

자동 리프팅 마그넷 유도코아자력절연부의 이종재 아크용접의 최적화

오 세 규* · 김 일 석** · 권 상 우*** · 이 학 준***
(99년 4월 17일 접수)

A Study on Development of Dissimilar Welding Optimization Technique for Auto-Lifting Magnet

Sae Kyoo Oh* · Il Seok Kim** · Sang Woo Kwon*** · Hack Jun Lee***

Key Word : Shielded Metal Arc Welding(SMAW)(피복아크용접), Tensile Strength(인장강도), Toughness(인성), Joint Efficiency(이음효율), Heat Input(입열량), Fatigue Life(피로파단수명), Optimization(최적화)

Abstract

In this paper an experimental study on the development of the shielded metal arc welding(SMAW) optimization technique for the dissimilar materials SS41 and STS304 of Auto-Lifting Magnet core plate was carried out. It was confirmed that the optimum welding heat input range was 37.5 to 45 kJ/cm by considering on the strength and fatigue life of the welded joints more than 100% joint efficiency. And the quantitative relationship empirical equation between the strength toughness and fatigue life and the weld heat input was obtained.

1. 서 론

오늘날 철강 기계 공업의 급진적 발달로 인하여 국내의 조선·해양분야, 철강 생산 및 기계제조분야와 해양구조물의 강재 및 부품생산·조립·운반의 경우 수 톤(ton)에서 수십 톤에 이르는 대중량급의 대·소형 철강자재나 완제품의 신속하고 안

전한 운반·이동이 필수적이다. 이때, 많은 인력으로 행하고 있는 철재류의 운반·이동의 현행 작업 환경을 개선할 필요가 있고, 철기계류운반 작업의 비능률과 안전 사고 및 인명·재산피해로부터 벗어나 작업자 보호를 위한 만전의 대책이 필요하다. 이를 해결하기 위하여 자동식 리프팅 마그넷 개발이 필요하다.

* 중신회원, 부경대학교 기계·자동차공학부

** 정회원, 안성여자대학교

*** 정회원, 부경대학교 대학원

개발되는 본 제품 영구자석자동흡착기의 마그넷의 몸체인 유도코어는 피흡착물을 흡착시키는 면의 역할과 동시에 좌우 N, S극을 중앙에서 자기력절연(자력선 차단)하는 역할을 하여야 한다. 그러므로 자성체인 유도코어판(core plate)(SS41, 19t, 35t)의 사이에 비자성체인 STS304 강봉(φ19, φ35)을 놓고 피복아크용접(용접길이 160mm)을 하여야 한다. 이러한 유도코어 자력절연부의 이중재용접부는 자기절연성이 100%확보되어야 하며, 중하중물의 탈착과 흡착, 운반 등의 피로하중 및 고하중과 충격하중등이 작용하므로 강도(인장, 피로)와 인성(인장흡수에너지, 단면수축률, 연신률, 충격치)이 모재부 보다 우수해야하는 조건이 요구된다. 그러나 이에 관한 연구는 아직 없다.

따라서 본 연구에서는 자동리프팅마그넷의 유도자력절연부 이중재용접의 최적화기술을 연구개발코져 한다.

2. 시험편 및 실험방법

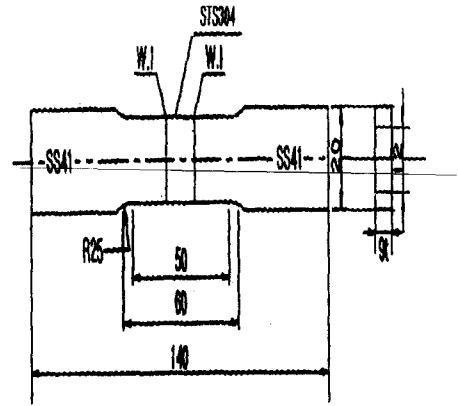
2.1 재료 및 시험편

시험에 사용된 재료는 유도코어판으로 사용되는 자성체인 열간압연 강판S S41평판과 자력차단용으로 사용되는 비자성체인 STS304 오스테나이트 스테인리스강봉(φ 19)이며, 그 화학조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다.

