

◎ 論 文

크랭크 샤프트강재의 마찰용접 최적화와 AE 실시간 평가

오 세 규* · 최 혜 영** · 공 유 식***
(99년 10월 19일 접수)

Optimization of Friction Welding for Crank Shaft Steels and Its Real Time AE Evaluation

Sae-Kyoo Oh*, Hei Young Choi**, Yu Sik Kong***

Key Words : Friction Welding(FRW, 마찰용접), Optimization(최적화), Weld Strength(용접강도), Weld Toughness(용접인성), Acoustic Emission(AE, 음향방출), Real-Time AE Evaluation(실시간 AE평가)

Abstract

The crank shafts need anti-corrosion materials. So STS 304 is the essential material to manufacture this shaft. However, it costs more to manufacture the shafts by using only STS 304 than welding of STS 304 to other carbon steels. 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.

Then, this study aimed not only to develop the optimization of dissimilar friction welding of crank shafts steels of STS304, SM35C, but also to develop the application technique of the acoustic emission to accomplish in-process real-time quality(such as tensile) evaluation during friction welding of the shafts by the AE technique.

1. 서 론

국제화 시대 산업사회에서 경쟁력 유지 및 지속적인 발전을 위해서는 노력과 기술 개발을 통한 양질의 제품을 생산할 수 있는 능력과 신뢰성 확보

보는 필수적이다. 이러한 기술력 확보에 필요한 용접분야인 마찰용접은 자동차부품, 기계부품, 전기기계등 각종 산업 분야에서 사용되고 있으며, 또한 고효율 고강도 저코스트의 혁신적인 접합방식으로 주목 받고 있다¹⁻²⁾.

* 중신회원, 부경대학교 기계자동차공학부

** 정회원, 울산직업전문학교

*** 정회원, 부경대학교 대학원

크랭크 샤프트등의 축부 부식 방지를 위해 내식성 재료의 사용이 필요하지만, 스테인리스 강철재료의 용접작업 난이 때문에 일체형 재료로 기계 가공하여 제품화하고 있는 실정이다. 이러한 부품 접합에 마찰용접을 도입함으로써 필요부분만 스테인리스재를 이용하고 또한 SM35C 쪽은 냉간단조에 의해 제작이 가능하여 고가 재료비의 대폭적인 절감과 가공공수의 절감을 가능하게 할 수 있다. 이때 축은 고속회전으로 비틀림모멘트와 중량에 의한 굽힘 모멘트, 또는 벨트구동인 경우 장력에 의한 모멘트, 회전중에 축진동에 의한 반복응력으로 인한 피로현상 등 복잡한 힘이 걸리는 부재이다. 이때 용접품질과 마찰용접 변수와의 상관관계를 실험적으로 도출하였다.

또한 마찰용접시 최근 비파괴 시험의 하나로 주목받고 있는 음향방출(acoustic emission:AE)시험을 병행하여 마찰용접시 발생하는 AE를 측정하여 이때 측정된 총 AE량(total AE count)과 마찰용접 변수 및 용접품질과의 상관성을 규명 하였다⁵⁻¹⁰⁾. 그리하여 본 연구결과가 크랭크 샤프트용 강재의 설계제작을 위한 이종재 마찰용접의 최적화 기술 개발과 AE에 의한 용접 실시간에 마찰용접 품질을 평가할 수 있는 기술개발에 기여할 중요한 기초자료가 되리라고 생각한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 크랭크 샤프트용 강재가 가져야 할 인성과 내마모성, 내식성에 중점을 두어 선택하였다. 실험재료인 STS304는 오스테나이트계 스테인리스 강으로서 페라이트계 스테인리스강의 비산화생산에 약한 성질을 개선하기 위해 이것에 Ni, Mo, Si등을 합금시킨 것으로서 그 표준 성분이 18% Cr, 8% Ni로서 내식성과 용접성 및 인성이 Cr계 스테인리스강보다 우수하다. 또한 18-8 스테인리스강에 많이 나타나는 입계부식(boundary corrosion)의 영향에서도 STS304는 탄소량을 낮게하여 탄화물 석출(입계부식)의 해를 적게 한 것이다.

