

플런저용 강재의 이종재 마찰용접과 AE에 의한 실시간 평가

Friction Welding of Dissimilar Plunger Materials and Its Real Time Evaluation by AE

공유식 · 조상근 · 김영대 · 오세규

Y. S. Kong, S. K. Jo, Y. D. Kim and S. K. Oh

Key Words : Friction Welding (FRW, 마찰용접), Acoustic Emission (AE, 음향방출), Welding Condition (용접조건), Heating Time (가열시간) Total AE Counts (AE총량)

Abstract : Plunger (piston rod) materials are used in high-pressure condition. So STD11 is the essential material to build this plunger. However, it costs more to make a plunger by using only STD11 than using the welding of STD11 to SCM440 and other dissimilar material. And it has been difficult to weld this sort of dissimilar materials. They could be unstable in the quality by the conventional arc welding. And also they have a lot of technical problems in manufacturing. But, by the friction welding technique, it will be able to be made without such problems. And then, on account of such reasons, we need a new approach of study on real-time quality evaluation by acoustic emission (AE) techniques as well as a domestic development of the plunger by friction welding. So that, the purpose of this study for such developments is the development of a plunger by optimizing of friction welding with more reliability and more applicability. Then, this study aimed not only to develop the optimization of friction welding of dissimilar plunger steels of STD11 to SCM440, but also to develop the application technique of the acoustic emission to accomplish an in-process real-time quality evaluation during friction welding of the plunger materials by the AE technique.

1. 서 론

유압기술은 자동차, 조선, 항공기, 공작기계, 건설기계 등 넓은 공업분야에 걸쳐 사용되고 있으며, 대부분의 장치는 동력을 전달 제어하는 부분을 가지고 있다. 동력전달에는 여러 가지 방법이 있지만 어떠한 경우라도 기능적인 면은 말 할 것도 없고 경제성, 안전성, 내구성, 보수의 신뢰성이 요구된다. 본 연구에서는 폴리우레탄 (poly urethane) 발포기에 적용된 유압장치의 핵심 동력원인 고압 실린더용 부품 플런저 (피스톤 로드) 제작에 있어서 마찰용접을 적용, 가공의 난이성 해결과 경제적 가치를 높이고자 한다^{1, 2)}.

폴리우레탄 발포기는 자동차의 시트, 대시판넬 (dash pannel), 냉장고의 보냉재, 기타 전자제품의

내·외장재로 사용되고 있고, 폴리우레탄의 주성분인 poly의 혼합물을 정형화된 금형에 충전하여 여러 가지 형상의 제품을 생산한다. 혼합된 화합물은 고압의 유압장비에 의해 금형에 주입되고, 고압을 발생하기 위해서는 로드와 가이드 파이프부의 틈새가 3~6 μ m 이내로 정밀하여야 한다. 본 장비의 핵심부품인 플런저의 경우 피스톤과 로드의 원통도가 5 μ m이며, 로드와 가이드 파이프의 틈새가 3~6 μ m인 관계로 끼워맞춤 공차에 의해 이 부품을 분할하여 나사로 조립하게 되면, 조립공차가 커서 고압의 힘이 작용할 때 피스톤과 로드의 원통도에 변형이 발생하여 제품에 치명적인 손상을 가져올 수 있다. 따라서 제품 기능상 질화강 재료 (SACM645)를 일체형으로 사용하면, 재료가 많이 통용되지 않음에 따라 열처리 비용 상승과 가공에 의한 재료비 상승으로 인한 경제적 손실이 우려된다. 이러한 경제적 손실을 보완하기 위해 로드부는 파이프의 안내면을 따라 연속적인 직선왕복 운동함에 따른 내마모성이 요구되어 STD11 냉간 금형

접수일 : 2001년 12월 21일

공유식, 김일선, 김영대, 오세규 : 부경대학교 기계공학부

조상근 : 부경대학교 대학원

재료를 사용하고, 피스톤부는 크롬 폴리브덴강인 SCM440을 사용하였다, 따라서 이러한 이종재료를 마찰용접³⁻⁵⁾에 의해 접합시킴으로써 두 재료의 기능성과 경제성 등의 이용가치를 높이고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

