

로켓모터용 노즐재의 관대관 마찰용접과 AE평가에 관한 연구

공 유 식* · 오 세 규** · 이 배 섭*
(99년 4월 17일 접수)

A Study on Tube-to-Tube Similar Friction Welding of Rocket Motor Nozzle Material and its AE Evaluation

Y. S. Kong* · S. K. Oh** · B. S. Lee*

Key words : Acoustic Emission(음향방출), Friction Welding(마찰용접), Weld Interface(용접경계면), Heat Affected Zone(열영향부), Number of Failure(피로파단수명)

Abstract

This paper 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 tube-to-tube welded joints of O.D. 30mm (I.D. 18 mm) nozzle steel. This is a new approach which attempts finally to develop real-time quality monitoring system for friction welding. And this study results in practical possibility of real-time quality control more than 100% joint efficiency showing good weld with no micro structural defects.

1. 서 론

경제가 고도성장함에 따라 공업총생산비 중 용접에 소요되는 비용(total welding cost)의 절감이 기업경쟁력 확보에 중요한 요소로 자리잡게 됨에 따라 용접의 효율성과 용접품질의 향상을 위해 용접공정 및 시공방법의 개선이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 마찰용접은 다른 용접보다 압접특성 및 경제성이 우수하므로 오늘날 각종 산업기계부품, 공작기계부품, 자동차부품, 항공기엔진부품 및

선박용부품 등 여러분야에서 이용되고 있다^{1~3)}.

본 연구에 사용된 로켓모터용 노즐의 제작에 있어서 경제성이나 기술품질적 우수성 때문에 연소실부와 노즐분출구간의 교축부 접합에 있어서 선진국에서는 TIG 용접이나 전자빔 용접 대신 마찰용접을 적용하는 실정이다. 그러므로 기대효과에서 로켓모터용 노즐은 사상형상에 가까운 단조품을 소재로 사용하는 것이 가능하게 된다면 재료절감을 할 수 있으며, 그 결과 가공시간을 대폭 단축시킬 수 있다. 또, 90개 이상의 생산으로 단조금형비를 포함

* 정회원, 부경대학교 대학원

** 종신회원, 부경대학교 기계자동차공학부

한 경제효과를 얻을 수 있다.

따라서 본 연구의 로켓모터용 노즐재로서 Cr-Mo강인 SCM435를 사용하여 외경 30mm(내경 18mm)으로 관대관 동종재 마찰용접의 최적조건을 브레이크형 마찰용접기를 사용하여 실험적으로 구하였다. 관대관 동종재 마찰용접의 최적화를 위해 이음부의 용접품질(피로수명, 인장강도)과 마찰용접 변수와의 상관성 관계를 실험적으로 도출하였다.

한편, 마찰용접시 비파괴검사법의 하나인 AE를 이용하여 음향방출의 누적총량과 마찰용접변수 및 용접품질과의 상관성을 도출하였다. 그리고 마찰용접부의 경도분포, 미시조직 및 피로파단면의 SEM 조사 등을 통하여 접합특성을 규명하고자 하였다.

그리하여 본 연구결과가 로켓모터용 노즐의 설계 및 제작을 위한 동종재 마찰용접의 최적화 기술개발과 마찰용접중 발생하는 AE에 의한 용접실시간에 마찰용접품질(강도, 인성)을 평가할 수 있는 기술개발에 기여할 중요한 자료가 되게 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 로켓 모터용 노즐에 사용되는 SCM435강으로서 강재가 가져야 할 내마모성과 인성 및 피로수명에 중점을 두었으며 국내 S사 제품이다. SCM435는 Cr-Mo강으로 Cr강에 Mo를 첨가함으로써 기계적 성질이 향상되며, 질량이 큰 부품에도 사용할 수 있고 그 사용용도가 대단히 넓다. 주된 용도는 일반기계, 자동차, 항공기 등의 축류, 치차류, 냉간단조품, 볼트류 등에 이용된다.