본 연구에 사용된 STS304, SM35C의 화학 조성 과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of STS304, SM35C (wt%)

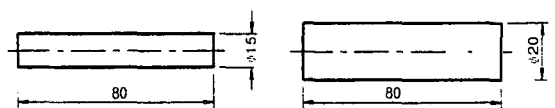
Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
STS304	0.065	0.62	1.27	0.024	0.015	9.1	18.16	0.23
SM35C	0.32	0.24	0.75	0.009	0.017	0.07	0.11	0.09

Table 2 Mechanical properties of STS304, SM35C

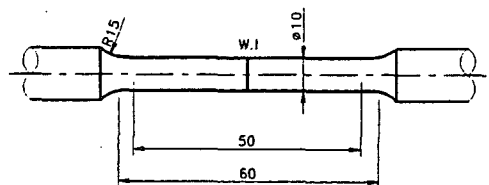
Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Reduction of area ψ (%)	Hardness H_v	Yield strength σ_y (MPa)	Heat treatment
STS 304	750	72	272	340	Cold drawn H.T bar
SM35C	690	39.8	228	471	Q. 820°C T. 540°C

본 연구에서 마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 마찰용접(friction welding, FRW)에 사용한 시험편의 형상과 치수 및 대표적 강도인 이음부의 인장강도, 시험편 형상치수는 각각 Fig. 1에 나타나 있다.

Fig. 1은 SM35C ($\phi 20$)과 STS304 ($\phi 15$)의 봉대봉 이종재 마찰용접을 위한 시험편으로 규격에 따라 선삭후 연삭한 형상 치수로서 (a)는 마찰용접 및 AE시험편, (b)는 인장 시험편의 형상 및 치수를 보여준다.



(a) Friction welding and AE test specimen of $\phi 15$ bar to $\phi 20$ bar



(b) Tension test specimen of weld

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

2.2 실험장치 및 실험방법

마찰용접에 사용된 마찰용접 기계는 용량이 최대재료 치수로서 회전축은 $\phi 25$ 이고 슬라이드축은 $\phi 40$ 인 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)인 TOHO TH-25 마찰용접 기계와 AE기기가 함께 조합되어 사용되었다.

본 실험에 사용된 시험편인 STS304와 SM35C에 대한 봉 대 봉 이종재 마찰용접 최적조건을 결정하기 위해 참고문헌을 조사하여 회전수(n)를 결정 후 가열압(P_1), 단조압력(P_2)을 결정하고 Table 3과 같이 실험을 하여, 단조시간(t_2)을 선택 후 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜 실험한다. 이음부의 강도는 인장강도, 흡수에너지, 연신율 등을 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간 (t_1)을 결정 짓는다.

Table 3 Various condition of dissimilar friction welding of $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar

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)
1	2000	60	135	2	3
		80	180		
		100	225		
		120	270		
		140	270		
2	2000	120	270	1 - 6	3

2.3 봉 대 봉 이종재 마찰용접시의 AE 시험

용접시간 중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료 중에 검출된 초기 AE 누적량과 용접후 냉각기간 중에 검출된 후기 AE의 두 가지가 사용될 수 있는데, 본 연구에서는 초기 AE량과 용접강도의 상관실험식을 만들기 위하여 전자에 관하여만 해석하였다⁸⁻¹⁰.

마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 센서(R15-150kHz sensor)를 마찰용접 기계의 마찰접합부에서 310mm인 위치의 정지척(chuck)에 부착하였고, acoustic couplant로서 그리스를 사용하여 sensor mount로 센서를 고정시켰다^{9, 10}.