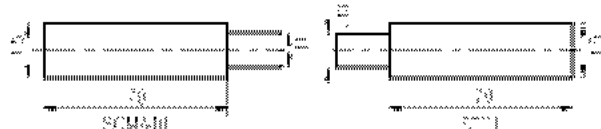
본 실험에 사용된 시험편 재료는 내마모성과 내충격성이 강한 냉간 금형재료로서 우수한 성능을 가지고 있는 STD11과 내열성과 내마모성 및 내부식성이 우수한 Cr Mo강인 SCM440을 사용하였다. Table 1은 본 실험에 사용한 재료의 화학적 성분을 나타내고 있으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt.%)

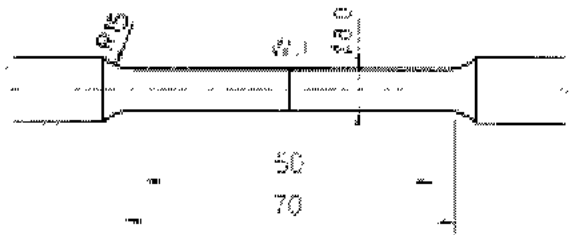
Materials	C	Si	Ni	Cr	Mn	P	S	Mo	Cu	V
STD11	1.51	0.23	0.14	11.5	0.29	0.26	0.01	0.84	0.12	0.25
SCM440	0.40	0.20	0.11	0.95	0.70	0.10	0.10	0.15	0.16	-

Table 2 Mechanical properties of base materials for dissimilar friction welding

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Hardness H_B
STD11	742	499	9.3	227
SCM440	637	526	17.2	168



(a) Friction welding and AE test workpiece



(b) Tension test specimen

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

마찰용접을 하기 위한 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1(a)와 같이 가공하여 실험을 수행하였고 동시에 AE실험을 수행하였다. Fig. 1의 (b)는 용접시험편의 인장강도를 알기 위한 시험편으로 KS규격 (B 0801 14A)에 따라 선삭과 연삭가공을 하였다.

2.2 실험방법

마찰용접 시험에 사용된 마찰용접기는 TOHO TH 25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이고, AE 시험에 사용된 시험기는 AE testing system (LOCAN 320, 16 channel)이며, 용접제면과 AE 센서와의 거리는 315 mm, Gain 35 dB, 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.

마찰용접의 최적화 실험을 위해서 우선 $\phi 10$ mm와 $\phi 11$ mm 봉대봉(bar to bar) 마찰용접 최적 조건의 최적화를 시도하여야 한다. 즉, 문헌 6~8)을 조사하여 회전수 (n)를 결정한 후 가열압력 (P_1), 가압압력 (P_2)을 결정하고 여러번 실험을 반복하여 P_1 , P_2 를 선정한 후, 가압시간 (t_2)을 선택하고 그 후 가열시간 (t_1)을 다양하게 변화시켜 실험한다. 이음부의 강도는 인장강도, 인장흡수에너지, 연신을 등을 구하여 용접부의 강도와 인성이 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간 (t_1)을 결정짓는다. STD11 시험편은 회전부 유압척에 고정하고, SCM440 시험편은 정지척에 고정 설치하여 마찰용접 시험을 하였다. 그리고 마찰용접 중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서 용접시작부터 용접완료까지 검출된 AE 누적총량과 용접강도와와의 상관성을 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접변수와 용접품질간의 상관관계

본 실험에 사용된 마찰용접의 변수는 회전수 (n), 마찰가열압력 (P_1), 단조가압력 (P_2), 마찰가열시간 (t_1), 단조가압시간 (t_2) 등이며, 이종재의 마찰용접 최적 가열압력 P_1 과 최적단조가압력 P_2 를 결정하기 위하여 몇몇 문헌 6~8)과 실험데이터를 참고하여 가열시간 t_1 과 단조가압시간 t_2 를 각각 4 s, 5 s로 정하고 Table 3 (Case 1)와 같이 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 하였다.

Table 3 Various conditions of dissimilar friction welding of STD11 for SCM440

Case	Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (s)	Forging time t_2 (s)	Total Upset U_T (mm)
1	2,000	40	80	4	5	1.8
		50	100			2.3
		80	160			2.9
		100	200			3.3
		120	240			4.2
		140	280			4.8
2	2,000	100	200	1~8	5	-

Fig. 2는 P_1 , P_2 를 결정하기 위하여 n 과 t_1 , t_2 를 고정하고 마찰용접을 하여 인장시험의 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, P_1 , P_2 가 각각 100, 200 MPa에서 가장 높은 인장강도를 나타내고 있으며, 이때의 인장강도는 748 MPa이다. 따라서 이음효율이 100% 이상이고 가장 높은 값을 나타내고 있기 때문에 P_1 , P_2 를 각각 100, 200 MPa로 결정하였다.

