

## 건축·토목 분야 용접기술의 최근 개발 동향

장용성·윤태양

### Recent Trends in Development of Welding Technologies for Building and Civil Engineering

Woong-Seong Chang and Tae-Yang Yoon

#### 1. 서 론

건축·토목산업에 있어서의 용접기술은 20세기 중반 구조물 제작의 패러다임을 리벳구조에서 용접구조로 전환하면서 지난 50년간 대형구조물의 경제적 제조를 가능하게 한 생산기반 기술로서 인류의 기술 발전에 지대한 역할을 수행하여 왔다. 한편, 2002년 국내 철강소비량은 43.7백만톤 규모로 중국, 미국, 일본에 이어 세계 4위 수준이며 이러한 소비량 중 건설 및 토목 관련 철강재 소비량은 전체의 41%에 해당하는 약 18백만톤 규모로 조선, 자동차 등 타 산업분야에 비해서 독보적인 시장을 형성하고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 건축 토목산업에 있어서 지금까지의 강재 소비 형태나 이에 따른 용접기술의 적용 수준이 조선, 압력용기, 자동차 등 타 산업분야와 비교하면 비교적 저급강 중심에 용접공정의 비효율성이 높은 문제점들을 지니고 있는 게 현실이었다. 한편, 최근 강구조물 관련 기술의 비약적 발전과 더불어 새로운 개념의 설계들이 도입되고 사회간접시설에 대한 사회적 욕구는 기존의 기능성, 안전성 및 경제성에 더하여 고급화된 심미안을 충족시키려는데 까지 관심이 확대되고 있다. 이러한 추세에 따라서 이 분야에 적용되는 강재의 수준도 점차 고강도화, 고기능화 되어 가고 있으며 이에 따른 용접재료, 용접공정의 고급화도 함께 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 본 특집기사에서는 최근 건축·토목산업 분야에서 진행되고 있는 강재, 용접재료, 용접공정 등과 관련한 의미있는 진전들에 대해 기술적 특징들을 살펴보고 그 내용을 정리하였다.

#### 2. 건축철골 및 교량용강재의 최근 진보

##### 2.1 건축철골 및 교량용 강재 요구특성

구조용후판은 단순한 구조부재가 아니고 구조물에 필

요한 두께로 강한 성질을 극한까지 추구하는 기능부재라고 간주될 수 있다. 따라서, 용접에 의해 최종적으로 사용되는 구조용 후판은 이음부 인성이나 용접부 피로강도 등 사용성능을 배려하면서 설계·시공기술의 진보에 발맞추어 대형 강구조물로서 대량으로 사용되어 왔다. 최근 들어서는 제강기술의 진보에 의한 고순도화 기술 및 기존에는 유해한 것으로 되어 있던 강중 개재물을 유효하게 활용하여 용접열영향부의 인성을 향상시키는 기술과 함께 TMCP법의 발전에 의해 구조용후판의 강도·인성·용접성의 비약적인 향상을 도모하고 있다.

건축철골용 강재에 요구되는 재료 규격상의 화학적 및 기계적성질은 다음과 같다.

가. 화학성분

- 1) P, S, N 등 불순물 상한치
- 2) C 혹은 Ceq, Pcm 상한치

나. 기계적성질

- 1) 항복점 상하한치
- 2) 인장강도 상하한치
- 3) 연신율
- 4) 항복비
- 5) Z방향 단면수축율 하한치
- 6) Charpy 흡수에너지

다. 기타

- 1) 판두께 공차
- 2) 단면형상
- 3) UT 규정

현재 널리 이용되고 있는 건축철골용 강재에 대해 어떠한 규정이 적용되고 있는지를 정리한 것이 Table 1과 같다<sup>2)</sup>. 여기서 알 수 있는 점은 각종 강재에 대한 규정 내용이 크게 다르다는 것이다. 원칙적으로 이러한 강재를 각각의 용도에 따라서 구분하여 사용해야 하지만 건축기준법상에는 모두 동일하게 사용 가능하게 되어 있다. 위에서 언급한 모재의 특성외에도 용접부 인

성 확보의 관점에서 최근의 연구에 의해 HAZ 인성지표치  $f_{HAZ}$ 가 다층용접부 열영향부의 인성을 평가하는 지표로서 이용되고 있다.

$$f_{HAZ} = C + Mn/8 + 6(P+S) + 12N - 4Ti (wt\%)$$

강의 Ti 함유량이 0.005% 이하의 경우에는 Ti를 0으로 계산한다. 위의 자표값이 0.577 이하이면 다층 MAG용접 열영향부 인성이 70J 이상, 0.632 이하면 27J 이상을 80% 확률로 확보 가능하다는 것이 밝혀져 있다.

