition, Real time evaluation, Weld quality, Weld interface(W.I)

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 φ12.3mm, φ16mm, φ20mm and φ24mm 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(φ12.3mm, φ16mm, φ20mm, φ24mm) 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 기계공업 분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 생산원가의 절감을 위한 이종마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성 높은 제품을 대량생산하는 등의 접합수단으로 많이 이용되고 있다[1, 2].

본 연구의 목적 및 수행 내용으로는 1) 각종 운송기계의 설계·제작을 위해 엔진의 요소부품 간의 이종재 마찰용접 최적화와 AE에 의한 품질 실시간평가 기술개발, 2) 내열강재의 이종재 마찰용접재 및 그 모재의 고온 creep 특성 및 안전수명의 초기연신율법(ISM)에 의한 실시간평가 기술개발이다.

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 SUH35(고 Ni-Cr)강이고, stem부는 소입경화성 및 내마모성이 우수한 마르텐사이트(martensite)계의 내열강 SUH3(Si-Cr)강이다. 마찰용접부의 직경이 각각 φ12.3, φ16, φ20, φ24mm인 시험편의 형상과 치수가 Fig. 1에, 그리고 두 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2와 같다.

마찰용접과 AE시험을 위한 시험편은 모재를 Fig. 1(a)와 같은 형상치수로 선삭가공((lathe turning)한 후 마찰용접면은 선삭(turning)하였다.

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

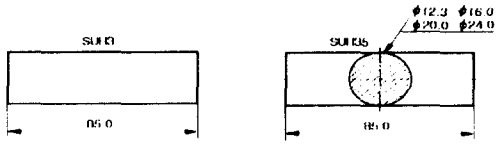
Note : Ceq. = Carbon equivalent

Table 2 Mechanical properties of base materials

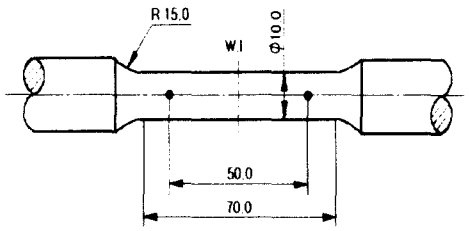
Prop. / Mtls.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ε (%)	Reduction of Area ψ(%)	Hardness (Hv)
SUH3	941	512	23.4	48.0	411
SUH35	1082	796	29.8	28.4	484
SUH31	895	720	30.0	40.0	310
STS303	638	263	64.0	50.0	200
STS304	687	435	61.4	60.0	235

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

또한, 엔진 배기밸브의 스템부와 헤드부의 접합을 씀씀 SUH3-SUH35(ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24mm), SUH3-SUH31(ϕ9, ϕ10.3mm), SUH3-STS303(ϕ11mm) 및 SUH3-STS304(ϕ11mm)로 하여 마찰용접과 AE시험을 수행한 후 마찰용접부(W.I, weld interface)의 인장시험을 수행하였다.



(a) Friction welding and AE test specimens



(b) Room temperature tensile test specimens

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

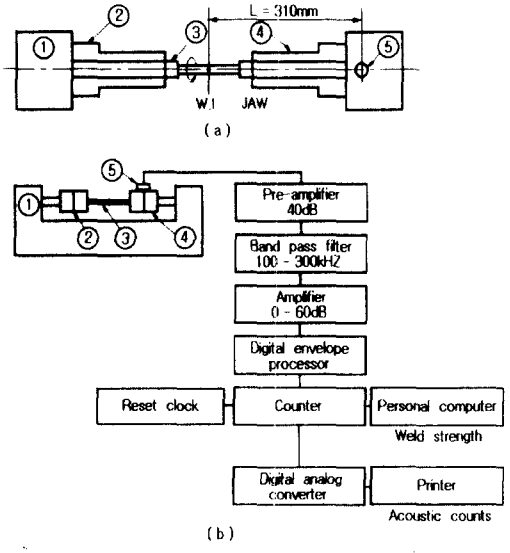
2.2 실험방법

2.2.1 이종재 마찰용접시험

본 연구 중 마찰용접시험에 쓰인 마찰용접기계는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전측은 ϕ25이고 슬라이드측은 ϕ40이다.

AE시험에 사용된 시험기는 음향방출 시험장치(LOCAN320, 4 channel)로써 14 channel까지 확장이 가능하며, Fig. 2에서는 AE 시험기를 마찰용접기계에 결합한 block diagram을 나타내었다.

