

용접방법에 따른 구조용강 용접 접합부의 저온 충격인성 특성

이진형^{1)*} · 신현섭²⁾ · 박기태³⁾

¹⁾ 포닥, KICT, 인프라구조연구실 ²⁾ 수석연구원, KICT, 인프라구조연구실 ³⁾ 연구위원, KICT, 인프라구조연구실

Effects of Welding Processes on the Low Temperature Impact Toughness of Structural Steel Welded Joints

Lee, Chin Hyung^{1)*} Shin, Hyun Seop²⁾ Park, Ki Tae³⁾

¹⁾ Post-doc., Structural Engineering Research Division, KICT, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

²⁾ Senior Researcher, Structural Engineering Research Division, KICT, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

³⁾ Research Fellow, Structural Engineering Research Division, KICT, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

ABSTRACT : In this study, the Charpy impact test along with metallurgical observation was conducted to evaluate low temperature impact toughness of structural steel welds with different welding processes to find out the optimal welding process to guarantee the required impact toughness at low temperatures. The welding processes employed are shield metal arc welding (SMAW) and flux cored arc welding(FCAW), which are commonly used welding methods in construction. The Charpy impact test is a commercial quality control test for steels and other alloys used in the construction of metallic structures. The test allows the material properties for service conditions to be determined experimentally in a simple manner with a very low cost. To investigate the impact toughness at low temperatures of the steel welds, specimens were extracted from the weld metal and the heat affected zone. Standard V-notch Charpy specimens were prepared and tested under dynamic loading condition. The low temperature impact performance was evaluated based on the correlation between the absorbed energy and the microstructure. Analysis of the results showed that the optimal welding process to ensure the higher low temperature impact toughness of the HAZ and the weld metal is SMAW process using the welding consumable for steels targeted to low temperature use.

KEYWORDS : cold regions, structural steel welds, charpy impact test, low temperature impact toughness, welding process

1. 서론

강구조물이 충격에 의해 급격히 파괴될 위험성은 기온이 내려갈수록 커지므로 남극과 같은 극한지에 강구조물을 적용하기 위해서는 최저온도에 따른 강재의 충격인성을 반드시 확인하여야 한다^[1]. 또한, 남극에 건설된 Amundsen-Scott 기

지의 강박스 빔, 상부구조물 거치용 트러스 구조 및 상부구조물 지지용 원형강관 기둥, 그리고 Halley VI 기지의 상부 프레임, Neumayer 기지의 상부구조물 거치용 트러스 구조 및 상부구조물 지지용 기둥 등의 용접 사례에서 알 수 있듯이 극한지에 건설되는 강구조물의 제작시 용접은 필수적으로 수반되므로, 모재뿐만 아니라 용접부 및 열영향부의 저온 충격인성을 반드시 확보해야한다^{[2],[3],[4],[5],[6],[7]}. 국내의 경우 용접 구조용 강재에 대하여 -15℃, -25℃, -35℃ 등 3가지 온도 구역별로 적용이 가능한 강재종류 및 최대허용두께에 대한 기준을 마련하고 있으나^[8] 그 이하의 온도에 적용할 수 있는 강재에 대한 기준은 물론 저온에서 사용가능한 용접부 및 열영향부의 충격인성에 관한 기준 및 확보방안은 전무한 상황이다. 최근 제2남극기지 후보지로 선정된 테라노바베이 등 남극

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 2, 2012; revised September 27, 2012; approved on December 10, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-31-910-0486; Fax. +82-31-910-0121
E-mail: ifinder@hanmail.net

의 경우 극한최저기온이 -50°C 이하에 달하므로 건설되는 기지에 사용되는 강재에 대한 저온 특성 검토뿐만 아니라, 극저온 환경하에 노출된 강구조물 용접부 및 열영향부의 충격인성 검토 및 확보방안에 대한 연구가 반드시 필요하다. 강재의 충격 인성을 표현하는 방법은 시험평가의 간편성, 소요시간 및 비용적 측면 등을 고려하여 샤르피 충격시험(Charpy Impact Test)을 통한 시험온도와 흡수에너지로 나타내는 것이 일반적이다^{[9],[10],[11]}. 본 논문에서는 서로 다른 용접방법 및 용접재료를 사용하여 제작한 강구조물 용접부 및 열영향부에 대하여 샤르피 충격시험 및 조직검사를 통한 저온에서의 충격인성 평가를 실시하여 강구조물 용접 접합부의 저온 충격인성을 확보할 수 있는 용접방안에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 선정된 용접재료 및 용접방법을 국내에서 흔히 쓰이는 저온 용접구조용 강재에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