### 3.2 건축·토목관련 구조용강의 최근 진보

Table 1의 구조용강 외에도 최근에는 다양한 성능을 보증하는 고성능 건축구조용강들이 건축철골 및 교량구조에 적용되고 있다. 몇 가지 대표적인 사례 중 먼저 일정항복강(Steel with Constant Yield Point)의 특성을 Fig. 1에 나타낸다. 판두께가 40mm를 초과하더라도 판두께 40mm 이하인 경우와 동일한 항복강도를 유지할 수 있게 하여 허용응력의 손실이 없도록 성능을 개선한 강으로서 일반강 규격에 비해 SMxxxC-H 규격을 사용하며 일반강에 비해 허용응력 손실분만큼 강중을 줄일 수 있기 때문에 경제성 및 설계자유도가 증가된다.

Fig. 2는 극후판을 이용한 강 교량 제작과 관련하여 일본의 각종 기준에 규정된 최대 적용 가능 판두께를

정리한 것이다. 한국의 경우 철도 및 도로교 설계기준에 인장강도 600N/mm<sup>2</sup>급 강까지 판두께 100mm가

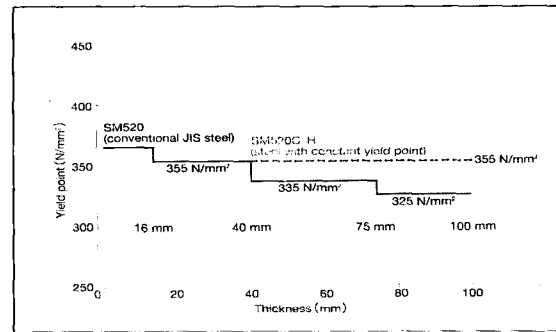


Fig. 1 Comparison of yield point between SM520 and SM520C-H

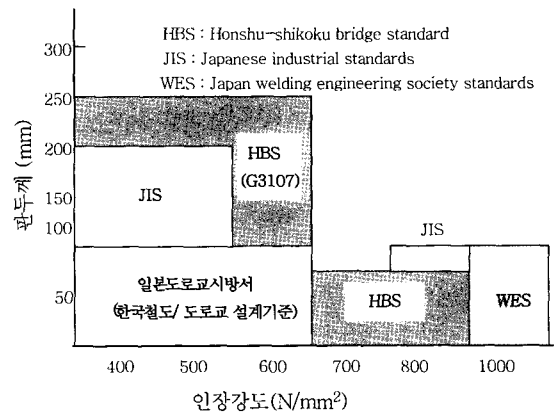


Fig. 2 Maximum applicable plate thickness specified at various Japanese standards

Table 1 Correlation between standards and required properties for structural steels

항목 규격(기호)	구조계산 가정과의 정합성 -축 판두께 공차 업격화	용접부 품질					변형능력확보 보유내력접합		판두께방향특성		
		C 상한 규제	Charpy 규정	P≤0.030 S≤0.015	C <sub>eq</sub> , P <sub>cm</sub> 규정	항복비 규정	항복점 상한치	P≤0.020 S≤0.008	수축율 규정	UT 규정	
강판	SS400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	SM400A, SM490A	x	o	x	x	x	x	x	x	x	△
	SM400B, SM490B	x	o	o	x	x	x	x	x	△	△
	SN400A	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x
	SN400B, SN490B	o	o	o	o	o	△	△	x	x	△
	SN400C, SN490C	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o

비고 1: 규정을 만족하는 것은 o, option 규정 또는 일부 불만족인 것은 △, 규정이 없거나 규정치를 만족하지 못하는 것은 x  
비고 2: SN400C, SN490C에서는 웹 두께 9mm 이하, 플랜지 두께 16mm 이하의 H 형강에서 항복점 상한치를 규정하지 않는다.

