

자동차 크랭크 軸用 鋼材의 棒對棒 同種材 摩擦熔接의 疲勞強度 特性 및 AE 評價

오 세 규* · 양 형 태** · 김 현 경**

(99년 4월 17일 접수)

Optimization of Bar-to-Bar Similar Friction Welding of Crank Shaft for Motor Vehicle and the Weld Fatigue Strength Properties and its AE Evaluation.

Sea-Kyoo Oh* · Hyung-Tae Yang** · Hun-Kyoung Kim**

Key Word : Acoustic Emission(AE, 음향방출), Friction Welding(FRW, 마찰용접), Heat Affected Zone(HAZ, 열영향부), Outside Diameter(O.D, 외경), Weld Interface(W.I, 용접경계면)

Abstract

Nowadays, the crank shaft for motor vehicle has become essential as the important component. The machining precision was asked for manufacturing the shaft. They could be unstable in the quality by the conventional arc welding.

Both in-process quality control and high reliability of the weld are the major concerns in applying friction welding to the economical and qualified mass-production. No reliable nondestructive monitoring method is available at present to determine the real-time evaluation of automatic production quality control for bar-to-bar friction welding of the crank shaft of O.D. 24mm for motor vehicle.

This paper, so that, presents the experimental examinations and statistical quantitative analysis of the correlation between the cumulative counts of acoustic emission(AE) during plastic deformation periods of the welding and the tensile strength and other properties of the bar-to-bar welded joints of O.D. 24mm shaft as well as the various welding variables, as a new approach which attempts finally to develop real-time quality monitoring system for friction welding, resulting in practical possibility of real-time quality control more than 100% joint efficiency showing good weld with no micro structural defects.

* 중신회원, 부경대학교 기계자동차공학부

** 정회원, 부경대학교 대학원

1. 서 론

기계 및 구조물의 제작에 있어서 그 방법의 선택은 생산 원가의 절감, 공정의 단축, 제작상의 성질, 작업의 난이도 등에 지대한 영향을 미치며, 산업현장에서의 이러한 문제들을 해결하기 위한 방안의 하나로 마찰용접을 들 수 있다.

마찰용접에 관한 연구는 많이 있지만, 자동차 크랭크축용 강재의 동종재(SM45C) 마찰용접의 최적화 기술이 용접계면의 이음효율 100%이상이 되고, 강도 및 피로를 고려한 것은 국내·외에서 아직 개발되어 있지 않다.

이들 재료의 마찰용접 중에 AE(acoustic emission, 음향방출)⁶⁻¹²⁾에 의해 용접품질에 대한 용접실시간 평가 기술에 관한 연구와, 실용상 중요하게 취급되어야 하는 피로강도(fatigue strength)의 관점과 병행한 피로시험에 관한 연구 보고는 많지 않다¹⁻⁵⁾.

따라서 본 연구는 자동차 크랭크축용 강재의 SM45C를 사용하여 외경 24mm로 봉대봉 동종재 마찰용접의 최적조건을 브레이크형 마찰용접기를 사용하여 실험적으로 구하였으며, 봉대봉 동종재 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 용접품질(피로수명, 인장강도)과 마찰용접 변수와의 상관관계의 실험적 도출과 마찰용접시 AE를 이용한 음향방출의 누적총량과 마찰용접변수, 용접품질(피로수명, 인장강도)과의 상관성을 도출하였다. 그리고 마찰용접부의 경도분포, 미세조직 및 피로파단면의 SEM 조사 등을 통하여 집합특성을 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 SM45C강의 화학조성과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

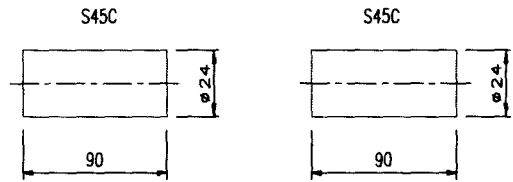
마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 마찰용접(friction welding, FRW)에 사용한 시험편의 형상과 치수 및 대표적 강도인 이음부의 인장강도, 피로강도의 시험에 사용한 시험편 형상 치수는 각각 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of SM45C (wt%)

