

해양차량 속업소버용 강재의 이중 마찰용접과 AE평가

이배섭* · 공유식** · 김선진**

*인천기능대학 컴퓨터응용기계과, **부경대학교 기계공학부

Dissimilar Friction Welding for Marine Shock Absorber Steels and its Evaluation by Acoustic Emission

BAE-SUB LEE*, YU-SIK KONG** AND SEON-JIN KIM**

*Department of Computer Aided Mechanics, Incheon Polytechnic College, Incheon, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Shock Absorber 완충기, Friction Welding (FRW) 마찰용접, Acoustic Emission (AE) 음향방출, Weld Interface 용접계면, Heat Affected Zone (HAZ) 열영향부

ABSTRACT: The shock absorbers for marine vehicles are very important components to absorbing the shock resulting from driving. Depending on the kinds of vehicles, these essential components, piston and piston rod, must be made of S25C, S45C, and SCM440, must be precisely machined, and assembled by the bolts. Other materials used have been difficult to weld, and could be unstable in quality, by the conventional arc welding. Also, they have been associated with a lot of technical problems in manufacturing. However, using the friction welding technique, such problems will be avoided. These factors have necessitated the domestic development of the marine shock absorber using a friction welding, as well as stimulating a new approach to the study of real-time weld quality evaluation by AE techniques.

1. 서 론

기계공업의 발달에 따라 용접분야에 있어서 용접에 소요되는 비용의 절감이 기업 경쟁력 확보에 중요한 요소로 자리잡게 되었다. 따라서 용접의 효율성과 용접품질의 향상을 위해 용접공정 및 시공방법의 개선이 필요하다. 특히 해저 및 항만의 해양차량부품, 전기기계, 기계부품 등의 분야에 사용되는 여러 강재들 중 많은 종류가 탄소당량이 높고 용접성이 좋지 않기 때문에 기존의 용접방법으로는 양호한 용접부 성능을 얻기 어렵다. 그러므로 본 연구에서 적용한 마찰용접(friction welding, FRW)은 이러한 기계 부품류의 고효율, 고강도, 저비용의 혁신적인 접합방식으로 주목받고 있다(일본마찰압접협회, 1984; AWS, 1991).

속업소버(shock absorber)는 해양차량이 주행 중 발생하는 각종 충격을 완화시켜 승차감 및 차체의 내구성을 향상시키고 접지성을 높여 조작성, 안정성을 높이는 역할을 하는 장치이다. 가장 보편적으로 많이 사용되는 것은 유압식 속업소버이며, 그 내부의 피스톤 및 피스톤 로드는 각종 하중을 상하, 좌우로 받기 때문에 강도가 높아야 하며, 내마모성이 우수하여야 한다. 그러나 이들 이중재료에 대한 마찰용접의 이음효율

100% 이상되는 적정 용접조건에 관한 연구는 많지 않으며, 특히 마찰용접 중에 실시간으로 음향방출(acoustic emission, AE)시험에 의해 이음효율 100% 이상의 이음강도를 확인하여 제품의 합격여부를 평가할 수 있는 연구 결과는 찾아보기 어렵다. 또한 용접완료 후 제품의 결함여부를 평가하는 초음파법은 현재 일부 부품에 국한해서 실용화되고 있으나, 용접 실시간에 측정하여 평가하는 것은 아니다.

따라서 본 연구에서는 차량 종류에 따라 다르지만 주로 속업소버에 사용되는 피스톤은 S45C와 피스톤 로드는 Cr-Mo강인 SCM440을 마찰용접을 이용해 성능이 양호한 접합부 강도를 얻음으로써 가공에 의한 공수 및 비용을 절감하고자 한다. 그리고 용접품질과 마찰용접 변수와의 상관관계를 실험적으로 도출하고, 두 이중재 마찰용접에 대하여 마찰용접 조건에 대한 용접품질의 변화를 검토하여 이음효율이 100% 이상인 용접조건을 적정 범위를 규명함으로써 마찰용접의 최적화를 규명하고자 한다(오세규 등, 1998). 또한 마찰용접시 최근 비파괴 시험의 하나로 주목받고 있는 AE시험을 병행하여 마찰용접시 발생하는 AE량을 측정하여, 이때 측정된 총 AE량(total AE count)과 마찰용접 변수 및 용접품질과의 상관성을 규명하였다(공유식 등, 1999). 그리하여 본 연구결과가 해양차량용 속업소버 강재의 설계제작을 위한 이중재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 실시간에 마찰용접 품질을 평가할 수 있는 기초 자료가 되게 하였다.

