

압력용기용 고온재료의 마찰용접 최적화 및 AE에 의한 실시간 품질평가(I)

김현경* · 공유식** · 이연탁* · 유인종* · 오세규**

*부경대학교 대학원 기계공학과, **부경대학교 기계공학부

Friction Welding Optimization of Elevated Temperature Materials for Pressure Vessels and Its Quality Evaluation by AE

HUN-KYOUNG KIM* · YU-SIK KONG** · YEON-TAK LEE* · IN-JONG YU* 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 : Friction Welding(FRW) 마찰용접, Welded Joints 용접재, Acoustic Emission(AE) 음향방출, cumulative AE counts(AE counts, N)누적총량

ABSTRACT : 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 : 1. 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. 2. Quantitative relationship was identified among welding condition, weld quality and cumulative AE counts.

1. 서 론

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 기계공업분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 생산원가의 절감을 위한 이종재 마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성 높은 제품을 대량생산하는 등의 접합수단으로 많이 이용되고 있다(Oh, 1986; 마찰압접연구회, 1979).

본 연구의 목적은 화력발전소, 원자로, 보일러, 고압용기 등의 고온재(1Cr0.5Mo)와 내식고온강재(STS304강)와의 이종재 마찰용접 최적화와 AE에 의한 품질 실시간평가 기술을 개발이다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 S특수강에서 제작한 것으로서 압력용기 및 화력발전소의 보일러 고온 배관과 열교환기 등에 쓰이는 고온재료 1Cr0.5Mo (STBA22)강봉과 내열성과 내식성이 강한 Ni-C4계 스테인리스강인 STS304 강봉이다. 사용재료의 화학 성분과 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	Cu
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	-

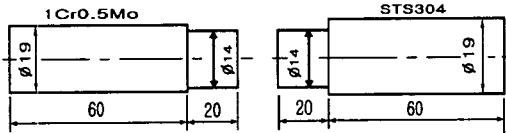
Table 2 Mechanical properties of materials

Mtls.	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	HB	H.T.
1Cr0.5Mo	745	637	11.7	185	*N, T
STS304	750	560	26.1	235	*N, T

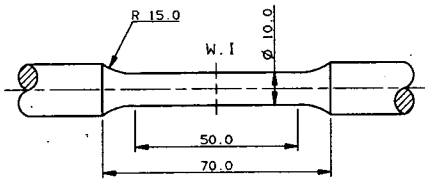
*N, T : 920°C Normalizing → 620°C Tempering

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

2.2 실험방법

본 연구 중 마찰용접시험에 쓰인 마찰용접기계는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며 용량은 최대 재료치수로서 회전축은 $\phi 25\text{mm}$ 이고 슬라이드축은 $\phi 40\text{mm}$ 이다. Fig. 2에 AE 시험기를 마찰용접기계에 결합한 위치를 나타내었다. 정적 하중하의 크리프 실험장치는 SATEC사 DLF-10, 5ton이다. 인장시험에 사용된 시험기는 만능시험기(Toyo Baldwin UTM-25T)이다.

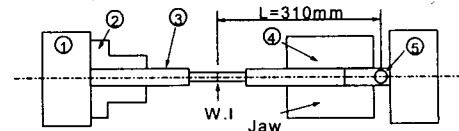


Fig. 2 AE transducer location

본 실험에 사용된 1Cr0.5Mo과 STS304에 대한 적정 마찰용접 조건을 결정하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 가공한 시험편을 참고문헌(마찰압접연구회, 1979; Vill, 1962; Ibid, 1979)에 의해 구한 여러 실험조건 중에서 Table 3과 같은 조건에서 마찰용접하여 용접부의 인장강도 시험을 통해 P_1 , P_2 를 구하고, 여기서 구한 최적압력하에서 $t_2=2\text{sec}$ 로 고정하여 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시하여, 용접부의 이음강도(인장강도)를 모재강도와 비교하고자 하였다.

STS304 시험편은 회전부 유압척에, 1Cr0.5Mo 시험편은 고정부 유압척에 고정 설치하였다.

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

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

Case	Rotation $n(\text{rpm})$	Heating pressure $P_1(\text{MPa})$	Forging pressure $P_2(\text{MPa})$	Heating time $t_1(\text{sec})$	Forging time $t_2(\text{sec})$
1	2,000	60	180	5	2
		80	200		
		100	220		
		110	230		
		120	240		
		130	260		
140	280				
2	2,000	120	240	1~7	2

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 센서(R15 150kHz sensor)를 마찰용접기계(TOHO, TH-25)의 마찰접합부에서 310mm인 위치의 정지척(chuck)에 부착하였고, 음향 연결재(acoustic couplant)로는 그리스(grease)를 사용하여 테이프(tape)로 센서를 고정시켰다.

