

교량용 강재 박스의 현장 제조시 셸프실드 플럭스코어드 아크용접의 적용 타당성에 대한 연구

황용화^{1*} · 고진현² · 오세용³

A Feasibility Study on the Application of Self-Shielded Flux Cored Arc Welding Process for the On-Site Steel Bridge Box Fabrication

Yong-Hwa Hwang^{1*}, Jin-Hyun Koh² and Se-Yong Oh³

요 약 본 연구에서는 구조용강 SM520을 사용하여 교량용 박스 제작시 플럭스 코어드 아크용접법에서 가스실드방식과 셸프실드방식의 두 공정으로 제작된 용접부를 건전성, 기계적 성질 및 미세조직에서 비교하였다. 그 결과 두 용접 프로세스에 의해 제작된 용접부들은 매크로 조직 및 비파괴 검사 결과 건전성이 입증되었고, 항복 및 인장강도가 각각 462~549 MPa와 548~640 MPa였고, CVN 충격치는 -20°C에서 요구값인 40J을 충족하였다. 결과적으로, 고속철도나 고속도로 건설시 사용되는 교량용 SM520강 박스 제조시 고소 및 강풍 조건하에서 용접할 때 셸프실드 아크용접법은 기존의 가스실드 아크 용접법과 비교하여 대등한 용접 특성들을 보였기 때문에 현장 시공시 적용 타당성이 있다고 사료된다.

Abstract A feasibility study on the application of self-shielded flux cored arc welding to the on-site SM520 steel bridge box fabrication for express trains and high way construction instead of gas-shield flux cored arc welding was conducted in terms of weld soundness, mechanical properties, toughness and microstructures. All welded specimens made with the self-shielded FCAW process were tested by magnetic particle and ultrasonic techniques and they were found to be sound. All multipass weld specimens made with both self-shielded and gas-shielded FCAW processes showed yield and tensile strengths of 462~549 MPa and 548~640 MPa, respectively. The impact values of Charpy V-Notch weld specimens also met with the required value of 40J at -20°C. The hardness values of the top area of weldments were higher than those of the bottom area because of higher residual stresses in the near surface. It was found that welding characteristics of SM520 steel by the on-site welding conditions with self-shielded FCAW showed almost equivalent to those by gas-shielded FCAW in terms of sound welds, mechanical properties and microstructure.

Key Words : SM520 steel, Self-shielded FCAW, Gas-shielded FCAW, Mechanical properties, Weld metal microstructure, HAZ, Ultrasonic testing and Magnetic particle testing

1. 서 론

최근 고도의 산업발전에 따라 교량, 구조물, 선박, 산업설비 등이 대형화 되는 추세이며 이에 따라 용접구조물도 대형화 되고 있다. 이러한 대형구조물의 제작은 공장부지의 대단위화 필요성과 도로 여건상 운송의 곤란함을 야기하고 있다. 따라서 대형구조물을 분할 제작한 블록(block)을 현장으로 운송한 후 용접할 필요성이

증가하고 있다. 심지어 50 m 이상의 고소에서도 용접 작업을 할 경우가 있고, 안전과 용접품질을 위해 방풍 시설이 필요하고 그리고 실드가스 공급용 관의 장대화에 따른 가스 순도저하 등의 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 용접시 실드가스를 사용하지 않고 자체적으로 가스가 발생되어 용접부를 실딩(shielding)하는 셸프실드 플럭스 코어드 아크용접(Self-shielded Flux Cored Arc Welding, FCAW)의 사용 필요성이 증대하고 있다[1].