SCM435강의 화학조성과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of SCM435 (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
SCM435	0.34	0.26	0.73	0.20	0.13	1.00	0.17	0.20	0.12

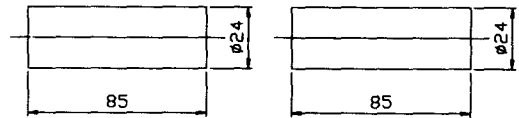
Table 2 Mechanical properties of SCM435

Material	Properties Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (H _v)

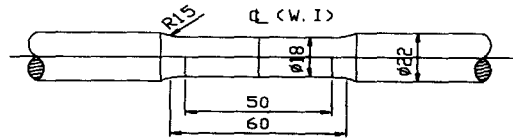
마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 마찰용접(friction welding, FRW)에 사용한 시험편의 형상과 치수 및 대표적 강도인 이음부의 인장강도, 피로강도의 시험에 사용한 시험편의 형상과 치수는 각각 Fig. 1, Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 1은 $\phi 24$ 관대관 동종재 마찰용접을 위한 시험편의 형상치수로서 (a)는 마찰용접 및 AE 시험편, (b)는 인장 시험편, (c)는 피로 시험편의 형상 및 치수를 보여준다.

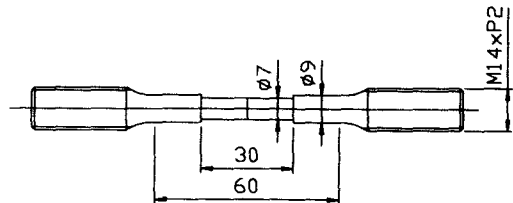
그리고, Fig. 2은 O.D. 30mm (I.D. 18mm) 관대관 동종재 마찰용접을 위한 시험편의 형상 및 치수로서 (a)는 마찰용접 및 AE 시험편, (b)는 인장 시험편, (c)는 피로 시험편의 형상 및 치수를 나타내었다.



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

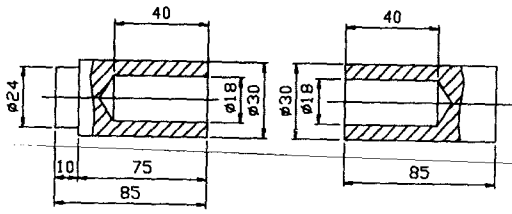


(b) Tension test specimen of $\phi 24$ bar-to-bar weld

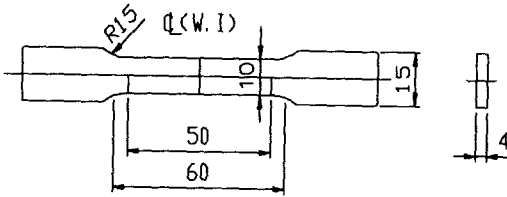


(c) Fatigue test specimen of $\phi 24$ bar-to-bar weld

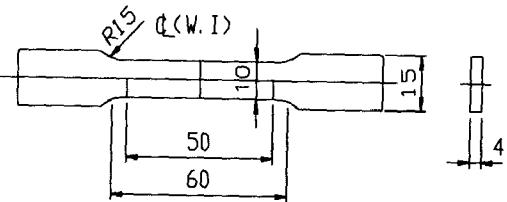
Fig. 1 Shape and dimension of test specimens



(a) Friction welding and AE test specimen of O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) tube-to-tube



(b) Tension test specimen of O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) tube-to-tube weld



(c) Fatigue test specimen of O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) tube-to-tube weld

Fig. 2 Shape and dimension of test specimens

2.2 실험장치

축대축 및 관대관 마찰용접시험에 사용된 마찰용접기는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이고, AE 시험에 사용된 시험기는 AE testing system(LOCAN AT, 4 channel)이다. 본 연구의 모재 및 마찰용접재에 대한 편진인장 피로시험에 사용된 Instron dynamic UTM(Model 8500, 20 ton)을 사용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 관대관 동중재 마찰용접 시험

마찰용접의 최적화 실험은 우선 O.D. 30mm

(I.D. 18mm) 관대관(tube-to-tube)마찰용접 최적 조건을 결정하기 위해 동일한 용접 단면적의 지름인 φ24 축대축(bar-to-bar) 용접의 최적화를 시도하여야 한다. 즉, 문헌¹⁻³⁾을 조사하여 회전수(n)를 결정 후 가열압력(P_1), 가압력(P_2)을 결정하고 여러번 시도 실험을 행하여 선정후, 가압시간(t_2)을 선택후 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜 실험한다. 이음부의 강도는 인장강도, 편진 인장 피로수명 등을 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간(t_1)을 결정 짓는다.

