

자동차용 피니온 기어재의 이종재 마찰용접과 실시간 AE평가

오 세 규* · 손 덕 수** · 양 형 태***
(99년 10월 19일 접수)

Dissimilar Friction Welding for Pinion Gear and Its Real Time AE Evaluation

Sae-Kyoo Oh*, Deog-Soo Son**, Hyung-Tae Yang***

Key Words : Acoustic Emission(AE, 음향방출), Friction Welding(FRW, 마찰용접), Welding Condition(용접조건), Heating Time(가열시간), Joint Efficiency(이음 효율), Toughness(인성), Total Cumulative AE Counts(AE 총누적량)

Abstract

This study aimed not only to develop the optimization of dissimilar friction welding of pinion gear of a motor vehicle steels of SCM415 and SMn443, but also to develop the application technique of the acoustic emission to accomplish an in-process real-time quality(such as strength and toughness) evaluation during friction welding of the pinion gear by the AE technique.

1. 서 론

자동차용 피니온 기어(pinion gear)재료는 마모성과 내구성 결여를 탈피하고 내마모성, 인성 및 내구성 모두를 가지는 재료를 사용하여 가공에서의 재료의 낭비를 줄이고 축 지지부의 기계가공의 어려움을 해결해야할 필요성이 요구되었다.

이전엔 자동차 pinion gear와 회전축 모두를 스테인리스 강으로 가공함으로써 재료비의 상승 및 가공의 어려움이 있었다. 이러한 어려움을 보완하

기 위해 pinion gear 부분만 SCM415을 사용하고 베어링 지지부의 축 부분에는 값싸고 절삭성이 우수한 기계구조용 망간강재인 SMn443을 사용하여 이와같이 이종재료를 마찰용접¹⁻³⁾에 의해 접합시킴으로써 이 두재료의 이용가치를 더욱 높이고자 한다.

본 연구에서는 이러한 이종재료, 즉 기계구조용 망간강재인 SMn443과 크롬-몰리브덴강인 SCM410와의 마찰용접의 최적화 기술을 회전수, 마찰가열 압력, 엽셋압력, 가열시간, 엽셋시간 결정에 의한

* 종신회원, 부경대학교 기계자동차공학부

** 정회원, 김천직업전문학교

*** 정회원, 부경대학교 대학원

용접부 강도와 인성을 고려하여 연구하였다. 또한 용접조건과 용접품질(강도, 인성)의 상관성을 도출하여 용접 이음효율이 100% 이상되는 용접조건의 최적범위를 설정하였으며, 최근 비파괴평가(nondestructive evaluation)의 하나로 주목받고 있는 음향방출(acoustic emission, AE)시험⁴⁻⁸⁾을 병행하여 마찰용접시 발생하는 AE를 측정하여 이때 측정된 총 AE량(total AE count)과 마찰용접 변수 및 용접품질(인장강도)과의 상관성을 도출하고 그에 대한 정량적 상관식을 도출하였다⁹⁻¹⁴⁾.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

실험에 사용된 SMn443, SCM415의 화학 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

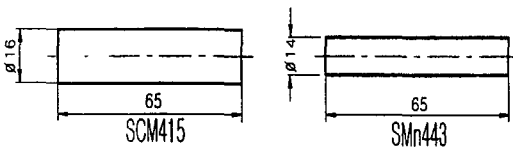
Table 1 Chemical composition of materials (wt%)

Item Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SMn443	0.45	0.15	1.37	0.018	0.004	0.05	0.04	0.02	0.01
SCM415	0.18	0.15	0.61	0.005	0.015	0.12	0.92	0.15	0.16

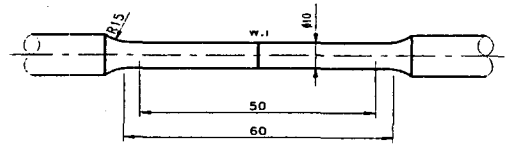
Table 2. Mechanical composition of materials (wt%)

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ψ (%)	Hardnes H_v
SMn443	981	17	45	278~279
SCM415	640	16	40	203~206

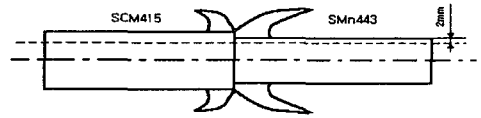
마찰용접에 사용한 시험편의 형상과 치수 및 이음부의 인장강도와 경도 및 조직시험편 형상치수는 Fig. 1에 나타나 있다.



