

잠호용접부 균열방지를 위한 용접 플럭스 및 시공기법 개발

최기영^{†*}, 김찬*, 김영필*

현대중공업 산업기술연구소*

Development of Welding Flux and Process for Prevention of Cold Cracking in SAW Weld Metal

Kee Young Choi^{†*}, Chan Kim* and Young Pil Kim*

Industry Research Institute, Hyundai Heavy Industry*

Abstract

SAW(Submerged Arc Welding) process is generally applied to a wide range of welding area in the fabrication of steel structure. This process has a good characteristic properties such as the high quality of welds and the high deposition rates, but in case of welding on a thick steel plate, it also has higher cold crack susceptibility than that of a thin steel plate.

The purpose of this research is to find the main factor of crack generation and clarify the countermeasure for crack prevention, and then establish the optimum welding condition in a heavy thick steel plate. The results of this study are as follows,

1. The cause of crack generation is found the diffusible hydrogen penetrated into weld metal by decomposition of the remained moisture in SAW flux during welding.
2. For the removal of diffusible hydrogen, the raw materials of SAW flux are to be dehydrated at the high temperature in the initial manufacturing stage.
3. Mechanical properties of weld metal welded with the dehydrated SAW flux were evaluated very excellent, furthermore the weld metal has been proved to have low diffusible hydrogen content with 3.1ml /100g.
4. The weldability and quality welded with thick steel plates were improved by establishing the new optimum welding condition.

※Keywords: Submerged arc welding(잠호용접), Cold crack susceptibility(저온균열감수성), Diffusible hydrogen(확산성수소), Gap Bead On Plate test(GBOP, 저온균열시험법), Crack Tip Opening Displacement test(CTOD, 인성평가법), Low temperature bonded type(저온소결형)

1. 서론

최근 선박이나 해양구조물이 대형화되면서 사용되는 강재도 점점 두꺼워지고 있다. 강재가 40mm를 초과하는 판재는 박판 용접과는 달리 높은 구속력과 용접부 급랭에 의한 조직의 취화로 저온균열이 빈번하게 발생되는데 당사에서도 선박용 강재에 자동 용접재료로 사용되고 있는 국내에서 제조되는 A 플락스와 H14 와이어 조합의 용접시공에서 두께 40mm 이하에서는 균열 발생이 없었으나 40mm를 초과하는 판재에서는 균열이 발생되었다. 특히 두께가 80mm에 가까운 대형 컨테이너 선박의 부재 용접부에서는 다량의 균열이 발생되어 시공상에 많은 문제점을 나타내었다. 그래서 이들 균열을 채취하여 파면을 조사한 결과 전형적인 수소취화에 의한 양상으로 저온균열로 판명된바 있다.

이러한 저온균열의 방지대책은 3가지로 나눌 수 있는데 첫째, 저탄소 당량의 강재 선정과 저입열 시공을 제한함으로써 경화조직을 방지하거나, 둘째, 용접시공시 구속조건을 고려한 용접설계로서 구속의 완화, 그리고 셋째, 용접부에 수소 유입을 방지할 수 있는 극저수소 용접재료의 선정 또는 용접전 예열시공으로 저온균열의 방지가 가능하나, 대부분의 용접설계에서는 이들 중 예열작업을 수행하게 함으로서 수소의 방출을 원활하게 하여 확산성 수소의 잔류를 극저화 시키는 방법을 이용하고 있다.

예열온도의 선정방법은 강재 제조회사, 검사기관 등에서 대부분 용착금속의 탄소당량과 용접재료의 확산성 수소량 그리고 제조물의 두께 등에 지배되는 구속도에 따라 적정의 예열온도를 계산하여 이용하고 있다. 이러한 예열온도는 각각의 선정요인에 대한 비중의 정도가 서로 다르기 때문에 동일한 재료와 두께일지라도 예열온도의 차이가 나타남을 다음의 예(Table 1)에서 보여주고 있다.

즉 선박용 EH급 50mm두께의 강재에 용접재료를 기존적용 A 플락스 그리고 B 플락스에 EH14 와이어와 조합으로 용접시공시 N Steel 제조회사와 K Steel 제조회사 그리고 미국용접학회(AWS : American Welding Society)에서 제시된 아래의 예열 산출방법에 따라 계산하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서와 같이 A 플락스의 경우, 가장 낮은 추천온도라도 104℃의 예열을 필요로 하며, 미국용접학회 규정의 적용 경우에는 129℃ 예열로서 고온의 작업분위기로 환경을 열악하게 만들기 때문에 생산성 저하의 요인이 된다. 이렇게 고온의 예열 필요성은 물론 온도의 차이도 많음을 보여주고 있어 현장 적용에 다소의 문제점이 있다.

$$N \text{ Steel: } T_p = 250 + 120\log(H/3.5) + 8 (\sigma - 83)$$

$$K \text{ Steel: } T_p = 1.15 (5.24 \sigma + 227\log H - 482)$$

$$AWS : T_p = f(P_{cm}, H_{gc}, Re, t)$$

σ : 인장강도(kg/mm²)

H: 확산성 수소량

Re: 구속도

t : 용접금속 두께

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + 5B$$

당사에서는 확산성수소를 극저로 관리하고 있는 B 플락스를 선정하여 적용한 결과 미국용접학회 규정에서는 79℃의 예열을 필요로 하였으나 연구소 시험결과 K Steel 제조회사에서 제안한 예열 계산식에 의한 결과와 같이 예열이 없이도 양호한 내균열성을 보여 대체 적용하고 있다.