한편, 시험데이터의 스캐터를 고려해서 예비시험, FRW시험, AE시험등에 있어서 동일한 조건에 대해 각각의 시험편을 사용하여 데이터의 평균을 구해 데이터 정리 및 회귀해석법(regression analysis method)으로써 실험식을 구하였다. 그리고, 마찰용접에서 얻어진 강도와 AE량과의 상관관계를 도출하였다.

2.3.2 관대관 동중재 마찰용접시의 AE 시험

용접시간 사이중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료까지 검출된 AE 누적총량과 용접강도 및 피로수명과의 상관 실험식을 축대축과 관대관을 비교분석하였다. 마찰용접시에 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 센서(R50-C 500kHz sensor)를 TOHO TH-25 마찰용접기의 마찰접합부에서 310mm인 위치의 정지척에 부착하였고, acoustic couplant를 사용한후 센서를 고정시켰다. 이 때, AE에서의 신호를 받아들이기 위한 적절한 작동 파라미터들은 전치증폭기(preamplifier)에서 40dB, gain은 20dB으로 설정하였고, 외부 noise를 제거하기 위하여 threshold는 45dB로 설정하여 AE시험을 수행하였다.

2.3.3 마찰용접부의 편진인장 피로시험

본 실험에서는 SCM435 모재부의 인장강도와 공칭응력비(σ/σ_t)를 변화 시키면서 편진인장 피로시험을 하였다. 그리고 모재에 대해 저주기 피로시험(low cycle fatigue test)을 수행하여 공칭응력비가 85%일 때의 파단시까지의 피로수명이 2.55×10^5 cycle일 때의 강도를 기준으로 가열시간을 변수로 한 용접재의 피로시험을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 관대관 동종재 마찰용접의 최적화

3.1.1 용접변수간의 상관관계

본 실험에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수 (n), 마찰가열압력(P_1), 마찰단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 마찰단조가압시간(t_2) 등이며, 여기서 마찰가열시간 t_1 (sec)을 여러 가지로 변화시켰다.

Table 3은 $\phi 24$ 奉대奉 동종재 마찰용접조건과 O.D. 30 mm(I.D. 18 mm)의 관대관 동종재 마찰용접조건을 나타낸 것으로서 奉대奉과 관대관의 상관관계를 비교하기 위해 단면적($A=452.4 \text{ mm}^2$)을 동일하게 하였다.

Fig. 3은 奉대奉 및 관대관을 각각 마찰용접한 경우로서 로켓모터용 노즐을 제작하기 위해 $\phi 24$ 奉대奉과 O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) 관대관의 마찰용접 최적화 비교실험을 위한 총 upset량 U_T 와 가열시간 t_1 과의 상관성을 나타낸다. 이 때 t_1-U_T 의 상관식은 다음과 같다.

SCM435 bar-to-bar similar welds :

$$U_T = 1.001t_1 - 1.7 \quad (R^2=0.98) \quad (1)$$

SCM435 tube-to-tube similar welds :

$$U_T = 2.213t_1 + 2.8 \quad (R^2=0.98) \quad (2)$$

Table 3 Condition in the similar FRW of $\phi 24$ bar-to-bar and O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) tube-to-tube (SCM435)

Materials	Rotation n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Forging time t_2 (sec)
bar-to-bar	2,000	70	100	5~15	5
tube-to-tube	2,000	70	100	1~9	5

Fig. 3은 奉대奉 및 관대관의 마찰용접을 위해 마찰용접조건을 $n=2000 \text{ rpm}$, $P_1=70 \text{ MPa}$, $P_2=100 \text{ MPa}$, $t_2=5 \text{ sec}$ 를 일정하게 하고 변수 t_1 을 각각 변화시켜서 마찰용접을 수행한 것이다. 여기서 보면, t_1 이 증가함에 따라 총 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 奉대奉과 관대관에 대한 t_1 의 조건이 다른 이유는 용접재의 단면적은 같지만 외경의 치수에 따른 t_1 의 적정치가 다르기 때문

이다. 또한 실단면적이 동일조건으로 마찰용접되었지만, 관대관의 마찰용접의 upset량이 훨씬 많은 것을 그래프를 통해 알 수 있다. 따라서, 단면적이 같다고 할지라도 관대관의 용접재 외경($\phi 30$)이 奉대奉의 외경($\phi 24$)보다 더 크므로 원주부의 회전 선속도가 더욱 빠르게 되고, 회전력에 의한 마찰열 열량이 많기 때문이다.