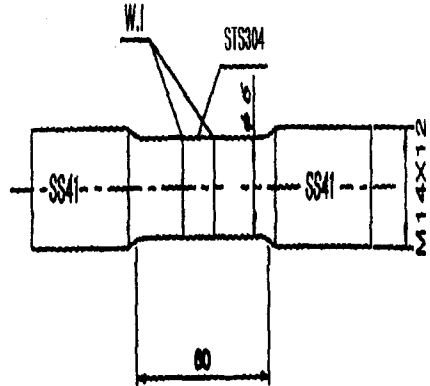
Fig. 1(a)는 모재와 용접재의 강도(인장강도)와 인성(인장흡수에너지, 연신률, 단면수축률)을 알기 위한 인장시험편을 나타내며, Fig. 1(b)는 용접재의 편진인장 피로시험을 모재의 경우와 비교하기 위한 편진 인장피로시험편의 형상과 치수를 나타낸다. 시험편은 용접선에 직각방향으로 채취하였다.

Table 1 Chemical composition (wt.%) and mechanical properties of materials

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Tensile stress (MPa)	Proof stress (MPa)
SS41	0.25	-	1.30	< 0.050	< 0.050	-	-	470	250
STS304	0.08	1.00	2.00	< 0.045	< 0.030	9.02	19.0	530	210



(a) Tension test specimen



(b) Fatigue test specimen

Fig. 1 Tension test and fatigue test specimens of base metals and weldments of SS41 steel to STS304 steel (W.I : weld interface)

2.2 실험방법

SS41강판과 STS304강봉과 SS41강판을 4개의 용접선에 따라 코어판 이중재의 단층 피복 아크용접(shielded metal arc welding) (SMAW)을 실시하며, 이때 사용된 용접봉은 AWS E308-16(φ 3.2 × 300mm)이며, 실험에 사용된 용접조건은 Table 2와 같다.

Table 2 SMAW conditions for core dissimilar materials

(SS41-ST304) (Electrode : AWS E308-16, ϕ 3.2)

spec. NO.	Welding vol. E (V)	Welding current I (A)	Welding speed V (cm/min)	Heat input H (kJ/cm)
#1	34	220	10	44.880
#2	32	200	10	38.400
#3	31	186	10	34.596
#4	29	160	10	27.840
#5	28	120	10	20.160

Table 2에서 입열량 $H(kJ/cm)$ 는 다음 식¹⁾에서 구하였다.

$$H = \frac{f_1 EI}{V} \times \frac{60}{1000} \quad (1)$$

여기서, H : 입열량 (kJ/cm), f_1 : 열전도율 (≈ 1)

E : 용접전압 (V), I : 용접전류 (A)

V : 용접속도 (cm/min)

용접부의 결함은 비파괴적으로 확인하기 위하여 초음파 탐상과 X-선 탐상시험을 수행하였고, Fig. 1(a), (b)와 같은 시험편으로 인장시험과 편진 인장 피로시험(tension-tension fatigue test)을 수행하였다. 인장시험에서 인장흡수에너지와 연신률 및 단면수축률등 인성을 조사하도록 하였으며, 피로시험은 모재 SS41강의 3×10^5 cycle의 피로수명에 해당하는 용력비 ($R = \sigma / \sigma_t$) 83%를 기준으로 하여, 용접재의 피로수명을 구하였고, 모재의 경우와 비교하였다. 용접부의 충격시험은 표준샤르피충격시험편에 의하여 충격치를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접조건간의 상관성

Fig. 2은 용접속도 V 를 10cm/min으로 일정하게 하여 Table 2와 같이 용접전류와 용접전압을 변화시켜 아크용접실험을 수행하여, 식(1)에 의해 구한 용접입열량 $H(kJ/cm)$ 와 용접전류 $I(A)$ 와의 관계와 용접전압 $E(V)$ 와 용접전류 $I(A)$ 의 관계를 구한 그래프이다.