B 플락스는 저온 소결형 타입의 플락스로서 고온소결형 타입의 A 플락스에는 함유하지 않은 탄산염을 함유하고 있다. 이 탄산염이 용접중에 분해하여 탄산가스(CO₂ Gas)를 발생하여 탄산가스분압을 높임으로써 용착금

Table 1 Difference of preheating temperature(Thickness : 50mm)

용접재료 (플락스/와이어)	화학 성분(%)			인장강도 (kg/mm ²)	확산성 수소량 (ml/100g)	예열 온도(℃)		
	C	Si	Mn			N Steel	K Steel	AWS
A / H14	0.13	0.21	1.92	61	13	142	104	129
B / H14	0.11	0.24	1.52	54	4	25	무	79

속으로 수소의 유입을 억제하는 역할을 함으로서 궁극적으로 저온균열을 방지하고 있다.

탄산염은 플락스 제조시 600℃이상의 고온에서 쉽게 분해하기 때문에 700℃이상에서 제조되는 일반적인 고온 소결형 타입의 플락스에는 제조과정에서 완전 분해되어 탄산염의 잔류가 불가하다. 따라서 저온 소결형 타입의 플락스는 소성온도에 따라 잔류 탄산염의 차이에 의하여 용접시 분해되어 발생하는 탄산가스량이 다르기 때문에 제조과정이 까다로워 현재까지 국산화 개발이 미진한 실정이다. 또한 B 플락스는 수입자재로서 재료의 수급성과 재료비 상승의 문제점을 가지고 있다.

이에 대하여 본 연구에서는 생산성 향상에 영향을 주는 예열을 무시할 수 있는 극저의 확산성 수소를 함유한 동급의 저온 소결형 플락스를 분석하고 평가한 데이터를 기준으로 새로운 플락스를 개발함으로써 용접재료를 다원화하고 국산화하여 원활한 수급성과 재료비를 절감하고자 하였다.

2. 연구수행 내용

본 실험에 사용된 잠호용접재료와 강재는 다음과 같다. 잠호용접용 플락스는 저온소결형의 타입으로서 당사에서 많이 사용되고 있는 B 플락스를 벤치마킹한 제품이었으며 용접용 와이어는 종합금속 제품인 H14를 사용하였다. 비교제품으로 B 플락스와 함께 이와 유사한 C 플락스도 병행하여 평가하였다. 평가에 사용된 강재는 선박용 EH36급의 열간

압연공정제어(TMCP : Thermo Mechanical Controlled Process) 강재로서 두께 55mm의 판재를 시편으로 사용하였다.

그리고 평가에 사용된 시험장비는 플락스 흡습특성 평가를 위한 항온항습장비와 용접 특성평가를 위하여 교류전원으로 구성된 자동용접기(SW41 : OTC SAW 용접기)를 이용하였다.

평가내용은 플락스의 내흡습 특성평가와 저온 소결형 특성을 나타내는 탄산염의 소성온도별 잔류함량과 탄산가스 발생량 그리고 용접부의 확산성 수소량을 평가하였다. 확산성 수소평가의 용접조건은 600암페어, 34볼트, 용접속도는 40cm/min.로 하였다.

최종적으로 개발된 용접재료의 저온 내균열성 평가를 위하여 예열온도별 GBOP(Gap Bead On Plate) 시험과 현장 용접구속에 가까운 구속 상태에서 평가 가능한 저온균열시험을 수행하였다. 또한 이들 용접부의 건전성 평가를 위하여 초음파 탐상의 비파괴시험과 화학분석 및 물성시험도 병행하였다.

3. 연구결과

3.1 플락스 원재료의 수분제거

저온균열 발생의 3대 요인의 하나인 확산성 수소량은 대기의 수분이나 용접부 주변의 오염 물질도 있지만 용접 플락스가 가지고 있는 수분이 용접시 분해하여 용착금속으로 유입되는 것이 가장 큰 요인으로 지적되고 있다. 플락스내의 수분은 사용하기 전에 보관 상태에서 대기로부터 흡수되는 것과 플락스를 이루는 화합물들의 결정수로 나눌 수 있는데 전자는 보관이나 사용 전에 건조로 내

에서 300℃ 1시간정도 충분히 건조함으로써 제거 가능한 것으로 관리방법에 따라 흡습의 영향을 극소화할 수 있으나 후자인 플락스내의 결정수는 건조로의 300℃ 온도에서 수분의 제거가 불가하기 때문에 플락스의 제조과정에서 근본적으로 최소화하여야 한다.