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 , sec), 마찰단조 가압시간 (t_2 , sec) 등이며, 고온강재 이중재(1Cr0.5Mo, STS304)의 마찰용접 최적가열압력 P_1 과 최적가압력 P_2 를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌(Oh, 1986; 마찰압접연구회, 1979; Vill, 1962; Tasako, 1970)과 실험 데이터(Oh, 1982; 양, 1979)를 참고로 가열시간 t_1 과 가압시간 t_2 를 각각 5sec, 2sec로 정하고 Table 3의 Case 1과 같이 마찰용접조건을 변화시키면서 마찰용접을 하였다.

Fig. 3은 1Cr0.5Mo강과 STS304 강의 이중재 마찰용접에서 마찰가열압력(P_1), 마찰단조가압력(P_2)의 변화에 따른 용접부 인장강도의 변화를 나타낸 실험결과를 보여 준다. Fig. 3에서 파단위치는 용접경계면(W.I)에서 떨어진 1Cr0.5Mo 모재측의 열영향부가 되는 위치로서, 모두 1Cr0.5Mo 모재의 인장강도 745MPa보다 높은 범위가 $P_1=110\sim130\text{MPa}$, $P_2=230\sim260\text{MPa}$ 로 구해졌다. 따라서, 용접 이음부의 인장강도로 볼 때, $P_1=120\text{MPa}$, $P_2=240\text{MPa}$ 일 때가 가장 인장강도가 높게 나타났으므로 이 때가 가장 적절한 P_1 , P_2 값으로 사료된다. 압력이 증가함에 따라 인장강도가 증가하다가 $P_1=120\text{MPa}$, $P_2=240\text{MPa}$ 일 때가 피크(peak)이고, 그 후 인장강도가 떨어지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 재료 자체의 특성과 과입열량의 영향에 의한 것으로 보인다.

3.1.2 용접조건과 용접부 강도와와의 상관성

Table 3의 Case 2와 같은 조건에서 1Cr0.5Mo강과 STS304강($\phi 14\text{mm}$)을 마찰용접한 결과로서, Fig. 3에서 구한 마찰가열압력(P_1)과 마찰단조 가압력(P_2)을 각각 120, 240 (MPa), $t_2 = 2(\text{sec})$ 로 하여 마찰가열시간(t_1)을 변화시키면서 마찰용접시험을 수행한 그래프가 Fig. 4이다.

Fig. 22에서 인장파단은 대부분 1Cr0.5Mo강측의 열영향부에서 파단되었고 일부만이 STS304의 열영향부에서 파단되어 일반적으로 양호한 접합임을 알 수 있었다. 마찰가열시간 t_1 이 증가함에 따라 인장강

도가 증가하여 $t_1 = 4\sim6\text{sec}$ 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 $t_1 = 7\text{sec}$ 이상에서는 인장강도가 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 가열을 오래 지속시키면 입열량이 과도하게 되어 시험편 자체의 열전도에 의한 강도증가의 열효과를 충분히 기대하기 어렵기 때문으로 생각된다.

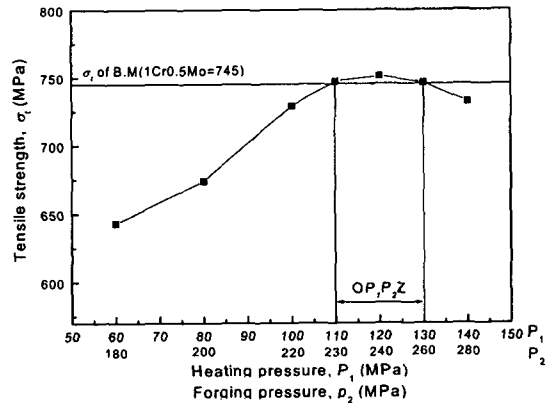


Fig. 3 Relationship between heating pressure and tensile strength for the welded joints
Welding condition : Table 3, Case 2

따라서, $O_{t_1}Z$ (optimum t_1 zone) (by σ_t), 즉, 최적 가열시간의 범위는 시험편 직경 $\phi 14\text{mm}$ 일 때 4~6sec임을 알 수 있다. 이 때의 인장강도는 모재 1Cr0.5Mo강의 인장강도보다 높다.

