

조선강재의 최적 용접조건에 관한 연구

김옥환[#]

Study on Optimal Welding Condition for Shipbuilding Steel Materials

Ok-Hwan Kim[#]

(Received 2 November 2011; received in revised form 24 November 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

In this study, the steel material for shipbuilding(LR-A class) was used, and FCAW was taken advantage of 3G attitude and they are welded by different welding ways. As a result of analyzing wave with welding monitoring system, the stable values are obtained which are the first floor(electronic current 164~182 A, voltage 24 V), the second floor(electronic current 174~190 A, voltage 22~25 V), the third floor(electronic current 158~188 A, voltage 22~25 V), and fourth floor(electronic current 172~184 A, voltage 22~25 V), at this time, the stable wave standard deviation and changing coefficient could be obtained.

When the welding testing through nondestructive inspection was analyzed know defect of welding, there was no defect of welding in A, D, E, but some porosities in B, and slag conclusion near the surface in C, because the length of arc was not accurate, and the electronic current and voltage was not stable. After observing the change of heat affect zone through micro testing, each organization of floor formed as Grain Refinement, so welding part was fine, the distance of heat affect zone is getting wider up to change the values of the electronic current and voltage. As a result of degree of hardness testing, the hardness orders were the heat affect zone(HAZ), Welding Zone(WZ), and Base Metal(BM). When the distribution of degree of hardness is observed. B is the highest degree of hardness. The reason why heat effect zone is higher than welding zone and base metal, welding zone is boiled over melting point(1539°C) and it starts to melt after the result of analysis through metal microscope, so we can know that delicate tissue is created at the welding zone. Therefore, in order to get the optimal conditions of the welding, the proper current of the welding and voltage is needed. Furthermore the precise work of welding is required.

Key Words : AShipbuilding(조선), Monitoring System(용접모니터링), Welding Current and Voltage(용접전류, 전압), X-ray Test(방사선투과시험), Micro Test(미소조직시험), Hardness Test(경도시험), Test Specimen(시험편)

1. 서 론

[#] 교신저자 : 한국폴리텍6대학 포항캠퍼스 산업설비학과
E-mail : owkim@kopo.ac.kr

수동 용접이나 반자동 용접 공정에서는 작업자의
기능과 용접기의 성능에 따라 용접 품질이 결정된다

고 볼 수 있다. 특히 작업자의 기능 수준은 품질에 아주 중요한 영향을 미치기 때문에 최적의 용접조건을 요구된다. 본 논문에서는 조선용 강재(LR-A급)를 사용하여 각각 달리한 용접전류 및 전압으로 측정된 값을 용접모니터링 시스템을^[1,2] 통해 전류 및 전압의 파형을 분석하여 아크안정을 살펴보고, 또한 비파괴 시험(X-ray시험)을 통한 용접결함을 분석하고, 매크로 시험, 경도시험을 통해 용접 열영향부의 변화를 관찰하였으며, 또한 용접금속 및 용융부, 모재부문의 현미경 조직사진 촬영을 통하여 용접 품질을 향상시킬 수 있는 여러 가지 최적 용접조건을 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 조선용 강판(Ship plate)

조선에 사용되는 모든 철판은 선급으로부터 검사를 받은 것을 사용한다. 각 선급별로 표시가 다르긴 하나 대부분 A, B, D, E, AH, DH, EH, FH, Z 등의 등급으로 크게 구분하여 사용하고 있는데 A, B, D, E등급은 연강이고 AH, DH, EH, FH는 고장력강이며 Z등급은 위와 아래에서 당기는 힘에 강하도록 된 재질을 말한다.

2.2 플럭스 코어드 아크용접(Flux cored arc welding)

플럭스 코어드 아크용접(Flux Cored Arc Welding, FCAW)의 원리는 GMAW와 유사하나, 이름 자체가 의미하는 바와 같이 와이어 중심부에 플럭스가 채워져 있는 플럭스 코어드 와이어를 사용한다. 따라서 FCAW^[3]

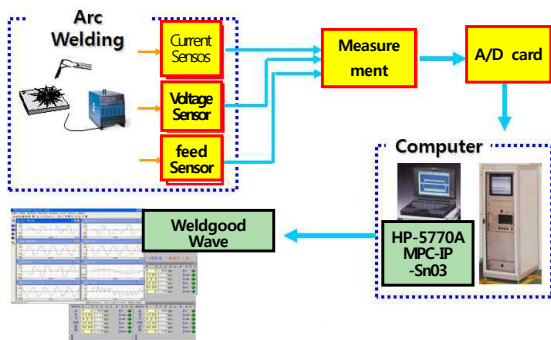


Fig. 1 Welding Monitoring System of Block diagram

는 플럭스코어 와이어를 일정한 속도로 공급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에 아크가 발생되도록 하고, 발생된 아크열로 용융지와 용접비드가 형성되도록 하는 용접법이다^[4].