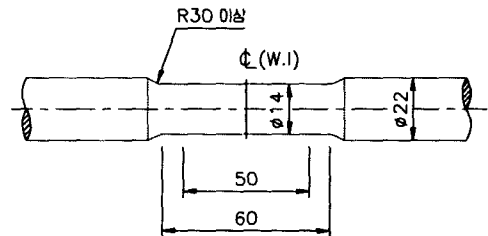
Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.44	0.19	0.72	0.018	0.012

Table 2 Mechanical properties of SM45C

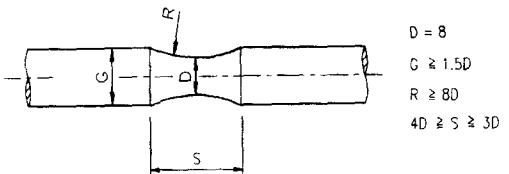
Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (H_v)
667	399	27.2	48.3	215



(a) Friction welding and AE test specimen of $\phi 24$ bar to bar



(b) Tension test specimen



(c) Fatigue test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

2.2 실험장치

봉대봉 마찰용접시험에 사용된 마찰용접기는 TO- HO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이고, AE 시험에 사용된 시험기는 PAC사의 AE testing system(Model LOCAN 320, 16 channel)이다. 모재 및 마찰용접재에 대한 피로시험에 사용된 시험기는 Instron사의 dynamic fatigue testing machine (Model 8501, 10ton)으로 하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 봉대봉 동종재 마찰용접시험

마찰용접의 최적화 실험을 위해서 우선 $\phi 24$ 봉대봉(bar-to-bar)마찰용접의 최적화를 시도하였다. 즉, 문헌¹⁻³⁾을 조사하여 회전수(n)를 결정 후, 가열압력(P_1)과 가압력(P_2)을 통하여 선정 후, 가압시간(t_2)을 선택한 후 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜 실험하였다. 이음부의 강도는 인장강도, 편진인장 피로수명 등을 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간(t_1)을 결정하였다.

한편, 시험 데이터의 스캐터를 고려해서 예비시험, FRW시험, AE시험 등에 있어서 동일한 조건에 대해 각각의 시험편을 사용하여 데이터의 평균을 구해 데이터 정리 및 회귀해석법으로써 실험식을 구하였다. 그리고, 마찰용접에서 얻어진 강도와 AE량과의 상관관계를 도출하였다.

2.3.2 봉대봉 동종재 마찰용접시의 AE시험

용접시간 중에 나타나는 AE발생거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료까지 검출된 AE 누적총량과 용접강도 및 피로수명과의 상관실험식을 비교분석하였다. 마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 센서(R15-500kHz sensor)를 TOHO TH-25 마찰용접기의 마찰접합부에서 310mm인 위치의 정지척(chuck)상에 부착하였고, acoustic couplant로써 센서를 고정시켰다. 이 때, AE에서의 신호를 받아들이기 위한 적절한 작동 파라미터들은 전치증폭기(preamplifier)에서 40dB, main gain은 20dB으로 설정하였고, 외부 소음을 제거하기 위하여 문턱값(threshold)은 45dB로

설정하여 AE시험을 수행하였다.

2.3.3 마찰용접부의 편진인장 피로시험

본 실험에서는 SM45C 모재에 대해 저주기 피로시험(low cycle fatigue test)을 수행하여 모재의 강도비 80%(6.52×10^4 cycle)일 때의 강도를 기준으로 가열시간을 변수로 하여 사인파(sine 波) 편진인장피로시험을 수행하였다.

이때의 진폭비는 $A = \sigma_a / \sigma_{max} = 1$ 로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자동차 크랭크축용 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접의 최적화

3.1.1 용접변수간의 상관성

Table 3 Friction welding condition for similar of $\phi 24$ bar to bar (SM45C)

Rotation n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Forging time t_2 (sec)
2,000	40	80	3	5
"	50	100	"	"
"	60	100	"	"
"	80	100	"	"
"	100	100	"	"
2,000	80	100	1~12	5

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 마찰단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 마찰단조가압시간(t_2) 등이며, 여기서는 마찰가열시간 t_1 (sec)을 여러 가지로 변화시켰다. Table 3은 $\phi 24$ 봉대봉 동종재 마찰용접조건을 나타낸 것이다.