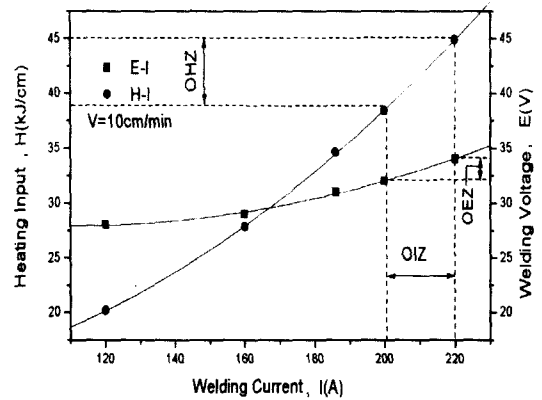


Fig. 2 Heat input vs. welding current vs. welding

voltage ($H = \frac{EI}{V} \times \frac{60}{1000}$)

입열량은 용접전류와 용접전압의 증가에 따라 2차 곡선적으로 증가함을 알 수 있다. 이때 $H-I$ 및 $E-I$ 의 상관실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$H = 8.907 \times 10^{-4} I^2 - 0.0557 I + 14.007 \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

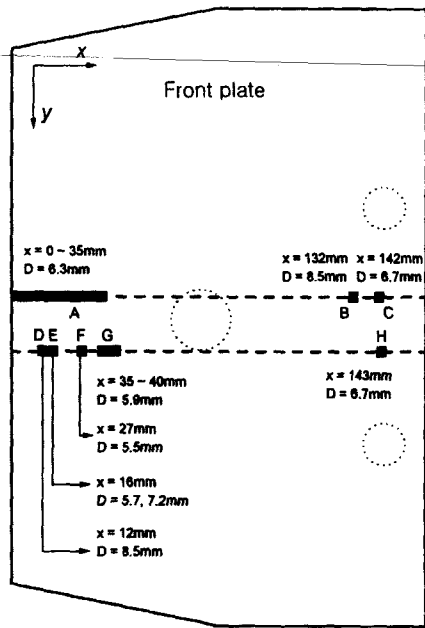
$$E = 5.14 \times 10^{-4} I^2 - 0.114 I + 34.25 \quad (R^2 = 0.99) \quad (3)$$

여기서 R^2 은 기여율(coefficient of edtermination)로서 높은 신뢰성을 보여준다²⁾.

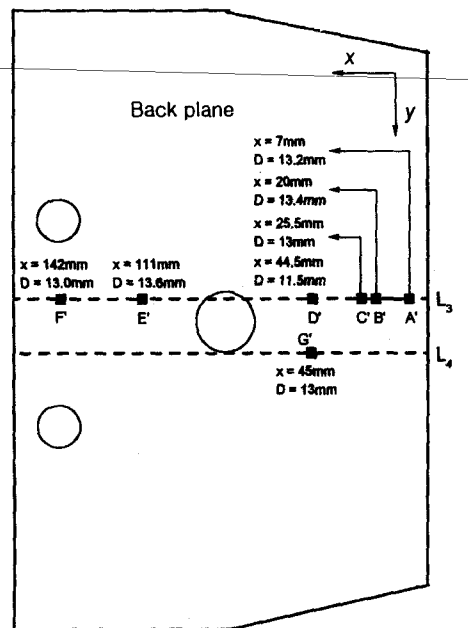
식(2)와 (3) 및 Fig. 3에서 알 수 있듯이 강도와 인성을 고려한 입열량 $H(kJ/cm)$ 의 최적범위만 구하여지면 일정 용접속도 $V(cm/min)$ 하에서의 최적 용접전류 $I(A)$ 와 최적용접전압 $E(V)$ 을 결정지을 수 있음이 확인 될 수 있다.