플락스 제조는 아래 Fig. 1의 제조공정에 나타낸바와 같이 플락스의 원재료는 아크 안정제, 슬래그 형성제, 보호가스 발생제 그리고 용접물성을 향상시키는 각종의 화합물로서 건조 상태에서 균일하게 혼합한 다음 바인더인 물유리를 고압분사하면서 미세한 분말 형태로 응결시켜 건조하고 적정온도로 소성과정을 지나 냉각한 후 사이즈를 선별하여 제품화 된다. 이 과정에서 원재료의 수분제거는 원재료 혼합(Dry Mixing)전에 탄산가스를 발생시키는 탄산염을 제외한 모든 재료를 1000℃의 고온 처리하는 과정을 거쳐 결정수를 제거하도록 하였다. 고온 처리한 결과 원재료의 0.21%정도 함유하고 있는 수분을 거의 제거할 수 있었다. 이는 용접용으로 사용되는 플락스 내부의 수분량을 0.21% 감소한 것으로 용접시 확산성 수소의 량을 감소시킬 수 있다.

3.2 저온 소결형 플락스의 제조

당사에서 사용되는 장호용접용 플락스는 소결형(Bonded Type)으로 제조온도에 따라 고온과 저온의 소결형 플락스로 구분되고 있다.

고온 소결형 플락스는 Fig. 1의 제조과정중 소성온도가 대부분 700℃이상의 높은 온도에서 처리하여 제조되고 있다. 이 방법은 플락스내에 함유하고 있던 수분과 일정량의 결정수도 제거할 수 있는 장점이 있어 용접시 확산성 수소의 유입을 방지할 수 있으나 현장성을 고려할 때 사용 중이나 보관 중에 흡수된 수분의 제거를 위하여 항상 건조로에서 충분히 건조되어야 하며 조금의 흡습에서도 용접부에 확산성 수소의 유입을 방지할 수 없는 단점이 있다. 특히 저온균열에 민감한

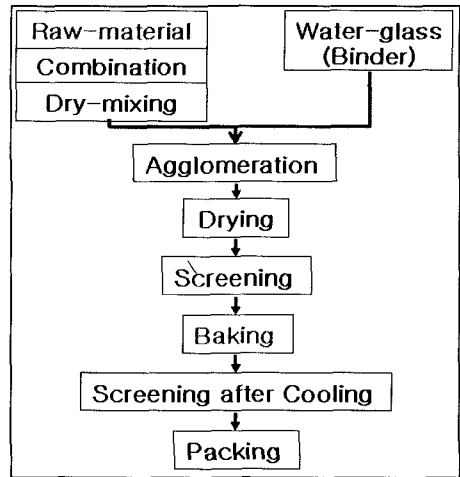


Fig. 1 Manufacturing process of SAW flux

높은 구속력을 갖는 후판의 용접 시공시 균열 발생이 예상되어 적용이 제한되고 있다.

저온 소결형 플락스는 600℃이하에서 저온 처리함으로써 일정량의 탄산염을 잔류하게 하여 어느 정도의 흡습에도 용접시 이들 탄산염의 분해로 발생하는 탄산가스(CO₂ Gas)의 분압 상승으로 확산성 수소의 용접부 유입을 방지할 수 있는 이점을 가지고 있어 후판의 용접시공에 유용하다. 그래서 최적의 저온 소결형 플락스 제조를 위하여 온도별 탄산염의 분해정도 평가와 함량별 탄산가스 발생량 그리고 확산성 수소량을 평가하였다.

3.2.1 소성온도에 따른 탄산칼슘(CaCO₃)분해도

플락스에 사용되는 탄산칼슘은 라임스톤(CaCO₃가 주성분)으로 고온에서 쉽게 분해하기 때문에 온도에 따라 분해정도를 평가하였다. Fig. 2는 그 결과를 도표화한 것으로 400℃에서 35%, 500℃에서 60% 그리고 700℃ 이상에서는 전량 분해됨을 보여주고 있다.

3.2.2 탄산칼슘 함량에 따른 탄산가스 발생량과 확산성 수소량

다음의 Table 2는 탄산칼슘(CaCO₃)을 제

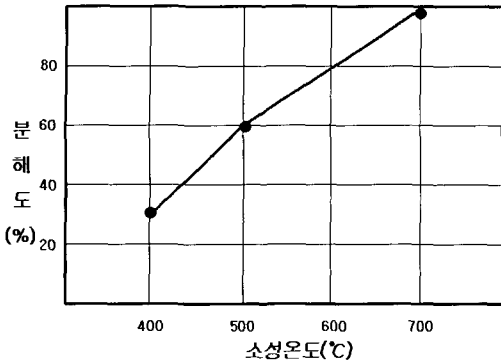


Fig. 2 CaCO₃ resolution rate according to flux manufacturing temperature

외한 플락스의 원재를 1000°C의 고온에서 수분을 제거한 후 탄산칼슘 함량별 소성온도별 잔류 수분량과 탄산가스 발생량 그리고 확산성 수소량을 평가한 데이터를 종합한 것이다.