Fig. 3은 $\phi 10$ 과 $\phi 11$ mm 이종재 마찰용접에서 총업셋량 U_T (mm)와 가열시간 t_1 (s)의 상관관계를 나타낸 그래프이다.

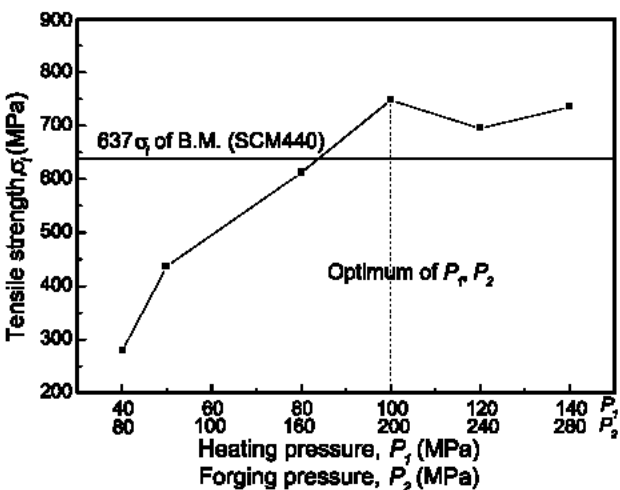


Fig. 2 σ_t vs. P_1 , P_2 in dissimilar friction welding of STD11 to SCM440

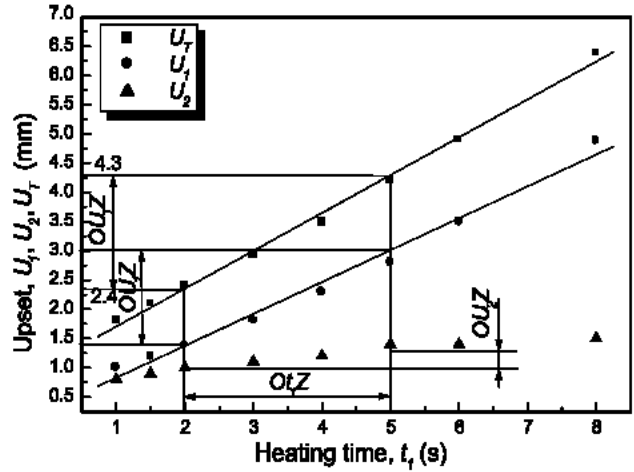


Fig. 3 U_1 , U_2 , U_T vs. t_1 for dissimilar FRW of STD11 to SCM440

U_1 t_1 , U_2 t_1 , U_T t_1 의 상관 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 0.55 t_1 + 0.29 \\
 U_2 &= 0.10 t_1 + 0.77 \\
 U_T &= 0.65 t_1 + 1.06
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

그래프에서 알 수 있듯이, 총업셋량 U_T 와 마찰 가열시간 t_1 의 상관관계는 마찰가열시간 이 증가할 수록 총 업셋량 U_T 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 구한 최적가열시간 t_1 2~5초(O t_1 Z)에 대한 U_1 , U_2 , U_T 를 구할 수 있으므로 마찰용접을 시간조정법 대신에 업셋조정법으로도 활용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 3(Case 2)의 조건에서 $\phi 10$ mm 봉인 STD11강과 $\phi 11$ mm 봉인 SCM440강을 마찰용접한 이종재 마찰용접재의 인장강도 σ_t (MPa)와 가열시간 t_1 (s)과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타내었다. 이때의 인장 시험편은 Fig. 1(b)에서와 같이 봉 대 봉 용접재의 종방향으로 마찰용접 경계면(W·I)이 중앙에 오도록 선삭한 후 연삭가공으로 마무리 하였다.