(a) Friction welding and AE test specimen



(b) Tension test specimen of $\phi 14$ bar to $\phi 16$ bar



(c) Hardness test & microscopic test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of specimens

2.2 실험방법

봉 대 봉(bar-to-bar) 마찰용접에 사용된 마찰용접기계는, 최대재료치수로서 회전축은 $\phi 25$ 이고, 슬라이드축은 $\phi 40$ 인 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type) TOHO TH-25 마찰용접기계를 사용하였다.

용접품질평가를 위한 AE시험은, PAC사의 acoustic emission testing system(Model Locan-320, 4 channel)으로 수행하였으며, AE량 측정에는 고감도 변환기(transducer)인 R15-C 150kHz sensor를 사용하였다.

SMn443과 SCM415에 대한 봉 대 봉 이종재 마찰용접 최적조건을 결정하기 위해 참고문헌¹⁻³⁾을 조사하여 회전수(n)를 결정 후 가열압력(P_1), 단조압력(P_2)을 결정하고 Table 3의 여러 조건으로 실험을 하여서 단조시간(t_2)을 선택한 후 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜 실험하였다. 이렇게 용접된 재료들의 이음부 강도와 인성(인장강도, 흡수에너지, 연신율 등)를 구하고, 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간(t_1) 범위를 결정한 후, 용접시작에서 종료까지의 AE 누적총량을 측정하여 용접강도와 AE와의 상관성을 규명하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자동차용 pinion gear의 이종재 마찰용접의 최적화

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수는 회전수

(n), 가열압력(P_1), 단조압력(P_2), 가열시간(t_1), 단조시간(t_2) 등이며, 이종재(SMn443, SCM415)의 마찰용접 최적 가열압력 P_1 과 최적 단조압력 P_2 를 결정하기 위하여 여러가지 문헌과 실험 데이터¹⁻³⁾를 참고로 가열시간 t_1 과 단조시간 t_2 를 각각 5sec로 정하고 Table 3(Case 1)과 같이 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 하였다.

Table 3 Various Condition of dissimilar friction welding of SMn443 to SCM415

Case	Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Forging time t_2 (sec)	Total Upset U_T (mm)
1	2,000	40	60	5	5	-
		60	90			-
		80	120			-
		120	180			-
2	2,000	60	90	1~9	5	2.3~8.3

Fig. 2는 P_1 , P_2 를 결정하기 위하여 t_1 , t_2 를 고정하고 그 때의 인장강도를 구한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 P_1 , P_2 가 60, 90MPa에서 이음효율 100% 이상으로 가장 큰 인장강도값을 보였다.

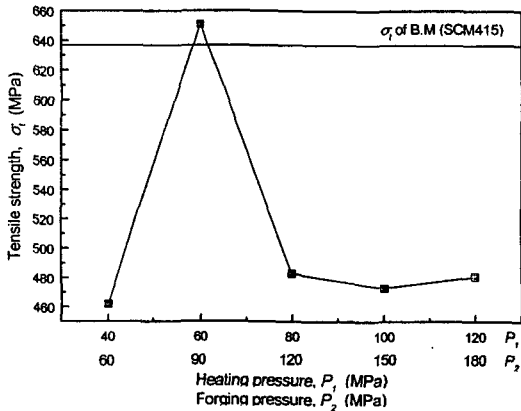


Fig. 2 σ_t vs. P_1 , P_2 in dissimilar friction welding of SMn443 to SCM415

Welding cond. : as shown in Table 3 (Case 1)

Fig. 3은 $\phi 14$ mm 이종재 마찰용접에서 가열업셋 U_1 , 단조업셋 U_2 , 총업셋량 U_T (mm)와 가열시간 t_1 (sec) 간의 상관관계를 실험에 의해 구한 결과

이다. $U_1 - t_1$, $U_2 - t_1$, $U_T - t_1$ 의 상관 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 0.91t_1 + 0.13, (R^2 = 0.99) \\
 U_2 &= 0.07t_1 + 1.21, (R^2 = 0.77) \\
 U_T &= 0.99t_1 + 1.34, (R^2 = 0.99)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