비고 3: C<sub>eq</sub>, P<sub>cm</sub> 규정은 400MPa급에서 판두께에 무관하게 C<sub>eq</sub>≤0.36%, P<sub>cm</sub>≤0.26%, 490MPa급에서 40mm 이하에서 C<sub>eq</sub>≤0.44%, P<sub>cm</sub>≤0.29%, 40~100mm 인 경우 C<sub>eq</sub>≤0.46%, P<sub>cm</sub>≤0.29%

비고 4: TMCP재의 경우 490MPa급 50mm 이하재 C<sub>eq</sub>≤0.38%, P<sub>cm</sub>≤0.24% 이고 50~100mm재 C<sub>eq</sub>≤0.40%, P<sub>cm</sub>≤0.26%

적용 최대 두께인데 비해 일본 HBS(Honshu-Shikoku Bridge Standard)에 따르면 인장강도 600N/mm<sup>2</sup>까지는 250mm 극후판 적용이 가능하게 규정하고 있는 등 국내 기준에 비해 극후판 적용 범위가 매우 광범위함을 알 수 있다. 이와 같이 강교량 제작시 극후판을 적용할 경우 보강재 생략이나 부재 수 감소에 의한 구조의 단순화가 가능해 지며 이로 인한 용접연장의 감소 등으로 초기 공사비가 대폭적으로 절감된다고 보고되고 있다. 또한, 소위 compact section 효과에 의한 극한상태에서의 부재 단면의 소성변형을 기대할 수 있으므로 변형능력이 증대된다.

이 외에도 고인성강 적용을 통한 냉간성형성의 향상을 통해 냉간 휨가공시의 제약조건을 제거함으로써 제작공수를 절감하거나 외관을 미려하게 하는 사례들이 보고되고 있으며 열 가공제어 공정에 의해 제조되는 TMCP강의 적용은 점차 확대되고 있는 추세이다. TMCP강의 경우 조선 분야에서 이미 확인된 우수한 용접성과 인성을 바탕으로 제작성이 획기적으로 개선된다는 이점 외에도 건축구조용강으로서 적용시 판두께방향으로 균일한 품질이 확보된다는 특징으로 인해 대표적인 일정항복강으로서 판두께에 상관없이 허용응력을 일정하게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

한편, 강교량의 가장 큰 취약점인 부식문제를 극복하고 채도장 작업시의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해 일반강에 비해 Cu, Cr, P, Ni 등 내식성이 우수한 원소를 소량 첨가함으로써 일반강에 비해 4~8배의 내식성을 지니는 내후성강의 적용이 점차 확대되고 있다. 강도 수준에 따라서 SMA400W, 490W, 570W 등으로 규정되어 있다. 이 경우 초기 도장 및 채도장의 생략을 통해 초기건설비용과 유지관리비용을 대폭적으로 감소시킬 수 있다. Fig. 3은 내후성강 사용에 따른 일반강과의 수명기간에 따른 비용지수를 비교한 그림이다.