그림에서 O t_1 Z (optimum t_1 zone)는 t_1 2~5 s이며, 이때의 인장강도는 σ_t 683~742 MPa이고, 총업셋량은 U_T 2.4~4.3 mm를 나타내고 있다. 이것은 이종재 모재의 낮은 인장강도 SCM440(σ_t 637 MPa)보다 높고 이음효율이 100% 이상이며, 최고 116%이다. 이때 σ_t t_1 의 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = 4.2t_1^3 - 72.3t_1^2 + 352.8t_1 + 224
 \tag{2}$$

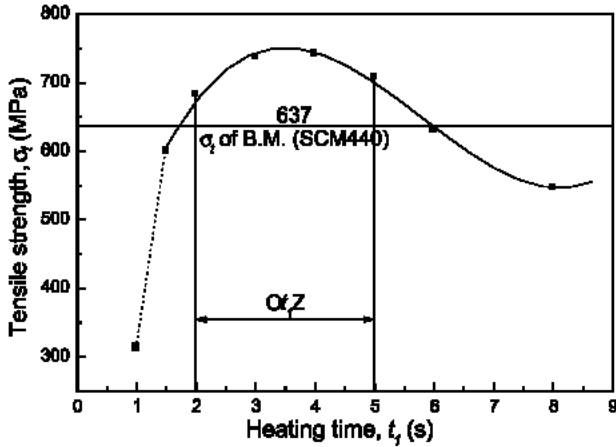


Fig. 4 σ_t vs. t_1 in dissimilar welding of STD11 to SCM440 ($\phi 10$ bar $\phi 11$ bar)

STD11과 SCM440의 이종재 마찰용접 최적화를 위하여 가열시간 t_1 을 변수로하여 용접부의 인장강도가 우수한 t_1 의 범위를 $OptZ$ (optimum t_1 zone)는 2~5s로 결정하였다. 따라서 $OptZ$ 보다 t_1 이 낮거나 너무 높으면 인장강도(σ_t)가 낮아지며, 이음효율이 좋지 않기 때문이다. 또한, 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 강도와 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신율)의 영향을 고려할 필요가 있다. 그러므로 Table 3 (Case2)의 용접조건에 따라 재료를 용접을 할 때 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 인장흡수에너지, 단면수축율, 연신율과의 상관관계는 Fig. 5와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 4에서 구한 $OptZ$ (2~5s)에서 인성이 높게 나타나므로, $OptZ$ 2~5s는 인장강도와 인성면에서 모두 우수한 범위임을 알 수 있다. 그리고 STD11과 SCM440의 이종재 마찰용접시 인장 파단부분은 SCM440측 모재부에서 파단되었다.

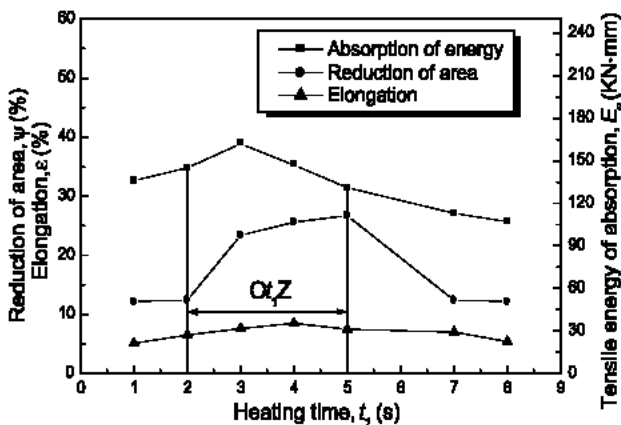


Fig. 5 E_a , ψ , ϵ vs. t_1 in dissimilar friction welding of STD11 to SCM440

3.2 마찰용접변수와 AE총량과 상관성

Fig. 6은 Table 3 (Case 2)과 같은 용접조건하에서 STD11과 SCM440 시험편을 마찰용접과 동시에 AE시험을 수행한 결과이다. 그래프에서 알 수 있듯이 t_1 의 증가와 더불어 AE 총량도 증가하는 양상을 보이고 있다. 일반적으로 가열시간 (t_1)의 증가에 따라 마찰용접부의 소성변형이 계속해서