우선 마찰용접부를 샌드페이퍼(#1000)로 연마가공을 한 후 Table 3의 용접조건과 같이 회전수(n) 2,000rpm, 가열시간(t_1) 3sec, 업셋시간(t_2)을 5sec로 일정하게 하고, 마찰가열압력을 40~100MPa, 업셋압력을 80~100MPa로 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다. 마찰가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2)과의 관계는 일반적으로 참고문헌¹⁻³⁾과 예비실험을 통

하여 결정하였으며 최적 P_1 , P_2 의 범위를 인장시험을 통해 구하고자 하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 OP_1Z (optimum P_1 zone)는 80MPa 이고, OP_2Z (optimum P_2 zone)는 100MPa 내외이며, 이때 인장강도는 약 675MPa 이었다.

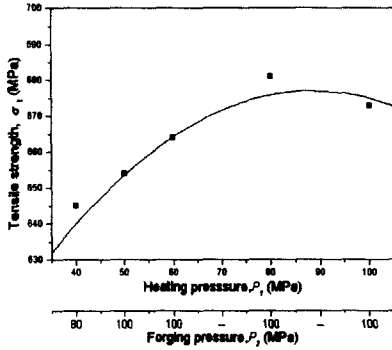


Fig. 2 σ_t vs. P_1 , P_2 in FRW of SM45C specimens

Fig. 3은 각각 봉대봉의 마찰용접을 한 경우로서 자동차 크랭크축을 제작하기 위해 $\phi 24$ 봉대봉과 마찰용접 최적화 비교실험을 위한 총 upset량 U_T 와 가열시간 t_t 과의 상관성을 나타낸다. 이 때 t_t-U_T 의 상관식은 다음과 같다.

$$U_T = 1.02t_t - 0.85, (R^2 = 0.98) \quad (1)$$

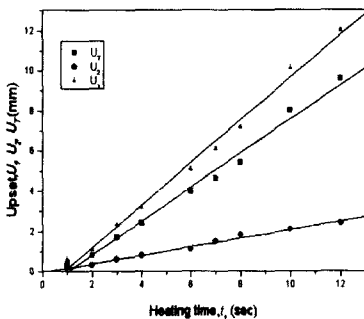


Fig. 3 Relation between the upset U_T and heating time t_t in bar to bar ($\phi 24$) of SM45C
Welding condition as shown in Table 3

Fig. 3은 봉대봉 마찰용접을 위해 마찰용접조건을 $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=100\text{MPa}$, $t_t=5\text{sec}$ 를 일정하게 하고 변수 t_t 를 각각 변화시켜서 마찰용접을 수행한 것이다. 여기서 보면, t_t 이 증가함에 따라 총 upset량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 3에서 U_T-t_t 의 정량적 상관관계는 마찰용접시의 시간조정법 또는 길이의 정밀성을 위한 upset 조정법 중 어느 것을 선택하는데 어려움 없이 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 이러한 결과는 종전의 결과와 흡사하다^{13, 15}.

3.1.2 용접변수와 용접품질(피로수명, 인장강도) 간의 상관관계

Fig. 4는 Table 3과 같은 조건에서 시간조정법으로 용접한 $\phi 24$ 봉대봉과 SM45C 동종재 마찰용접재의 인장강도 σ_t 와 가열시간 t_t 의 관계를 나타내고 있으며, S45C의 모재에 대한 피로시험을 통한 S-N 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 S-N 곡선에서 모재가 6.25×10^4 cycle일 때의 강도를 기준으로 가열시간을 변수로 한 용접재의 피로시험을 행하였다. 그리하여, 피로수명 N_f 와 가열시간 t_t 과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 Fig. 6에 도시한 것이다. 이 때, 인장시험편과 피로시험편은 Fig. 1과 같이 봉대봉은 CNC 선삭가공 후 연삭가공 하였다.