이상에서 언급한 바와 같이 지금까지 구조용강의 개발은 주로 특정한 성능에 대해 집중적인 개선 노력이

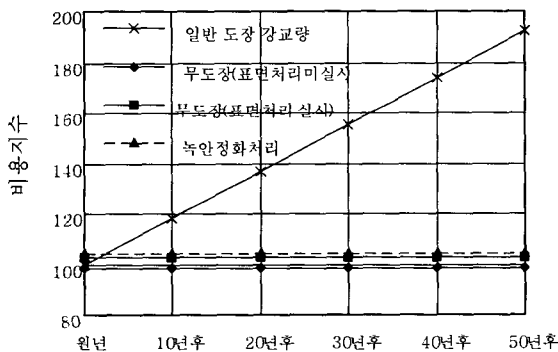


Fig. 3 Comparison of life cost between conventional and weathering steels

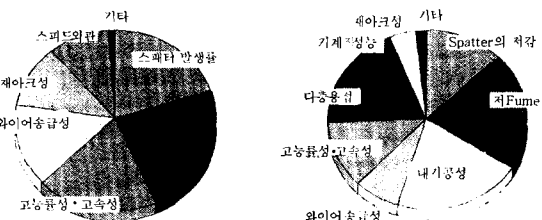
이루어지는데 비해 1992년부터 미국에서 개발한 HPS(High Performance Steel) 즉, 복합성능개선 고성능강은 강도, 내후성, 인성 및 용접성을 복합적으로 개선한 구조용강으로서 현재 HPS50W, HPS70W 및 HPS100W가 개발되어 있으며 ASTM A709/A709M-98로 제정되어 있다<sup>3)</sup>. 이들 강재의 경제적 장점으로 인해 미국 내 고속도로 교량을 중심으로 시용량이 급속히 확대되고 있는 실정이다. HPS강으로 교량을 제작시 경량으로 인한 기초 재설계 및 장대 비조질강판 사용으로 인한 경제성 확보가 약 25% 수준에 이르며 개선된 내후성과 인성에 의한 경제성 효과도 약 35%에 이르는 것으로 간주되고 있다.

### 3. 건축철골 및 교량용 용접재료 개발동향

#### 3.1 MAG용접 재료의 사용성능 향상

지금까지 용접기술의 발전은 용접의 고효율화, 고능률화를 최대의 목적으로 삼아 왔다. 용접재료의 관점에서는 피복아크용접에서 출발하여 고용착화에 대응한 서브머지드아크용접재료, 반자동·자동화에 대응한 MAG 용접재료(솔리드 와이어, 플렉스코어드 와이어)로 발전되어 왔다. 지금도 각 산업 현장에서 용접의 합리화와 원가절감에 대한 요구는 계속 높아지고 있으며 이에 대응한 용접재료의 개발이 이루어지고 있다.

최근 들어 용접재료의 종류별 사용비율을 보면 피복아크용접봉을 대체하여 MAG용접 재료의 비율이 증가하고 있으며 한국이나 일본의 경우 현재 약 70%를 점하고 있으며 이러한 경향은 건축 토목산업분야에서도 예외는 아니다. 특히, 최근에는 플렉스 코어드 와이어(이하 FCW)의 사용이 매우 높아지고 있다. Fig. 4에는 로봇용 와이어나 MAG용 FCW에 요구되는 특성에 대한 일본 조사 결과를 나타낸다<sup>4)</sup>. 로봇용 와이어에 관해서는 고능률성·고속성과 함께 스패터 발생량, 와이어 거칠기, 와이어 송급성, 재아크성 등에 대한 요구가 높아지고 있지만 이 모드는 용접 공정의 고효율화라는 관점에서 요구된다고 할 수 있다. MAG용접용 FCW에



(a) 로봇용접용 와이어 (b) MAG 용접용 FCW

Fig. 4 Required properties for different GMAW wires

관해서도 고능률성·고속성과 함께 스패터 저감, 저흡, 내기공성, 와이어송급성, 다층용접 등이 중요한 요구 조건이며 저 흡 이외에는 용접공정의 고효율화라는 관점에서 요구된다.

용접재료 측면에서 본 용접공정의 고효율화에 대해서 고려해 보면 우선 용접을 고능률로 시행한다는 관점에서 대응착화나 고속화가 가능한 용접재료 개발이 필요하게 된다. 예를 들어 전자세용접성이 우수한 슬래그계 FCW나 대응착화에 따른 용접부 품질저하를 극복한 용접재료 등이 있다. 또한 용접 전공정을 효율화한다는 측면에서 스패터 저감 등에 의해 아크발생률·로봇가동률 향상이 가능한 용접재료 개발이 요구된다. 한편, 고능률 용접공정이나 신강종에 적합한 용접재료의 개발도 중요한 역할이라고 생각된다. 다전극화 용접공정에 대한 대응이나 지금까지 피복아크용접봉이 아니면 용접이 안되는 강종에 대한 MAG용접와이어의 개발 등이 추진되고 있다.