제1저자 공유식 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-620-1608 kongys@mail1.pknu.ac.kr

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 해양차량용 속업소비용의 피스톤 및 피스톤 로드에서 사용되는 S45C와 SCM440 강재에 대한 강도와 인성, 내마모성에 중점을 두었으며, 국내 D사의 제품이다. S45C는 기계구조용 탄소강재로 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, SCM440은 Cr-Mo강재로 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하며, 주된 용도는 해양 일반기계, 해양차량, 항공기 등의 축류, 치차류, 냉간단조품, 볼트류 등에 이용된다. 본 연구에 사용된 S45C와 SCM440의 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타낸다.

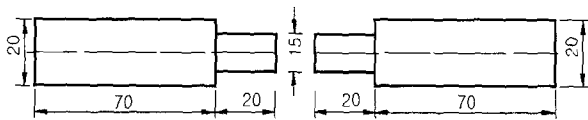
마찰용접을 하기 위한 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1(a)와 같이 가공하여 실험을 수행하였고, 동시에 AE실험을 수행하였다. Fig. 1(b)는 용접된 시험편의 인장강도를 알기 위한 시험편으로서 KS규격(B 0801)에 따라 선삭 후 연삭가공 하였다.

Table 1 Chemical composition of materials (wt.%)

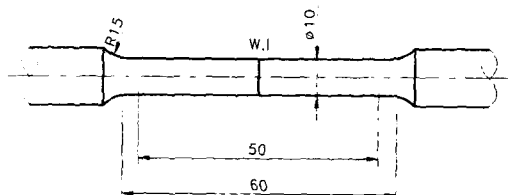
Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440	0.44	0.22	0.77	0.01	0.013	9.5	0.15
S45C	0.40	0.20	0.70	0.018	0.02	0.15	0.19

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Reduction of area Ψ (%)	Hardness Hv	Elongation ϵ (%)
SCM440	908	34.4	310	18
S45C	637	35.2	212	22



(a) Friction welding and AE test workpiece



(b) Tension test specimen

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

2.2 실험방법

마찰용접 시험에 사용된 마찰용접기는 TOHO TH-25 연속 구동 브레이크형(continuous drive brake type)이고, AE 시험에 사용된 시험기는 AE Testing System (LOCAN 320, 4 channel)이며, 용접계면과 AE 센서와의 거리는 170 mm, Gain 40 dB, threshold 40 dB이며, 센서는 R15를 사용하였다. 그리고 이음부의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (UTM 25T)로서, 인장속도는 2 mm/min으로 행하였다. 경도 시험은 마이크로 비이커스 경도시험기(MVK-H1)를 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g/10초의 1(mm) 등간격으로 측정하였다.

마찰용접의 적정조건을 규명하기 위하여, $\phi 15$ (mm)의 봉대봉(bar-to-bar) 마찰용접 적정조건에 관련된 타 문헌(오세규 등, 1998; 공유식 등, 1999; 오세규 등, 2000)을 조사하였다. 먼저 회전수 n 을 결정한 후 가열압력 P_1 과 업셋압력 P_2 를 결정하고, 압력변화에 따른 실험을 반복하여 P_1 , P_2 를 선정한 후, 업셋시간 t_2 를 선택한 후 가열시간 t_1 을 다양하게 변화시켜 실험한다. 이음부의 강도는 인장강도, 인장흡수에너지, 연신율과 단면수축율 등을 규명하여 용접재의 강도와 인성이 모재에 비해 우수한 범위를 선정하여 최적 가열시간 t_1 을 결정하였다. 또한 SCM440 시험편은 회전부 유압축에 고정하고, S45C 시험편은 정지척에 고정하여 마찰용접 시험을 수행하였다. 그리고 마찰용접 중에 발생하는 AE 거동을 해석하기 위해서 마찰용접 시작부터 완료까지 검출된 AE 누적총량과 용접강도와의 상관성을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰용접변수와 용접품질간의 상관성