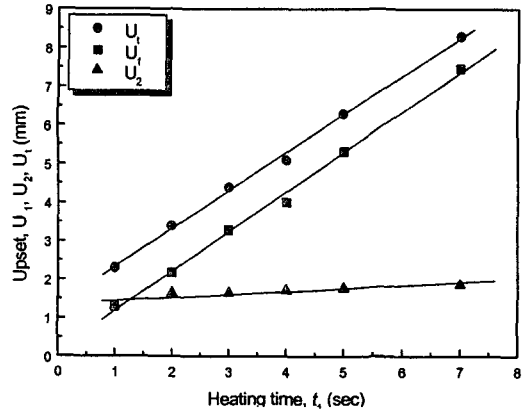


Fig. 3 U_1 , U_2 , U_T vs. t_1 for dissimilar FRW of SMn443 to SCM415

Welding cond. : as shown in Table 3 (Case 2)

총단조업셋량 U_T (mm)와 마찰가열시간 t_1 (sec)의 상관관계는 그림에서 알 수 있듯이 마찰가열시간 t_1 이 증가할수록 총단조업셋량 U_T 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 3(Case 2)과 같은 조건에서 $\phi 14$ mm 봉인 SMn443강과 $\phi 16$ mm 봉인 SCM415강을 마찰용접한 이종재 마찰용접재의 인장강도 σ_t (MPa)와 가열시간 t_1 (sec)과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타내었다.

이때의 인장 시험편은 Fig. 1(b)에서와 같이 봉대 봉 용접재의 중방향으로 마찰용접면(W.I, weld interface)이 중앙에 오도록 선삭한 후 연삭으로 마무리하였다.

이 그림에서 O_{t1Z} (optimum t_1 zone)는 $t_1=4\sim 6$ sec이며, 이때의 인장강도는 $\sigma_t=641\sim 649$ MPa이고, 총단조업셋량은 $U_T=2.3\sim 8.3$ mm를 나타내고 있다.

이것은 이종재의 낮은 인장강도 SCM415($\sigma_t=640$ MPa)보다 높다. 이때 $\sigma_t - t_1$ 의 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma_t = 2.41t_1^3 - 34.98t_1^2 + 162.91t_1 + 403 \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

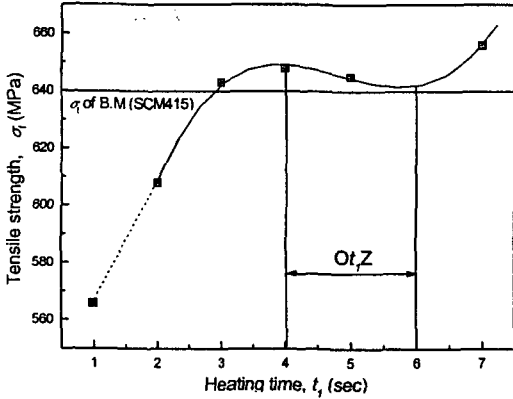


Fig. 4 σ_t vs. t_1 in dissimilar welding of SMn443 to SCM415 ($\phi 14$ bar to $\phi 16$ bar)
Welding cond. : as shown in Table 3 (Case 2)

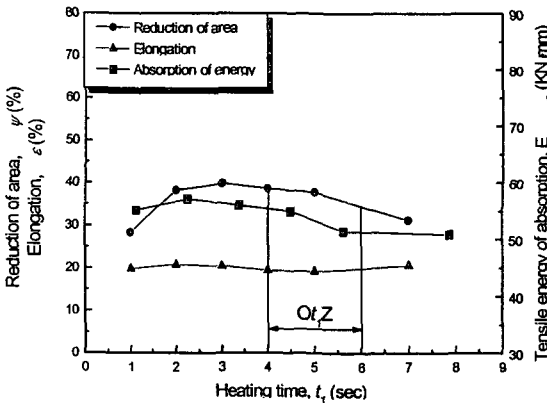


Fig. 5 E_a , ψ , ϵ vs. t_1 in dissimilar friction welding of SMn443 to SCM415
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

여기서 R^2 은 기여도(coefficient of determination)로서 1(100%)에 가까우므로 실험식의 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있다.

마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 강도와 인

성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신률)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3(Case 2)의 용접조건에 따라 재료를 용접할 때 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 인성과의 상관관계는 Fig. 5와 같이 구하여진다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 4에서 구한 Ot_1Z 에서 인성이 높게 나타나므로, $Ot_1Z = 4 \sim 6$ sec는 강도와 인성면에서 모두 우수한 범위를 알 수 있다.