고속철도나 고속도로의 교량건설 및 대형 강구조물 제작시 피할 수 없는 고소와 해안지역 등 작업시 강한 바람의 영향 아래서 용접을 하여야 한다. 이때 가스실

¹한국원자력연구소 핵주기기시험부

²한국기술교육대학교 신소재공학과

³충남대학교 기계공학과

*교신저자 : 황용화(hyh@kaeri.re.kr)

드 플럭스 코어드 아크용접(Gas-shielded Flux Cored Arc Welding, FCAW)에서는 실드가스 실린더의 공급 및 운반, 설치, 순도저하 등의 어려움이 대두된다. 따라서 본 연구에서는 현재 강 교량용 강재 박스 제작시 현장에서 많이 사용되고 있는 가스실드 FCAW 공정과 비교하여 현장용접에 유리할 것으로 판단되는 셀프실드 플럭스 코어드 아크용접[1-3]에 의한 용접 특성을 비교하여 현장 적용 타당성을 조사하는 것이 목적이다. 이를 위하여 구조용강 SM520을 가스실드용접과 셀프실드 용접의 두 공정에 의해 제작된 용접부를 건전성, 기계적 성질 및 미세조직 등의 용접특성으로 비교 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 용접재료

본 실험에 사용된 모재는 압연 구조용강 SM520으로 그 화학조성과 탄소당량은 표 1(a)와 같으며, 실험에 사용된 용접 와이어는 AWS A 5.29 규격에 따라 E71T8-K6를 사용하였고, 화학조성은 표 1(b)와 같다.

2.2 시편용접

용접은 열기성 계열인 직경 2 mm의 가스실드 플럭스 코어드 아크용접 와이어를 사용하여 가로 230×세로 760×두께 35 mm의 모재 강판에 가공된 홈을 채우는 것이었다. 각 용접시편은 표 2와 같은 조건으로 용접되었다. 시편번호 1은 강판에 50°로 가공된 양면 홈을 수직 용접자세에서 입열량 3.6~3.8 kJ/mm으로 상하 각각 4와 5패스로 9패스가 용접되었고, 시편번호 2는 같이 강판에 35°로 가공된 일면 홈을 아래보기 용접자세에서 입열량 0.9~1.7 kJ/mm으로 사용하여 25패스가 용접되었고 그리고 시편번호 3은 강판에 35°로 가공된 일면 홈을 입열량 1.9~2.7 kJ/mm으로 수직용접자세에서 16패스가 용접되었다. 용접전 예열온도는 110°C 이상으로, 패스간 온도는 평균 150°C 이상 220°C 이하를

표 2. 시편의 용접조건에 따른 용접변수

| Specimen No | Groove angle & shape | Welding position | Heat input (kJ/mm) | Number of pass |
|-------------|----------------------|------------------|--------------------|----------------|
| 1 | 50°, D.V | vertical | 3.6~3.8 | 9 |
| 2 | 35°, S.B | flat | 0.9~1.7 | 25 |
| 3 | 35°, S.B | vertical | 1.9~2.7 | 16 |

Note : D.V(double V groove), S.B(single bevel groove)

유지하였다.

용접 후 용접부의 건전성 여부는 초음파탐상 검사로 수행되었고 지연균열의 발생여부는 용접완료하고 48시간 경과한 후 실시하였다[9]. 또한 용접부 표면비드의 건전성은 자분탐상검사로 실시하였다.

2.3 용접부 건전성과 기계적 시험 및 미세조직 검사

용접 완료 후 초음파탐상 및 자분탐상검사로 용접부의 건전성 시험을 수행하였다. 그리고 건전성이 있다고 판명된 용접부는 그림 1과 같이 인장시험, 충격시험과 굽힘시험 시편을 가공하여 준비하였다. 용착금속의 기계적 성질과 용접품질을 비교하기 위하여 종방향 인장 시편은 길이 140 mm, 게이지길이 50 mm와 직경 12 mm의 환봉으로, 횡방향 인장시편은 두께 25 mm, 게이지 길이 20 mm의 판상으로 가공하여 준비하였다. 인장 시험은 100톤급 만능시험기를 사용하여 크로스헤드 속도 5 mm/min로 수행되었다.