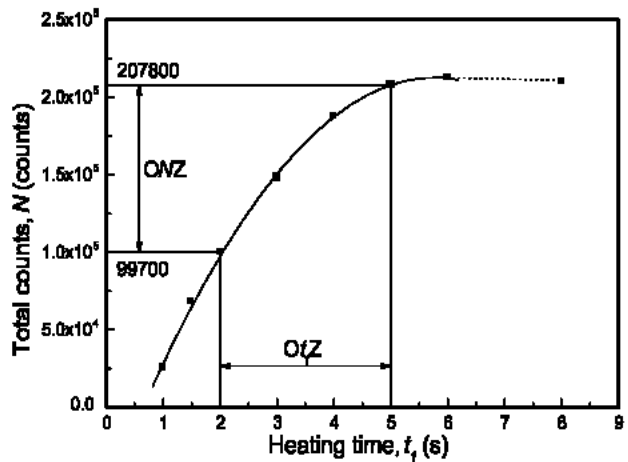


Fig. 6 N vs. t_1 in dissimilar friction welding of STD11 to SCM440

크게 일어나기 때문에 AE(acoustic emission)도 증가한다. 그리고 6~8초 사이의 점선 구간은 과열 열량 구간임을 알 수 있다. 이는 마찰용접 최적조건 범위내에서는 마르텐사이트 상변태에 의한 AE량이 많이 발생하는 구간이지만, 가열시간 5초 이후에는 과열열량에 의한 오스테나이트 상변태 구간으로 AE량이 발생되지 않는 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 4에서 구한 $OptZ$ (2~5s)에서의 AE총량(N)은 99700~207800 (counts)임이 확인되었다. 이는 마찰용접시 AE총량을 측정함으로써 실시간에 용접품질 평가가 가능함을 알 수 있다. 이때의 AE총량 N (counts)과 t_1 (s)사이의 N t_1 관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$N = 6444.4t_1^2 + 82879.8t_1 - 44451 \quad (3)$$

Fig. 7은 이종재 (STD11 SCM440) 마찰용접시 AE 시험을 수행한 결과에 대한 용접강도 및 AE총량과의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 6에서 구한 최적 AE 누적총량인 ONZ가 99700~207800 counts 일때의 인장강도는 683~742MPa로서 이때의 이음효율이 모재에 비해 100% 이상(최고 116%)임이 확인되었다. 이때의 σ_t N 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = 1.64255 \times 10^{-8} N^2 + 0.00533 N + 312.3 \quad (4)$$

이와 같이 σ_t 와 N 이 정량적 상관성은 타 문헌⁹⁻¹¹⁾의 연구 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

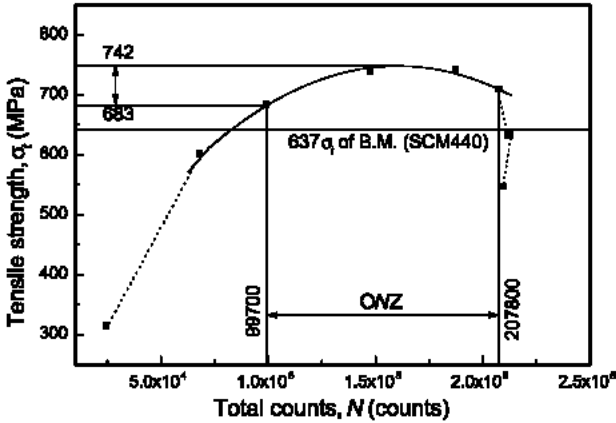


Fig. 7 σ_t vs. N in dissimilar friction welding of STD11 to SCM440

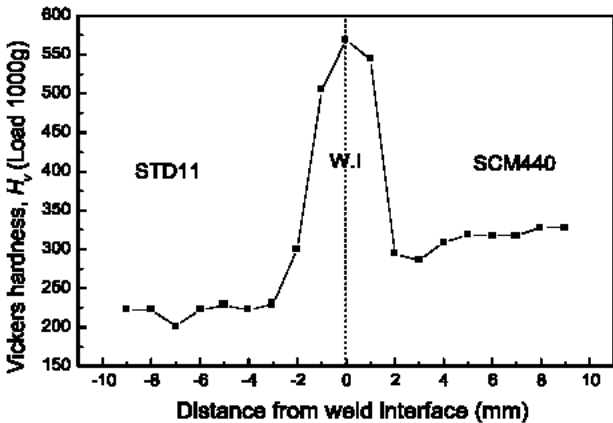


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joint Welding condition : n 2,000 rpm, P_1 100 MPa, P_2 200 MPa, t_1 4 s, t_2 5 s

3.3 마찰용접부의 경도분포

Fig. 8은 최적 마찰용접 조건하에서 마찰용접한 시험편의 경도분포를 나타낸다. 그래프를 보면, 용접경계면(weld interface)에서 최고의 경도값을 나타내고 있다. 그 이유는 용접경계면 부근에서 마찰용접시 국부 가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. STD11 및 SCM440의 모재 경도는 각각 약 Hv 269, Hv 310로서 매우 낮고 마찰용접 경계면의 경우는 Hv 569정도로서 모재부 경도보다 큰 값으로 상승했으며, 이러한 경도의 peak는 후열처리³⁻⁵⁾로써 완화 시킬 수 있다고 생각된다. 또

한 후열처리에 의한 경도치는 사용조건에 따라 달라지므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 여기서 열영향부(HAZ, heat affected zone)는 마찰용접 경계면에서 좌우 약 4mm 정도임을 알 수 있다.