3.2 자동차용 피니온 기어 마찰 용접시의 AE의 총량과 용접품질(인장강도)과의 상관성

일반적으로 가열시간(t_1)의 증가에 따라 마찰용접부의 소성변형이 계속해서 크게 일어나기 때문에 AE(acoustic emission)도 증가한다. Fig. 6은 Table 3(Case 2)와 같은 용접조건하에서의 마찰용접 중 AE시험을 수행한 결과로 t_1 의 증가와 더불어 AE counts량도 증가하는 양상을 보이고 있다. 그리고, $Ot_1Z(4 \sim 6$ sec)에서의 AE 총량(N)은 84400~87800(count)으로 확인되었다. 이때의 AE 총량 N (counts)과 t_1 (sec)사이의 $N-t_1$ 관계 실험식은 다음과 같다.

$$N = -2288.09t_1^2 + 23730.71t_1 + 26309, \quad (R^2=0.99) \quad (3)$$

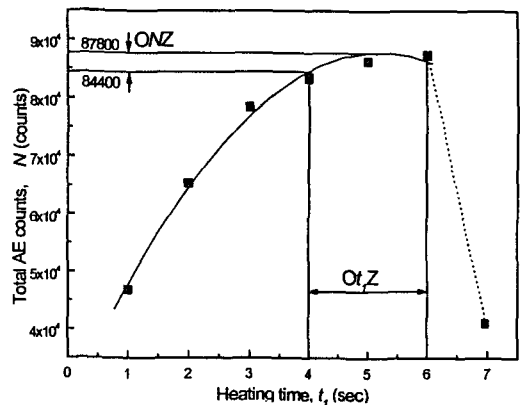


Fig. 6 N vs. t_1 in dissimilar friction welding of SMn443 to SCM415
Welding cond. : as shown in Table 3 (Case 2)

Fig. 7은 용접강도와 AE 총량과의 상관관계를 보여준다. 즉, 마찰용접 중 AE 시험을 수행하여 얻은 AE총량 N (counts)과 용접품질(강도) σ_t (MPa)과의 상관관계를 실험적으로 구한 것이다. Fig. 6에서 구한 ONZ (84400 ~ 87800 counts) 범위에서 인장강도는 648~651MPa로서 이때의 이음효율이 모재에 비해 100% 이상임이 확인되었다.

이때의 σ_t-N 관계식은 다음과 같이 구해졌다.

$$\sigma_t = -6.96 \times 10^{-8} N^2 - 0.013 N + 82, \quad (R^2=0.95) \quad (4)$$

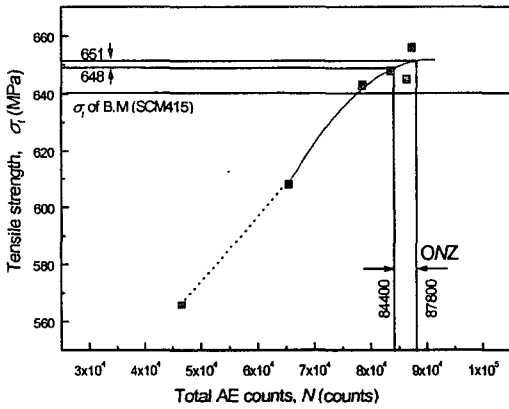


Fig. 7 σ_t vs N in dissimilar friction welding of SMn443×SCM415
Welding cond. : as shown in Table 3
(Case 2)

여기서 주어진 최적용접조건하에서 마찰용접시 측정된 AE count의 총량 N 이 최적 ONZ 사이에 있는 경우 이음효율이 100%이상인 되는 최적의 이음강도임을 비파괴적으로 즉시 실시간에 예측 평가할 수 있다. 이는 마찰용접 실시간에 AE량의 측정만으로 용접부 강도의 최적 여부를 비파괴적으로 평가할 수 있음을 뜻하며 식(4)을 통하여 이를 정량적으로 규명할 수 있음을 뜻한다.

결과적으로 이중재 마찰용접은 Fig. 7, 식(4)에서 알 수 있듯이 마찰용접중의 AE 총량 N 을 측정하면 즉시 실시간에 그 용접재의 σ_t 를 구하고 이것

이 이음효율이 100% 이상인 $O_t Z$ 범위내의 것인지 아닌지를 평가할 수 있다. 이러한 결과는 타재료의 마찰용접과 같은 경향으로 확인되었다^{12~14)}.