### 3.2 건축 토목산업용 고효율 용접재료 개발사례

#### 3.2.1 솔리드 와이어

건축 토목산업에서 이용되는 용접재료는 피복아크용접봉, MAG용접와이어(솔리드와이어, 플럭스코아드와이어) 서브머지드아크 용접재료 등이 있으며 용도와 적용부재에 의해 사용되어진다. 전반적으로는 MAG용접와이어의 사용량이 가장 많고 특히 솔리드와이어가 압도적으로 많다. 솔리드와이어는 피복아크용접봉에 비해 전류밀도가 높으므로 아크집중성이 양호하여 와이어 용융속도도 높아서 고능률용접이 가능하다. 그리고, 확산성소량이 적으므로 내균열성이 우수하며 슬래그생산량이 적으므로 용착효율이 높다는 특징을 지닌다. column과 beam 다이어프램부의 다층용접을 중심으로 조립용

접, 필릿용접 등 철골 용접 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 차폐가스는 CO<sub>2</sub>가 주력이며 반자동용접 및 자동·로봇용접에 사용되고 있다. 일부 로봇용접에서는 저스패터화, 용접금속의 고인성화, 무인화 등을 목적으로 하<sup>2</sup> Ar 가스와 CO<sub>2</sub> 가스의 혼합가스를 사용하고 있다. 최근 들어 FCW도 메탈계를 중심으로 CO<sub>2</sub> 분위기에서 비드외관이 양호하고 스패터가 작은 입경이면서 적어 제거작업이 생략 가능하고 용착속도가 높아지므로 total cost 저감 차원에서 사용량이 증대되고 있다.

철골용접에 사용되는 솔리드와이어는 원칙적으로 JIS Z3312(연강 및 고장력강용 MAG용접 솔리드와이어)<sup>6</sup> 중에서 강종, 판두께, 이음부 형상, 이음부의 요구성능 및 용접방법 등에 따라서 최적의 것을 선정할 필요가 있다. JIS에서는 차폐가스 조성에 의해 CO<sub>2</sub>용 와이어(YGW11~14, YGW21~22)와 CO<sub>2</sub> 및 Ar 혼합가스용 와이어(YGW15~17, YGW23~24)로 구분한다. 이 중에서 YGW11은 400 및 490N/mm<sup>2</sup>급강의 용접에 가장 많이 사용되는 CO<sub>2</sub>용 와이어이다. 이 와이어는 Si와 Mn 외에 Ti를 함유하고 있으며 특히, Ti가 고전류영역에서의 용적 직경을 세립화하여 용적이행 및 아크를 안정화시키므로 양호한 작업성이 얻어진다. 이에 비해 Ti를 함유하지 않는 CO<sub>2</sub>용 YGW12와이어는 저전류영역의 단락이행용접에 적용되고 있다.

YGW15는 YGW11에 대응하는 재료로서 CO<sub>2</sub>와 Ar 혼합가스용 와이어로 YGW11과 같이 Si와 Mn 외에 Ti를 소량 함유하여 비교적 대전류의 스프레이 아크도 이용된다. 이 혼합가스는 CO<sub>2</sub>보다 고가이지만 스패터 발생량, 아크안정성, 비드외관, 용착금속의 기계적성질(특히, 인성)등의 점에서 CO<sub>2</sub>보다 우수하므로 용구품질에 따라 이용된다. 또한 570MPa급 강 및 590MPa급 고성능강용으로는 YGW21(CO<sub>2</sub>용) 및 YGW2

Table 2 Classification of solid wires for mild steel and high strength steel

규격 KS D7025 JIS Z3312	차폐가스	적용강종	용착금속 기계적성질				
			인장강도 MPa	항복강도 MPa	연신율 %	충격시험	
						온도 ℃	흡수에너지 J
YGW 11	CO <sub>2</sub>	400~490MPa	490 min.	390 min.	22 min.	0	47 min.
YGW 14			420 min.	345 min.	22 min.	0	27 min.
YGW 15	Ar+CO <sub>2</sub>	a급	490 min.	390 min.	22 min.	-20	47 min.
YGW 17			420 min.	345 min.	22 min.	-20	27 min.
YGW 18*	CO <sub>2</sub>	490, 520				0	47 min.

(혼합가스용)으로 분류된 와이어가 있다. 철골분야에 사용되는 시판 솔리드와이어의 분류와 용착금속 성능을 Table 2에 나타낸다. 이 재료의 KS규격(KS D7025)은 JIS규격(JIS Z3312)과 동일하다.