3. 결과 및 고찰

3.1 크랭크 샤프트의 봉대봉 이종재 마찰용접의 최적화

3.1.1 용접변수간의 상관관계

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수 (n), 마찰가열압력 (P_1), 단조가압력 (P_2), 마찰가열시간 (t_1), 단조가압시간 (t_2)등이며, 이종재 (STS304 - SM35C)의 마찰 용접 최적 가열압력

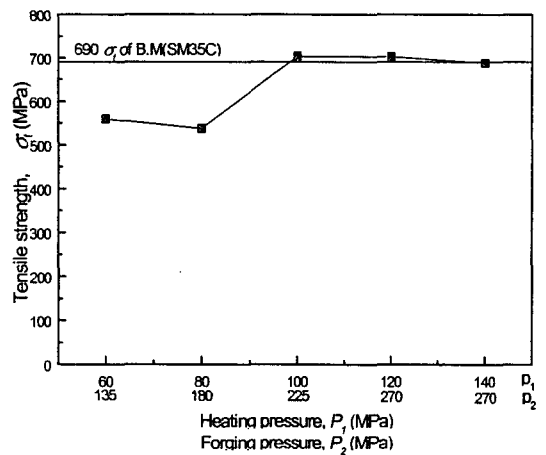


Fig. 2 σ_t vs. P_1, P_2 in $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar friction welding of STS304 to SM35C
Welding condition : as shown in Table 3

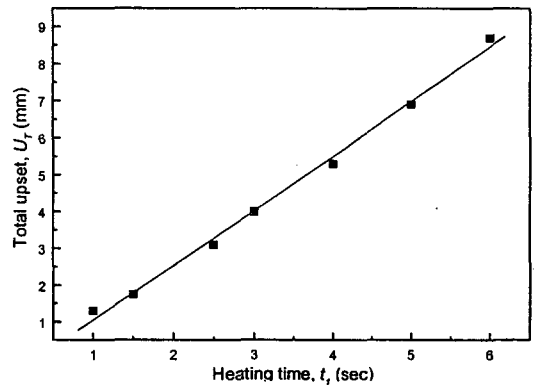


Fig. 3 U_T vs. t_1 in $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar friction welding of STS304 to SM35C
Welding condition : as shown in Table 3

P_1 과 최적 가압력 P_2 를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌과 실험 데이터¹⁻⁴⁾를 참고로 가열시간 t_1 과 단조시간 t_2 를 각각 2 sec, 3 sec로 정하고 앞의 Table 3과 같이 마찰용접 조건을 변화 시키면서 마찰용접을 하였다.

Fig. 2는 P_1 , P_2 를 결정하기 위하여 n 과 t_1 , t_2 를 고정하고 마찰용접한 용접재의 인장강도를 구한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 P_1 , P_2 가 각각 120, 270MPa에서 가장 큰 인장강도 값을 보였다. 이때 총단조업셋량 U_T (mm)와 마찰가열시간 t_1 과의 상관관계를 실험한 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 마찰가열시간 t_1 (sec)을 여러 가지로 변화시켜서 이중재 마찰용접한 경우로서 $\phi 15$ 봉 대 $\phi 20$ 봉(bar-to-bar)의 마찰용접 최적화 실험을 위한 총단조업셋량 U_T (mm)와 가열시간 t_1 (sec)과의 상관성을 나타낸다. 이때 U_T-t_1 의 상관 관계식은 다음과 같이 되풀되었다.

STS304 - SM35C dissimilar weld :

$$U_T = 1.47t_1 - 0.72, (R^2 = 0.95) \quad (1)$$

Fig. 3의 경우는 t_1 이 증가 할수록 U_T 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 이중재 STS304-SM35C의 마찰용접에서 식(1)의 U_T-t_1 의 정량적 상관관계는 마찰용접시의 시간조정법 또는 길이의 정밀성을 위한 업셋조정법 중 어느 것을 선택하는 데 어려움 없이 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

3.1.2 용접변수와 강도(기계적성질)간의 상관관계

Fig. 4는 Table 3과 같은 조건에서 시간 조정법으로 용접한 $\phi 15$ 봉 대 $\phi 20$ 봉 STS304와 SM35C 이중재 마찰용접재의 인장강도 σ_t (MPa)와 가열시간 t_1 (sec)과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타낸다.