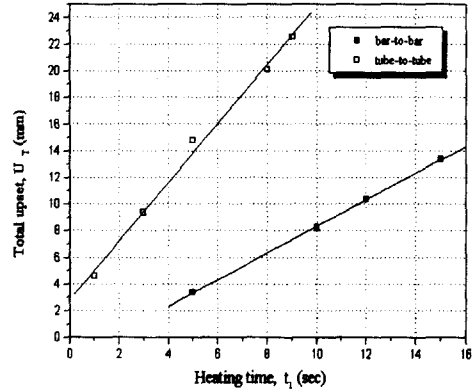


Fig. 3 Relation between the upset U_T and heating time t_1 in bar-to-bar($\phi 24$) and tube-to-tube (O.D.30mm×I.D.18mm) similar FRW of SCM435

Welding condition : as shown in Table 3

3.1.2 용접변수와 강도(피로수명, 인장강도)간의 상관관계

Fig. 4는 Table 3과 같은 조건에서 시간 조정법으로 용접한 $\phi 24$ 奉대奉과 O.D. 30mm (I.D. 18mm) 관대관 SCM435 동종재 마찰용접재의 인장강도 σ_t 와 가열시간 t_1 의 관계를 나타내고 있으며, SCM435 모재부의 인장강도와 최대피로 부가강도를 공칭용력비(σ/σ_t)로 두고 공칭용력비를 변화시키면서, 피로수명(N_f)을 편진인장 피로시험을 하여 구한 대표적 S-N 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 S-N 곡선에서 공칭용력비가 85%일 때의 파단시 까지의 피로수명이 $2.55 \times 10^5 \text{ cycle}$ 일 때의 강도를 기준으로 가열시간을 변수로 한 용접재의 피로시험을 행하였다. 그리하여, 피로수명 N_f 와 가열시간 t_1 과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 Fig. 6에 도시한 것이다. 가열시간 t_1 에 따라 σ_t-t_1 및 N_f-t_1

과의 상관관계식은 최소자승법을 이용하여 다음과 같이 도출되었다.

SCM435 bar-to-bar similar weld :

$$\sigma_t = 0.097t_1^3 - 3.253t_1^2 + 34.639t_1 + 367.7$$

$$(R^2=0.92) \quad (3)$$

$$N_f = 268.0024t_1^3 - 9119.84t_1^2 + 99119.88t_1 + 8897$$

$$(R^2=0.95) \quad (4)$$

SCM435 tube-to-tube similar weld :

$$\sigma_t = 0.261t_1^3 - 4.769t_1^2 + 26.183t_1 + 426.7$$

$$(R^2=0.93) \quad (5)$$

$$N_f = 614.184t_1^3 - 13024.727t_1^2 + 75489.76t_1 + 182475.8$$

$$(R^2=0.92) \quad (6)$$

그리고, Fig. 4에서 奉대奉의 $O_{t1}Z$ (optimum t_1 zone)는 $t_1=8\sim 11$ sec이며 이때의 인장강도 $\sigma_t=485\sim 489$ MPa를 나타내고 있다. 또한 관대관의 $O_{t1}Z$ 는 $t_1=3\sim 6$ sec이며 인장강도 $\sigma_t=467\sim 474$ MPa를 나타낸다.

Fig. 6은 마찰가열 시간 t_1 (sec)과 피로수명 N_f (cycle)의 관계를 보여준다. 이때의 피로수명은 $O_{t1}Z$ 에 의해 ON_fZ (optimum fatigue life zone)가 결정되어진다. 즉, 奉대奉의 $ON_fZ=3.3\times 10^5\sim 3.4\times 10^5$ cycle이고, 관대관은 $ON_fZ=3.0\times 10^5\sim 3.2\times 10^5$ cycle이다. 모두 모재의 $N_f(2.55\times 10^5$ cycle)보다 훨씬 높으며, 즉 각각 약 130%, 120%이다. 이는 각각의 $O_{t1}Z$ 가 피로수명을 고려했을 때도 매우 적합한 범위임을 의미한다.