용착금속과 열영향부의 인성을 조사하기 위하여 용접부 표면으로부터 2 mm 깊이의 V형 노치를 표준형태의 충격시편(10×10×55 mm)을 각각 3개씩 가공하여 -20°C로 유지된 액조 내에서 10분 이상 유지한 다음 꺼내어 5초 이내 충격시험을 수행하였다.

경도시험은 매크로조직검사에 사용되었던 시편을 비커스 경도시험기로 상하부로부터 각각 표면직하 2 mm 거리에서 열영향부는 0.5 mm 간격으로, 모재는 1mm

표 1. (a) SM520강과 (b) E71T8-k6 와이어의 화학조성

| C | Si | Mn | P | S | SAL | Cr | Ni | Cu | V | Mo | B | Pcm | Ceq |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|-----|------|-------|----|----|------|------|
| 0.14 | 0.33 | 1.39 | 0.018 | 0.004 | 0.029 | 0.01 | 0.2 | 0.21 | 0.004 | TR | TR | 0.24 | 0.39 |

$$Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + V/14 + Ni/40 + Mo/4$$

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + (5*B)$$

(b)

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| 0.044 | 0.17 | 9.82 | 0.005 | 0.003 | 0.15 | 0.81 | 0.015 | 0.636 |

간격으로 측정하였으며, 사용하중은 5 kgf였고 압입 유지시간은 15초였다.

셀프실드 FCAW 용접부와 가스실드 FCAW 용접부를 용접방향에 직각으로 절단한 후 밀링머신으로 절단면을 연삭하고 연마한 후 2% 나이탈 용액으로 부식하고 광학현미경으로 미세조직을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부 건전성 검사

본 실험에서 준비된 3 종류의 용접시편을 셀프실드 FCAW로 용접 완료 후 초음파 검사로 용접부 내부의 결함을 탐상한 결과 시편 모두 결함이 없었고 또 자분 탐상검사로 용접 비드 표면을 검사한 결과 결함이 없었다. 그리고 그림 2, 3과 4는 이들 시편을 절단, 연마 및 부식하여 용접부의 매크로조직 사진이다. 그 결과 3 종류의 용접시편에서 결함이 없었다. 그리고 용접시편으로 제작된 굽힘시편을 굽힘지그 위에 놓고 인장시험기로 압축한 결과 그림 5의 굽힘시험된 시편과 같이 3개의 시편 모두 지그에서 굽힘이 허용된 범위에서 파괴가 발생하지 않았다.

이와 같이 셀프실드 FCAW에 의해 제작된 3 종류의

용접부를 초음파 탐상 검사에 의한 용접부 내부 검사와 자분 탐상에 의한 용접비드 및 용접부 매크로조직 검사

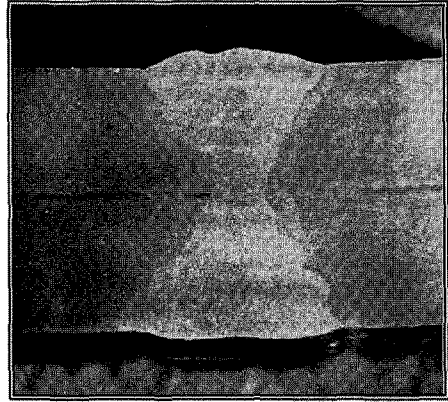


그림 3. 용접시편의 매크로조직 No.2.

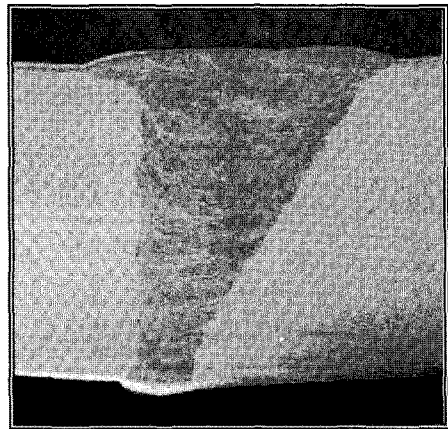


그림 4. 용접시편의 매크로조직 No.3.