그러나 일본의 경우 고베 대지진 이후 건축철골 분야에 있어서 용접부의 품질을 더욱 향상시키기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있는데 그 중에서 대입열과 높은 층간온도에 있어서도 용접부 품질이 확보되는 540 N/mm<sup>2</sup> 급 강용 MAG용접와이어가 1999년에 JIS 규격화되어 실제로 널리 적용되고 있다. Fig. 5에 CO<sub>2</sub> 용접용 솔리드와이어(YGW18)의 기계적특성을 나타내는데 0.4% 이하의 Mo 첨가 등 와이어 화학조성의 최적화에 의해 기존의 와이어인 YGW11에 비해 대입열/높은 층간온도에 있어서도 매우 양호한 기계적특성(인장강도와 인성)을 보유하고 있다. 판두께가 20mm인 구조부재 용접에 있어서 용접소요시간이 약 1/2 수준으로 단축이 가능하게 된다. CO<sub>2</sub> 용접용 솔리드와이어 이외에도 Ar-CO<sub>2</sub>용접용(YGW 19)이나 FCW (YFW-

C55DX, YFW-A55DX)도 JIS규격화되어 있다.

3.2.2 플럭스코어드와이어

건축철골이나 교량의 용접은 과거에는 대부분 피복아크용접과 서브머지드아크용접이 주를 이루었지만 용접의 자동화 및 인력 감소의 진전에 따라서 FCW에 의한 MAG용접이 급속히 증가하게 되었다. 건축 및 토목분야에서 적용이 되고 있는 대표적인 FCW 재료는 Table 3에 정리하였으며 대부분의 경우 CO<sub>2</sub> 분위기하에서 사용되지만 스패터 저감이 필요한 경우 Ar-CO<sub>2</sub> 혼합가스용 재료를 채택한다. YFW-SXX series는 self-shielded형으로 바람이 강한 옥외 작업 등에서 보호가스를 사용하기가 어려운 경우 사용된다. 앞서 언급한 바와 같이 일본의 경우 540MPa급 FCW인 YFW-C55DX, YFW-A55DX에 대한 규정을 1999년에 제정하여 고장력강의 고능력용접에 대응하고 있다<sup>6)</sup>.

판형, 상형, 강상판형 등의 보강재에 대한 필릿용접은 과거에는 주로 피복봉으로 실시되었지만 용접의 자동화가 발전됨에 따라 다양한 자동용접장치와의 조합으로 FCW가 적용되게 되었다. 필릿용접에 있어서는 피트나 블로우홀 등 기공발생문제가 많으므로 내기공성이 우수한 와이어가 사용된다. 또한 내기공성 와이어로서는 슬래그계와 메탈계가 있지만 비드외관 및 형상이 양호한 슬래그계 와이어가 주로 사용되고 있다. 또, 슬래그계 와이어에는 저수소계 와이어와 비저수소계 와이어가 있어 강종, 판두께, 슷플라임의 종류 등에 따라서 구분하여 사용한다. Box girder 내부의 용접, 공장에서의 대블록 조립용접, 현지에서의 전단면용접 등에는 피복봉이나 솔리드와이어를 대신하여 전자세용 FCW 적용이 확대되고 있다. 그 이유는 피복봉이나 솔리드와이어로는 용접자세에 의해 용접전류를 변화시키지 않으

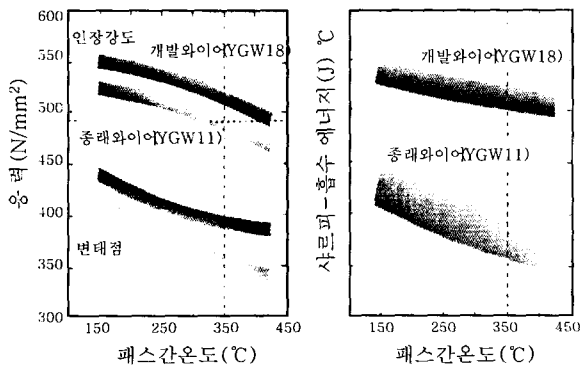


Fig. 5 Comparison of tensile and impact properties between conventional YGW11 and newly developed YGW18 wires