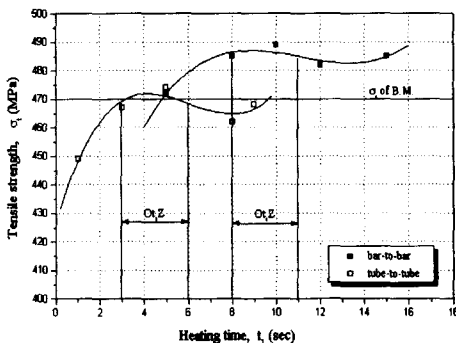


Fig. 4 σ_t Vs t_1 of bar-to-bar ($\phi 24$) and tube-to-tube(O.D. 30mm×I.D. 18mm) similar FRW joints of SCM435
 Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=7$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=1\sim 15$ sec, $t_2=5$ sec

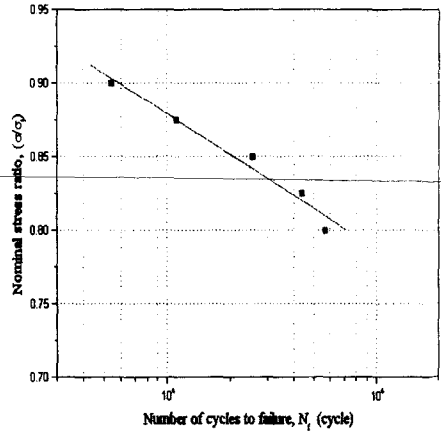


Fig. 5 Relation between fatigue cycle and nominal stress ratio of SCM435

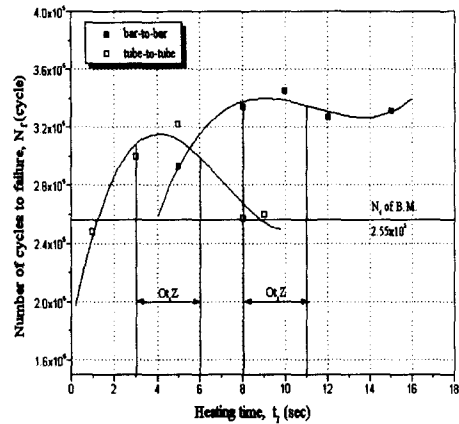


Fig. 6 N_f Vs t_1 of bar-to-bar ($\phi 24$) and tube-to-tube(O.D.30mm×I.D.18mm) similar FRW joints of SCM435
 Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=70$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=1\sim 15$ sec, $t_2=5$ sec

3.13 용접변수와 용접부 인성(흡수에너지, 연신률, 단면 수축률)과의 상관성

마찰용접의 최적화를 위하여 이음부의 강도와 인성(toughness)의 영향을 고려할 필요가 있다. Fig. 7은 SCM435강의 O.D. 30mm (I.D. 18mm) 동종재 관대관 마찰용접제의 단위면적당 인장흡수에너지 $E_a(N \cdot \text{mm}/\text{mm}^2)$, 단면수축률 δ (%), 연신율 ε (%)을 용접시간 t_1 과의 상관성을 실험적으로 구한 결과이며, 또한 상관식은 최소자승법에 의해 다음과 같이 계산되었다.

SCM435 tube-to-tube similar welds :

$$E_a = 0.085t_1^3 - 1.594t_1^2 + 8.679t_1 + 41.7 \quad (R^2=0.94) \quad (7)$$

$$\delta = 0.117t_1^3 - 2.028t_1^2 - 10.448t_1 + 42.3 \quad (R^2=0.90) \quad (8)$$

$$\varepsilon = 0.077t_1^3 - 1.214t_1^2 + 5.231t_1 + 19.8 \quad (R^2=0.97) \quad (9)$$

여기서, 적정 용접조건 O_tZ 는 $t_1=3\sim 6$ sec이며 단면수축률, 흡수에너지 및 연신률 등이 높으므로 인성면에서 문제가 없는 양호한 조건이라고 할 수 있다.