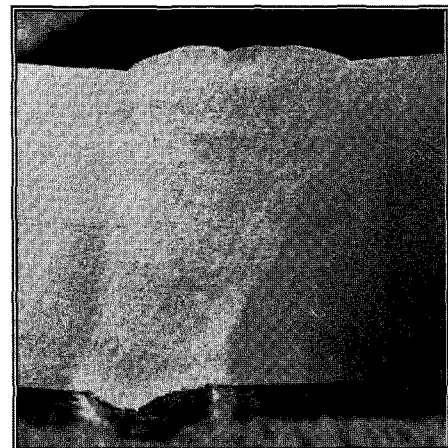


그림 5. 굽힘, 인장, 충격시험 후의 용접시편

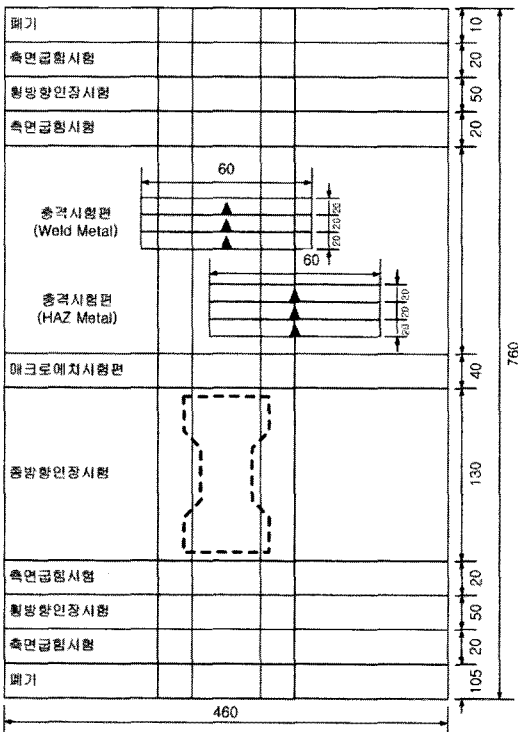


그림 2. 용접시편의 매크로조직 No.1.

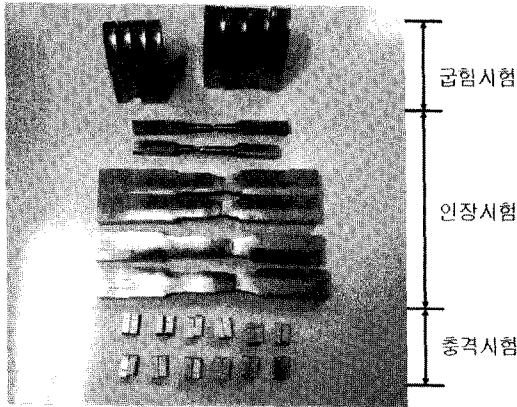
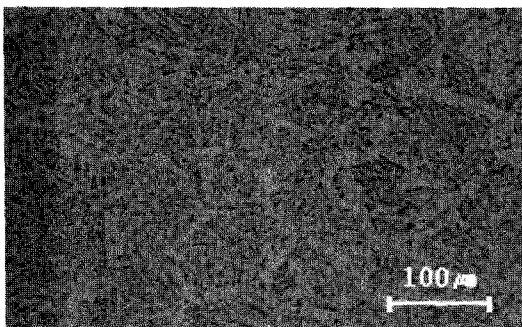


그림 5. 굽힘, 인장, 충격시험 후의 용접시편

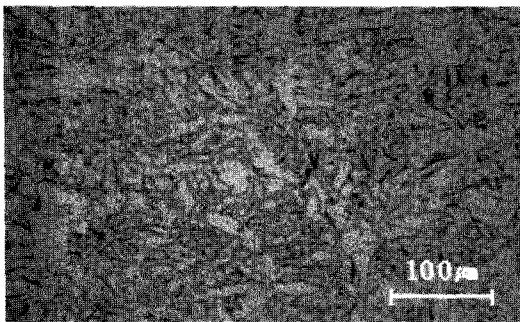
뿐만 아니라 용접부의 굽힘시험 결과 모두 기계적 성질에 영향을 미칠만한 결함이 없이 양호하여 용접부의 건전성이 입증된 것으로 사료된다.