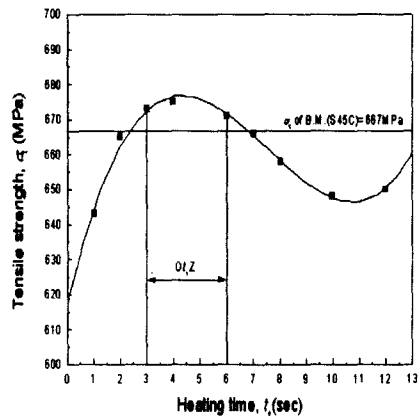


Fig. 4 σ_t vs t_t of bar to bar ($\phi 24$) similar FRW joints of SM45C
Welding condition : as shown in Table 3

그리고, Fig. 4에서 봉대봉의 Ot_iZ (optimum t_i zone)는 $t_i=3\sim 6\text{sec}$ 이며 이때의 인장강도는 $\sigma_f=671\sim 675\text{MPa}$ 을 나타내고 있다. σ_f 가 t_i 의 영향을 많이 받으며, 그 상관성이 정량적으로 해석된 것은 종전의 연구발표¹⁵⁾와 일치한다.

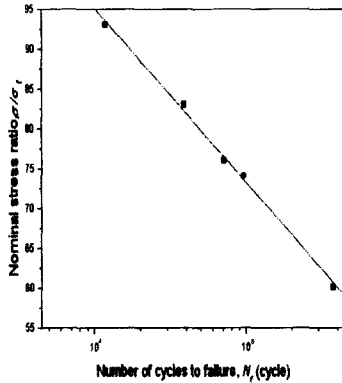


Fig. 5 Relation between fatigue cycle and nominal stress ratio of SM45C (B.M.)

Fig. 6는 마찰가열시간 $t_i(\text{sec})$ 과 피로수명 $N_f(\text{cycle})$ 의 관계를 보여준다. 이때의 피로수명은 Ot_iZ 에 의해 ON_fZ (optimum fatigue life zone)가 결정되어진다. 즉, 봉대봉의 $ON_fZ=7.25\times 10^4\sim 8.28\times 10^4$ cycle이다. 모두 모재의 $N_f(6.52\times 10^4\text{ cycle})$ 보다 훨씬 높으며, 즉 115%이다. 이는 Ot_iZ 가 피로수명을 고려했을 때도 매우 적합한 범위임을 의미한다.

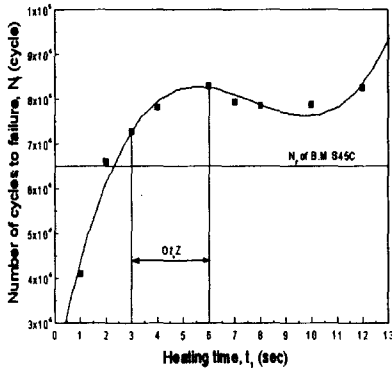


Fig. 6 N_f vs. t_i of bar to bar of SM45C welded joints. Welding condition : as shown in Table 3

3.1.3 마찰용접의 최적화

마찰용접의 최적화를 위해 일반적으로 용접이음부의 이음효율이 100% 이상이면 대체로 만족하다고 할 수 있으나 이것만으로는 부족하고 다소 문제점이 있을 수 있다. 따라서 이음강도(인장강도), 피로수명 등을 고려해야 한다.

SM45C 동종재 마찰용접재의 최적화를 위하여 가열시간 t_i 를 변수로 하여 인장강도와 인성이 우수한 t_i 의 범위를 정하였으며, 또한 피로수명(N_f)을 고려하여 가열시간(t_i)을 변수로 한 마찰용접 최적화를 구한 최적용접조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Optimum Welding condition for friction welding of bar to bar of SM45C

Material		SM45C
Diameter of FRW spec.		$\phi 24$
Optimum welding condition	$n(\text{rpm})$	2,000
	$P_1(\text{MPa})$	80
	$P_2(\text{MPa})$	100
	$t_i(\text{sec})$	5
	$Ot_iZ(\text{sec})$	3~6
Tensile strength of weld	$\sigma_f(\text{MPa})$	671~675
Fatigue life of weld	$ON_fZ(\text{cycle})$	$7.25\times 10^4\sim 8.28\times 10^4$