2. 저온 충격시험

2.1 사용강재

극한지에 건설되는 강구조물에 적합한 용접재료 및 용접방법 선정 시험에 사용된 강재는 -40°C 까지 요구되는 저온충격인성을 확보하는 저온 선급용 구조용 강재인 EH36이다. 제강, 제어가열, 제어압연, 제어냉각을 유기적으로 결합하여 이들의 공정조건을 통일적으로 규제함으로써 성형 원료시 재료에 최고의 재료특성을 부여하도록 하는 기술체계라 정의되고 있는 제어압연법, 즉 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)법에 의해 제조되는 EH36 강은 탄소당량이 작고 조직이 미세하며 강도 및 인성이 좋다. 또한 종래의 강에 비해 용접성이 뛰어나고 취성파괴에 대한 저항능력이 우수하며, 극후판 강재에서도 고강도 및 고인성을 확보할 수 있다^{[12],[13],[14],[15]}. 또한, 선정된 용접방안의 적용성 및 유용성 검증에 사용된 강재는 국내에서 생산되는 저온 용접구조용 강재인 SM520C이다. 본 시험에 사용된 재료의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 제조사의 성적서를 인용하였다. Table 2의 샤르피 충격 인성값의 경우에는 성적서에 명시되어 있는 데로 EH36 강은 -40°C 에서의 값을, SM520C 강재는 -20°C 에서의 값을 나타낸다.

Table 1. Chemical Composition of the Materials (wt, %)

Base metal	C	Si	Mn	P	S
EH36	0.08	0.32	1.5	0.008	0.003
SM520C	0.15	0.36	0.15	0.019	0.003

Table 2. Mechanical Properties of the Materials

Base metal	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Impact Toughness (J)
EH36	500	572	22	429(-40°C)
SM520C	433	555	25	265(-20°C)

2.2 시험편 제작

강구조물의 용접부 및 열영향부의 극한지 적용성 검토를 위해 용접시험편을 제작하였다. 저온에서의 인성확보를 위한 용접재료 및 용접방법 선정에 사용된 시험편의 전체 폭(B)과 길이(L)는 각각 300mm와 600mm이고 두께(t)는 20mm로써, Fig. 1과 같이 용접시편으로부터 충격시험편 채취시 열영향부 및 용접부에서의 정확한 노치위치 확보를 위해 베벨(Bevel) 용접을 실시하여 시험편을 제작하였다. 시험편 제작시 적용된 용접방법 및 용접재료는 Table 3과 같으며, Table 4 및 Table 5에 용접재료의 화학성분 및 기계적 성질을 나타내었다. 시험편 제작시 사용된 용접방법들은 강구조물 제작시 널리 쓰이는 피복 아크 용접(SMAW)과 플럭스 코어드 아크 용접(FCAW)이다. 피복 아크 용접봉과 피용접물 사이에 아크를 발생시켜 그 에너지를 이용하는 용접방법인 피복 아크 용접은 용접장비가 간단하여 이동이 용이하고 전자세 용접이 가능하며, 보호가스를 사용하지 않아 옥외(현장) 용접이 가능한 장점이 있다. 하지만 기계화가 어렵고 아크울 및 단위시간당 용착량이 낮아 생산성에는 취약한 단점이 있다. 와이어 중심부에 플럭스가 채워져 있는 플럭스 코어드 와이어(FC 와이어)를 일정한 속도로 공급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에 아크가 발생되도록 하고, 발생된 아크열로 용융지와 용접비드가 형성되도록 하는 용접방법인 플럭스 코어드 아크 용접은 용착속도가 높아 능률적이고 자동화가 가능하여 생산성이 높다. 단점은 피복 아크 용접에 비해 장비가 다소 복잡하여 이동이 용이하지 않고 장비가 고가이다^[16]. 용접시 사용된 용접재료들은 모두 각 용접방법에 적합한 저온강용 용접봉을 사용하였다. 두 시험편 모두 예열은 하지 않고 Table 6 및 Table 7과 같은 용접조건으로 본 용접을 실시하였으며, 패스 층간 온도는 온도 센서를 사용하여 150°C 이상이 되도록 하였다. 용접이 끝난후 비파괴 시험인 방사선 투과시험을 실시하여 용접부의 건전성을 확인하였다.