본 실험에 사용된 마찰용접의 변수는 회전수 n , 마찰 가열압력 P_1 , 업셋압력 P_2 , 마찰가열시간 t_1 , 업셋시간 t_2 등이며, 이중재의 마찰용접 적정 가열압력 P_1 과 업셋압력 P_2 를 결정하기 위하여 타 문헌(오세규 등, 1998; 공유식 등, 1999; 오세규 등, 2000)과 실험데이터를 참고하여 가열시간 t_1 과 업셋시간 t_2 를 각각 4 sec, 5 sec로 고정하고, Table 3의 Case 1과 같이 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 시행하였다.

Fig. 2는 P_1 , P_2 를 결정하기 위하여 회전수 n , 가열시간 t_1 , 업셋시간 t_2 를 고정하고 마찰용접을 시행하여 인장시험의 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 용접재의 인장강도가 S45C 모재의 인장강도 637 MPa에 비해 높게 나타났으며, 이들 결과에서 P_1 , P_2 가 각각 60, 100 MPa에서 가장 높은 인장강도 652 MPa가 나타났다. 따라서 1단계 압력변화의 적정조건은 P_1 과 P_2 를 각각 60, 100 MPa로 결정하였다.

Table 3 Various conditions of dissimilar friction welding of SCM440 to S45C

Case	Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Upsetting pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Upsetting time t_2 (sec)
1	2,000	30	40	4	5
		40	60		
		50	80		
		60	100		
		80	120		
2	2,000	60	100	1~7	5

Fig. 3은 앞선 실험에서 구한 최적의 P_1 , P_2 와 업셋시간 t_2 (sec)를 일정하게 한 상태에서 마찰가열시간 t_1 (sec)을 여러 가지로 변화시켜서 S45C와 SCM440의 봉 대 봉 마찰용접에서 총업셋량 U_T (mm)와 마찰가열시간 t_1 (sec)과의 상관성을 나타낸 그림이다. 즉, 마찰용접조건은 $n=2000$ rpm, $P_1=60$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_2=5$ sec를 일정하게 하고, 가열시간 t_1 을 변화시켜서 마찰용접을 수행하였으며, 그래프에서 나타난 바와 같이 마찰가열시간 t_1 이 증가할수록 총 업셋량 U_T 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이때 t_1-U_T 의 상관 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$U_T = 1.36 t_1 + 1.1 \quad (1)$$

그래프에서 알 수 있듯이 총업셋량 U_T 와 마찰가열시간 t_1 의 상관관계는 마찰가열시간이 증가할수록 총 업셋량 U_T 가 선형적으로 증가함에 따라 Fig. 4에서 구한 적정 가열시간 $t_1=3\sim5$ sec(O_tZ)에 대한 U_1 , U_2 , U_T 를 구할 수 있다. 이는 마찰용접을 시간조정법 대신에 업셋조정법으로도 활용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 3과 같은 조건에서 시간조정법으로 용접한 SCM440과 S45C 이종재 마찰용접제의 인장강도 σ_t MPa와 마찰가열시간 t_1 (sec)과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타낸다. 이때의 인장 시험편은 Fig. 1(b)에서와 같이 봉 대 봉 용접제의 종방향으로 마찰용접 계면을 기준으로 가공하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 이음효율은 100% 이상이고, SCM440 모재보다 인장강도가 높은 적정한 t_1 의 범위 O_tZ (optimum t_1 zone)는 3~5 sec이며, 이때의 인장강도는 653~658 MPa이고, 총업셋량은 5.2~7.9 mm로 나타났으며, 파단은 S45C측 모재부에서 연성파단 되었다. 그리고 실험결과를 최소자승법을 이용한 회귀 해석법으로 구한 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = -4.38t_1^2 + 36.69t_1 + 582 \quad (2)$$