3.2 용접부의 초음파 탐상과 X-선 탐상

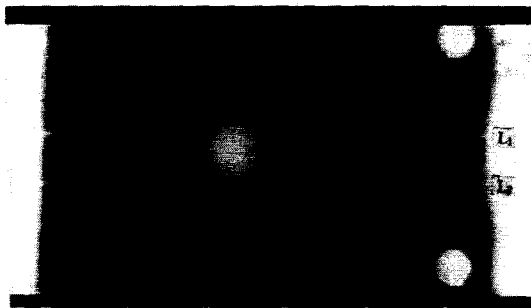
Fig. 3은 코아 이중재 용접의 앞면 용접선 L_1, L_2 와 뒷면 용접선 L_3, L_4 에 따라 초음파 탐상(UT)과 X-선 탐상시험(RT)한 결과를 나타내며, 각각 용접 결함(공극, 슬랙함유, 불연속등) A~H와 A'~G'의 위치와 크기 및 깊이를 보여주고 있다. 이러한 결함 등은 용접공의 용접기술부족에도 원인이 있지만 대개 입열량부족의 원인으로 생각된다¹⁾. (이때의 용접 입열량은 $H=34.6kJ/cm$ 로서 현장에서 실제 사용되고 있는 조건이나 입열량 부족에 의한 용접결함발생과 용접부 강도와 인성의 부족이 예상된다.)



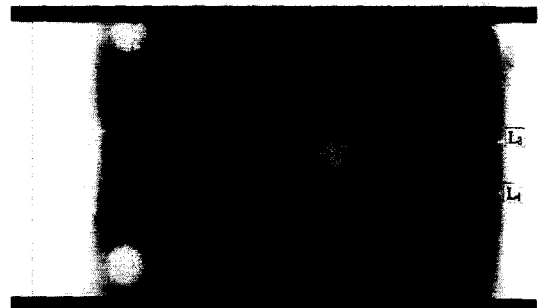
(a-1) Ultrasonic weld-flaw detection result at the front plane (Weld defects A~H)



(b-1) Ultrasonic weld-flaw detection result at the back plane (Weld defects A'~H')



(a-2) X-ray weld-flaw detection result at the front plane



(b-2) X-ray weld-flaw detection result at the back plane

Fig. 3 Ultrasonic and X-ray flaw detection results at the front and back plane of core plate dissimilar (SS41-ST304) SMAW joints

3.3 용접부의 강도와 인성을 고려한 이중재 용접의 최적화

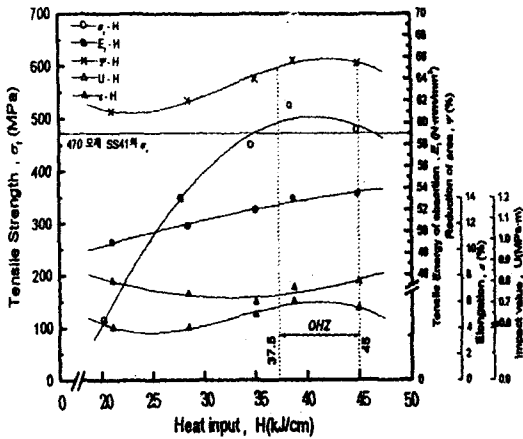


Fig. 4 Effects of heat input on strength (σ_t) and toughness (E_t, ϕ, ϵ, U) of core plate dissimilar SMAW joints(SS41-ST304)