Table 2의 소성온도 600°C에서 탄산칼슘 함량별(8, 12, 16, 20%) 플락스의 수분량과 탄산가스 발생량을 도표화 한 것이 Fig. 3으로 수분제거를 위하여 고온처리하지 않은 탄산칼슘(CaCO₃)이 많을수록 수분량은 증가하였으며 탄산가스 발생량도 같이 증가되고 있음을 보여주었다. 또한 작업성 및 용접성이 B 플락스와 동등 등급인 C 플락스에서도 유사한 탄산가스 발생량과 확산성 수소량을 보여주었다.

Fig. 4는 탄산칼슘 함량 10%에서 소성온도(480, 520, 580°C)를 달리하여 잔류수분과 탄산가스 발생량 그리고 확산성 수소량을 평가한 데이터를 도표화 한 것으로 낮은 소성온도에서는 잔류 수분량이 증가함을 보여주었으며 탄산가스 발생량도 증가되었다. 확산성 수소량에서는 잔류 수분량의 증가와 함께 증가되고 있으나 그 증가폭은 감소하고 있다. 이는 낮은 소성온도에서 탄산칼슘(CaCO₃)의 잔류가 많아짐에 따라 탄산가스 발생량이 증가하여 아크 주위의 탄산가스 분압이 높아져 확산성 수소의 유입을 어느 정도 차단하였기

Table 2 Diffusible hydrogen content with CaCO₃ content & flux manufacturing temperature

CaCO ₃ 함량	소성온도	잔류수분	CO ₂ 발생량	확산성 수소량
8(%)	600(°C)	0.02(%)	0.6(%)	2.7 (ml/100g)
10	480	0.12	3.2	6.2
~	520	0.08	2.3	5.1
~	580	0.05	1.3	3.8
12	600	0.03	1.3	2.7
14	580	-	2.3	2.9
16	600	0.05	2.2	2.6
19	580	-	3.2	2.6
20	600	0.06	2.4	2.3
~	600	0.06	3.0	3.1
(B플락스)	-	0.09	3.0	3.2
(C플락스)	-	0.07	2.5	3.1

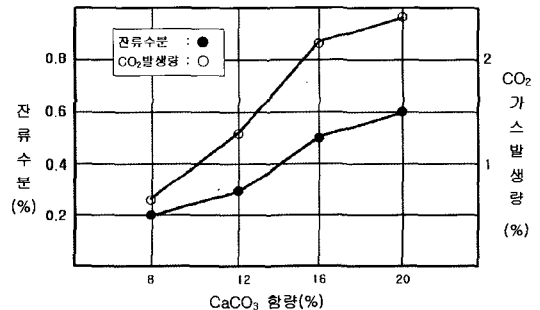


Fig. 3 CO₂ gas generation rate with CaCO₃ contents (Flux manufacturing temp. : 600°C)

때문으로 판단된다.

Fig. 5는 종합적으로 탄산칼슘 함량에 따른 탄산가스 발생량과 확산성 수소량을 나타낸 것으로 탄산칼슘 함량이 증가하면 Fig. 3에서 보여준 바와 같이 탄산가스 발생량은 증가된다. 이에 대하여 확산성 수소량은 상대적으로 감소하고 있는데 그 이유는 낮은 잔류 수분량과 Fig. 4에서 분석된 탄산가스 분압의 증가에 의한 결과로 판단된다.

수입자재인 B나 C 플락스는 탄산가스 발생량이 3.0, 2.5%로 평가되었는데 이는 본 실험에서 탄산칼슘 함량 10%일 경우 480°C 이

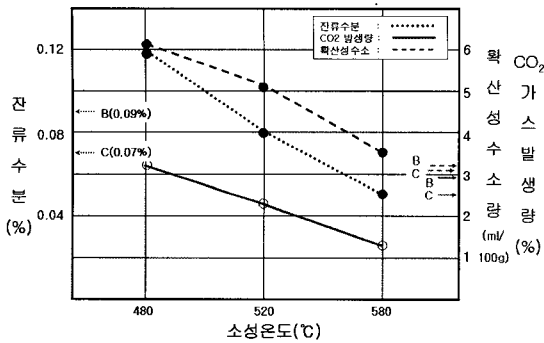


Fig. 4 CO₂ gas generation rate & diffusible hydrogen content with manufacturing temp. (CaCO₃ content : 10%)

하의 소성온도로 처리된 플락스이거나 14% 이상의 탄산칼슘 함량에서 580-600°C 처리로 얻어지는 결과와 유사하게 나타났다. 이들의 확산성 수소량에서 전자의 탄산칼슘 함량 10%, 480°C 소성처리의 경우, 6.2ml/100g으로 다소 많이 측정된 것은 0.12%의 많은 잔류수분의 결과로 판단되었으며, 탄산칼슘 함량이 14%, 580-600°C 소성처리의 경우에는 B, C 플락스를 사용한 용착부보다 더 우수한 결과로서 적은 양을 보여주고 있는데 이는 플락스내의 잔류수분량 관리에서 B 플락스 0.09%, C 플락스 0.07%에 비하여 0.05%이하로 최소화한 결과로 판단된다.