3.3 용접부 미시조직, 경도, 파단면의 SEM 검사

Fig. 8은 최적 마찰용접 조건하에서 마찰용접한 시험편의 경도 분포를 나타낸다. 이 그래프를 보면 용접계면(weld interface) 부근에서 경도치가 최고이다. 그 이유는 용접면 부근에서 마찰용접시 극부가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. SMn443 및 SCM415의 모재 경도는 각각 약 $H_v 279, 206$ 정도로서 매우 낮고 마찰용접 경계면 (W.I)의 경우는 $H_v 470$ 정도로서 SMn443의 모재부 경도보다 큰 값으로 상승했으며, HAZ (heat affected zone)는 경계면에서 좌우 약 4mm 정도이다. 이러한 경도의 peak는 후열처리로써 완화시킬 수 있을 것이다^{2, 3)}.

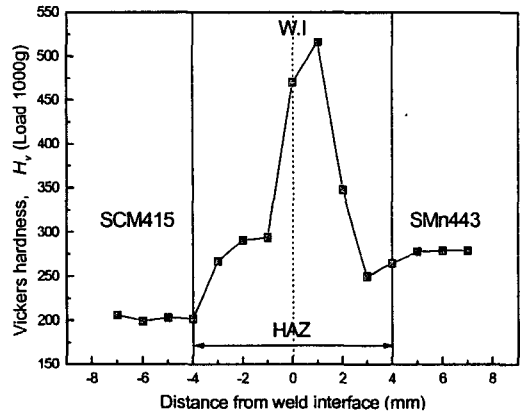


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joint
Welding cond. : $n=2,000$ rpm, $P_1=60$ MPa, $P_2=90$ MPa, $t_1=4$ sec, $t_2=5$ sec

Fig. 9는 모재와 열영향부(HAZ) 및 마찰용접부의 조직을 검사코져 중심 축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접면(W.I) 좌우 5mm 부근의 조직 사진이다.

전반적으로 조직은 sorbite 상태로 나타나 있다. 그러나 마찰가열시간의 변화에 따라 HAZ 부와

W.I 부분의 조직이 조금씩 상이하다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 W.I와 HAZ 부는 같은 sorbite 조직이지만 W.I에 따라 원주 방향으로 약간의 금속 이동의 흐름(metal flow)을 볼 수 있다.

따라서 마찰용접부는 모재에 비해 미세한 결정립을 가진 조직으로 되며 조직상에도 아주 양호함을 나타내고 있다.

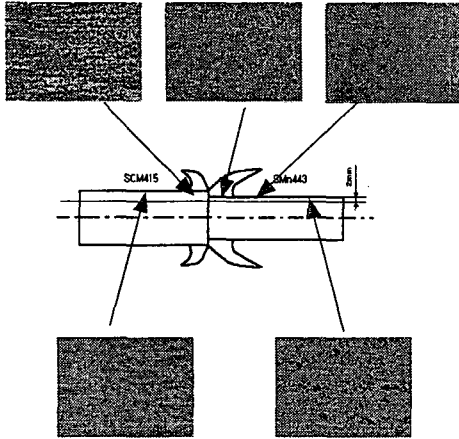


Fig. 9 Micro-structures of B.M, HAZ and weld interface of friction welded joint of SMn443 to SCM415

Welding cond. : $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=60\text{MPa}$, $P_2=90\text{MPa}$, $t_1=4\text{sec}$, $t_2=5\text{sec}$

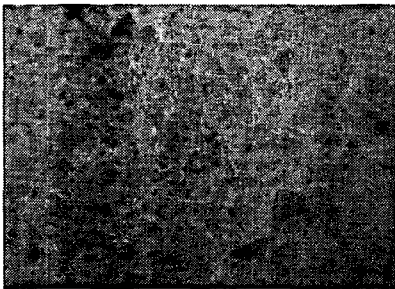


Fig. 10 Fractograph of tensile fractured surface of dissimilar FRW joint by SEM

Welding Cond.: $n=2000\text{rpm}$, $P_1=60\text{MPa}$, $P_2=90\text{MPa}$, $t_1=4\text{sec}$, $t_2=5\text{sec}$

Fig. 10은 SMn443과 SCM415를 최적 마찰용접 조건으로 마찰용접한 용접부의 인장 파단면에 대해 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한 마이크로(micro)사진으로 SCM415측의 파단면을 400배로 확대해서 나타내었다.