Fig. 4는 용접부의 인장강도 (σ_t , MPa)와 입열량(H , kJ/cm), 인장흡수에너지(E_t , N·mm/mm²)와 입열량(H , kJ/cm), 단면수축율(ϕ , %)과 입열량(H , kJ/cm), 충격치(U , MPa·m)와 입열량(H , kJ/cm), 연신율(ϵ , %)과 입열량(H , kJ/cm)의 상관관계를 나타내는 그림으로서, 그 상관관계 실험식은 각각 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma_t-H : \sigma_t = -0.935H^2 + 76.025H - 1041.311 \quad (R^2 = 0.99) \quad (4)$$

$$E_t-H : E_t = -0.0026H^2 + 0.361H - 42.678 \quad (R^2 = 0.99) \quad (5)$$

$$\psi-H : \psi = -0.0013H^3 + 0.123H^2 - 3.545H + 93.184 \quad (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

$$U-H : U = -9.74 \times 10^{-4}H^3 + 0.095H^2 - 2.868H + 31.298 \quad (R^2 = 0.97) \quad (7)$$

$$\epsilon-H : \epsilon = 5.2 \times 10^{-4}H^2 - 0.034H + 1.271 \quad (R^2 = 0.96) \quad (8)$$

Fig. 5와 식(4)~(8)에서 알 수 있듯이 σ_t-H 관계에서 용접부의 이용효율이 100%이상 되는 H 의

범위가 최적 입열량 범위(OHZ, optimum heat-input zone)로서 $H=37.5\sim 45\text{kJ/cm}$ 이다. 이 범위는 인성(인장흡수에너지, 단면수축률, 연신율, 충격치)을 고려하여도 제 2, 제 3, 제 4 용접선에 따른 템퍼링(tempering)효과 때문의 연화작용에 의한 인성의 피크(peak) 또는 증가추세인 범위이므로 역시 최적 조건의 범위가 될 수 있음을 알 수 있다. 여기서 OHZ를 앞으로써 전술한 바와 같이 Fig. 3에서 최적용접전류와 최적용접전압의 범위도 각각 쉽게 결정할 수 있게 된다. 이러한 성질은 수중용접이나 마찰용접의 최적화에 관한 앞선 연구보고와 매우 일치한다³⁻⁵⁾.

3.4 용접부의 피로수명과 입열량의 상관관계

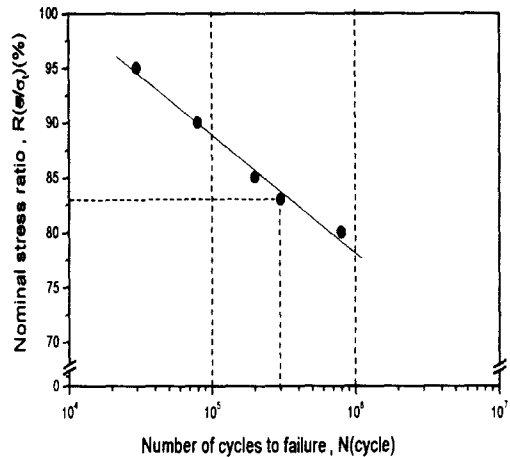


Fig. 5 Tension-tension fatigue fracture life vs. stress ratio of base metal SS41 steel plate

Fig. 5는 모재SS41강판의 편진인장피로파단 수명 $N(\text{cycle})$ 과 응력비 $R = \frac{\sigma}{\sigma_t}(\%)$ 과의 상관관계를 구한 그래프이다. 이 그림에서 수명 3×10^5 되는 응력비 $R=83\%$ 와 같은 피로응력하에서 각 이중재 용접재의 피로시험편(Fig.1(b))의 피로파단수명을 구하여 모재의 경우와 비교한 것이 Fig. 6이며, 각 입열량에 대하여 구하였다. 이때 입열량의 증가에 따라 피로파단수명도 증가하며, 피로수명효율이 100%이상의 범위가 존재함을 알 수 있다.