결과적으로 확산성 수소량의 유입을 최소화하기 위하여 탄산칼슘 함량을 증가하여 많은 탄산가스 발생량을 만들어야 하나 탄산칼슘이 16%를 초과하면 용접비드 표면에 포크마크의 형성 등으로 용접 작업성이 불량하다. 따라서 플락스내의 탄산칼슘 함량 범위는 14-16%가 적절한 것으로 평가되었으며, 플락스 제조를 위한 소성온도의 범위도 580-600°C로 평가되었다. 이러한 조건에 의하여 제조된 플락스는 초기에 가지고 있는 수분량이 0.05%, 탄산가스의 발생량이 2.2-2.3% 이었으며, 용접시 용접부의 확산성 수소량은 2.6-2.9ml/100g으로 평가되었다.

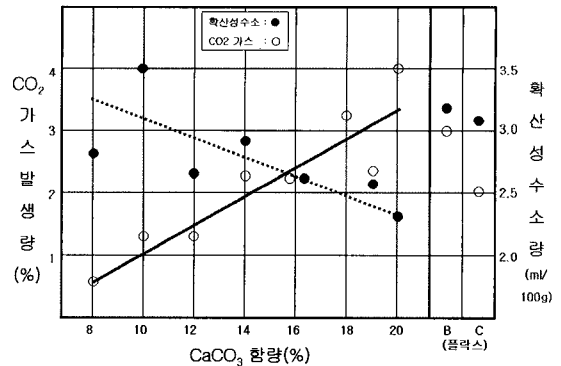


Fig. 5 CO₂ gas generation rate & diffusible hydrogen content with CaCO₃ contents (Flux manufactured temp. : 580, 600°C)

이는 기존 사용중인 용접재료의 확산성 수소가 3.2ml/100g인 B 플락스나 3.1ml/100g인 C 플락스를 사용한 용접부보다 우수한 결과를 보여주었다

3.2.3 개발품의 흡습 및 확산성 수소량 평가

상기 결과에 의하여 확산성 수소량을 최소화 할 수 있는 제조방법에서 초기 탄산염을 제외한 원재료를 1000°C에서 결정수를 제거하고 탄산가스 발생물인 탄산칼슘(CaCO₃)을 16% 첨가하여 바인더와 함께 응결시킨 후 소성온도를 600°C로 하여 새로운 D 플락스를 제조하였다. 이렇게 제조된 플락스는 현장 적용성을 위하여 대기로부터의 내흡습성이 우수하여야 작업성에서도 우수한 결과를 얻을 수 있기 때문에 고온 다습한 항온항습조 내에서 방치시간에 따른 흡습량과 흡습상태에서의 확산성 수소량을 평가하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

이들 평가는 내부 분위기(30°C, 80%)가 동일한 조건인 항온 항습조내에서 0, 1, 3, 5, 7일간 경과한 후 B와 D 플락스의 흡습을 및 흡습상태에서 용접시 확산성 수소량을 비교 평가하였다.

Fig. 6은 비교평가 데이터를 도표화한 것으로 플락스를 300°C에서 1시간 건조한 직후

Table 3 Diffusible hydrogen content with elapsing time in atmosphere chamber

납치 경과	D 플락스				B 플락스			
	흡습전/후 무게(g)	무게 감소량	흡습율 (%)	확산성 수소량 (mL/100g)	흡습전/후 무게(g)	무게 감소량	흡습율 (%)	확산성 수소량 (mL/100g)
(1시간 건조)				3.1				3.5
1일	348.60 349.37	0.77	0.2209	-	341.68 343.02	1.34	0.3922	-
3일	337.01 338.23	1.22	0.3620	12.797	343.78 347.51	3.73	1.0850	23.633
5일	343.62 345.39	1.77	0.5151	19.479	339.48 344.22	4.74	1.3963	24.228
7일	343.61 346.25	2.64	0.7683	-	335.91 341.55	5.64	1.6790	-

항온항습조 분위기 : 30℃, 80%

평가한 경우, B 플락스가 3.5ml/100g, D 플락스가 3.1ml/100g으로 아주 양호한 값을 나타내었다. 이는 앞서 평가한 Data보다는 미미하나마 조금 증가된 것은 실험적 오차로 판단된다. 시간의 경과에 따라 흡습량이 지속적으로 증가하지만 새로 개발된 D 플락스가 기존의 B 플락스에 비하여 1/2 수준으로 평가되었다. 확산성 수소평가에서도 흡습정도에 따라 비례적으로 증가됨을 보여주었다. 이러한 결과는 현장 적용성에 직접적인 영향을 미치는 내흡습 특성으로 D 플락스가 우수한 것으로 판명되었다.