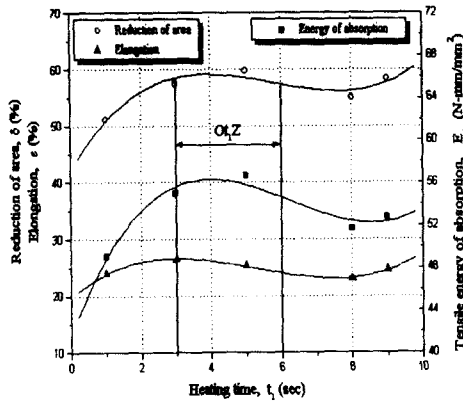


Fig. 7 E_a Vs t_1 , δ Vs t_1 and ε Vs t_1 of tube-to-tube(O.D. 30mm×I.D. 18mm) friction welded joints of SCM435
Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=70$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=1\sim 9$ sec, $t_2=5$ sec

3.2 管대管 摩擦용접시의 AE 총량과 용접품질 (피로수명, 인장강도)과의 상관성

3.2.1 용접조건과 AE와의 상관성

Fig. 8은 Table 3과 같은 용접조건하에서 SCM435 시험편으로 마찰용접과 동시에 AE 시험을 수행한 결과를 나타내었다. O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) 管대管 용접에서 O_tZ 가 3~6 sec일 때, AE 누적총량은 $ON_Z=34100\sim 40000$ counts이며, 또한 상관식을 최소자승법에 의해 다음과 같이 나타내었다.

$$N_c = 53.28t_1^3 - 10099.165t_1^2 + 8524.32t_1 + 16968 \quad (R^2=0.98) \quad (10)$$

3.2.2 용접부 강도, 인성과 AE와의 상관성

Fig. 9는 Table 3과 같은 용접조건하에서 Fig. 2와 같은 SCM435 시험편으로 O.D. 30 mm(I.D. 18 mm) 管대管의 동종재 마찰용접시 AE시험을 수행한 결과 AE 누적총량과 용접품질과의 상관관계를 실험적으로 구한 결과이다. 이 그림에서 총 누적AE량 ON_Z 가 34100~40000 counts이며 이때 σ_t-N_c 관계 실험식은 최소자승법에 의해 계산되어 다음과 같이 나타내었다.

$$\sigma_t = -1.489 \times 10^{-11} N_c^3 + 1.403 \times 10^{-6} N_c^2 - 0.042 N_c + 846 \quad (R^2=0.89) \quad (11)$$

$$N_f = -1.0459 \times 10^{-7} N_c^3 + 0.01 N_c^2 - 314.489 N_c + 3.429 \times 10^6 \quad (R^2=0.95) \quad (12)$$

용접시작에서 완료시까지의 N_c 량이 AE시험기에서 측정되는 즉시 PC를 통하여 입력된 식 (11)과 식 (12)의 관계식으로부터 측정된 AE량 N_c 에 대한 인장강도 σ_t 가 계산되어, 그 용접부의 인장강도를 실시간에 알 수 있다.

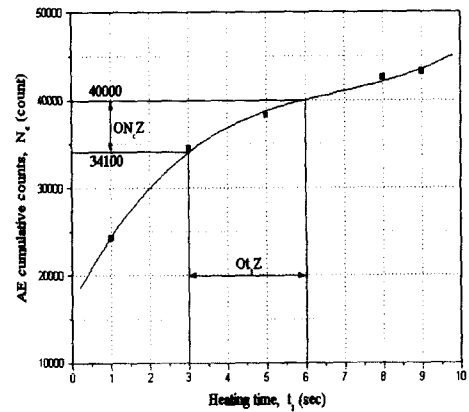


Fig. 8 Relation between AE cumulative counts and heating time of tube-to-tube similar FRW joints of SCM435 (O.D. 30mm×I.D. 18mm)

Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=70$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=1\sim 9$ sec, $t_2=5$ sec

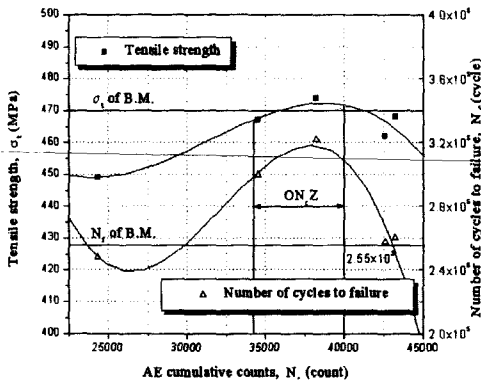


Fig. 9 σ_t Vs N_c and N_f Vs N_c of tube-to-tube(O.D. 30mm×I.D. 18mm) friction welded joints of SCM435
Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=70$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=1\sim 9$ sec, $t_2=5$ sec

3.3 管대管 동종재 마찰용접부의 경도분포 및 파단면 조사

3.3.1 용접부의 경도분포

SCM435의 미소 비커스경도를 0.5mm 간격으로 용접부에서 부터 열영향부, 모재부 근처까지 측정하였다. Fig. 10은 그 내용을 보여준다. 대부분의 재료의 경우 마찰용접면을 중심으로 열영향부에서 높은 경도가 나타나며 마찰용접면에서 멀어질수록 모재의 경도값과 근사하게 되고 있다.