3.2 자동차 크랭크축용 강재의 봉대봉 마찰용접시의 AE 총량과 용접품질(피로수명, 인장강도)과의 상관성

3.2.1 용접변수와 AE총량의 상관성

Fig. 7은 Table 3과 같은 용접조건하에서 SM45C 시험편으로 마찰용접과 동시에 AE 시험을 수행한 결과를 나타내었다. $\phi 24$ 봉대봉 용접에서 Ot_iZ 가 3~6sec일 때, AE 누적총량은 $ONZ=32780\sim 41310$ counts이며, 또한 상관식을 최소자승법에 의해 다음과 같이 나타내었다.

$$N_c = 97.56t_i^3 - 2195.86t_i^2 + 16869.66t_i + 546 \quad (R^2=0.97) \quad (2)$$

3.2.2 AE총량과 용접품질(피로수명, 인장강도)과의 상관성

Fig. 8과 같이 Table 3의 용접조건 $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=100\text{MPa}$ 에서 Fig. 1과 같은 SM45C 시험편으로 $\phi 24$ 봉대봉의 동종재 마찰용접시 AE 시험을 수행한 결과 AE누적총량과 용접품질(강도)과의 상관관계를 실험적으로 구한 결과이다. 이 그림에서 총 누적AE량 ONZ가 32800~42500 counts이며 이때 인장강도는 671~675MPa로서 이음효율이 모재에 비해 100% 이상은 기대할 수 있었다. σ_t-N , N_f-N 의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_t = 1.84N^3 - 2.62N^2 + 0.01N + 538.4, (R^2=0.89) \quad (3)$$

$$N_f = 0.5588 \times 10^{-10}N^3 + 9.055 \times 10^{-5}N^2 + 4.754N - 8383, (R^2=0.94) \quad (4)$$

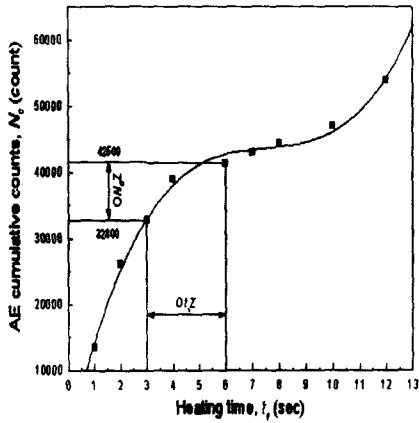


Fig. 7 Relation between AE cumulative counts and heating time of bar to bar similar FRW joints of SM45C
Welding condition : as shown in Table 3

용접시작에서 완료시까지의 N 량이 AE시험기에서 측정되는 즉시 PC를 통하여 입력된 식 (4)의 관계식으로부터 측정된 AE량 N 에 대한 인장강도 σ_t 가 계산되어, 그 용접재의 인장강도를 실시간에 알 수 있다. 다른 실험조건들에 대한 모든 기계적 성

질이 사전에 실험하여 입력되어 있으면 용접품질에 대한 정보도 즉시 알 수 있게 되어 AE에 의한 마찰용접 품질의 실시간 평가에 크게 기여되리라 기대된다. 마찰용접품질과 AE의 정량적 상관성은 다른 여러 이종재료의 관성마찰용접에서 확인된 연구발표¹³⁻¹⁸⁾와 매우 일치하므로 장래 이러한 신기술의 응용이 기대될 수 있다.

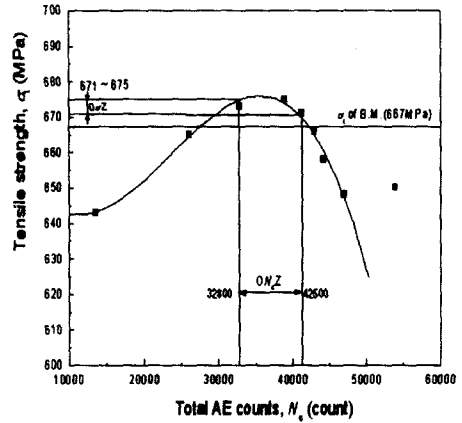


Fig. 8 σ_t vs. N of bar to bar friction welded joints of SM45C
Welding condition : as shown in Table 3