또한 당사의 40mm 두께 미만의 판재에 사용되는 A 플락스와 개발된 D 플락스를 비교 평가하였는데 대기에서 1일 경과 후 흡습율이 D 플락스가 0.22%로 A 플락스의 0.8%에 비하여 약 25% 정도 우수한 내흡습성을 보였다.

3.3 내균열성 평가

용접재료의 내균열성 평가는 다양한 방법이 있으나 본 연구에서는 시험실에서 평가 가능한 Fig. 7의 GBOP 시험과 현장의 높은 구속력을 고려한 Fig. 9의 저온균열 시험방법을 선정하여 용착금속의 내균열성을 기존 적용재료(B 플락스)와 비교 평가하였다.

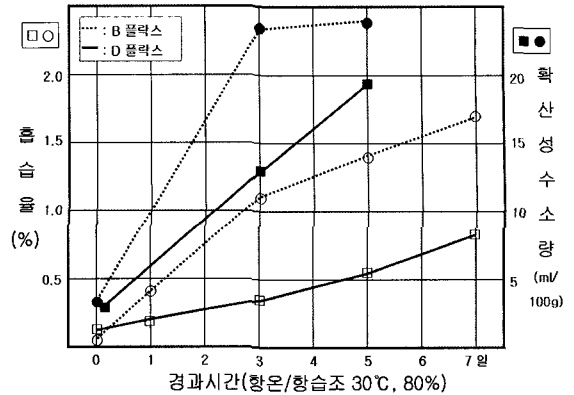
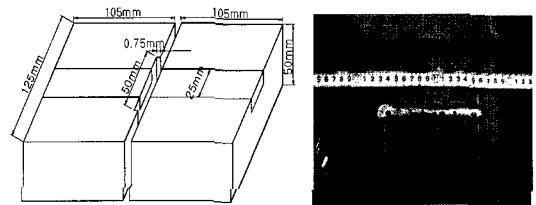


Fig. 6 B, D diffusible hydrogen contents with elapsing time in atmosphere chamber



A : schematic dia. B : after welding
Fig. 7 GBOP test specimen

3.3.1 GBOP(Gap Bead On Plate) 시험

GBOP 시험은 시편의 0.75mm의 간격(Gap)부분에서 용착부의 균열 진전현상으로 균열 감수성을 평가하는 방법이다. 용접재료는 사용 전 건조로에서 300℃로 1시간 건조 후 사용하였으며 시편은 EH36, 두께55mm 판재로서 용접조건은 확산성 수소량 평가방법과 동일하게 하였다.

평가온도는 산소-에틸렌 토치에열로서 25℃에서부터 100℃까지 4단계로 평가하였다. 시편 형상은 Fig. 7-A와 같으며 용접 후 시편은 Fig. 7-B와 같다. 결과는 Fig. 8의 파면 사진과 같이 균열이 없이 모두 양호하였다.

3.3.2 저온균열 시험

앞서 수행한 GBOP의 저온균열 평가는 일









온도	시험 온도			
	25℃	50℃	75℃	100℃
D 플럭스 (개발품)				
B 플럭스				

Fig. 8 Results of GBOP test according to preheating temperature

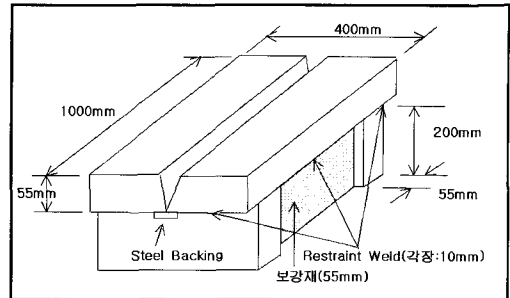


Fig. 9 Schematic diagram of a restricted weld specimen

반적인 시험실 규모의 용접재료 평가방법으로 저온균열 발생의 인자인 구속조건과 냉각속도는 실 현장의 용접조건과는 큰 차이가 있어 실구조물에 적용하는 데는 한계가 있다. 그래서 요시노리 이토(Yoshinori Ito) 등에 의해 제안된 방법으로 현장에 가까운 강한 구속력과 냉각속도를 갖도록 Fig. 9와 같이 EH36 55mm의 TMCP 강재로서 용접 평가하였다. 보강재도 모두 55mm 두께의 동일한 강재를 사용하였다.