2.3 용접모니터링 시스템(Welding monitoring system)

용접모니터링 시스템의 기본 구성도를 나타내는 것으로, 용접기의 출력단에서 홀 센서 타입의 전류센서와 전압센서 그리고 와이어 송급 속도 센서를 이용하여 용접 시 각각의 시그널을 획득한 후 이를 계측기를 통하여 증폭한 후 A/D 컨버터를 통해 디지털신호를 컴퓨터(PC)로 전송시킨다. 그리고 용접 공정에 최적화되어 있는 전용 소프트웨어를 통하여 용접 양부 판단 및 용접 파형을 분석하게 된다. 모니터링 장비는 용접 관련 분야에서 용접기술의 선진화 및 용접 품질 평가, 용접 데이터의 체계적인 구성, 선급, ISO 등의 각종 인증, 품질관리, 장비 및 재료의 개발, 교육 및 각종 연구 등에 최적화되어 적용되며, 용접 네트워크 시스템의 의한 현장 및 사무실에서의 용접품질 평가 및 불량 검출, 데이터 획득 및 관리가 가능하기 때문에 용접부의 실시간 용접품질 평가 및 데이터의 획득이 가능하다^[5].

3. 실험장치 및 조건

3.1 시험편(specimen)

본 실험에 사용된 모재는 Table 1과 같이 기계적인 성질과 화학적인 조성을 가진 조선용 강재(Ship Plate)로 LR- A등급으로 연강으로 두께 16mm, 가로 150mm,

Table 1 Mechanical property, chemical component of base metal

Chemical component				
C	Si	Mn	P	S
0.1695	0.203	0.682	0.137	0.045
Tensile test			Impact test(+20℃)	
YP(N/mm ²)	TS(N/mm ²)	EL(%)		
285	442	28	208	

길이 300mm로 Fig. 2와 같이 40°로 개선 가공하여 V용접을 하였다. 또한 용접용 와이어는 티타니아계 타입의 플렉스 코어 와이어 SF-71(Ø 1.4)을 사용하였으며, 사용된 용접기는 대우용접기 NEW ARC 350을 사용하였다. 사용 가스는 100% CO₂가스를 사용하였으며 이때 가스유량은 12 l/min로 세팅하여 3G 자세로 용접을 하였다.

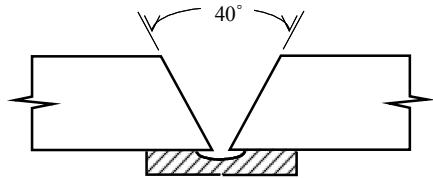


Fig. 2 Welding specimen

3.1.1 용접봉(Wire)

사용된 SF-71은 티타니아계 타입의 플렉스 코어드 와이어로서 전자세 용접봉으로 설계되어 있고 아크가 매우 안정되며 스패터의 입자가 미세하고 양이 적으며 비드 외관이 매우 미려하고 퍼짐성이 우수하며, 슬래그가 완전히 덮히며 박리성이 매우 양호하며, 내 균열성이 뛰어나며, 용융풀이 형성된 후 빨리 응고하기 때문에 전자세 용접 또는 후판 용접시 용착량을 크게 증가 시킬 수 있는 용접봉이다. 일반적인 FCAW 장점인 빠른 용착속도를 지니며 저온 충격 성질(-29℃ 이하) 및 COD(Crack Opening Displacement)성질을 향상시켜 조선 및 해양 구조물 등에 적용할 수 있도록 개발된 와이어로서 AWS 용접봉 분류로는 E71T-1 Type으로 그 규정(AWS A5.20)에 따라 Table 2와 같이 인장강도 50-60Mpa급이며 화학적 조성은 연강에 속하는 직류정극성의 전기적인 극성을 갖는다.

Table 2 Mechanical property of wire

Yielding strength YP(N/mm ²) (Kgf/mm ²)	TS(N/mm ²) (Kgf/mm ²)	EL (%)	Impact test J(Kgf/mm ²)(0℃)
548(56)	582(59)	28	86(9)

3.1.2 용접모니터링을 이용하여 파형계측

용접기의 출력단에서 홀센서 타입의 전류센서와 전압센서 그리고 와이어 송급속도센서를 이용하여 용접시 각각의 시그널을 획득한 후 이를 계측기를 통하여

증폭한후 A/D변환기를 통해 디지털 신호를 컴퓨터에 보내어 파형을 측정하여, Table 3과 같이 5가지 용접조건으로 각층마다 용접작업이 안정되어 가는 100mm지점에서 60초동안 모니터링을 실시하여 전류, 전압의 변동을 파형으로 분석하였으며 아아크 안정성 평가를 위해 30~36Sec 구간을 설정하여 파형을 확대하고 다시 32~33Sec 구간을 키보드로 설정하여 전류와 전압의 변동계수와 IE 평면 궤적분석을 하였다.