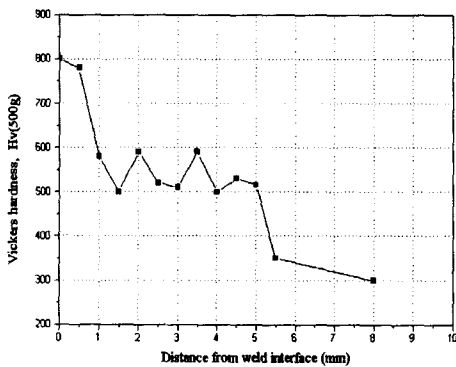


Fig. 10 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joints of SCM435 tube-to-tube
Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=70$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=5$ sec, $t_2=5$ sec

3.3.2 용접부 파단면의 SEM 조사

최적조건에서 용접된 경우의 피로파단면의 SEM사진을 Fig. 11에서 보여주고 있다. 이 그림은 연성파괴의 흔적과 취성파괴의 양상을 보여주고 있는 의사벽개 파단양상을 나타내고 있다.

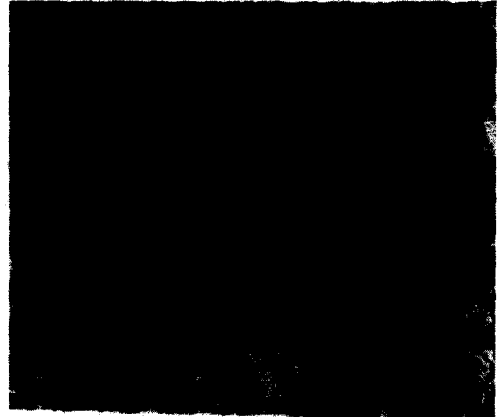


Fig. 11 Fractograph of fatigue fracture of friction welded joint of SCM435 under optimum welding condition by SEM(×200)
Welding condition : Same as those in Fig. 10

4. 결론

로켓 모터용 노즐재 SCM435의 마찰용접기술과 AE 평가법 개발을 위하여 로켓모터용 노즐의 동종재 마찰용접 최적화와 AE평가에 관한 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할수 있다.

- 1) 모든 시험편이 모재부에서 파단되었고, 최적 용접조건에서의 용접부 이음효율과 피로수명 효율이 거의 100% 이상이 되었으며, 용접강도, 인성, 피로수명을 고려한 최적용접조건은 다음과 같다.

奉대奉의 경우 :

$$n=2,000\text{rpm}, P_1=70\text{MPa}, P_2=100\text{MPa}, t_2=5\text{ sec일 때}, t_1=8\sim 11\text{ sec}$$

管대管의 경우 :

$$n=2,000\text{ rpm}, P_1=70\text{ MPa}, P_2=100\text{ MPa}, t_2=5, \text{ sec일 때}, t_1=3\sim 6\text{ sec}$$

- 2) 용접실시간에 측정된 AE총량의 최적범위

ON₂에서 마찰용접 이음효율이 100% 이상인 용접품질(인장강도, 피로수명, 인성)을 얻을 수 있었다. 그러므로, 실제 마찰용접시 AE를 사용함으로써 실시간에 용접품질의 평가가 가능함을 알 수 있었다.

- 3) 奉대奉(φ24)과 管대管(O.D. 30mm × I.D. 18mm)의 동종재 마찰용접 품질(인장강도, 피로강도)을 비교 분석하였고 각각의 용접조건과 용접품질과의 상관실험식을 도출하였다.

참고문헌

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) Squie, I.F., "Thermal and Mechanical Characteristics of Friction Welding Mild Steel", British Welding Journal, Nov, pp.625~657, 1966
6) 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
7) Oh, S. K., "Friction Weld Strength Analysis by Acoustic Emission Techniques", J. of KSME, Vol.22, No.3, pp.184~190, 1983