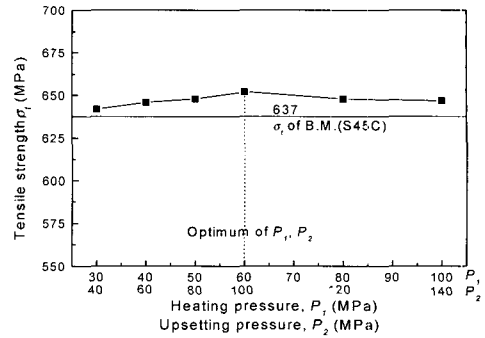


Fig. 2 σ_t vs. P_1 , P_2 in dissimilar friction welding of SCM440 to S45C

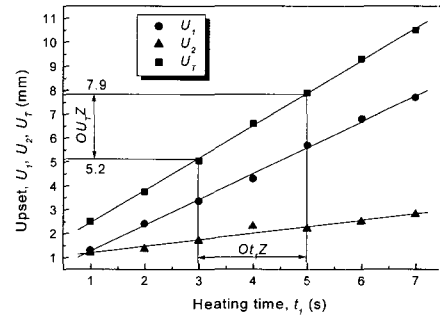


Fig. 3 U_1 , U_2 , U_T vs. t_1 in dissimilar FRW of SCM440 to S45C

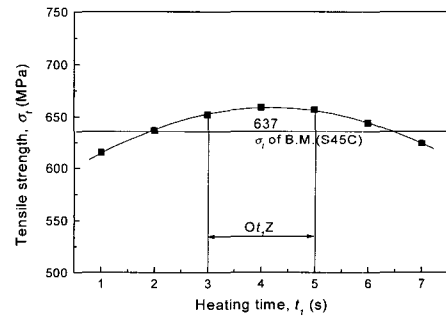


Fig. 4 σ_t vs. t_1 in dissimilar FRW of SCM440 to S45C

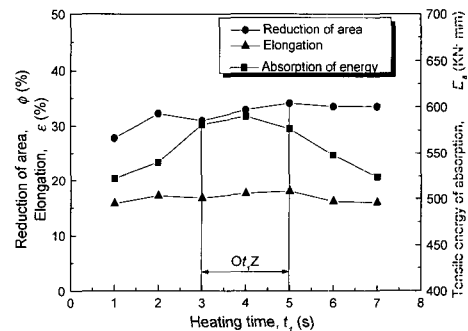


Fig. 5 E_a , ψ , ϵ vs. t_1 in dissimilar friction welding of SCM440 to S45C

SCM440과 S45C의 이중재 마찰용접 적정조건을 위하여 마찰가열시간을 변수로 하여 실험한 결과 이음부의 인장강도가 우수한 t_1 의 범위를 구할 수 있었다. 따라서 본 실험에서 구한 $OptZ$ (optimum t_1 zone)는 3~5 sec이며, 이보다 t_1 이 낮거나 너무 높으면 인장강도가 낮아지며, 또한 이음효율이 양호하지 않게 된다.

따라서 Fig. 5는 Fig. 4와 마찬가지로 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 흡수에너지, 단면수축률, 연신율과의 상관 관계를 나타낸 그림이다. 실제 마찰용접의 최적화를 위해서는 이음부의 강도뿐만 아니라 인성 (인장흡수에너지, 단면수축률, 연신율)의 영향을 고려할 필요가 있다. 본 그림에서 나타낸 바와 같이 앞에서 용접부의 인장강도로서 구한 $OptZ$ 에서의 Ψ , ϵ 및 Ea 를 고려해 볼 때 크게 염려될 만큼 낮지 않으므로 $OptZ=3\sim 5$ sec는 인성면에서 모두 우수한 범위임을 알 수 있다. 이는 t_1 이 3~5 sec에서는 Ψ , ϵ 이 t_1 의 다른 범위에 비해 낮지 않고 유사하며, 특히 Ea 는 가장 높은 구간에 속하기 때문이다.