Table 3 Welding conditon

Specimen	Pass Type	A1		B1		C1		D1		E1	
		A	V	A	V	A	V	A	V	A	V
1P	V	159	18	169	19	179	20	189	22	199	23
2P	V	170	18	180	19	190	20	200	22	210	23
3P	V	160	18	170	19	180	20	190	22	200	23
4P	V	165	18	175	19	185	20	195	22	205	23

3.1.3 비파괴시험

방사선 투과시험 장비를 사용하여 조건에 따라 용접작업을 완료한 후 완전냉각상태에서 방사선 투과시험(radiography testing)을 하였다.

3.1.4 매크로 조직시험에 의한 측정

매크로 조직시험은 절취된 시편을 벨트샌드로 600 rpm으로 1차 연마하고 사포지(#600-#1200)로 연마 후 연마제(CR₂O₃)와 물을 사용하여 폴리싱한 후 실체 금속현미경을 사용하여 모재와 용접부의 열영향부 사진을 비교 분석하였다.

3.1.5 미소 경도시험에 의한 측정

경도시험은 미소 경도 시험기를 이용하여 용접부별로 모재부, 열영향부, 용착금속부에 대하여 비커스 경도 시험기(규격 : MVK-200, Akashi(Japan))를 사용하여 실시하였다.

3.1.6 용접부의 현미경 조직시험

시편을 폴리싱한 후 5% Nital용액(질산 + 메틸알콜) 20초 동안 부식, 세척하고 건조하여 금속 현미경을 사용하여 모재와 열영향부, 용접부의 조직을 비교 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1.1 용접모니터링

5가지 조건으로 각층마다 용접 시작 시 용접작업이 안정되어 가는 100mm지점에서 60초 동안 모니터링을 실시하여 전류, 전압의 변동을 파형으로 분석하였으며 아크 안정성 및 용접장치의 상태 및 용접품질 평가를 위해 30~36sec 구간을 설정하여 파형을 확대하고 다시 32~33sec 구간을 키보드로 설정하여 전류와 전압의 변동계수와 IE 평면 궤적분석을 하였다.

여기서 처음 전류를 지정할 때 용접기에 나타난 디지털 값을 측정함 다음 그 값을 기준으로 용접하였으나 실제 모니터링을 해본 값과의 차이는 약 10% 정도의 차이가 있음을 알 수 있었다.

여기서 나타나는 용접전류와 용접전압과의 관계에서 나타난 파형과 표준편차, 변동계수를 비교 분석하면 전류와 전압이 높아질수록 아크가 안정되면서 양호한 용접 결과를 얻을 수 있다⁷⁾. 그러나 A시험편에서 나타난 파형을 분석하면 전류의 표준편차 값의 평균이 54.85와 전압의 표준편차의 평균이 3.83으로 전류와 전압이 낮을 때 파형의 단락이 심해져 아크의 불안정한 상태를 관찰할 수 있었다.

다음 B시험편의 파형을 살펴보면 전류의 표준편차 값의 평균이 46.12와 전압의 표준편차 값의 평균이 2.90으로 점점 값이 낮아지며 아크가 A시험편보다 안정됨을 나타냄을 알 수 있다. 다음 C시험편의 값은 전류의 표준편차 값의 평균이 32.04와 전압의 표준편차의 평균이 1.73으로 아주 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

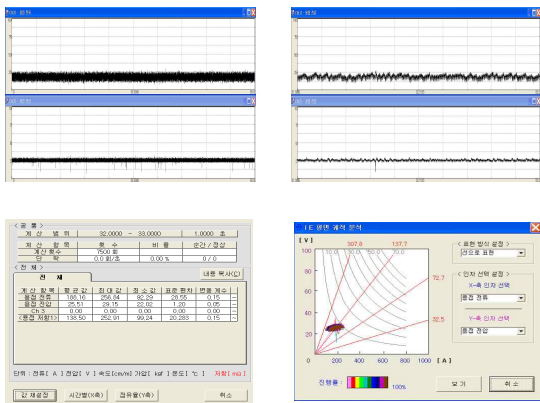


Fig. 3 Welding current, welding voltage wave

전류와 전압이 조화를 이루며 아크의 안정을 기함을 알 수 있고 D시험편과 E시험편은 더욱더 안정됨을 알 수 있다. 그러나 전압 값이 높으면 전류 값은 같이 비례해서 높아지며 오히려 아크가 불안하여 짐을 알 수 있다.