서로 다른 용접방법 및 그에 따른 저온강용 용접봉을 사용하여 제작한 강구조물 용접부 및 열영향부에 대한 저온에서의 충격인성 평가 후, 선정된 SMAW 용접방법 및 용접재료의 유용성 및 적용성 검토를 위해 저온 용접구조용 강재인 SM520C를

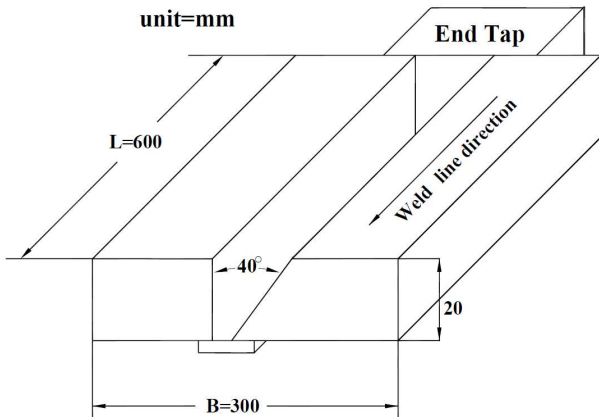


Fig. 1 Weld Specimen Geometry and Dimensions

Table 3. Welding Processes and Weld Fillers

Base metal	Welding process	Filler Metal
EH36	Shielded Metal Arc Welding (SMAW)	S-76LTH (4 ϕ)
EH36	Flux Cored Arc Welding (FCAW)	Supercored 81-K2 (1.4 ϕ)

Table 4. Chemical Compositions of the Weld Fillers (wt, %)

Filler Metal	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	B
S-76LTH (4 ϕ)	0.08	0.35	1.35	0.013	0.004	0.45	0.018	0.0015
Supercored 81-K2 (1.4 ϕ)	0.07	0.36	1.05	0.015	0.006	1.55	0.05	0.004

Table 5. Mechanical Properties of the Weld Fillers

Filler Metal	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
S-76LTH (4 ϕ)	540	590	30
Supercored 81-K2 (1.4 ϕ)	607	636	28

이용하여 선정시 사용된 용접방법 및 조건 등을 그대로 이용하여 용접시험편을 제작하였다. 제작된 시험편의 전체 폭과 길이는 각각 600mm와 1,200mm이고 두께(t)는 25mm이며, 용접조건은 Table 8에 나타내었다. 시험편 두께의 차이로 패스수가 차이가 남을 알 수 있다.

Table 6. Welding Conditions (SMAW)

PASS No.	Heat Input (kJ/cm)	PASS No.	Heat Input (kJ/cm)
1	19.6	9	16.0
2	8.7	10	14.5
3	10.3	11	10.7
4	12.9	12	16.1
5	13.0	13	12.4
6	15.2	14	13.8
7	12.9	15	16.6
8	16.9	Avg.	13.9

Table 7. Welding Conditions (FCAW)

PASS No.	Heat Input (kJ/cm)	PASS No.	Heat Input (kJ/cm)
1	12.7	6	19.8
2	12.0	7	19.8
3	7.4	8	19.8
4	10.5	9	19.8
5	19.8	Avg.	15.7

Table 8. Welding Conditions (SM520C)

PASS No.	Heat Input (kJ/cm)	PASS No.	Heat Input (kJ/cm)
1	22.6	10	17.4
2	19.8	11	14.3
3	10.5	12	16.2
4	15.5	13	14.5
5	14.4	14	14.0
6	17.4	15	14.2
7	18.2	16	13.7
8	19.3	17	14.5
9	17.1	18	15.9

2.3 충격 시험편

극한환경에서 용접부 및 열영향부의 인성을 확보할 수 있는 용접재료 및 용접방법의 선정을 위하여 각각 제작된 용접 시험편의 용접부와 열영향부(Heat Affected Zone)에 대해서 저온 충격시험을 실시하였다. 샤르피 충격 시험편은 KS B 0809^[17] 「금속재료 충격시험편」에 따라 제작하였으며 그 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다. 충격시험편은 Fig. 3과 같이 용접부 중앙(a)과 퓨전 라인에서 1mm 떨어진 위치의 열영향부(b)에서 채취하였으며, 용접편 두께의 중앙이 충격시험편 높이의 중앙과 일치하도록 하였다. SM520C 용접시험편의

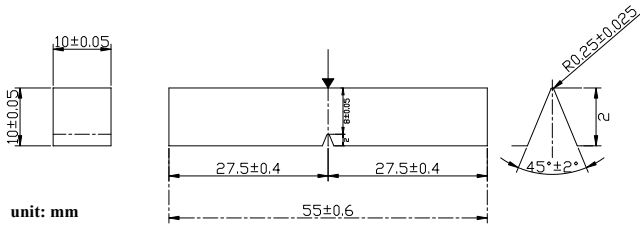


Fig. 2 Configuration of the Impact Test Specimen

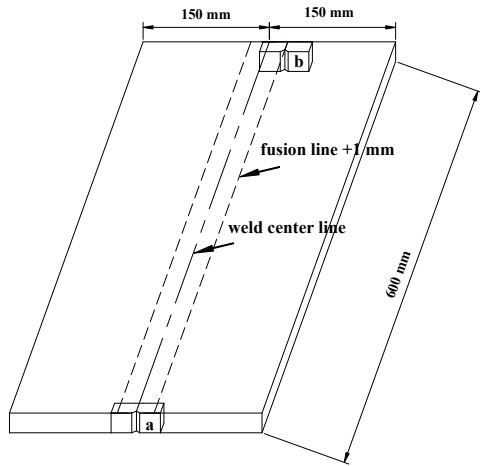


Fig. 3 Notch Locations of the Test Specimens

경우에는 상기 용접부 및 열영향부 이외에 모재에서도 시험편을 채취하였다.