3.2 마찰용접변수와 AE총량과의 상관성

일반적으로 마찰가열시간 t_1 의 증가에 따라 마찰용접부의 소성변형이 계속해서 크게 일어나기 때문에 AE량(N)도 증가한다. Fig. 6은 Table 3과 같은 용접조건에서의 마찰용접 중 AE시험을 수행한 결과이며, 이때 t_1 의 증가와 더불어 N도 증가하는 양상을 보이고 있다. 하지만 $t_1=6$ sec 이상일 때는 AE량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 가열시간의 증가에 따른 인장강도의 저하 요인과 상관성이 있는 것으로 사료된다. Fig. 6에서 $OptZ=3\sim 5$ sec의 AE총량(N)은 89700~123600 (counts)으로 확인되었다. 이때의 AE총량 N (counts)과 t_1 (sec)사이의 N- t_1 관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

$$N = 3761t_1^2 + 48434.3t_1 - 24062 \quad (3)$$

Fig. 7은 Table 3과 같은 용접조건으로 마찰용접할 때 용접강도와 AE 총량과의 상관관계를 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 이음효율 100%이상 되는 범위의 높은 인장강도 653~658 MPa를 구할 수 있는 $OptZ$ 에 해당하는 N의 범위 ONZ (optimum N zone)는 89700~123600 counts이다. 여기서 인장강도와 AE 누적카운터량과의 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = 4.68 \times 10^{-9} N^2 + 0.0014N + 588 \quad (4)$$

이상에서 마찰용접시 측정된 AE count가 ONZ 사이에 있을 때, 마찰용접 이음부의 인장강도가 100%이상 되는 이음 효율임을 알 수 있다. 이는 마찰용접 실시간에 AE량의 측정만으로 용접부 강도의 최적 여부를 비파괴적으로 평가 할 수 있음을 뜻하며, 식 (4)와 같이 이를 정량적

으로 구할 수 있음을 의미한다. 이와 같이 σ_t 와 N이 정량적 상관성은 타 문헌(오세규 등, 1995; Oh et al, 2000)의 연구 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

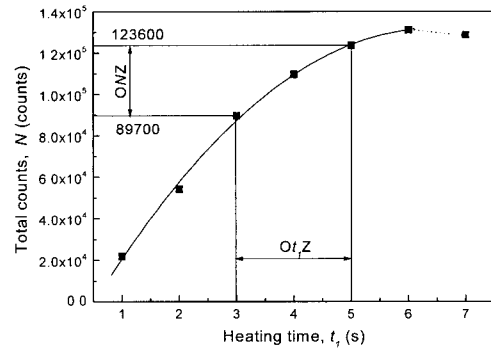


Fig. 6 N vs. t_1 in dissimilar friction welding of SCM440 to S45C

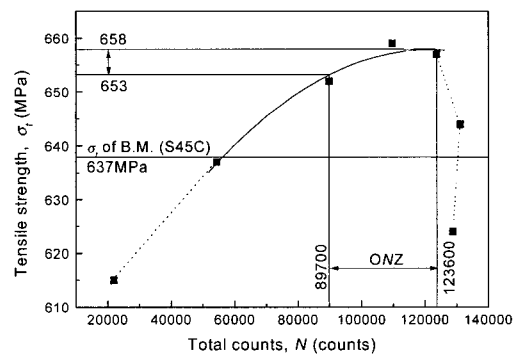


Fig. 7 σ_t vs. N in dissimilar friction welding of SCM440 to S45C

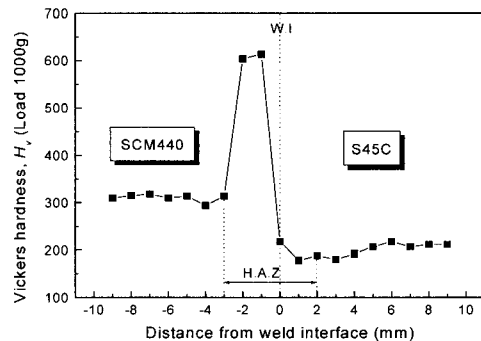


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of friction welded joint : welding condition : $n=2,000$ rpm, $P_1=60$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=4$ sec, $t_2=5$ sec