본 실험에 사용된 SUH3과 SUH35에 대한 적정마찰용접조건을 결정하기 위해 참고문헌[1-9]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, 연신율 등을 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적가열시간(t_1)을 결정 짓는다[10].



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

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 (ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24)
		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	ϕ9 SUH3-SUH31
		95	220	4~5	2.5	ϕ10.3 SUH3-SUH31
4	2,000	80	180	1.5	2	SUH3-STS303 (ϕ11)
5	2,000	80	180	1.5	2	SUH3-STS304 (ϕ11)

SUH35 시험편은 회전부 유압척에, SUH3 시험편은 고정부 유압척에 고정 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 실험식을 실험 데이터를 통하여 최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의해 전산화해서 구하였으며, 마찰용접에서 얻어진 강도와 AE양과의 상관관계를 도출하였다[11-13].

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[8, 11-13], 본 연구에서는 초기 AE량과 용접강도 상관실험식을 만들기 위하여 전자에 관하여만 해석하였다[10].

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 Fig. 2의 (a) 및 (b)와 같이 고감도 센서(R15 150kHz sensor)를 TOHO TH-25 마찰용접기계의 마찰접합부에서 310mm인 위치의 정지척(chuck)에 부착하였고, 음향 연결재(acoustic couplant)로는 그리스(grease)를 사용하여 테이프(tape)로 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 Bawld- win UTM - 25T)에서의, 인장속도는 2mm/min으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 내열강 이종재의 마찰용접 최적화

3.1.1 마찰용접조건의 영향

이 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_1과 최적단조가압력 P_2를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌과 실험데이터를 참고로 가열시간 t_1과 가압시간 t_2를 각각 5sec, 3sec 정하였다. 그리고 Table 3(Case 1)과 같이 마찰용접조건을 변화시키면서 마찰용접을 하였다.

Fig. 3은 SUH3과 SUH35 강의 ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24mm 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 SUH3종 측으로 28mm되는 위치로서 모재부의 파단이고, 그 외의 압력에서는 용접계면 W.I에서 SUH3종 측으로 수 mm 떨어진 HAZ부 파단이었다. 모든 압력의 경우 SUH35종의 모재 인장강도(1082MPa) 보다는 훨씬 낮지만, SUH3종의 모재의 인장강도(741MPa) 보다는 훨씬 높음을 알 수 있다. 용접 이음부의 인장강도로 볼 때, P_1=160MPa, P_2=320MPa일 때가 가장 인장강도가 높게 나타났으므로 이 때가 가장 적정한 P_1, P_2값으로 생각된다. 압력이 증가함에 따라 인장강도가 증가하다가 P_1=180MPa, P_2=360MPa일 때가 피크(peak)이고, 그 후 인장강도가 떨어지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 재료 자체의 특성과 입열량의 영향에 의한 것으로 보인다[6-8].

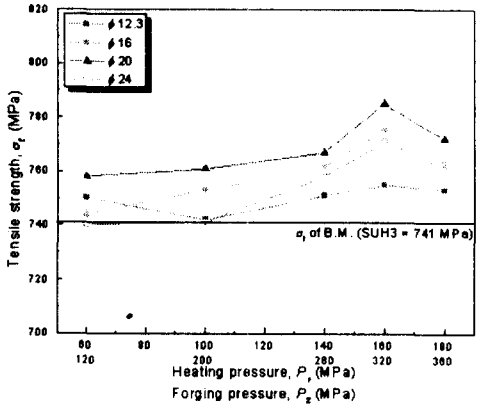


Fig. 3 Typical relationship between heating or forging pressure and tensile strength for the welded joints of SUH3 to SUH35(ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24) Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

3.1.2 용접조건과 용접부 강도(인장강도)와의 상관성

Table 3(Case 2)과 같은 조건에서 SUH3과 SUH35(ϕ 12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24mm)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_1이 증가함에 따라 인장강도가 증가하여 t_1 = 5~7sec, 5~7.5sec, 6~8sec사이가 이음효율 100% 이상인 가장 양호한 상태를 나타내고 있다. t_1이 낮은 경우는 용접 자체가 불완전한 용접이고 가열시간이 짧아 충분한 입열량 효과를 얻기 힘들기 때문에 인장강도는 낮게 나타났고, t_1이 증가함에 따라 입열량 영향에 의해 인장강도가 증가하다가 t_1 = 7sec이상에서는 인장강도가 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 가열을 오래 지속시키면 입열량이 과도하게 되어 시험편 자체의 열전도에 의한 강도증가의 열효과를 충분히 기대하기 어렵기 때문으로 생각된다[7-10].