2.4 시험 방법

샤르피 충격시험은 KS B 0810^[18] 「금속재료 충격시험방법」 및 KS B 0821^[19] 「용착 금속의 충격시험방법」에 따라 시험을 실시하였다. 시험온도는 재료의 DBTT(Ductile-Brittle Transition Temperature, 연성-취성-천이온도)를 알아보기 위해 상온 및 -30℃, -40℃, -50℃, -60℃로 정하였으며, 상온에서는 1개의 시험편에 대해 충격시험을 실시하고 나머지 온도에서는 3개의 시험편을 이용하여 충격흡수에너지 값을 측정하였다. KS B 0810 (2003)에 따라 액조에 시험편을 넣고 액화 질소를 이용하여 시험편의 온도를 원하는 온도로 조절한 후 10분 동안 일정하게 유지시킨 다음 시험편을 액소에서 꺼내어 5초 이내에 충격시험을 실시하였다.

금속재료의 충격 특성치는 재료의 조직에 의해 결정되므로 광학현미경을 이용하여 두가지 용접방법에 의해 제작된 시험편의 모재부, 용접부 및 열영향부의 조직을 분석하였다. 다이몬드 천을 사용하여 시험편을 폴리싱 하고, 니탈 용액으로 에칭한 후 조직사진을 촬영하였다.

3. 시험 결과

Fig. 4에 미국기계학회에서 정의하는 강재의 두께 및 항복 응력에 따른 충격흡수에너지의 기준값을 나타내었다^[20]. 특정 사용온도에서 강재의 충격흡수에너지 값이 이 기준값을 초과하게 되면 그 강재는 해당온도에서 사용 가능하다는 것을 의미한다. 그래프를 보면 EH36과 SM520C의 기준값은 모두 27J임을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에 각각 SMAW로 용접한 경우와 FCAW로 용접한 경우의 열영향부 및 용접부에 대한 충격시험 결과를 나타내었다. 시험결과는 각각의 온도에서 측정된 시험편의 충격흡수에너지 값을 심벌을 이용하여 그래프 형태로 나타내었고, 결과 그래프에는 해당 충격흡수에너지 기준값인 27J을 함께 도시하였다. 그리고 각각의 용접방법에 의한 열영향부와 용접부의 조직사진을 Fig. 7과 Fig. 8에 제시하였다. 먼저 저온에서의 적용성을 보면 SMAW로 용접한 경우의 용접금속을 제외하고는 모두 -60℃까지 기준값보다 큰 충격흡수에너지 값을 나타내어 해당 온도에서 안정적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 용접금속의 경우 전체적으로 충격흡수에너지 값은 비슷하게 나오고 있으나 FCAW로 용접한 경우가 약간 크게 나옴을 알 수 있다. 이것은 Table 4에서 보듯이 FCAW 용접시 사용된 용접금속에 충격인성을 향상시키는 성분인 Ni이 SMAW 용접시 사용된 용접금속 보다 많이 함유되어 있기 때문이다^{[21], [22]}. 또한, 연성파괴 및 취성파괴의 기준이 되는 연성-취성 천이온도인 DBTT도 두 경우 모두 -40℃에서 -50℃ 사이로 판단된다. 열영향부의 경우에는 용접금속의 결과와는 달리 SMAW로 용접한 경우가 FCAW로 용접한 경우보다 큰 충격흡수에너지 값을 보이고 있으며(-50℃를 기준으로 약 1.6배 높음), DBTT도 각각 -60℃ 이하 및 -40℃ 이하로 판단되어 SMAW로 용접한 경우의 열영향부가 더 우수한 저온 충격인성을 가짐을 알 수 있다. 이것은 SMAW 용접에 비해 FCAW 용접시 높은 입열(입열량 차: 1.8 kJ/cm)로 인해 열영향부에서 인성을 향상

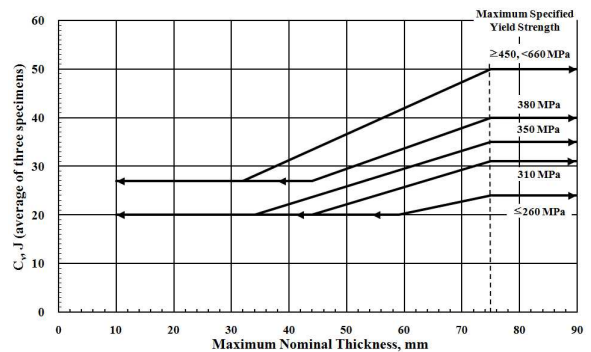


Fig. 4 Impact test requirements^[18]