여기서 각층마다 각각의 전압과 전류의 값을 달리 하여 실험한 결과 1층(용접전류 173A, 전압 24V), 2층(용접전류 182A, 전압 25V), 3층(용접전류 174A, 전압 25V), 4층(용접전류 174A, 전압 24V)일때 안정된 파형과 표준편차와 변동계수가 안정된 것을 알 수 있었다.

4.1.2 방사선투과 시험결과

방사선투과 시험결과 A 시험편, D 시험편, E 시험편은 결함이 없었고 B 시험편은 2층과 3층 사이에 기공(porosity)현상이 나타났으며, C 시험편은 표면 가까이 작은 슬래그 섞임(Slag conclusion)현상이 나타났으며, 주로 슬래그 잠입(Slag conclusion)과 기공(porosity)현상의 결함이 나타났다. 이는 부정확한 아크 길이와 전류, 전압의 불안정으로 모재와 용가제가 충분한 용합이 이루어 지지 않았고, 슬래그 잠입과 용접 부 내부에 blow hole이 합쳐서 생긴 결함으로 판단된다.

4.1.3 Macro 조직시험 결과

각 층별 조직은 미세결정립으로 형성되어 용접부는 건전하였으며 조직시험 결과 첨부사진은 다음과 같다. 전류와 전압 값의 변화에서 값이 커질수록 용접입열의 영향으로 열영향부의 거리가 넓어짐을 알 수 있다.

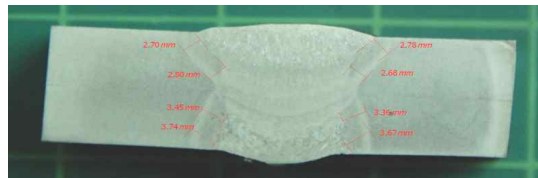


Fig. 4 Macro specimen

4.1.4 미소경도(Micro Vickers Hardness)시험결과

용접 힘을 실시하였다. 경도 분포를 조사하기 위하여 시험편을 제작 채취하여 측정하중 300g 하중을 적용하여 용접부 심부(WZ)를 중심으로 압흔 간격을 처음에는 가공한 매크로 시험편을 미소경도시 mm간격으로

로 시작하여 0.5mm간격으로 3회 실시하였고 열영향부(HAZ)에서는 0.2mm간격으로 경도를 측정하였다. 경도시험은 각 시험편 별로 실험하였으며 측정 영역 별로 경도 측정값을 살펴보면 열영향부가 가장 높았고 다음이 용착금속 부(WZ)이고 모재(BM)순으로 나타났고, 각 용접 조건별 경도분포를 살펴보면 시험편B의 경도 값이 가장 높은 값으로 측정되었다. 이렇게 열영향부가 용착금속과 모재보다 높은 이유는 용착금속이 용점(1538℃) 이상으로 가열되었다 용융이 이루어지므로 용착부에 미세조직이 생성됨을 알 수 있다. 이러한 조직의 변화는 입열량, 냉각속도 등의 일반적인 요인 외에 용접 와이어 및 플럭스(Flux)에 함유된 각종 합금원소가 용접 실행 중 충분히 정련작용이 이루어져 용접부의 조직이 미세화 되어 경도 값이 높게 나타난 것으로 생각된다.

아래 그림은 각각 다른 조건의 용접한 용접열영향부의 경도값과 그림을 나타낸 것이다.

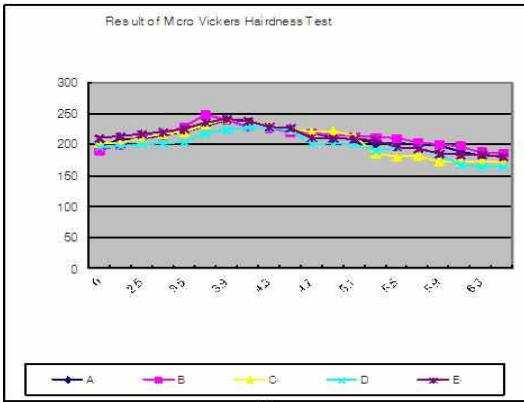


Fig. 5 Result of macro vickers hardness test

4.1.5 용접부의 금속조직시험 결과

용접 후 각 시험편로 마이크로 시험편을 가공하여 폴리싱 한 후 에칭하여 에칭용액은 5% Nital 용액(질산+메틸 알콜)에 20초 동안 부식, 세척하고 건조한 후 모재, 모재와 열영향부, 열영향부와 용접부, 용접부의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 용접부가 Tempered Martensite 조직이며 열영향부는 미세조직에서 보듯이 각 조건별에 따른 미세조직의 차이는 크게 나타나지 않은 것으로 확인할 수 있다.