따라서 최적용접 조건은 $\phi 14\text{mm}$ 의 1Cr0.5Mo과 STS304강의 최적 마찰용접조건은 회전수 $n = 2000\text{rpm}$, 마찰가열압력 $P_1 = 120\text{MPa}$, 마찰단조 가압력 $P_2 = 240\text{MPa}$, 마찰가열시간 $t_1 = 4\sim6\text{sec}$, 마찰단조 가압시간 $t_2 = 2\text{sec}$ 라 할 수 있다.

마찰용접부의 인장강도 $\sigma_t(\text{MPa})$, 마찰가열시간 $t_1(\text{sec})$ 과의 사이에는 정량적 상관성이 존재한다. 이 때, σ_t-t_1 상관관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$\phi 14$:

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

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

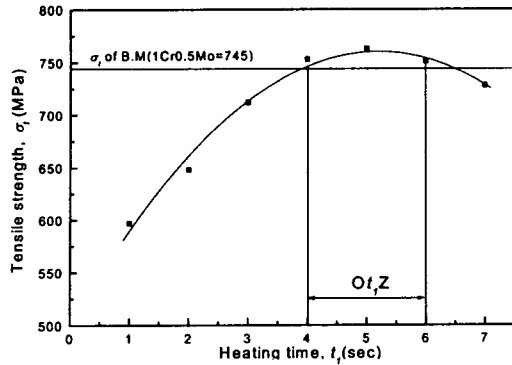


Fig. 4 Relationship, between heating time and tensile strength for the welded joints

3.1.3 용접조건과 용접부 인성(흡수에너지, 연신률, 단면수축률)과의 상관성

마찰용접의 최적화를 위하여, 이음부의 강도(이음 효율 100% 이상)와 인성(인장흡수에너지, 단면수축률, 연신률)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3(Case 2)의 마찰용접조건에 따라 1Cr0.5Mo강과 STS304강을 마찰용접할 때 마찰가열시간에 대한 마찰용접부의 인장흡수에너지, 단면수축률 및 연신률과의 상관관계는 $\phi 14\text{mm}$ 의 경우 Fig. 5와 같았다.

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

흡수에너지는 용접조건 t_1 의 증가에 따라 가열로 인한 연화성 때문에 대체로 증가하다가 Fig. 23에서 구한 Ot,Z 인 $t_1 = 4\sim 6\text{sec}$ 일 때 다소 감소하나 문제될 정도는 아니다. 이 때 연신률과 단면수축률은 거의 일정하게 나타난다.

이상에서 알 수 있듯이, 마찰용접부의 인성(인장흡수에너지, 연신률, 단면수축률)을 고려하여 도출한 마찰용접 적정조건인 마찰가열시간 $t_1 = 4\sim 6\text{sec}(Ot,Z)$ 에서 인성을 고려할 때 큰 문제가 되는 것은 전혀 없다고 생각되며, 다른 직경과 다른 재료의 마찰용접의 경우와도 같은 경향으로 나타났다(오, 1993; 오, 1996; 오, 1995).

3.1.4 이종재 마찰용접의 최적화

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

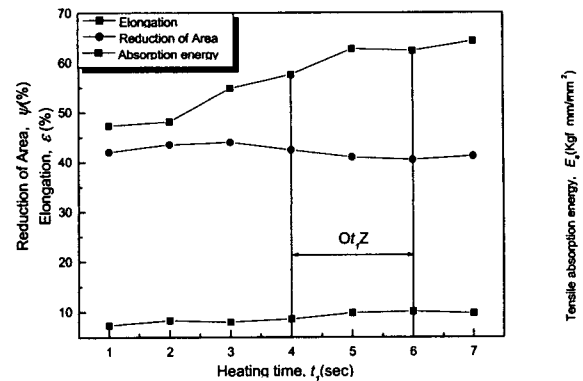


Fig. 5 E_a vs. t_1 , ϵ vs. t_1 and ψ vs. t_1 of friction welded joints of 1Cr0.5Mo-ST304

Welding condition : Same as those in Fig. 4

Table 5 Optimum welding conditions of FRW for each dissimilar friction welded joints of 1Cr0.5Mo to STS304 comparing with other materials match (SUH3-ST304)

Dissimilar FRW joints		1Cr0.5Mo-ST304	SUH3-SUS304
Diameter (mm)		$\phi 14$	$\phi 11$
Optimum	n (rpm)	2000	2000
	P_1 (MPa)	120	80
Welding	P_2 (MPa)	240	180
	t_1 (sec)	4~6	1.5
Condition	t_2 (sec)	2	2

3.2 마찰용접부 품질의 AE에 의한 실시간 평가

3.2.1 용접조건과 AE와의 상관성

Fig. 6은 1Cr0.5Mo-ST304 마찰용접재($\phi 14$)에 대하여 마찰가열시간 t_1 의 증가에 따른 AE총량(total AE count)의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 가열시간(t_1 , sec)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 아래와 같이 도출되었다.