이때의 인장 시험편은 Fig. 1(b)에서와 같이 봉 대 봉 용접재의 증방향으로 마찰용접면이 중앙에 오도록 가공하였고, 가열시간 t_1 (sec)에 따른 σ_t 의 상관관계식은 최소자승법을 이용한 회귀 해석법에 의해 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = - 22.83t_1^2 + 169.35t_1 + 471, (R^2=0.98) \quad (2)$$

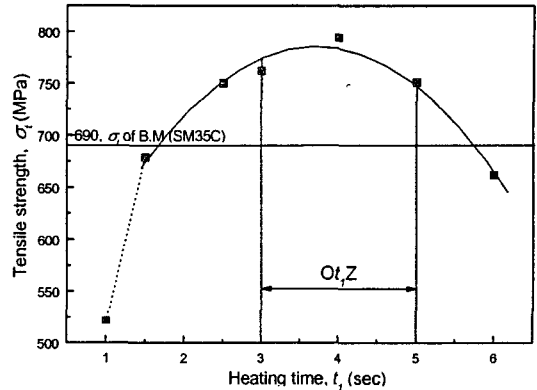


Fig. 4 σ_t vs. t_1 in $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar friction welding of STS304 to SM35C
Welding condition : as shown in Table 3

Fig. 4에서 Ot_tZ (optimum t_1 zone)에 대한 t_1 의 최적범위는 $t_1=3\sim 5$ sec이며, 이때의 인장강도는 $\sigma_t = 762\sim 773$ MPa이고 총업셋량은 $U_T=2.9\sim 6.9$ 로 나타내고 있다. 파단은 SM35C측 모재측이였으며, 이때 이음효율은 100% 이상이다.

3.1.3 봉 대 봉 이중재 마찰용접의 최적화

STS304-SM35C의 이중재 마찰용접재의 최적화를 위하여 가열시간 t_1 을 변수로 하여 인장강도가 우수한 t_1 의 범위를 정할 수 있다.

따라서 Ot_tZ 보다 t_1 이 낮거나 너무 높으면 인장강도(σ_t)가 낮아지며, 또한 이음효율이 좋지 않으나, Ot_tZ 내의 t_1 을 선택하면 100%이상의 충분한 강도를 유지할 수 있어 이들 재료에 있어서 강도면에서 최적화를 실현할 수 있다.

또한, 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 강도 외에 인성(인장흡수에너지, 단면수축률, 연신률)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3의 용접조건에 따라 재료를 용접을 할 때 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 흡수에너지, 단면수축률, 연신률과의 상관 관계는 Fig. 5와 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 앞에서 구한 Ot_tZ 에서의 ψ , ϵ 및 E_a 를 고려해 볼 때 크게 염려될 만큼 낮지 않으므로 인성 면에서 문제되지 않음을 알 수 있다.

이러한 경향은 타 연구결과와 매우 일치한다⁸⁻¹⁰⁾.

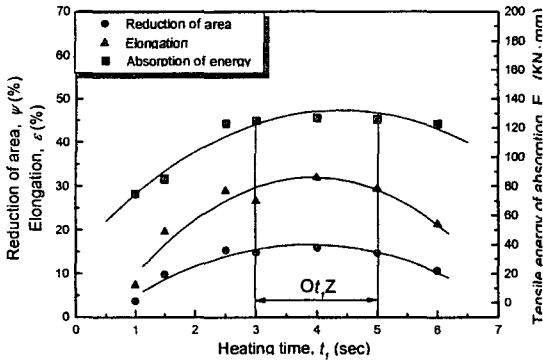


Fig. 5 ψ vs. t_1 , ϵ vs. t_1 , and E_a vs. t_1 in $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar friction welding of STS304 to SM35C
Welding condition : as shown in Table 3

3.2 크랭크 샤프트의 마찰용접시 AE의 총량과 용접품질과의 상관성

3.2.1 용접조건과 AE와의 상관성

일반적으로 가열시간(t_1)이 증가함에 따라 마찰 용접부의 소성변형이 계속해서 크게 일어나기 때문에 AE량도 증가한다. Fig. 6은 Table 3과 같은 용접조건하에서의 마찰용접 중 AE시험을 수행한 결과로 t_1 의 증가와 더불어 N 도 증가하는 양상을 보이고 있다. 그림에서 $t_1=5\text{sec}$ 이상일 때는 N 이 감소하는 경향을 보이는데 이는 가열시간의 증가