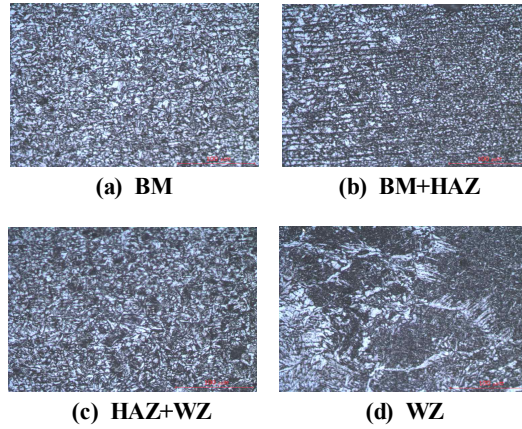


Fig. 6 E-specimen structure

5. 결론

조선용 강재(LR-A급)를 3G자세로 FCAW 용접 시 우수한 비이드를 얻기 위해 용접조건을 달리하고 모니터링 시스템을 이용하여 용접 비이드에 미치는 최적 용접조건과 용접 열영향부에 미치는 여러 가지 현상을 보기 위해 시험편을 채취하여 매크로 시험과 미소 경도시험, 전자현미경 조직시험을 통해 다음과 같은 실험된 범위내에서 우수한 결과를 나타내었다.

1. 용접모니터링 파형분석 결과 1층(용접전류 173A, 전압 24V), 2층(용접전류 182A, 전압 25V), 3층 (용접전류 174A, 전압 25V), 4층(용접전류 174A, 전압 24V)일 때 안정된 파형과 표준편차와 변동계수가 안정된 것을 알 수 있었다.
2. 방사선 투과 시험결과 B시험편은 2층과 3층 사이에 부정확한 아크 길이와 운봉의 불안정으로 슬래그 잠입(Slag conclusion)과 기공(Porosity)현상이 C 시험편은 용가재의 충분한 용합이 이루어 지지 않아 표면 가까이 작은 슬래그 잠입 현상이 나타났 다.
3. 매크로 시험결과 각 층별 조직은 미세결정립으로 형성되어 용접부가 양호하였고, 전류와 전압 값이 커질수록 용접 입열의 영향으로 열영향부의 거리가 넓어짐을 알 수 있다.
4. 미소경도시험 결과 용접 와이어 및 플럭스(Flux)에 함유된 각종 합금원소의 탈산정련작용과 입열

량, 냉각속도의 영향으로 용접부 조직의 미세화현상으로 열영향부(HAZ), 용착금속부(WZ), 모재(BM)순으로 경도값이 나타났다.

5. 현미경 조직시험은 모재, 열영향부, 용접부의 조직을 분석한바 각 조건에 따른 미세조직의 결정립은 전류, 전압에 따라 변화됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. S. Adolfsson, A Bahrami, Bolmsjo and I Claesson. "On-Line Quality Monitoring in short-circuit gas metal Arc Welding", AWS Welding research supplement, pp. 59-73, Feb. 1999.
2. T.P. Quinn, C. Smith, C.N. McCowan, E. Baglachowiak and R.B.Madigan, "Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding". AWS Welding research supplement pp. 322-328, Sep. 1999
3. ANON. "Self-Shielded FCAW Speeds High-Rise Construction", Welding Journal, Vol. 63, No 4, pp. 47-49, 1984.
4. ANON. "Office Building Columns Field Spliced with Self-Shielded Welding Wire", Welding Journal, Welding Journal, Vol. 65, No. 10, pp. 53-54, 1986.
5. S. M. Cho "A Study on the Quantitative Evaluation of Stability in AC SMAW", Journal of KWS. vol. 16, No. 4, pp. 125-131, 1998.
6. Mita, "Quantitative Estimation of Arc Stability on CO₂ Gas Shielded Arc Welding", j.of Japan Weld. Soc. Vol. 5, No. 10, p. 75(in Japanese), 1987.
7. T. Mita, "Waveform control method in CO₂ Gas Shielded Arc Welding", Quarterly Journal of the Japan welding Society. Vol. 6, No. 6, p. 457(in Japanese), 1994.