4. 결 론

플러저용 강재에 사용되는 냉간 금형강재와 Cr Mo 강인 봉 대 봉의 이종재 (STD11 SCM440) 마찰용접을 수행하여 마찰용접 최적화와 AE평가, 용접품질(강도, 인성)에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) STD11과 SCM440의 봉 대 봉 이종재 마찰용접이 가능하며, 고가 재료비 및 가공 공수의 대폭적인 절감이 가능하다.
- 2) 모든 시험편이 SCM440측 열영향부에서 인장과 단 되었다고, 최적 용접조건에서 용접부의 이음효율이 거의 100% 이상이 되었으며, 용접강도, 인성면을 고려한 최적 마찰용접조건은 다음과 같다.
 n 2,000 rpm, P_1 100 MPa, P_2 200 MPa, t_1 2~5 s, t_2 4 s
- 3) 봉 대 봉의 이종재 마찰용접 품질(인장강도, 인성)을 분석하였고 이에 따른 용접조건(가열시간 t_1 , s)과 용접품질(인장강도 σ_b , MPa)과의 상관관계 실험식이 다음과 같이 도출되었다.
 $\sigma_t = 4.2t_1^3 - 72.3t_1^2 + 352.8t_1 + 224$
- 4) 용접실시간에 측정된 AE총량의 최적범위 (ONZ)가 99700~207800 (counts)에서 마찰용접 이음효율이 100%이상이 되는 용접품질 (인장강도, 인성)을 얻을 수 있었고, 실제 마찰용접시 AE를 측정함으로써 실시간에 용접품질 평가가 가능함을 알 수 있었다. 이때 AE총량 (N , count)과 용접부 인장강도(σ_b , MPa)와의 상관관계는 다음과 같이 도출되었다.
 $\sigma_t = 1.64255 \times 10^{-8} N^2 + 0.00533 N + 312.3$

참고 문헌

1. 日本摩擦壓接協會, “摩擦壓接協會20年誌”, pp. 1 106, 1984
2. AWS, “Welding Handbook”, Vol. 2. pp. 747, pp. 672 763, 1991
3. 오세규, 공유식, 박일동, 유인종, “열간금형재의 마찰용접 최적화와 AE평가”, 한국동력기계공학회지, 제4권, 제4호, pp. 54 58, 2000

4. 조현수, 서성재, "Inconel 713C와 SCM440의 마찰용접", 대한용접학회지, 제15권, 제6호, pp. 78-84, 1997
5. 오세규, 장홍근, 장지훈, "Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴검사학회지, 제 15권, 제 4호, pp. 511-519, 1995
6. 박일동, 오세규, 김지수, "열간 금형펀치 제작을 위한 이종재 마찰용접과 고온 크리프 실시간 예측 및 AE에 의한 품질평가(I) 마찰용접과 AE", 한국해양공학회지, 제13권, 제3호, pp. 77-82, 1999
7. 공유식, 오세규, 이배섭, "로켓모터용 노즐재의 관대관 마찰용접과 AE평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제2호, pp. 66-73, 1999
8. 오세규, 양형태, 박형동, "자동차 브레이크용 강재의 이종재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가", 한국해양공학회지, 제12권, 제4호, pp. 60-69, 1998
9. S. K. Oh, H. D. Park, B. S. Lee, "Friction Weld Quality Evaluation of Hydraulic Valve Spool Material by Acoustic Emission Technique", Inter. J. of Ocean Engineering and Technology, Vol.2, No.1, pp. 18-25, 1999
10. S. K. Oh, Y. S. Kong and H. T. Yang, "Creep Prediction by Initial Strain Method for Aging Treated Friction Welds of Heat Resisting Steels", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.2, No.2, pp. 13-18, 1999
11. S. K. Oh, Y. S. Kong, I. J. Yoo and I. S. Kim, "Creep Life Prediction for Dissimilar Friction Welded Joints of Turbine Impeller Heat Resisting Steels and AE Evaluation(1) FRW and AE Evaluation", Proc. of 10th International Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Seattle, USA, pp. 203-207, 2000