따라서 Ot_1Z(optimum t_1 zone) (by σ_t), 즉, 최적 가열시간의 범위는 시험편 직경 ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24mm에 따라 각각 5~7sec(ϕ12.3), 5~7.5sec(ϕ16, ϕ20), 6~8sec(ϕ24)임을 알 수 있다. 이 때의 인장강도는 모재 SUH3의 인장강도보다 높으며, 평균 이음효율이 104%가 된다. 따라서 ϕ16과 ϕ24mm의 SUH3과 SUH35의 엔진 배기밸브재의 적정 마찰용접조건은 회전수 n = 2000rpm, 마찰가열압력 P_1 = 160MPa, 단조가압력 P_2= 320MPa, 마찰가열시간 t_1 = 5~7.5sec(ϕ20) 및 6~8sec(ϕ24), 단조가압시간 t_2 = 3sec라 할 수 있다.

이와 같이 여러 가지 내열강의 용접재와 상이한 직경에 따라 Ot_1Z에서의 평균 용접부 인장강도와 이음효率을 Table 5에 나타내었다.

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

ϕ12.3 :

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

ϕ16 :

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

ϕ20 :

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

ϕ24 :

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

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

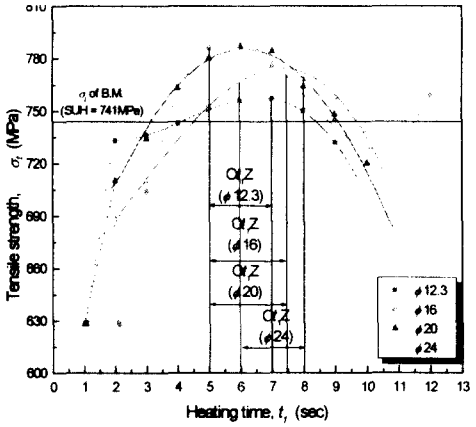


Fig. 4 Relationship between heating time and tensile strength for the welded joints (SUH3-SUH35) (ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24)

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 마찰용접조건에 따라 SUH3과 SUH35를 마찰용접할 때 마찰가열시간에 대한 마찰용접부의 인장흡수에너지, 단면수축율 및 연신율과의 상관관계는 ϕ12.3의 경우 Fig. 4와 같았다.

Table 4 Tensile strength and joint efficiency and Ceq. of each dissimilar friction welded joints with different diameters

Dissimilar FRW joint	SUH3-SUH35				SUH3-SUH31	
Mean Ceq. (%)	4.30				2.15	
Diameter (mm)	ϕ12.3	ϕ16	ϕ20	ϕ24	ϕ9	ϕ10.3
σ_t of B.M (SUH3)(MPa)	741	741	741	741	800	800
Av. at σ_t Ot_1Z (MPa)	755	775	785	771	805	831
Joint efficiency	102	105	106	104	101	104

Note : Av. - Average Av. σ_t - 736MPa

Ceq. - Carbon equivalent Av. joint efficiency - 104%

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

Fig. 5에서 SUH3과 SUH35의 마찰용접부의 흡수에너지 그래프를 보면, 마찰가열시간 t_1 = 1sec에서부터 증가하는 경향을 나타낸다.

흡수에너지는 용접조건 t_1의 증가에 따라 가열로 인한

연화성때문에 대체로 증가하다가 Fig. 4에서 구한 Ot_1Z인 t_1= 5~7sec일 때가 가장 양호한 것으로 나타났다. 이 때 연신율과 단면수축율은 약간 증가한 상태이나, 거의 일정하게 나타난다.

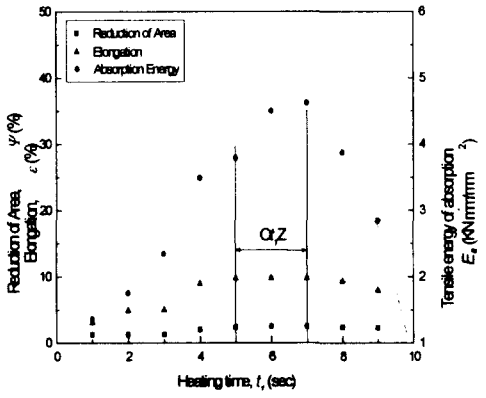


Fig. 5 E_a vs. t_1, ε vs. t_1 and ψ vs. t_1 of friction welded joints of SUH3-SUH35 in case of ϕ12.3 bar-to-bar
Welding condition : Same as those in Fig. 4

이상에서 알 수 있듯이, 마찰용접부의 인성(인장흡수에너지, 연신율, 단면수축율)을 고려하여 도출한 마찰용접 적정조건의 마찰가열시간 t_1 = 1~7sec(Ot_1Z)에서 인성을 고려할 때 큰 문제가 되는 것은 전혀 없다고 생각되며, 다른 직경과 다른 재료의 마찰용접의 경우도 같은 경향이 나타났다.