3.3 마찰용접부의 경도분포

Fig. 8은 적정 마찰용접 조건에서 마찰용접한 시험편의 경도분포를 나타낸다. 그래프를 보면, 모재의 경도는 SCM440이 Hv 310으로 S45C의 Hv 212보다 조금 높은편이며, 이들 재료의 마찰용접 경계면의 경도는 Hv 218로서 비교적 낮은 편이었다. 그리고 SCM440의 용접경계면(weld interface)에서 최고의 경도값 Hv 605를 나타내고 있다. 그 이유는 용접경계면 부근에서 마찰용접시 국부 가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료된다(조현수와 서성재, 1997). 이러한 경도의 크(peak)는 후열처리(post weld heat treatment)로써 완화시킬 수 있다고 생각되며, 추가 실험에서 후열처리를 시행하여 경도분포를 조사할 필요가 있다. 여기서 SCM440의 열영향부(HAZ, heat affected zone)는 마찰용접 경계면에서 약 3 mm이고, S45C는 약 2 mm로 확인되었다.

4. 결 론

해양차량용 속업소버의 피스톤 및 피스톤 로드에서 사용되는 SCM440과 S45C의 봉 대 봉 이중재 마찰용접을 시행하여, 마찰용접의 적정 조건과 AE발생량이 용접품질에 미치는 상관관계에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) SCM440과 S45C의 마찰용접 이음부 강도가 모재에 비해 양호한 이중재 접합이 가능하게 되어, 재료의 기계가공에 따른 공수, 비용 및 재료의 절감이 가능하게 되었다.
- (2) 모든 시험편이 S45C측 모재부에서 인장파단 되었고, 적정 용접조건에서 용접부의 이음효율이 거의 100% 이상이 되었으며, 강도 및 인성면을 고려한 적정 마찰용접조건은 $n=2,000$ rpm, $P_1=60$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_1=3\sim 5$ sec, $t_2=5$ sec 이다
- (3) 봉 대 봉의 이중재 마찰용접 품질(인장강도, 인성)을 분석하였고, 이에 따른 가열시간과 인장강도와의 상관관계 실험식은 $\sigma_t=4.38t_1^2+36.69t_1+582$ 로 도출되었다.

(4) 용접실시간에 AE총량을 측정하였을 때, 용접품질이 양호한 적정조건에서의 AE총량 범위(ONZ)는 89700~123600 counts로 나타났다. 그리고 AE총량과 마찰용접부의 인장강도 간의 상관관계가 확인되어, 용접실시간 AE총량의 측정만으로 용접재의 인장강도를 비파괴적으로 평가가 가능하며, 그 실험식은 $\sigma_t=-4.68\times 10^{-9}N^2+0.0014N+588$ 로 도출되었다.

참 고 문 헌

- 공유식, 오세규, 이배섭(1999). "로켓모터용 노즐재의 관대관 마찰용접과 AE평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제2호, pp 66-73.
- 오세규, 공유식, 박일동, 유인중(2000). "열간금형재의 마찰용접 최적화와 AE평가", 한국동력기계공학회지, 제4권, 제4호, pp 54-58.
- 오세규, 양형태, 박형동(1998). "자동차 브레이크용 강재의 이중재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가", 한국해양공학회지, 제12권, 제4호, pp 60-69.
- 오세규, 장홍근, 장지훈(1995). "Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴검사학회지, 제15권, 제4호, pp 511-519.
- 일본마찰압접협회(1984). "마찰압접협회20년지", pp1-106.
- 조현수, 서성재(1997). "Inconel 713C와 SCM440의 마찰용접", 대한용접학회지, 제15권, 제6호, pp 78-84.
- AWS (1991). Welding Handbook, Vol 2, pp 672-763.
- Oh, S.K., Kong, Y.S., Yoo, I.J. and Kim, I.S.(2000). "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.

2004년 1월 26일 원고 접수

2005년 1월 24일 최종 수정본 채택