3.2. 미세조직

그림 6(a)와 그림 6(b)는 각각 가스실드 FCAW와 셀

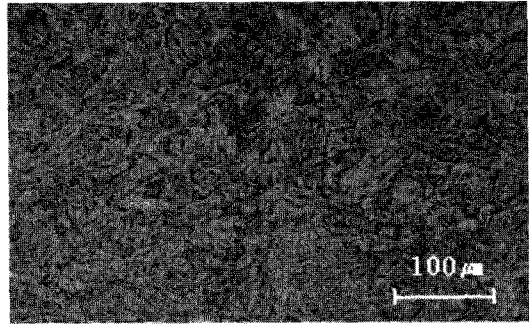


(a)

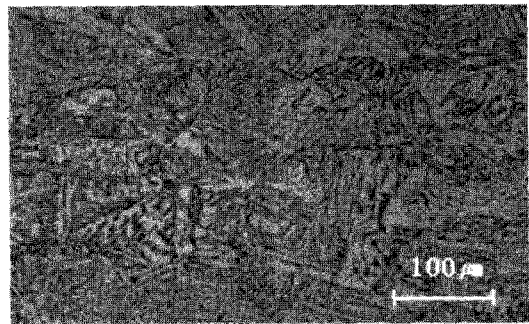


(b)

그림 6. 용접부의 미세조직 (a) 가스실드 FCAW (b) 셀프실드 FCAW



(a)



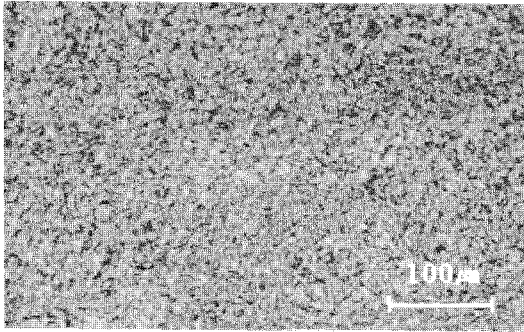
(b)

그림 7. 열영향부의 미세조직 (a) 가스실드 FCAW (b) 셀프실드 FCAW

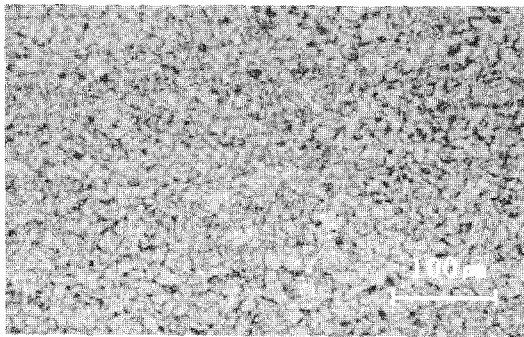
프실드 FCAW에 의한 용접부 미세조직을 보여주고 있다. 가스실드 FCAW 용접부의 미세조직은 구오스테나이트 입계를 따라 생성된 입계 페라이트(grain boundary ferrite, GBF)와 이 입계 페라이트에서 입내 쪽으로 생성된 사이드플레이트 페라이트(side plate ferrite, SPF)가 많이 존재하고 있다[7, 8]. 그리고 입계에는 폴리곤알 페라이트(polygonal ferrite, PF)도 생성되었다. 한편 가스실드 FCAW에 의한 용접부 미세조직은 약간 조대한 폴리곤알 페라이트와 입계 페라이트들이 생성되었고 구 오스테나이트 입내에는 페라이트들이 서로 얹혀 있는 형상을 하고 있는 아시쿨러 페라이트(acicular ferrite, AF)도 존재하고 있다[9, 10].