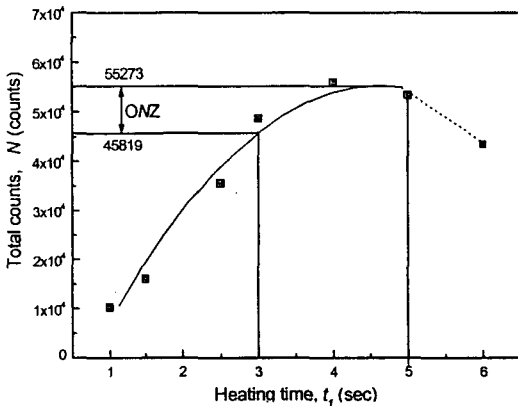


Fig. 6 N vs. t_1 in $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar friction welding of STS304 to SM35C
Welding condition : as shown in Table 3

에 따른 인장강도의 저하와 관련이 있다고 생각된다. Fig. 6에서 $ONZ(3\sim 5\text{sec})$ 에서의 AE 총량(N)은 45819~55273(counts)으로 확인 되었다. 이때의 AE총량 $N(\text{count})$ 과 $t_1(\text{sec})$ 사이의 $N-t_1$ 관계식은 다음과 같다.

$$N = -3666.81t_1^2 + 33901.57t_1 - 22996, (R^2=0.98) \quad (3)$$

3.2.2 AE 총량과 용접품질의 상관성

Table 3과 같은 용접조건으로 마찰용접할 때 용접강도(σ)와 AE 총량(N)과의 상관관계는 Fig. 7과 같다. 그림에서와 같이 ONZ가 45819~55273 counts일 때의 인장강도는 762~773MPa로서 이음효율이 모재에 비해 100%이상임을 실험적으로 확인할 수 있었다.

이때의 σ_t-N 관계식은 다음과 같이 구해졌다.

$$\sigma_t = -3.97 \times 10^{-8} N^2 + 0.0052N + 607, (R^2=0.97) \quad (4)$$

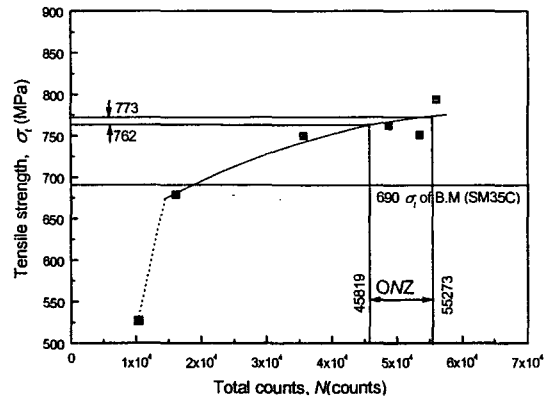


Fig. 7 σ_t vs. N in $\phi 15$ bar-to- $\phi 20$ bar friction welding of STS304 to SM35C
Welding condition : as shown in Table 3

여기서 마찰용접시 측정된 총 AE count가 최적 ONZ사이에 있을때 이음효율 100%이상의 최적의 강도임을 비파괴적으로 확인이 될수있다. 이는 마찰용접 실시시간에 AE량의 측정만으로 용접부 강도의 최적여부를 비파괴적으로 평가 할 수 있음을 뜻하며, 식 (4)를 통하여 이를 정량적으로 규명할 수 있음을 뜻한다.