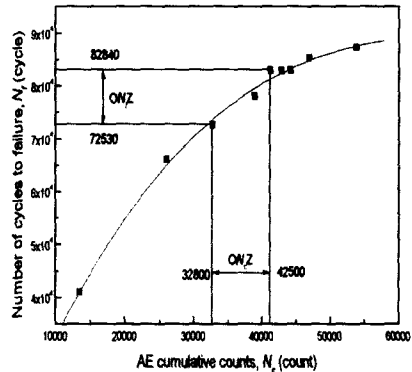


Fig. 9 N_f vs. N of bar to bar friction welded joints of SM45C
Welding condition : as shown in Table 3

3.2.3 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가에 관한 고찰

자동차 크랭크축의 제작에 있어서 가공공정 중 마찰용접의 품질보증은 매우 중요하다고 할 수 있다. 마찰용접부에서의 결합은 마접합 또는 균열로서 용접부 내부나 표면의 플래시 부분에 생긴다¹⁵⁾. 또한 균열은 모재 원형으로부터 플래시 발생초기의 형상 급변부에서 확인될 때가 있다^{15, 17, 18)}. 이러한 결합의 검출에는 타 용접부의 경우와 마찬가지로 초음파 탐상법 또는 침투탐상법이 사용된다. 그런데, 이러한 검사는 현재 실제의 생산에 있어서는 많이 수행되고 있지 않다. 마찰용접법이 생산에 도입된 초기에는 이 용접법의 본질이 불투명인 경우도 있어서 매우 확실한 방법에 의한 파괴시험과 QC공정을 통하여 용접제품의 발체에 의한 파괴시험과 비파괴시험을 반복해서 생산과 더불어 병행하였다. 따라서, 마찰용접기의 제어인자로서 회전수, 가열압(마찰추력), 가압력(업셋추력), 마찰가열시간, 가압시간 또는 가열업셋량, 가압업셋량 및 모재의 길이 등을 채택해서 압접과정 진행 중에 그러한 제어인자의 경과를 설정치와 비교하여 허용범위 내에 있는지를 감시하는 양식의 품질관리 장치가 가동되고 있고, 관리에 있어서는 작동유의 온도(가압력 및 브레이크의 작동기능 등에 영향을 줌)도 제어되고 있다. 그러나 소재재질, 소재치수오차 등으로 인해 용접설정조건이 맞지 않게 되어 결과적으로 제품에 오차가 올 수 있다.

그러므로 종래의 조건 감시적 품질관리 장치는 그대로 사용하면서 소재의 물성이나 형상치수 등의 오차로 인해 생기는 불의의 용접불량 또는 합격 보증을 제품의 강도와 인성의 품질을 공정 실시간에 검출 감시되고 보증할 수 있는 방법으로 연구개발되면 매우 유익할 것이다¹⁵⁻¹⁸⁾.

따라서, 용접실시간에 발생한 AE총량을 측정하므로써, 이 AE총량이 Fig. 8, Fig. 9와 식 (3), (4)에 의해 AE총량의 최적범위 ONZ에 속하는지 여부를 확인함으로써 마찰용접 강도면에서 이음효율이 100%이상 이 되고, 그인성도 만족할 만한 것임을 평가할 수 있는, AE에 의한 마찰용접품질의 실시간 평가 가능성이 본 연구의 자동차크랭크 축의 동종재 마찰용접 최적화와 그 품질평가에서 입증되었고, 앞으로 이의 응용 연구가 기대된다.

3.3 봉대봉 동종재 마찰용접부의 경도분포, 미시조직 및 피로파단면의 검사

3.3.1 용접부의 경도분포와 미시조직

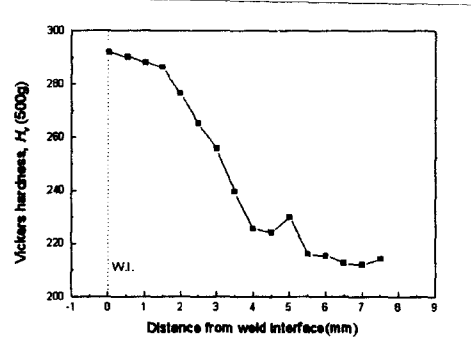


Fig. 10 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of SM45C bar to bar
Welding condition : $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=100\text{MPa}$, $t_1=5\text{sec}$, $t_2=5\text{sec}$