$\phi 14$:

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

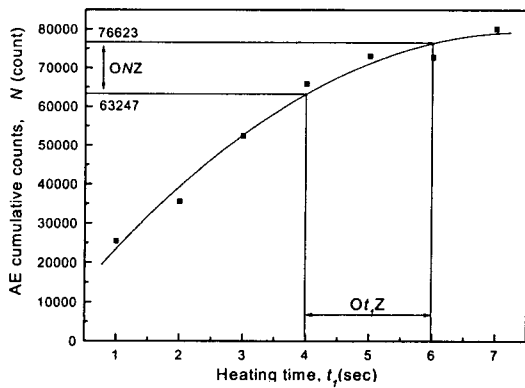


Fig. 6 N vs. t_1 in friction welding of 1Cr0.5Mo to STS304 (ϕ 14)
Welding condition : Table 3, Case 2

3.2.2 용접 품질(인장강도)과 AE와의 상관성

Fig. 7은 $\sigma_t - N$ 의 관계를 보여주고 있다. 또한 $\sigma_t - N$ 의 상관실험식은 다음과 같이 도출되었다.

ϕ 14 :

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

결과적으로 이종재 마찰용접은 Fig. 6과 Fig. 7 및 식(3)에서 알 수 있듯이, 마찰용접 중의 AE 총량 N 을 측정함으로써, 즉시 실시간에 그 용접재의 인장강도 σ_t 를 예측할 수 있고, 이로써 마찰용접시 용접 품질에 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. 4, Fig. 5에서 구한 O_{t_1Z} 에 해당하는 ONZ를 Fig. 6에서 구하였고, 이 ONZ(by O_{t_1Z})를 Fig. 7에서 100%이상의 이음효율을 얻을 수 있는 ONZ($\geq 100\%$ joint efficiency)로 보정하여야 한다. 즉, Fig. 6, Fig. 7에서 각 용접재에 대한 최적 t_1 의 범위(O_{t_1Z})를 식(33), 식(34)에 대입하여 구한 최적 AE 총량의 범위(ONZ by O_{t_1Z})와 이음효율 100%이상의 ONZ를 구한 값(ONZ by 100% joint eff.)을 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Optimum N zone for dissimilar friction welded joints of 1Cr0.5Mo-ST304(ϕ 14mm)

Materials	1Cr0.5Mo-ST304
Diameter (mm)	ϕ 14
Optimum t_1 Zone (sec)	4~6
Optimum N Zone by O_{t_1Z}	63247 ~ 76623
Optimum N Zone compensated by 100% joint effect	64463 ~ 76623

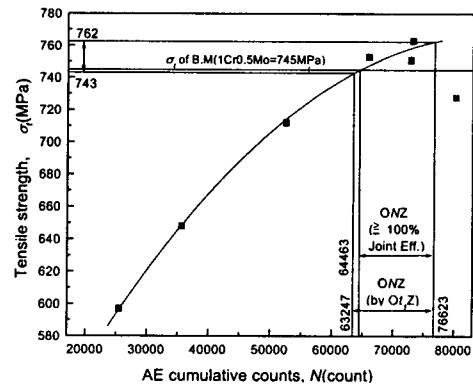


Fig. 7 σ_t vs. N in friction welding of 1Cr0.5Mo to STS304 (ϕ 14)
Welding condition : Table 3, Case 2

3.2.3 신뢰성 검사

AE는 재료의 소성변형, 파괴기구의 연구 및 균열의 검출, 용접의 관리, 최대응력 이력의 추정 및 마찰용접강도와 품질의 실시간 평가 등에 응용될 수 있으며, 특히 주목되는 것은 설비정비 및 안전성의 확보에 대한 응용이다.

그런데, 이종 마찰용접강도와 품질의 실시간 평가를 통한 제품의 신뢰성 향상법은 일반 비파괴검사 개념과는 다르다. 즉 AE에 의해 균열 등의 결함을 찾는 것이 아니고, 마찰용접이 마찰가열가압에 의한 금속의 대소성변형을 유발하며 압접에 의해 수행되기 때문에 이 때의 가열압, 가열시간, 단조가압력, 가압시간, 회전수 등과 용접부강도와 품질이 상관성이 있듯이 동시에 이때에 용접부에서 발생된 AE의 총량도 용접조건이나 용접부강도와 품질에 정량적 상관성이 있음이 밝혀졌으므로, 이에 용접강도와 품질의 고신뢰성(무결함)이 파괴시험을 거치지 않더라도 비파괴적으로 탐지하고 제어할 수 있는 새로운 방법인 것이다.