그림 7(a)와 그림 7(b)는 각각 가스실드 FCAW와 셀프실드 FCAW에 의한 열영향부의 미세조직으로 모두 용접시 온도가 오스테나이트 영역으로 도달하였다가 다소 빠른 냉각속도에 의한 페라이트에 제2상이 생성된 (ferrite with second phase), 침상형태의 페라이트, 베이 나이트 조직과 베이 나이트적 페라이트(banitic ferrite)가 생성되었다[10, 11].

그림 8(a)와 그림 8(b)는 다층용접에서 후속패스가 선행패스를 제거한 결과 생성된 미세조직으로 입자가



(a)



(b)

그림 8. 다층용접에서 결정립이 미세화된 영역의 미세조직 (a) 가스실드 FCAW (b) 셀프실드 FCAW

등축정에 가까운 재결정된 미세한 결정립을 보여주고 있다. 이러한 미세조직의 형성으로 용접 열영향부의 인성이 용접부의 인성향상에 기여한다고 알려져 있다[8].

3.3 인장시험과 굽힘시험

표 3은 셀프실드와 가스실드 FCA 용접부의 종방향 인장시험의 결과로 얻어진 인장강도와 항복강도이다. 그림 10은 이들 시험결과 파손된 시편들을 보여주고 있다. 종방향 인장시험에서 셀프보호 용접부의 항복강도는 511~521 MPa이고, 인장강도는 611~640 MPa, 단면

표 3. 용접시편의 종방향 인장시험결과

| Specimen No | Shielding | Mechanical property | | | |
|-------------|-----------|---------------------|---------|-------|-------|
| | | YS(Mpa) | TS(Mpa) | El(%) | RA(%) |
| 1 | self | 511 | 640 | 27 | 60 |
| | | 507 | 605 | 28 | 62 |
| 2 | self | 521 | 623 | 27 | 66 |
| | | 525 | 627 | 26 | 63 |
| 3 | self | 519 | 611 | 25 | 59 |
| | | 505 | 602 | 27 | 60 |

표 4. CVN의 인장시험 결과(Joule at -20°C)

| Specimen No | Location of notch | Self-shielding | CO ₂ gas shielding |
|-------------|-------------------|----------------|-------------------------------|
| 1 | WM | 89 | 93 |
| | HAZ | 221 | 240 |
| 2 | WM | 53 | 60 |
| | HAZ | 203 | 180 |
| 3 | WM | 74 | 75 |
| | HAZ | 107 | 110 |

수축률은 59~66%, 연신률은 25~27%로 양호하였고, CO₂ 가스실드 용접부의 항복강도는 505~525 MPa, 인장강도는 605~627 MPa, 단면수축률은 60~63%, 연신률은 26~28%로 두 조건에 의한 용접부 모두 비록 다소의 용접패스수에는 차이가 있었지만 항복강도, 인장강도, 단면수축률 및 연신율의 값의 범위가 거의 비슷하였고 양호하였다. 따라서 CO₂ 가스실드 용접부와 셀프실드 용접부의 인장강도와 항복강도에서 거의 대등한 값을 가졌음을 확인할 수 있었다.

3.4 충격시험

표 4는 용접부와 열영향부에 노치를 가공하여 수행한 샤르피 충격시험 결과이다. 충격시험 특성상 편차는 있지만 -20°C에서 셀프실드 및 가스실드 FCA 용접부의 평균 충격치이다. 셀프실드 용접시편 1, 2와 3의 용접부의 충격치는 각각, 89, 53과 74J이고, 가스실드 용접시편 1, 2와 3의 용접부의 충격치는 각각 93, 60와 75J이다. 용접부의 충격치에서 이와 같은 차이는 용접패스 용착시 사용한 입열량이 표 2와 같이 시편번호 1, 3과 2 순으로 낮아 용접 후 용접금속의 냉각속도가 컸기 때문에 경한 용접미세조직이 더 증가한 것으로 사료된다.