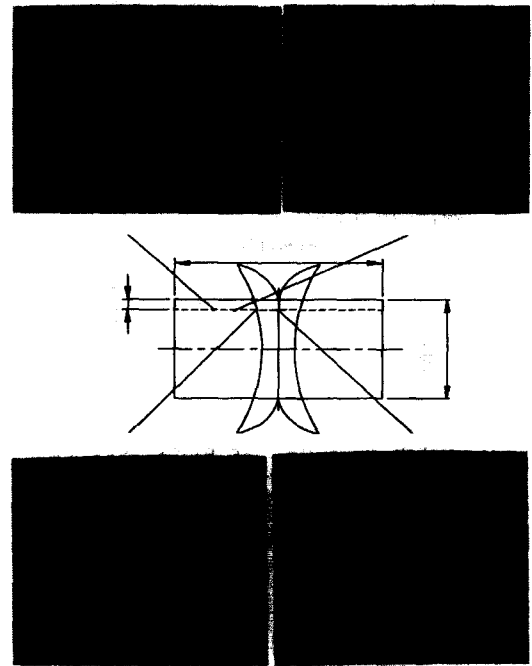


Fig. 11 Microstructure of S45C similar friction welded joint($\times 200$)

Welding condition : $n=2,000\text{rpm}$,
 $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=100\text{MPa}$, $t_1=5\text{ sec}$, $t_2=5\text{ sec}$

SM45C의 미소 비커스경도(Vickers hardness)를 0.5mm 간격으로 용접부에서부터 열영향부, 모재부까지 측정하였다. Fig. 10은 그 내용을 보여준다. 대부분의 재료의 경우 마찰용접계면을 중심으로 높은 경도가 나타나며 마찰용접면에서 멀어질수록 모재의 경도값과 근사하게 되고 있다.

마찰용접부의 열영향으로 인한 미시조직의 변화를 검사하기 위하여, 최적조건에서 용접된 S45C의 용접부를 종방향으로 표면에서 2.5mm를 평삭하고 polishing하여 용접계면부, 열영향부, 모재부를 200배 확대하여 그 미시조직을 Fig. 11에 나타내었다.

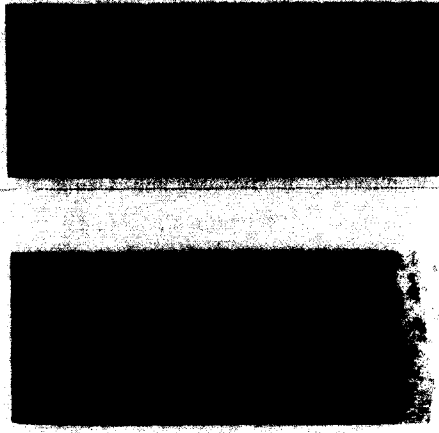


Fig. 11 Fractograph of fatigue fracture of friction welded joint of SM45C under optimum welding condition by SEM ($\times 400$, $\times 60$)

Welding condition : $n=2,000\text{rpm}$,
 $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=100\text{MPa}$, $t_1=5\text{ sec}$, $t_2=5\text{ sec}$

용접경계부의 조직은 다량의 C를 고용한 일부 미세한 마르텐사이트(martensite)와 트루스타이트(troostite)의 기지에 초석 페라이트가 보이는 백색 망목상 조직이다. 이는 마찰용접에 의하여 단조온도에 달한 후 모재부와 공기에 의한 냉각효과(유냉효과와 흡사함)¹⁾⁻³⁾에 의하여 오스테나이트 상태에서 냉각도중 A₃점에 달하여 오스테나이트의 입계

에 페라이트가 석출하기 시작하고, 또한 온도가 강하하여 페라이트는 망목상으로 석출하고 잔류오스테나이트 중의 고용 C를 남겨지며 이 상태에서 석출 페라이트는 그대로 급냉되고 오스테나이트는 일부 미세 마르텐사이트와 트루스타이트로 되기 때문이다.

열영향부는 미세한 트루스타이트 조직으로 되어 있고 모재부는 페라이트와 펄라이트의 혼합조직으로 되어 있다. 용접부의 어느곳에서도 용접결합이 발견되지 않았다.