결과적으로 이종재 마찰용접은 Fig. 7, 식(4)에서 알 수 있듯이 마찰용접중의 AE총량 N 을 측정하면 즉시 실시간에 그 용접재의 인장강도 σ_t 를 구할 수 있고, 이것이 O_{t2} 범위내의 것인지 아닌지를 평가할 수 있으며, 또한 용접조건 조절에 의해 품질을 조정 제어할 수 있는 방법이 됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 타 연구결과에서도 확인된 바 있다.^{9~10)}

3.2.3 용접부 미세조직과 경도분포 조사 및 파단면의 SEM 검사

Fig. 8은 최적 마찰용접 조건하에서 마찰용접한 시험편의 용접부 경도 분포를 나타낸다. 이 그래프를 보면 용접계면(weld interface)에서 경도치가 최고이다. 그 이유는 용접면 부근에서 마찰용접시 국부 가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 모재의 경도는 STS304와 SM35C의 경우 각각 H_v272 , H_v228 정도로서 매우 낮고 마찰용접 경계면 (W.I)의 경우는 H_v314 정도로서 STS304의 모재부 경도보다 약 13%정도 상승했으며, HAZ(heat affected zone)는 경계면에서 좌우 약 3mm정도이다. 이러한 경도의 peak는 후열 처리로써 완화시킬 수 있을 것이다.

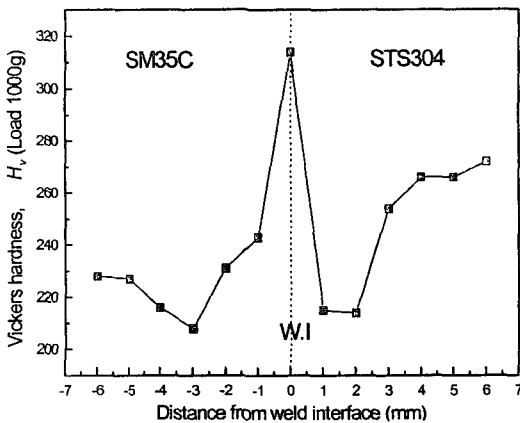


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of friction-welded-joint of STS304 to SM35C steel bars
Welding cond.: $n=2,000$ rpm, $P_1=120$ MPa, $P_2=270$ MPa, $t_1=4$ sec, $t_2=3$ sec

Fig. 9는 모재와 열 영향부(HAZ) 및 마찰용접계면의 조직을 검사코져 중심 축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접계면(W.I) 좌우 6mm 부근의 조직 사진이다. 인장파단은 대부분이 SM35C 모재측에서 파단되므로 HAZ부와 W.I부의 미세조직 결함은 없다고 생각된다. 전반적으로 조직은 sorbite 상태로 나타나 있다. 그러나 마찰가열시간의 변화에 따라 HAZ부와 W.I 부분의 조직이 조금씩 상이하다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 W.I부와 HAZ부는 같은 sorbite 조직이지만 W.I부는 더욱 조직이 미세하고, 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.

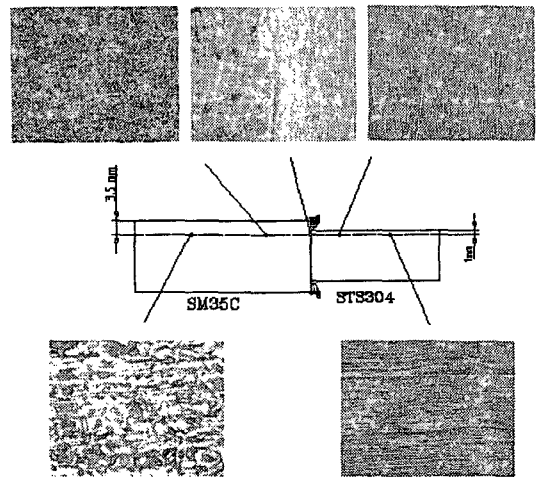


Fig. 9 Micro-structures of B.M, HAZ and weld interface of friction welded joint of STS304 to SM35C steel bar ($\times 200$)
Welding cond.: $n=2,000$ rpm, $P_1=120$ (Mpa), $P_2=270$ (Mpa), $t_1=4$ (sec), $t_2=3$ (sec)

Fig 10은 최적 마찰 용접 조건인 회전수 2000rpm, 마찰가열압력 $P_1=120$ MPa, 업셋단조압력 $P_2=270$ MPa, 마찰가열시간 $t_1=4$ sec, 업셋단조시간 $t_2=3$ sec로 STS304와 SM35C를 마찰용접한 용접부의 인장 파단면에 대해 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한 마이크로(micro)사진으로 SM35C 측의 파단면을 400배로 확대해서 나타내었다.