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 5와 같다.

3.2 재료(탄소당량) 및 직경이 용접품질 및 평가에 미치는 영향

마찰용접에 있어서 재료가 용접부의 품질(강도, 인성 등)이나 품질평가를 위한 AE양에 큰 영향을 미침은 당연하다고 할 수 있다. 동일 강종인 탄소강에서도 그 탄소함량이 증가함에 따라 마찰용접부의 강도는 증가하고 그 때의 총 AE양도 증가한다. 이 때 AE양의 증가는 용접시간 중 대량의 소성변형에 의한 초기 AE양의 증가보다 용접 후 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[14,15] AE양에도 그 영향이 클 것으로 예측된다. 따라서, 각종 재료에 따른 마찰용접 최적화와 품질평가를 위한 AE 시험결과의 데이터가 많이 축적되어야 할 것이다.

Table 5 Optimum welding conditions of FRW for each dissimilar friction welded joints

Dissimilar FRW joints		SUH3-SUH35				SUH3-SUH31	
Diameter (mm)		ϕ12.3	ϕ16	ϕ20	ϕ24	ϕ9	ϕ10.3
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-STS303	SUH3-STS304
Diameter (mm)		ϕ11	ϕ11
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

Fig. 6은 Table 4에서 구한 탄소당량이 증가함에 따라 마찰용접부의 Ot_1Z에서의 평균인장강도(Table 4)가 약간 증가하는 경향이 있으며, 탄소당량에 무관하게 최적용접조건하의 경우에는 100%이상임을 확인할 수 있었다.

3.2.2 시험편 직경이 마찰용접 및 품질평가에 미치는 영향

본 연구에서 사용된 직경은 ϕ9, ϕ10.3, ϕ11, ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24mm로서 직경의 증가에 따라 용접조건의 압력, 가열시간 또는 가열업셋양 등의 값을 대체로 증가시켜 설정하며, 용접 후의 강도나 용접중 AE양에도 직경의 크기가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 직경이 마찰용접부의 품질(인장강도) 및 음향방출(AE)에 미친 영향을 나타낸다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 직경 D의 증가에 따라 용접부 강도가 근소하게 증가하다가 감소하는 경향이나, 대체로 큰 변화가 없다.

Fig. 8에서 직경 D의 증가에 따라 용접부의 AE 누적총량이 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

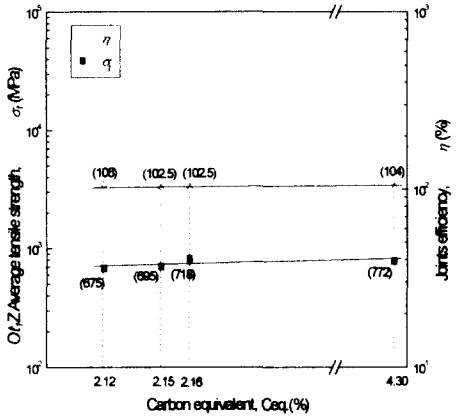


Fig. 6 σ_t vs. *Ceq.* and η vs. *Ceq.* of dissimilar FRW joints of SUH3 to SUH35(Ceq. 4.30 %), SUH3 to SUH31(Ceq. 2.15%), SUH3 to STS303(Ceq. 2.12%) and SUH3 to STS 304(Ceq. 2.14%)
Welding condition : Same as those in Table 5

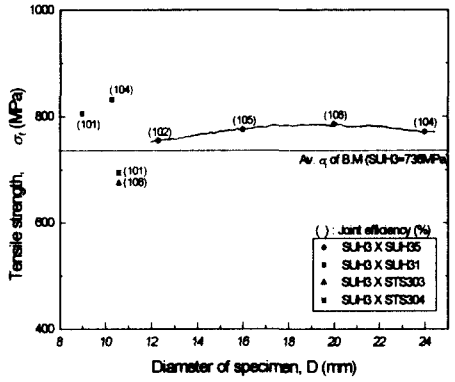


Fig. 7 Tensile strength vs. Diameter (ϕ9, ϕ10.3, ϕ11, ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24) of each FRW material
Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2-5