용접은 H14(HWC 제품명) 와이어와 조합으로 예열은 없었으며 충전온도는 현장 용접 시공조건에 가까운 50℃ 이하로 하였다. 용접조건은 600암페어, 34볼트, 그리고 용접속도는 35-40cm/min.로서 약 35kJ의 입열이었다. 동일한 조건에서 저온 내균열성 평가를 위하여 두 시편 a, b를 Fig. 10과 같이 연속적으로 용접할 수 있게 하였으며 사용된 플럭스는 대기중에서 3일 동안 방치한 다음 용접하였는데 이때의 흡습율은 30%, 80% 조건인 항온 항습조내에서 1-2일 경과한 후의 흡습율과 비슷한 값으로 B 플럭스는 0.65%, D 플럭스는 0.22%를 보여주었다.

용접부의 균열발생 여부평가는 용접 후 48시간 경과한 다음 초음파탐상으로 용접부를 조사하였는데 두 시편 모두 양호한 결과로 나타났으며 용접부 단면(Fig. 11) 조사에서도

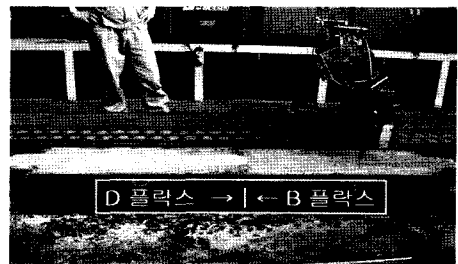


Fig. 10 Welding of restricted test specimen

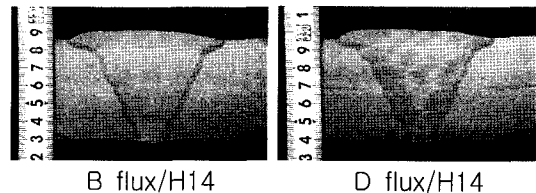


Fig. 11 Macro specimen

양호한 적층 형상을 보였다.

3.4 용착금속의 화학성분 및 물성평가

저온균열 시험평가로 사용되었던 시편을 활용하여 용착금속의 화학성분 분석 및 기계적 성질을 평가한 결과를 Table 4, 5, 6에 나타내었다.

3.4.1 용착금속의 화학성분

Table 4에서 개발품의 D 플럭스와 기존품의 B 플럭스를 사용한 용착금속부의 화학조

Table 4 Chemical compositions of weld metal(%)

종류	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Ti	Nb	B
A 플락스	0.10	0.14	1.31	0.024	0.018	1.13	0.04	0.03	0.07	0.01	0.015	0.008	30ppm
B 플락스	0.09	0.19	1.58	0.028	0.013	0.03	0.04	0.03	0.06	0.01	0.02	0.006	20ppm
D 플락스	0.08	0.29	1.56	0.020	0.012	0.03	0.04	0.03	0.06	0.01	0.02	0.006	47ppm

성을 비교한 결과 보론(B)을 제외한 대부분의 성분에서 유사한 함량을 가지고 있었다. 함유 원소중 보론은 주로 인성향상을 위하여 미량 첨가하나 개발 제품에는 A, B 플락스보다 많이 함유하고 있었다. 보론은 인성향상에 효과적이기는 하나 30ppm 이상 함유할 경우 인성향상의 효과는 둔화되고 균열발생 민감성은 급격히 증가하는 것으로 2000년도 플락스 코어드 아크 용접(Flux Cored Arc Welding) 품질향상 연구에서 평가된바 있어 최대 30ppm으로 관리되고 있다.

판재 두께 40mm 이하에서 사용되고 있는 A 플락스의 화학성분과 비교에서는 니켈(Ni) 성분을 첨가하지 않은 대신 망간(Mn) 함량을 0.25% 정도 증가시켜 인성저하의 요인을 보완하였음을 보여주고 있다.

3.4.2 용착금속의 기계적 성질

기계적 성질은 Table 5에 나타내었는데 새로 개발된 플락스로 용접된 용착금속의 인장강도, 항복강도, 신율평가에서 규정에 만족하였으며 충격인성에서 AWS 규정에는 물론 -70℃에서도 우수한 특성을 보여주고 있다.

그리고 CTOD 시험에 의한 인성평가에서도 -10℃에서 δ값이 평균 0.91로 양호한 특성을 보였다. 이때 사용한 강재는 83mm 두께의 TMCP 강재였으며 용접조건은 최대 입열 40kJ의 조건으로 하였다.

3.4.3 용접부 경도

Table 6은 용착금속부의 경도를 Hv10kg으로 측정결과이다.