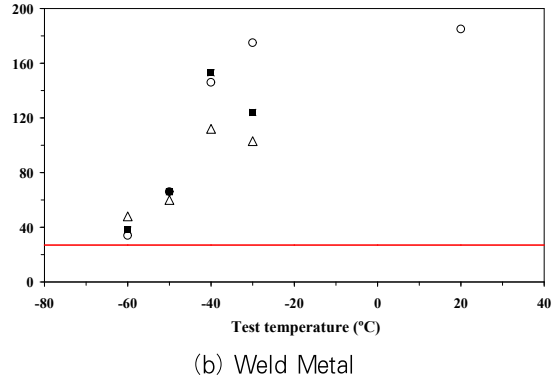
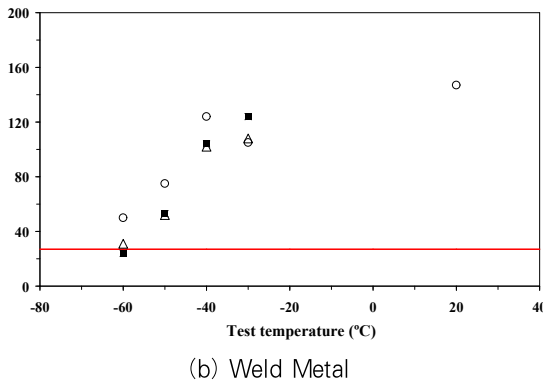
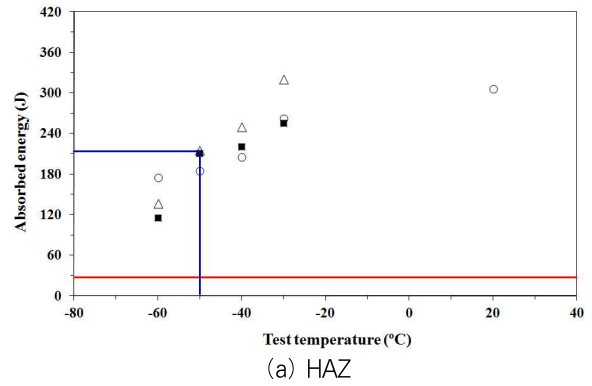
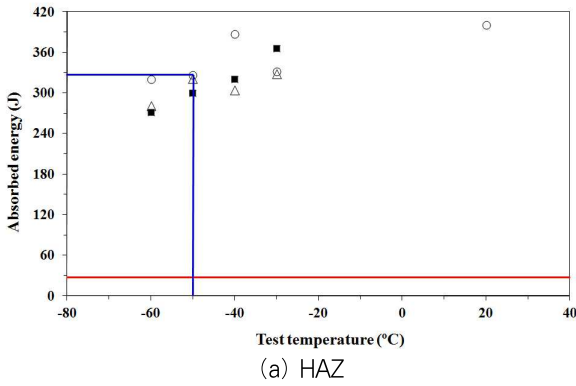
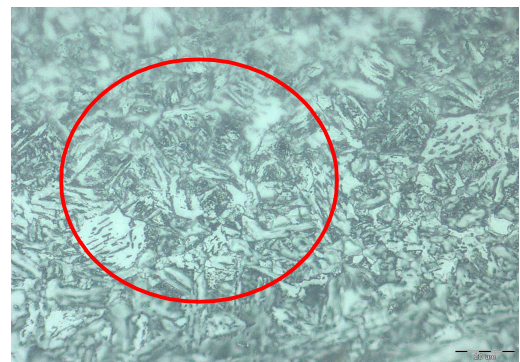


Fig. 5 Impact Test Results (SMAW)

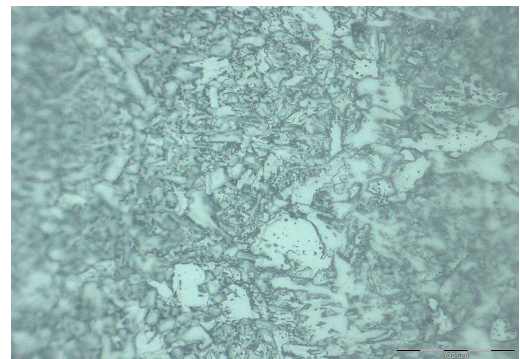
Fig. 6 Impact Test Results (FCAW)

시키는 침상 페라이트(Accicular Ferrite) 조직이 덜 발달되었기 때문이다^[23]. 이상의 결과에서, 극한지에 용접구조물을 적용하기 위해서는 SMAW 용접방법을 사용하는 것이 FCAW 용접방법보다 저온 충격인성 확보 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