그리고 셀프실드 용접시편 1, 2와 3의 열영향부 충격치는 각각 221, 203과 107J이고, 가스실드 용접시편 1, 2와 3의 열영향부 충격치는 240, 180과 110J이다. 열영향부는 평균 충격치가 용접부의 충격치보다 열영향부가 훨씬 높다. 이것은 용접부가 열영향부보다 더 취약한 것으로 이미 용접미세조직에서 고찰한 바와 같이 다층패스 용접에서 선행 용접부가 후행 용접부 용착시 적용된 용접열에 의해 재가열되어 미세조직이 미세화(refined)되기 때문이다. 그러나 용접부와 열영향부 모두 -20°C에서 충격인성 40J 이상을 요구하는 규격 요구치를 모두 만족하였다. 같은 용접조건으로 된 셀프실드와 가스실드 FCAW에 의한 용접부와 열영향부의 충격인성은 비슷한 결과를 얻었다.

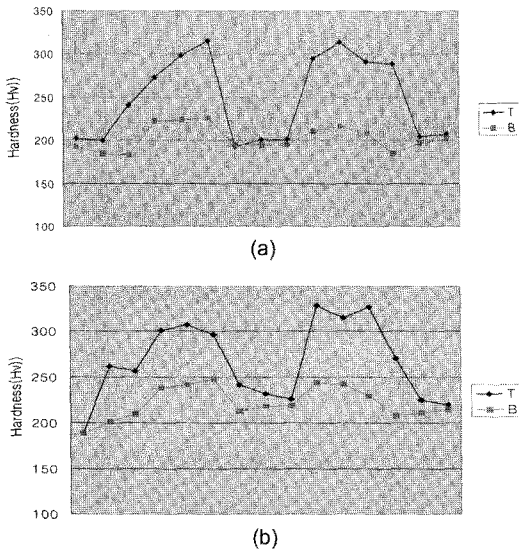


그림 9. 용접금속의 경도시험 결과

3.5. 경도시험

그림 9는 모재, 열영향부와 용접금속의 경도시험결과를 보여주고 있다. 경도치는 모재 180~210 Hv, 열영향부 220~320 Hv, 용접금속 210~240 Hv 범위를 보여주고 있으며 열영향부가 용접금속보다 경도가 높다. 이것은 이미 용접부 미세조직 사진에서 고찰한 바와 같이 조대한 페라이트 입자의 용접금속의 미세조직과 비교하여 용접부에 인접한 열영향부의 미세조직이 경한 배이나이트, 제2상 페라이트(ferrite with second phase)와 사이트플레이트(비드만스테텐) 페라이트가 생성되었기 때문으로 생각된다.

그리고 다층용접부에서 용접패스수가 더 많았던 상부 용접표면쪽이 용접패스수가 적었던 하부 용접표면쪽보다 경도가 낮다. 이것은 상부표면이 하부표면보다 더 높은 잔류응력이 생성되었기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고속전철과 고속도로건설시 교량용 박스 제작시 SM520 구조용 강재를 사용하여 셀프실드 FCAW로 고소와 강풍 등의 현장에서 적용가능성을 조사하기 위해 수행되었다. 이를 위해 셀프실드 FCAW를 실드가스 FCAW 프로세스와 용접특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 용접프로세스에 의한 용접부는 비파괴 검사와 굽힘시험 및 인장시험 결과 건전성은 우수하였고 용접금속의 인장강도, 항복강도 및 연신률 등 기계적 성질

이 거의 대등하였으며, 인성도 -20°C에서 요구되는 최소 충격치 40J 보다 훨씬 높았다.

2. 셀프실드 및 가스실드 FCAW 프로세스에 의한 용접부의 미세조직은 모두 입계 페라이트와 사이트플레이트 페라이트로 구성되었으나 셀프실드 FCAW에 의한 용접금속에서 미세조직이 가스실드 FCAW에 의한 용접금속의 미세조직 보다 조금 더 조대하였다.