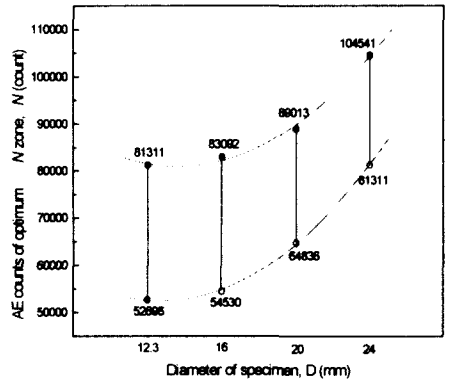


Fig. 8 AE counts vs. Diameter of specimen(ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24) of FRW SUH3 to SUH35
Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

3.2.3 AE에 의한 마찰용접 품질(인장강도)의 실시간 평가

Fig. 9는 SUH3-SUH35 마찰용접재(ϕ12.3, ϕ16, ϕ20, ϕ24)에 대하여 마찰가열시간 t_1의 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.

ϕ12.3 :

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

ϕ16 :

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

ϕ20 :

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

ϕ24 :

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

Fig. 10은 σ_t-N 의 관계를 보여주고 있다. 또한 σ_t-N 의 상관실험식은 다음과 같이 도출되었다.

ϕ12.3 :

$$\sigma_t = -3.2617\times10^{-9}N^2 + 6.78\times10^{-1}N + 724 \quad (R^2=0.94) \tag{9}$$

ϕ16 :

$$\sigma_t = 8.432\times10^{-13}N^3 - 2.5624\times10^{-7}N^2 + 0.023N + 134 \quad (R^2 = 0.94) \tag{10}$$

ϕ20 :

$$\sigma_t = 3.712\times10^{-13}N^3 - 1.393\times10^{-7}N^2 + 0.015N' + 306 \quad (R^2 = 0.99) \tag{11}$$

ϕ24 :

$$\sigma_t = 1.769\times10^{-13}N^3 - 9.908\times10^{-8}N^2 + 0.014N' + 190 \quad (R^2 = 0.99) \tag{12}$$

결과적으로 이종재 마찰용접은 Fig. 9, Fig. 10과 식(9)~(12)에서 알 수 있듯이 마찰용접 중의 AE 총량 N을 측정함으로서, 즉시 실시간에 그 용접재의 인장강도 σ_t를 예측할 수 있고, 이로써 타재료와 마찬가지로 본 연구에서도 AE에 의해 마찰용접시 용접품질에 대한 실시간 제어가 가능함을 알 수 있었다[8, 10-13]. 즉, 마찰용접 중에 N의 측정이 ONZ 범위 내이면 그 마찰용접재는 이음부 인장강

도가 모재 SUH3의 것보다 높으며, 그 이음효율은 100% 이상임을 용접 실시간에 비파괴적으로 예측 및 확인이 가능함을 뜻한다.

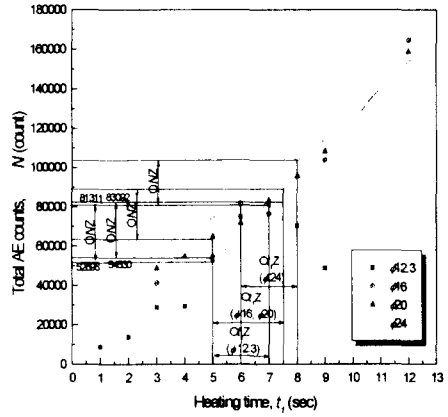


Fig. 9 N vs. t_1 in friction welding of SUH3 to SUH35 (ϕ 12.3, ϕ 16, ϕ 20, ϕ 24)
Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

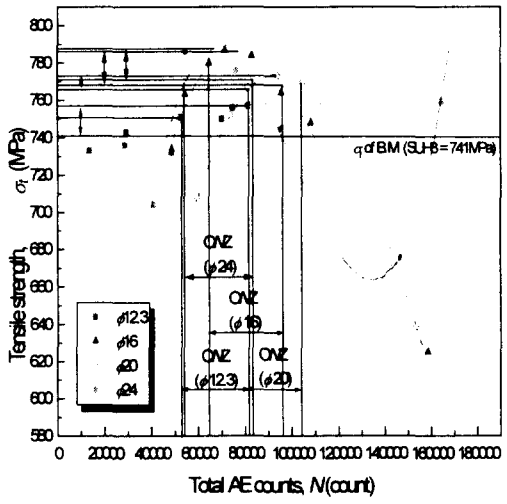


Fig. 10 σ_t vs. N in friction welding of SUH3 to SUH35 (ϕ 12.3, ϕ 16, ϕ 20, ϕ 24)
Welding condition : Same as those in Table 3, Case 2