선정된 용접방법 및 용접재료의 적용성 검토를 위해 제작된 SM520C 용접시험판에 대한 저온에서의 충격인성 시험결과 및 조직사진을 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 결과를 보면 모재, 열영향부 및 용접부 모두 충격흡수에너지 값이 실험에 사용된 -50°C까지 기준값을 만족하고 있어 해당 온도에서 안정적으로 사용가능함을 알 수 있다. 조직사진을 보면 모재는 페라이트와 펄라이트의 조직이 단단하게 결합되어 있는 것으로 보이며, 열영향부의 경우에는 저입열 용접으로 인해 용접후 냉각시 재결정에 의한 조직의 조대화는 두드러지지 않고 침상 페라이트 조직이 발달된 것을 확인할 수 있다. 그리고 용접부는 페라이트 및 수지상의 조직이 지배적임을 알 수 있다. 따라서 저온에서의 용접구조물의 충격인성 확보를 위해 선정된 SMAW 용접방법 및 용접금속의 유용성을 확인할 수 있다.

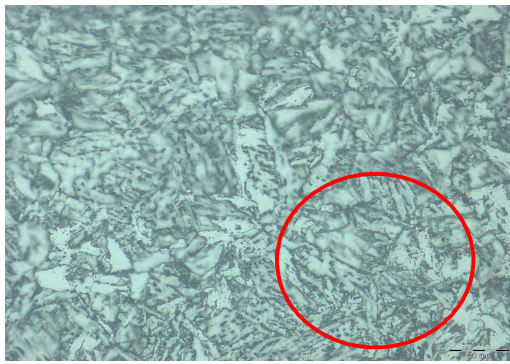


(a) HAZ(x500)

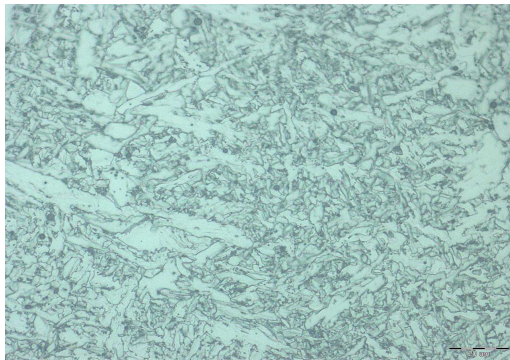


(b) Weld Metal(x500)

Fig. 7 Microstructures (SMAW)

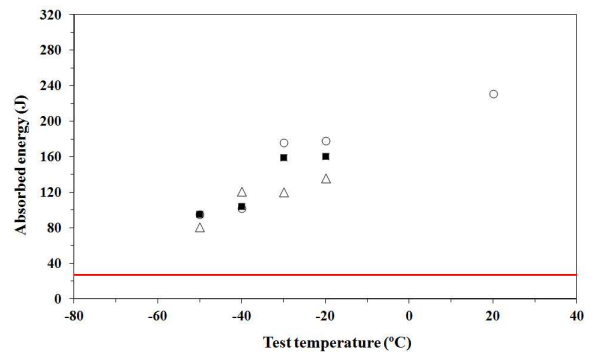


(a) HAZ(×500)



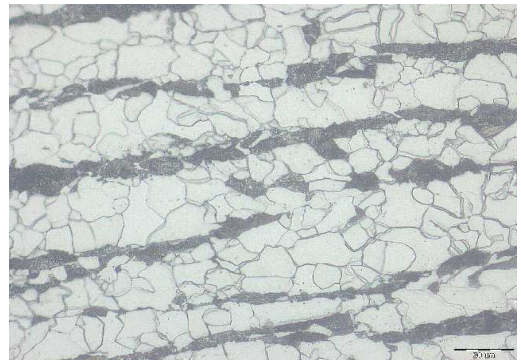
(b) Weld Metal(×500)

Fig. 8 Microstructures (FCAW)

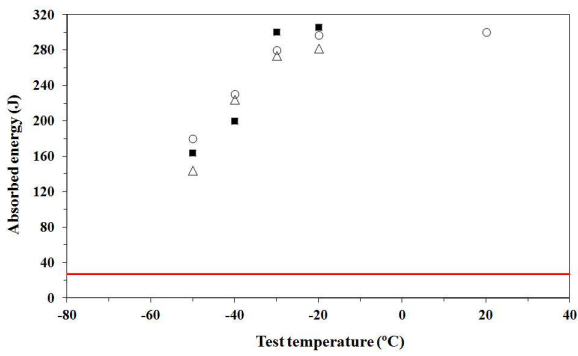


(c) Weld Metal

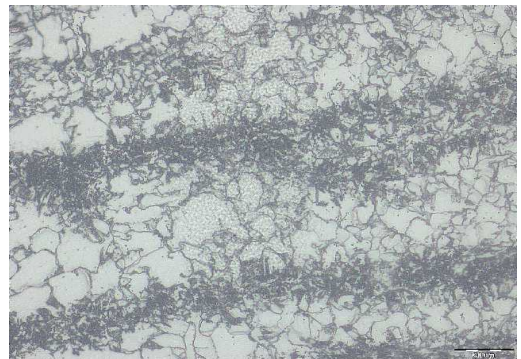
Fig. 9 Impact test Results (SM520C)