따라서, 마찰용접에서 용접조건인 회전수 n (rpm), 가열압력 P_1 (MPa), 가압력 P_2 (MPa) 및 업셋량 U_1 (mm)이나 마찰가열시간 t_1 (sec) 및 단조가압시간 t_2 (sec)의 설정에만 의존하는 것은 소재 자체의 물성치와 형상치수의 오차를 고려치 않은 문제점이 있다. 그러나, 마찰용접 작업상 회전수, 압력 등을 먼저 일정하게 설정하고 그 후에 U_1 이나 t_1 을 결정해서 이들의 상호작용에 의한 마찰용접 중의 품질특성(강도 및 인성)을 AE량에 의해 측정하여 품질을 제어하는 것이 훨씬 합리적이고 더욱 완전해 접근한 것이라고 생각된다.

또한 위에서 구한 모든 실험식들의 기여율(determination coefficient) R^2 의 평균값이 0.94이므로 실험식의 신뢰성이 매우 높다고 할 수 있다.

4. 결론

압력용기 및 열교환기용 고온재료의 이중재 1Cr0.5Mo강과 내식·내열강 STS304($\phi 14$ mm)의 마찰용접 최적화 연구와 AE에 의한 마찰용접부의 품질(강도, 인성)에 대한 비파괴적 실시간 평가법을 개발하고 연구한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 1Cr0.5Mo과 STS304($\phi 14$)의 이중재 마찰용접 최적화 기술과 AE에 의한 용접 실시간 중 비파괴적으로 평가할 수 있는 기술이 강도와 인성의 영향을 고려하여 개발되었다.
- 2) 최적용접조건은 회전수 2000rpm, 마찰가열압력 120MPa, 업셋 단조가압력 240MPa, 업셋 단조시간 2sec일 때, 마찰가열시간이 4~6sec임이 밝혀졌다.
- 3) 마찰용접부의 인장강도 σ_t (MPa)와 가열시간 t_1 (sec) 사이에 정량적 상관관계가 존재하며, 그 상관실험식은 다음과 같다.

$$\phi 14 : \sigma_t = -9.666t_1^2 + 100.547t_1 + 498$$

- 4) t_1 의 최적범위 $0t_1Z = 4\sim 6$ sec($\phi 14$)일 때의 이음효율 100%이상되는 최적 AE 총량의 범위 ONZ는 64463~76623 counts임이 밝혀졌으며, 마찰용접부의 인장강도 σ_t (MPa)와 용접 중의 AE 총량 N (counts)와의 실험적 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\phi 14 : \sigma_t = -4.618 \times 10^{-8}N^2 + 0.00797N + 423$$

후 기

본 연구논문은 1999년도 부경대학교 대학원생 연구지원비에 의하여 연구된 논문임.

참 고 문 헌

- Oh, S. K., "Application of friction welding to parts of industrial machinery," 한국박용기관학회지, 제 10권, pp. 34-32, 1986.
- 摩擦壓接研究會, "摩擦壓接," コロナ社, pp. 46, 145-150, 184, 1979.
- Vill, V. I., "Friction welding of metals," Svarochoe proizvodstvo, 3, pp. 19-23, 1962.
- Tasako, Y.& N. Nakayama, "Friction welding of Ni-based super alloyed nitriding steel," J.prec. Mech. Mar., 36, pp. 707-711, 1970.
- Ibid of Ref. (2), pp. 146, 1979.
- 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.
- 양형태, "내열강재의 SUH3과 SUH35의 마찰용접 특성과 Creep 수명예측에 관한 연구", 부경대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp.1-133. 2000.
- 오세규, "FW에 의한 유공압밸브스풀의 개발 및 실시간 품질 평가 자동화에 관한 연구", 과학기술처 91년도 특정연구 개발사업부 연구 보고서, pp. 1-111, 1993.
- 오세규, 이경우, 전태언, 오명석, 이원석, "유공압밸브스풀용강 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접의 최적화와 용접강도 특성 및 AE품질평가, 한국해양공학회지 10권 2호, pp. 69-76, 1996.
- 오세규, 장지훈, 장홍근, "유공압 밸브스풀용 Cr-Mo강봉의 동종재 마찰용접과 AE평가", 대한용접학회지 13권 4호, pp. 103-112, 1995.