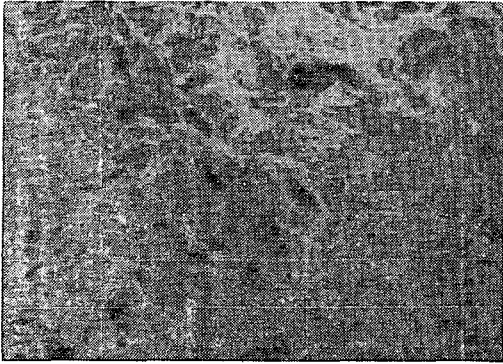


Fig. 10 Fractograph of tensile fractured surface of dissimilar FRW joint (STS304-SM35C) by SEM, $\times 400$
 Welding cond. : $n=2,000$ rpm, $P_1=120$ (MPa), $P_2=270$ (MPa), $t_1=4$ (sec), $t_2=3$ (sec)

사진에서 SM35C측 파단면에서 미세한 덩이를 관찰할 수 있으며, 이는 소성변형에 의한 연성파괴임을 알 수 있다.

4. 결 론

크랭크 샤프트용에 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강과 기체구조용탄소강(STS304-SM35C)의 봉 대 봉 이종재 마찰용접을 수행하여 마찰용접 최적화와 AE총량, 용접품질(인장강도), 인성에 미치는 영향 및 AE총량과 인장강도의 상관관계에 대한 연구결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- 1) 크랭크 샤프트용 강재인 STS304와 SM35C의 이종재 마찰용접이 가능하고, 고가 재료비의 대폭적인 절감이 가능하고, 마찰용접 시작에서 종료까지 강한 소성변형과 더불어 다량의 AE가 발생하였다.
- 2) 인장시험에서 보면 모재부의 강도가 낮은 SM35C($\sigma_t=690$ MPa)측 열영향부(HAZ)에서 용접 경계면(W.I)과의 사이에서 파단되었고, 최적 마찰용접 조건에서의 용접부 이음효율이 100% 이상으로서 모재부보다 높았으며, 용접강도와 인성을 고려한 최적 마찰용접 조건은 다음과 같다.
 $n=2,000$ rpm, $P_1=120$ MPa, $P_2=270$ MPa, $t_1=3\sim 5$ sec, $t_2=3$ sec

- 3) 용접실시간에 측정된 AE총량의 최적범위 ONZ에서 마찰용접 이음효율이 아주 높은 용접품질(인장강도, 인성)을 얻을 수 있었다. 그러므로, 실제 마찰용접시 AE를 사용함으로써 실시간에 용접품질의 평가가 가능함을 알 수 있었다.
- 4) 마찰용접부 조직은 두 이종재질이 강력하게 혼합되어 치밀하고 조밀한 조직을 갖고 있고, 용접부는 매우 좁게 나타났으며, 용접결함이 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) Vill, V.I., "Friction Welding of Metals", pp. 2~21, 1962
- 5) Glennie, A.M.G. and J. Summerscales, "Acoustic Emission Source Location in Orthotropic Materials, British Journal of NDT, 28(1), pp.17~22, January, 1986
- 6) Beattie, A.G., "Acoustic Emission Principles and Instrumentation", Journal of Acoustic Emission, Vol. 2, No1/2, pp. 95~98, 1983
- 7) Arrington, M., "Acoustic Emission", Speedtronic Ltd, Huntingdon, pp. 25~59, 1988
- 8) 오세규, 양형태, 박형동, "자동차 브레이크용 강재의 이종재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가," 한국해양공학회지, Vol.12, No.4, pp.60~69, 1998
- 9) 공유식, 오세규, 이배섭, "로켓모터용 노즐재의 관대관 마찰용접과 AE평가에 관한 연구," 한국해양공학회지, Vol.13, No.2, pp.66~73, 1999
- 10) Oh, Sae-Kyoo, Hyung-Dong Park, Bae-Sup 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