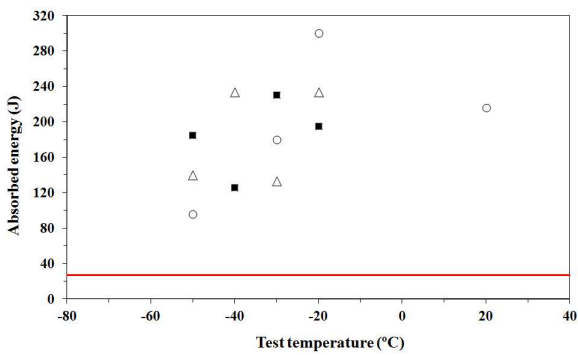
(a) Base Metal(×500)



(a) Base Metal



(b) HAZ(×500)



(b) HAZ



(c) Weld Metal(×500)

Fig. 10 Microstructures (SM520C)

4. 결 론

강구조물이 충격에 의해 급격히 파괴될 위험성은 기온이 내려갈수록 커지므로 극한지에 강구조물을 건설하기 위해서는 사용되는 강재뿐만 아니라 강구조물 제작시에 필연적으로 수반되는 용접부 및 열영향부의 저온 충격인성을 반드시 확보해야한다. 본 연구에서는 두가지 서로 다른 용접방법인 SMAW와 FCAW 및 그에 따른 저온강용 용접금속을 사용하여 용접시험편을 제작한 후, 각 시험편의 용접부 및 열영향부에 대해 샤르피 충격시험을 통한 저온에서의 충격인성 평가 및 조직사진 분석을 통해 극한환경에 노출된 용접부 및 열영향부의 충격인성을 확보할 수 있는 용접재료 및 용접방법을 선정하였다. 또한, 선정된 용접재료 및 용접방법을 국내에서 흔히 쓰이는 용접구조용 강재에 적용하여 그 유용성 및 적용성을 확인하였다. 시험결과 극한지에 용접구조물을 적용하기 위해서는 저압 용접인 SMAW 용접방법을 사용하는 것이 FCAW 용접방법을 사용하는 것보다 충격인성 확보 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있었으며, 용접구조용강재에 대한 적용 결과 그 유용성 또한 확인할 수 있었다. 향후에는 극한지 현장에서 용접을 수행할 경우 용접구조물의 충격인성을 확보할 수 있는 방안에 대한 연구를 수행해 나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(극한환경 대응 재료 및 급속 시공기술 개발)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌(References)

[1] Eurocode 3 (2005) *Design of steel structures - Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties*, CEN.

[2] Bayraktar, E., Hügele, D., Jansen, J.P., and Kaplan, D. (2004) Evaluation of pipeline laser girth weld properties by Charpy (V) toughness and impact tensile tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, pp.155-162.

[3] Devillers, L., Kaplan, D., and Testard, P. (1993) An approach to predicting microstructures and toughness properties in heat affected zones of multipass welds of structural steels, *Welding World*, Vol. 31, pp.256-267.

[4] Jang, Y.C., Hong, J.K., Park, J.H., Kim, D.W., and Lee, Y. (2008) Effects of notch position of

the Charpy impact specimen on the failure behavior in heat affected zone, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, pp. 419-424.

[5] Kim, J.H. and Yoon, E.P. (1998) Notch position in the HAZ specimen of reactor pressure vessel steel, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 257, pp.303-308.

[6] Moitra, A., Parameswaran, P., Sreenivasan, P. R., and Mannan, S.L. (2002) A toughness study of the weld heat-affected zone of a 9Cr-1Mo steel, *Materials Characterization*, Vol. 48, pp.55-61.

[7] Tvergaard, V. and Needleman, A. (2000) Analysis of the Charpy V-notch test for welds, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 65, pp.627-643.

[8] 김일평, 허용, 박영석, 윤태양(2008) 도로교 설계기준 개정 소개, *대한토목학회 기술기사*, 제56권, 제10호, pp.59-66.
Kim, I.P., Heo, Y., Park, Y.S., and Yoon, T.Y. (2008) Introduction of bridge design specification, *KSCE Technical report*, Vol. 56, No. 10, pp.59-66 (in Korean).