3. 두 용접프로세스에 의한 용접부의 경도는 용접금속보다 열영향부가 더 높았다. 이것은 용접 용융선 근처 열영향부의 미세조직이 경한 배이나이트적 페라이트와 사이트플레이트 페라이트가 생성되었기 때문이었다. 용접부 상부의 경도가 용접부 하부보다 더 높았는데 이것은 패스수가 많은 상부층에서 잔류응력이 더 높았기 때문으로 사료된다.

4. 셀프실드 FCAW를 사용하여 현장 용접조건에서 용접한 용접부의 특성은 가스실드 FCAW에 의해 용접된 용접부의 특성과 거의 대등하였기 때문에 고소 및 강풍 영향을 받는 용접조건에서 현장 적용가능성이 있다고 사료된다.

참고문헌

- [1] K. J. Rodgers and J. C. Lochhead, "Self-shielded Flux Cored Arc Welding-The Route to Good Fracture Toughness, Welding Journal, Vol. 66, No. 7, pp.49-59, July 1987
- [2] Anon, "Self-shielded FCAW Speeds High-Rise Construction, Welding Journal, Vol. 63, No. 4, pp.47-49, April 1984
- [3] Anon, "Office Building Columns Field Spliced with Self-shielded Welding Wire", Welding Journal, Vol. 65, No. 10, pp. 53-54, Oct. 1986
- [4] D. J. Kotecki and R. A. Moll, "A Toughness Study of Steel Weld Metal from Self-shielded Flux Cored Electrodes-Part 1, Welding Journal, Vol. 49, No. 4, pp.157s-163s, April 1990
- [5] 고진현 외, "국산 플럭스 코어드 와이어 용접에서 입열량이 용접부의 미세조직과 영향에 미치는 영향", 대한용접학회지, 제11권 제4호, pp.57-63, 1993. 12
- [6] 고진현 외, "SA508 class 3 서브머지드 아크용접부의 기계적 성질에 미치는 입열량의 영향", 대한용접학회지, 제22권 제5호, pp.38-45, 2004. 10
- [7] Classification of Microstructure in Low Carbon Alloy Weld Metal, IIW Doc. IX-1282-83, 1983
- [8] K. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, pp. 75-77, 1987
- [9] B. Dixon and K. Hakansson, "Effect of Welding Parameters on Weld Zone Toughness and Hardness in

690 MPa steel”, Welding Journal, Vol 64, No.1 P122s, Jan. 1995

- [10] R. A. Farrar and Z. Zhang, “Aspect Ratios and Morphology of AF in C-Mn-Ni Weld Metals, Materials Science Technology”, No. 11, p.759, 1995
- [11] N. J. Smith, J. T. McGrath, J. A. Gianetto and R. F. Orr, “Microstructure/mechanical Properties Relationships of Submerged Arc Welds in HSLA 80 Steels”, Welding Journal, Vol. 58 No. 3, p.112s, March 1989

고 진 현(Jin-Hyun Koh)

[정회원]



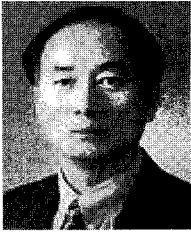
- 1985년 1월 : Lehigh University 재료공학과 (공학석사)
- 1987년 5월 : Lehigh University 재료공학과 (공학박사)
- 1987년 5월~1991년 2월 : 한국원자력연구소
- 1991년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

용접야금, 마이크로접합, 원자력재료

황 용 화(Yong-Hwa Hwang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 5월 : 충남대학교 기계공학과 (공학박사과정)
- 1979년 2월~현재 : 한국원자력연구소

<관심분야>

비정질 브레이징, 용접야금, 원자력재료

오 세 용(Se-Yong Oh)

[정회원]



- 2002년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 5월 : 충남대학교 기계공학과 (공학박사과정)

<관심분야>

구조해석, 용접야금