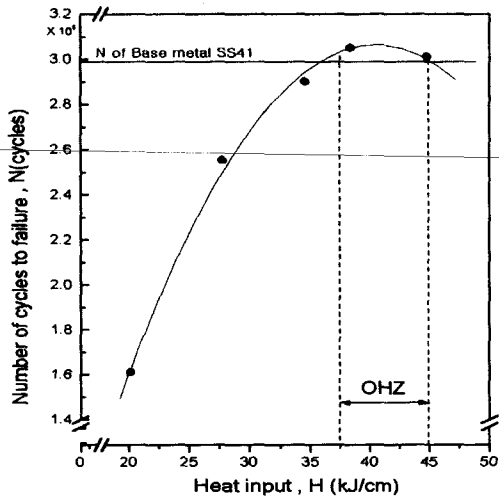


Fig. 6 Relationship between fatigue life and heat input of core plate dissimilar SMAW joint (SS41-ST304) (stress ratio $R = \frac{390}{470} = 83\%$)

Fig. 4에서 구한 $OHZ=37.5 \sim 45kJ/cm$ 에서 피로 파단수명 N 도 모재보다 100%이상이 됨을 확인할 수 있다. 이때 $R-N$ 과 $N-H$ 상관관계식은 다음과 같다.

$$R = 142.96 - 10.813 N \quad (R^2 = 0.98) \quad (9)$$

$$N = -0.0035H^2 + 0.283H - 2.662 \quad (R^2 = 0.99) \quad (10)$$

이상에서 알 수 있듯이 강도와 인성 및 피로수명을 고려하여 자동리프팅 마그네틱의 코아 이중재 아크용접의 최적조건은 용접속도 10cm/min하에서 최적 용접 입열량범위는 $H=37.5 \sim 45(kJ/cm)$ 이며, 이때의 최적용접전류의 범위는 $I=200 \sim 220(A)$, 최적 용접전압의 범위는 $E=32 \sim 34(V)$ 임이 확인되었다.

이러한 특성은 타 재료의 타 용접에서의 최적화 연구결과와 흡사하다⁶⁻⁸⁾.

3.5 용접부의 경도분포, 미세조직 및 파단면의 조사

3.5.1 용접부의 경도분포

Fig. 7은 최적 용접조건하에서 용접한 시험편의 경도 분포를 나타낸다. 이 그래프를 보면 용접계면(weld interface)에서 경도치가 최고이다.

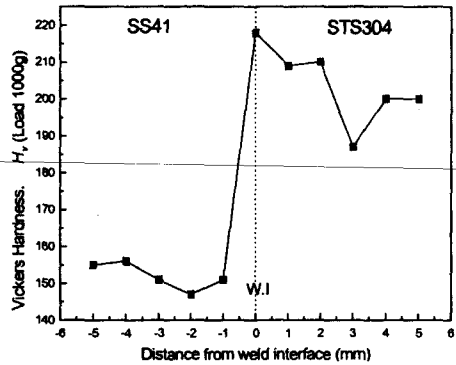


Fig. 7 Hardness distribution near the weld interface of dissimilar SMAW joint (SS41-ST304)

3.5.2 용접부 인장 · 피로파단면의 미세조직 조사



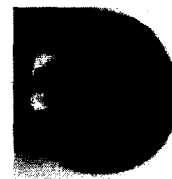
(a) Weld flaws



(b) Tensile fracture



(c) Tensile fracture (penetration lack)



(d) Fatigue fracture

Fig. 8 Macro-structure of weld flaws inside core plate dissimilar SMAW joint (SS41-ST304) (picric acid deep etching)

Fig. 8은 용접입열량이 부족한 경우의 균열이나 불연속성등 용접결함이 있는 경우를 나타낸다.