사진에서 SCM415측 파단면에서 미세한 덩플을 관찰할 수 있으며, 이는 소성변형에 의한 연성파괴임을 알 수 있다.

4. 결 론

자동차의 피니온기어에 사용되는 기계구조용 망간강(SMn443)재와 Cr-Mo강(SCM415)의 이종재 마찰용접을 수행하여 마찰용접 최적화와 AE에 의한 마찰용접부의 비파괴적 평가에 대한 연구결과를 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- 1) 기계구조용 망간강재와 Cr-Mo강 이종재 마찰용접이 가능하였고 재료비의 절감이 가능하였다.
- 2) 두 이종재의 인장시험에서 보면 모재부의 강도가 약한 SCM415($\sigma_t=640\text{MPa}$)측의 모재부에서 파단이 되었고, 최적 마찰용접 조건에서의 용접부 이음효율은 모재부보다 약 100% 이상 높았으며, 용접강도, 인성을 고려한 최적 마찰용접 조건은, $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=60\text{MPa}$, $P_2=90\text{MPa}$, $t_1=4\sim6\text{sec}$, $t_2=5\text{sec}$ 이다.
- 3) 적정 마찰가열시간 t_1 이 4~6sec일 때, 용접실시간에 측정된 total AE count의 범위는 $N=84400\sim87800\text{counts}$ 이었고, 이때의 인장강도는 이음효율 100% 이상으로서 648~651MPa이었다.
이음효율(인장강도, 인장흡수에너지)이 모재부보다 높았음을 실험적으로 확인할 수 있었고, 마찰용접 실시시간에 비파괴적으로 품질평가가 가능하였다. 즉 도출된 σ_t-N 의 상관관계 실험식은 다음과 같다.

$$\sigma_t = -6.96 \times 10^{-8} N^2 - 0.013 N + 82$$

- 4) 마찰용접부 조직은 두 이종재질이 보다 강력하게 혼합되어 치밀하고 조밀한 조직을 갖고 있

고, 용접부는 매우 좁게 나타났으며, 용접결합이 전혀 없는 우수한 접합이었다.

참 고 문 헌

- 1) AWS, "Welding Handbook", Vol. 2. p. 747, pp. 672-763, 1991
- 2) 摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, p. 46, pp. 145-150, 184, 1976
- 3) 日本 摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會 20年誌", pp. 1-106, 1984
- 4) Glennie, A.M.G. and J. Summerscales, "Acoustic Emission Source Location in Orthotropic Materials, British Journal of NDT, January, 28(1), pp.17~22, 1986
- 5) Beattie, A.G., "Acoustic Emission Principles and Instrumentation", Journal of Acoustic Emission, Vol. 2, No1/2, pp.95~98, 1983
- 6) Arrington, M., "Acoustic Emission", Speedronics Ltd, Huntingdon, pp.25~59, 1988
- 7) Oh, S.K. and Wang, K.K., "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, 1983
- 8) Oh, S.K., Wang.K.K. and G.R. Reif, "In-process Quality Detection of Friction Welds using Acoustic Emission Techniques", Welding Journal of AWS, Welding Research Supplement, Vol. 61, No. 9, pp.312-316, 1982
- 9) Oh, S.K., "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transaction of KSME, Vol.7. No.2. pp.226~236, 1983
- 10) 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한 기계학회지, 제 22권, 제 3호. pp.184~190, 202, 1982
- 11) Oh, S.K., "Friction Weld Strength Analysis by Acoustic Emission Techniques", J. of KSME, Vol.22, No.3. pp.184~190, 1982
- 12) 오세규, 양형태, 박형동, "자동차 브레이크용 강재의 이중재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가," 한국해양공학회지, Vol.12, No.4, pp.60~69, 1998
- 13) 공유식, 오세규, 이배섭, "로켓모터용 노즐재의 관대관 마찰용접과 AE평가에 관한 연구," 한국해양공학회지, Vol.13, No.2, pp.66~73, 1999
- 14) Oh, Sae-Kyoo, Park, Hyung-Dong, Lee, Bae-Sup, "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