3.3.2 용접부 피로파단면의 SEM 검사

최적조건에서 용접된 경우의 피로파단면의 SEM 사진을 Fig. 12에서 보여주고 있다. 이 그림은 연성 파괴의 흔적과 취성파괴의 양상을 보여주고있는 의사벽개 파단양상을 나타내고 있다.

4. 결 론

자동차 크랭크축용 강재 SM45C의 마찰용접기술과 AE평가법 개발을 위하여 자동차 크랭크축의 동종재 마찰용접 최적화와 AE평가에 관한 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 자동차 크랭크축용 강재의 SM45C 동종재 봉대봉마찰용접법 적용이 가능하였다.
- 2) 모든 시험편이 모재부에서 인장파단 및 피로파단이 되었고, 최적용접조건에서의 용접부 이음효율과 피로수명효율이 거의 100% 이상이었으며, 용접 강도, 인성, 피로수명을 고려한 최적용접조건은 $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=80\text{MPa}$, $P_2=100\text{MPa}$, $t_2=5\text{sec}$ 일 때, $t_1=3\sim 6\text{ sec}$ 로 구하여 졌다.
- 3) 용접실시간에 측정된 AE총량의 최적범위 ONZ에서 마찰용접 이음효율이 100% 이상인 용접품질(인장강도, 피로수명, 인성)을 얻을 수 있었다. 그러므로, 실제 마찰용접시 AE를 사용함으로써 실시간에 용접품질의 평가가 가능함을 알 수 있었다.
- 4) 봉대봉($\phi 24$)의 동종재 마찰용접 품질(인장강도, 피로강도)을 분석하였고 이에 따른 용접조건과 용접품질과의 상관실험식은

$$\sigma_t = 538.4 + 0.01N - 2.62N^2 + 1.84N^3$$

$$N_f = -8383. + 4.754N + 9.055 \times 10^{-5}N^2 + 0.5588 \times 10^{-10}N^3 \text{로 도출되었다.}$$

참고문헌

- 1) AWS, "Welding Handook", 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) Squie, I.F., "Thermal and Mechanical Characteristics of Friction Welding Mild Steel", British Welding Journal, Nov, pp.62 5-657, 1966
- 6) Kaiser, J., "Untersuchungen unber das Auftreten von Geraeuchen beim Zugversuch", Dr-Ing. Thesis, Technische Hochschule, Munich, 1950
- 7) ASFNT, "Nondestructive Test Handbook", 1987
- 8) Kolsky, H., "Stress Waves in Solids", 2nd edition, Dover, New Yord, ISDN 0-486-61098-5, 1963
- 9) Glennie, A.M.G. and J. Summerscales, "Acoustic Emission Source Location in Orthotropic Matereals, British Journal of NDT, January, 28(1), pp.17-22, 1986
- 10) Beattie, A.G., "Acoustic Emission Principles and Instrumentation", Journal of Acoustic Emission, Vol.2, No1/2, pp.95-98, 1983
- 11) Williams, R.V., "Acoustic Emission", Adam Hilger Ltd, pp.5-12, 1980
- 12) Arrington, M., "Acoustic Emission", Speedtronics Ltd, Huntingdon, pp.25-59, 1988
- 13) Oh, S.K. and K.K. Wang, "Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic in Friction Weld", J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp.22-33, 1983
- 14) Oh, S.K., K.K. Wang and G.R. Reif, "In-Process Quality Detection of Friction Welds using Acoustic Emission Techniques", Proc. of 63rd Annual American Welding Society Convention on Kansas, USA, Tech. Sess. 5, Apr, Welding Journal of AWS, Welding Research Supplement, Vol.61, No. 9, pp. 312-316, 1982
- 15) Oh, S.K., "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques", Ph.D Thesis, Graduate School, Keio Univ., Japan, pp.1-314, 1982
- 16) Oh, S.K., "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transaction of KSME, Vol.7, No.2, pp.226-236, 1983
- 17) 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한 기계학회지, 제 22권, 제 3호, pp.184-190, 202, 1982
- 18) Oh, S.K., "Friction Weld Strength Analysis by Acoustic Emission Techniques", J. of KSME, Vol.22, No.3, pp.184-190, 1982