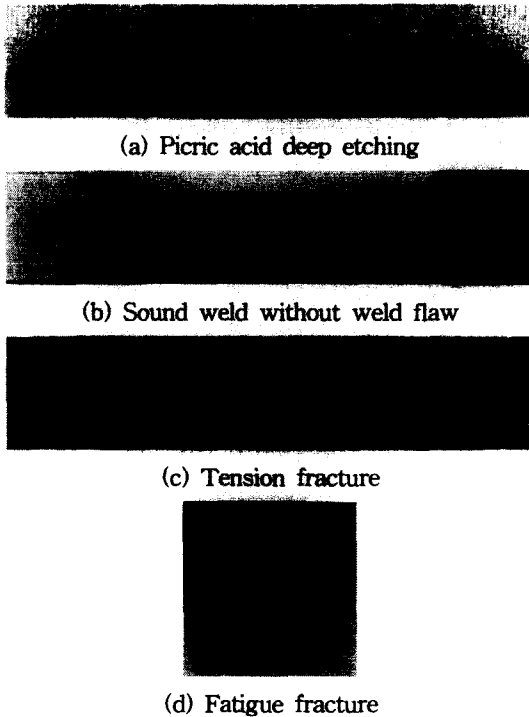


Fig. 9 Macro-structure of sound weld without weld flaw inside dissimilar SMAW joint (SS41-ST304)

Fig. 9는 최적용접 입열량범위내에서 용접된 용접재시험편의 외관으로서 결함이 나타나지 않고 있다. 여기서 알 수 있는 것은 최적용접 입열량범위를 벗어난 용접재는 용접결합이 식별되거나 내주에 결함이 개재하므로 안정성이 결여되지만, 최적용접 입열량의 범위에서 용접된 용접재의 건전성과 안전성이 보장될 수 있음이 확인되었다.

4. 결론

영구자석 흡착기의 자동화 기술개발을 위한 자동 리프팅 마그넷의 코아 이중재 아크용접기술의 최적화를 위한 연구를 개발한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용접 조건인 입열량, 용접전류, 용접전압간에는 정량적인 상관성이 존재한다.
- 2) 비드 외관상 결함이 없어도 용접입열량이 부족하거나 과다하면 자력절연체 STS304봉과

코아재 SS41강판간의 국부적 용접결합이 발생하여 초음파 및 X-선 탐상에 의해 발견될 수 있다.

- 3) 용접부의 강도와 인성과 피로파단 수명을 고려하여 모재보다 100%이상의 효율을 갖는 최적 용접입열량의 범위는 37.5~45kJ/cm임이 확인되었다.
- 4) 용접부 강도와 인성 및 피로파단수명등은 용접입열량에 2차 함수적 정량관계가 성립한다.
- 5) 최적 용접입열량 범위를 벗어난 용접재는 용접결합이 식별되지만, 최적 용접입열량 범위에서 용접된 용접재는 건전성과 안정성이 보장될 수 있다.

참고문헌

- 1) AWS, "Welding Handbook", Vol. 1, p.36, 1991
- 2) 오세규, "해양개발기술을 위한 수중용접기술개발-저수심 습식 수중용접기술개발-", 한국기계연구소 위탁연구보고서, pp.16~18, 1990
- 3) 남기우, "용접구조용 강판의 수중용접성과 수중용접강도의 최적화", 부산수산대학교 대학원 공학석사논문, pp.21~25, 1983
- 4) 이배섭, "60m급 재현고압 습식 수중피복아크용접에 의한 SWS50A강의 인장구속균열 임계강도특성에 관한 연구", 부산수산대학교대학원 공학석사 논문, pp.1~49, 1991
- 5) 전태연, "수심 100m급 재현고압 습식 수중용접 실험장치의 개발과 수심이 용접강도에 미치는 영향에 관한 연구", 부산수산대학교대학원 공학석사논문, pp.1~42, 1991
- 6) Oh, S. K. and K. K. Wang, "Effect of Welding Parameter on Weld Strength and Acoustic Emission in Friction Welding", J. of Korean Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp.23~33, 1983
- 7) 오세규, "어쿠우스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한기계학회지, 22(3), pp.184~190, 1982
- 8) Oh, S. K., K. K. Wang, G. R. Rief, "In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques", Welding Journal of American Welding Society, Welding Research Supplement, Vol.61, No.9, pp.312~316, 1982