Table 5 Mechanical properties of weld metal

종류	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	E (%)	충격인성(J)			비고
				온도(℃)	1차(Ave.)	2차(Ave.)	
B 플락스	561	617	24	-60	120	115	-
				-70	114	109	
D 플락스	574	624	25	-60	141	120	개발품
				-70	92	124	
(AWS Spec)	≥400	480-660	≥22	-62	≥27		

Table 6 Hardness of weld metal (Hv10kg)

플락스 종류	모재 (Base Metal)	열영향부 (HAZ)	용착금속 (Weld Metal)
B플락스	184	212	200
D플락스	186	220	206

대부분의 저온균열은 경도가 높은 열영향부에서 주로 발생하고 있으나 최근 TMCP 등과 같이 저합금으로 제조된 고강도의 강에서는 열영향부보다는 오히려 용착금속부에서 저온균열이 더 쉽게 발생된다고 알려져 있다. 후판의 TMCP 판재에 A 플락스를 사용하였을 경우, 본 실험에서와 같이 경도는 오히려 열영향부에서 더 높게 측정되었지만 경도가 낮은 용착금속부에서 균열이 발생되었다.

이러한 결과는 평가된 플락스의 용접부 경도의 차이가 작아 균열발생의 요인이 되지 않고 용착금속내에 잔류되는 확산성수소의 영향이 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

3.4.4 용접시공 기법개발

1) 용접 작업성

신개발품인 D 플락스의 용접작업성은 구속 균열시험 평가에서 B 플락스와 동일한 조건으로 용접 아크성, 슬래그 박리성, 비드외관 등을 평가하였는데 결과는 우수하였으며 상호 유사한 작업특성을 보였다.

2) 최적 용접조건 선정

최적 용접조건은 Table 7과 같이 모든 영역에서 유사한 전류, 전압의 특성을 보였다.

Table 7 Optimum welding condition

용접 재료	AWS Class	전극	와이어 직경 (mm)	전류 (Amp)	전압 (Volt)	용접속도 (cm/min)
B 플락스 /H14	F7A8 /EH14	AC	4.8	650 -800	32-36	35-40
D 플락스 /H14	F7A8 /EH14	AC	4.8	600 -800	30-36	35-45

4. 결론

본 시험결과를 통하여 강재의 두께가 40mm를 초과하는 판재의 잠호용접 시공에서 나타나는 저온균열의 발생을 피하기 위하여 확산성 수소의 유입을 극소화하여야 한다. 이는 플락스의 제조과정에서 첫째, 플락스에 사용되는 탄산염 화합물을 제외한 원재료를 고온 처리하여 플락스내 잔류수분을 최소화하며, 둘째, 탄산염을 함유한 플락스의 최종 소성온도는 탄산염 분해방지를 위하여 600℃ 이하로 저온 처리하여야 한다.

그리고 최종적으로 개발된 용접재료의 시공기법 개발과 적용평가는 55mm 두께의 판재를 이용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 개발된 용접재료(플락스)는 기존 사용중인 용접재료와 비교 평가한 결과, 내흡습성은 우수하였으며 용접 아크성, 슬래그 박리성, 비드 외관형성 등의 작업성은 유사한 경향으로 양호하였다. 그리고 최적용접 시공조건에서도 유사하였다.
- 2) 용접부의 물성 평가에서는 용접부 충격 인성이 -70℃에서 평균 124J, CTOD δ값이 -10℃에서 0.91 그리고 확산성 수소량이 3.2ml/100g로 우수하였다.

향후 선박용 강재의 다층 용접에 적용되는 박판용 용접재료인 A 플락스/H14 뿐만 아니라 40mm이상의 후판에 적용되는 B 플락스/H14의 용접재료들은 모두 D 플락스/H14로 대체함으로써 단일화하여 재료비 절감 및 품

질향상에 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 최기영, 김광수, 김찬, 구연백, "FCAW 용접품질 향상연구" HHI 기술개발본부 산업기술연구소 일 반과제 2000.
- ANSI/AWS D1.1-94, Structural Welding Code - Steel, Guideline on alternative method for determining preheat, Appendix XI
- American Welding Society, Welding Handbook, Vol.1(8th), 1987.
- ASM Handbook Committee, Metal Handbook(9edition) Vol6, 1973.
- Bailey, N., Wright M. D., "Weldability of high strength steels", Welding and Metal Fabrication, 1993.
- Eiji Takahashi and Kenji Iwai, "Relations between occurrence of the transverse cracks and parameter of residual stress and diffusible hydrogen concentration", Journal of JWS, Vol48(10), 1979.
- Naoki Okada, "Hydrogen induced cracking susceptibility of weld metal", IIW, Doc. No. 11-IO72-86, 1986.
- Takashi Yatake, Nobutaka Yurioka, "Studies on delayed cracking in steel weldments", Journal of JWS, Vol50(3), 1981.
- T.Yatake, N.Yurioka, "Study on delayed cracking in steel welding, Report No3", J. of JWS, Vol.50(1981, No.3)
- Yoshinori Ito, Mutsuo Nakanishi, "New submerged arc welding process for thick plates" -Prevention of transverse weld cracking in thick weldment-, The Sumitomo Search No. 25 May 1981.



< 최 기 영 > < 김 찬 > < 김 영 필 >