Table 6 Optimum N zone for dissimilar friction welded joints

Materials	SUH3-SUH35			
Diameter (mm)	ϕ 12.3	ϕ 16	ϕ 20	ϕ 24
Optimum t_1 Zone (sec)	5~7	5~7.5	5~7.5	6~8
Optimum N Zone (counts)	52696 ~ 81311	54530 ~ 83092	64836 ~ 89344	73938 ~ 104541

Fig. 9, Fig. 10에서 각 용접재에 대한 최적 t_1의 범위(Ot_1Z)를 식(5)~식(12)에 대입하여 구한 최적 AE 총량의 범위(ONZ)를 Table 6에 나타내었다.

4. 결 론

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

1) 엔진용 내열강 SUH3과 SUH35(ϕ 12.3, ϕ 16, ϕ 20, ϕ 24)의 이종재 마찰용접 최적화 기술과 AE에 의한 용접 실시간중 비파괴적으로 평가할 수 있는 기술이 직경과 탄소당량의 영향을 고려하여 개발되었다.

2) 최적용접조건은 회전수 2000rpm, 마찰가열압력 160 MPa, 업셋 단조가압력 320MPa, 업셋 단조시간 3sec일 때, 마찰가열시간이 ϕ 12.3일 때 5~7sec, ϕ 16, ϕ 20일 때 5~7.5sec, ϕ 24일 때 6~8sec임이 밝혀졌다.

3) 마찰용접부의 인장강도 σ_t(MPa)와 가열시간 t_1(sec)사이에 정량적 상관관계가 존재하며, 그 상관실험식은 다음과 같다.

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

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

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

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

4) t_1의 최적범위 Ot_1Z = 5~7sec(ϕ 12.3), 5~7.5sec(ϕ 16, ϕ 20), 6~8sec(ϕ 24)일 때의 이음효율 100% 이상되는 최적 AE 총량의 범위 ONZ는 각각 52696~81311, 54530~83092, 64836~89344, 73938~104541 counts임이 밝혀졌으며, 마찰용접부의 인장강도 σ_t(MPa)와 용접 중의 AE총량 N(counts)와의 실험적 상관 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

ϕ 12.3 : $\sigma_t = -3.2617\times10^{-9}N^2 + 6.78\times10^{-1}N + 724$

ϕ 16 : $\sigma_t = -8.432\times10^{-13}N^3 - 2.5624\times10^{-7}N^2 + 0.023N + 134$

ϕ 20 : $\sigma_t = -3.712\times10^{-13}N^3 - 1.393\times10^{-7}N^2 + 0.015N + 306$

ϕ 24 : $\sigma_t = -1.769\times10^{-13}N^3 - 9.908\times10^{-8}N^2 + 0.014N + 190$

참 고 문 헌

1) Oh, S. K, "Application of Friction Welding to pa-rts of industrial machinery," 韓國舶用機關學會誌, 第 10卷, pp. 32-34, 1986.

2) 摩擦壓接研究會, "摩擦壓接," コロナ社, p.46, pp.145-150, p.184, 1979.

3) Vill, V. I., "Friction Welding of Metals," Svaroc-hoe proizvodstvo, 3, pp.19-23, 1962.

4) Tasako, Y.& N. Nakayama, "Friction Welding of Ni-Based Super Alloyed Nitriding Steel," J.prec. Mech. Mar., 36, pp.707-711, 1970.

5) Okita, K. and W. Kishimoto, "Studies on Friction Welding of SUS304 Austenitic Stainless (Report I)," J. Weld. Soc. 48, pp.991-995, 1979.

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

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

8) Oh, S. K., "Studies on Strength Analysis of Fric-tion 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.

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

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

11) Oh, S. K. and K. K. Wang, "Effect of Weldi-ng Parameters on Weld Strength and Acoustic Emisi on in Friction Weld", J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp. 22-33, 1983.

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

13) Oh, S. K., "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transac-tion of KSME, Vol.7, No.2, p.226-236,1983.

14) 나석주, 김성주, "강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향—동종강에 대하여", 대한용접학회, Vol.3, No.2. pp.1-9, 1985.

15) 나석주, 양영수, "강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향-탄소강과 고속도강에 대하여", 대한용접학회, Vol.