[9] 김종락, 김상섭, 이철호, 이은택, 백기열(2008) 600MPa 급(SM570 TMC) 강재의 소재 및 용접특성에 관한 연구, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제20권, 제6호, pp.773-781.
Kim, J.R., Kim, S.S., Lee, C.H., Lee, E.T., and Beak, K.Y. (2008) A Study on the Material Characteristics and the Welding Properties of 600MPa Grade Steel (SM570 TMC) *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 20, No. 6, pp.773-781 (in Korean).

[10] 이진형, 신현섭, 박기태, 양승현(2011) 샤르피 충격시험을 통한 구조용강재의 극한지 적용성 검토, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제23권, 제4호, pp.483-491.
Lee, C.H., Shin H.S., Park, K.T., and Yang, S.H. (2011) Evaluation of the Applicability of Structural Steels to Cold Regions by the Charpy Impact Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 4, pp.483- 491 (in Korean).

[11] 김희동, 양재근, 이은택, 김우범, 오영석(2012) 400 MPa 급 건축구조용 열간압연 H형강(SHN400)의 용접특성, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp. 129-136.
Kim, H.D., Yang, J.G., Lee, E.T., Kim, W.B and Oh, Y.S. (2012) Welding Characteristics of 400MPa Grade Hot Rolled H-beam (SHN400) for Building Structure, *Journal of Korean Society of*

Steel Construction, Vol. 24, No. 1, pp.129-136 (in Korean).

[12] Porter, D., Laukkanen, A., Nevasmaa, P., Rahka, K., and Wallin, K. (2004) Performance of TMCP steel with respect to mechanical properties after cold forming and post-forming heat treatment, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, pp.867-877.

[13] Shin, Y.T., Kang, S.W., and Lee, H.W. (2006) Fracture characteristics of TMCP and QT steel weldments with respect to crack length, *Materials Science Engineering A*, Vol. 434, pp.364-371.

[14] Tamehiro, H., Yamada, N., and Matsuda, H. (1985) Effect of the thermo-mechanical control process on the properties of high strength low alloy steel, *ISIJ International*, Vol. 25, pp.54-61.

[15] Tsay, L.W., Chern, T.S., Gau, C.Y., and Yang, J.R. (1999) Microstructures and fatigue crack growth of EH36 TMCP steel weldments, *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, pp.857-864.

[16] 대한용접·접합학회(1998) 용접·접합 편람. The Korean Welding and Joining Society (1998) A handbook of Welding and Joining (in Korean).

[17] KS B 0809 (2001) *Test pieces for impact test for metallic materials*, Korean Standards.

[18] AKS B 0810 (2003) *Method of impact test for metallic materials*, Korean Standards.

[19] KS B 0821 (2007) *Methods of tension and impact tests for deposited metal*, Korean Standards.

[20] ASME (2004) *Impact testing requirements*, Boiler & pressure vessel code, Sec. VIII, Div. I.

[21] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., Reddy, G.M., and Balasubramanian, T.S. (2008) Effect of welding processes and consumables on tensile and Impact properties of high strength quenched and tempered steel joints, *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 15, pp.87-94.

[22] Parker, J.D. and Stratford, G.C. (1999) Review of factors affecting condition assessment of nickel based transition joints, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, pp.29-39.

[23] Yang, J.R., Huang, C.Y., and Huang, C.F. (1993) Influence of acicular ferrite and bainite microstructures on toughness for an ultra-low-carbon alloy steel weld metal, *Journal of Materials Science Letter*, Vol. 12, pp.1290-1293.

요 약 : 본 논문에서는 서로 다른 용접방법 및 용접재료를 사용하여 제작한 강구조물 용접부 및 열영향부에 대하여 샤르피 충격시험(Charpy Impact Test) 및 조직검사를 통한 저온에서의 충격인성 평가를 실시하여, 극저 및 시베리아와 같은 저온환경에 노출된 강구조물 용접 접합부의 충격인성을 확보할 수 있는 용접방안에 대한 연구를 수행하였다. 사용된 용접방법은 강구조물 제작시 널리 쓰이는 SMAW(Shielded Metal Arc Welding)와 FCAW(Flux Cored Arc Welding)이며, 각 용접방법에 따른 저온강용 용접봉을 사용하여 시험편을 제작하였다. 서로 다른 용접방법으로 제작된 시험편의 용접부 및 열영향부에 대하여 샤르피 충격시험을 통한 저온에서의 충격흡수에너지 값과 미세조직 분석을 통하여 용접방법에 따른 구조용강 용접 접합부의 저온 충격인성을 평가하였다. 시험결과 극한저온 강구조물을 적용하기 위해서는 저입열 용접인 SMAW 용접방법 및 그에 따른 저온강용 용접봉을 사용하는 것이 충격인성 확보 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 극한저, 구조용강 용접 접합부, 샤르피 충격시험, 저온 충격 인성, 용접방법