Table 3 Classification of typical flux cored wires for high strength steel

Standard KS D7104 JIS Z3313	Shielding Gas	Steel Grade	Weld Metal mechanical properties				
			TS, MPa	YP, MPa	El, %	Impact Test	
						Temp., °C	Absorbed Energy, J
YFW-C50DX	CO <sub>2</sub>	490MPa급	490 min.	390 min.	22 min.	0	47 min.
YFW-A50DX	Ar+CO <sub>2</sub>						
YFW-C55DX*	CO <sub>2</sub>	540MPa급	540 min.	430 min.	22 min.	0	47 min.
YFW-A55DX*	Ar+CO <sub>2</sub>						
YFW-C60FX	CO <sub>2</sub>	590MPa급	590 min.	490 min.	19 min.	-5	47 min.
YFW-A60FX	Ar+CO <sub>2</sub>						
YFW-S50DX	Self	490MPa급	490 min.	390 min.	22 min.	0	47 min.

\*JIS(1999년 개정)에만 규정되어 있으며 KS 규격은 미제정 단계임

면 안되는데 비해 이 종류의 와이어는 동일 수준의 높은 전류로 전자세용접이 가능하므로 용착속도가 커고 스패터가 적으며 비드외관이 미려하다는 이점을 지니고 있다. 형 부재의 판이음부나 현지에서의 플랜지 맞대기 용접 등 비교적 단거리의 이음부에는 서브머지드아크용접이나 솔리드와이어에 의한 MAG용접을 대신하여 메탈게 와이어의 적용이 확대되고 있다. 메탈게 와이어는 솔리드와이어나 슬래그계 와이어에 비해 용착속도가 커다는 장점을 지니지만 다른 점 보다 슬래그계 와이어가 지닌 스패터가 적다는 점과 솔리드와이어가 지닌 슬래그 생성량이 적다는 장점을 각각 지니고 있다. 이러한 특징은 아크 타임 단축, 슬래그나 스패터 제거시간의 단축 등 모두 용접의 고능률화와 관련되므로 메탈게 와이어의 사용량을 차츰 증대될 것으로 예상된다.

교량분야에서는 건설원가를 절감하는 수단의 일환으로서 소주형교가 증가하고 있다. 이에 따라 주형부재가 대형화되고 판두께가 증가되어 필릿용접의 각장이 커지게 된다. Fig. 6에 나타내듯이 대각장 필릿용접용 FCW가 개발되었다<sup>4)</sup>. 종래의 FCW로는 수평필릿용접에서 1층 각장은 필릿 상부측의 언더컷이나 하부의 오버랩 등에 의해 8mm 정도가 한계였다. 개발된 FCW는 생성되는 슬래그의 점성을 높이고 슬래그 양을 증가시켜 각장 10mm 정도까지 1층 용접이 가능하게 되었다. 또한 490N/mm<sup>2</sup>급강용 및 590N/mm<sup>2</sup>급강용은 물론 내후성강용도 실용화되어 있다.

#### 4. 건축철골 및 교량의 신용접공정 적용현황

##### 4.1 고능률 MAG용접

대전극화의 용접공정에 대응한 용접재료의 개발도 고 효율화에 대한 중요한 역할을 한다. MAG용접법의 대표적인 예로서는 Fig. 7에 나타내듯이 조선·교량 등의

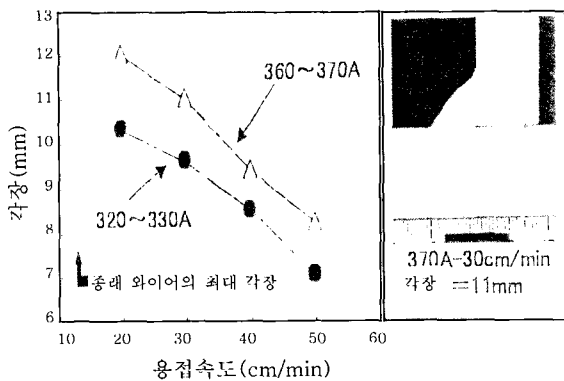


Fig. 6 Newly developed flux cored wire providing larger leg length in fillet welding

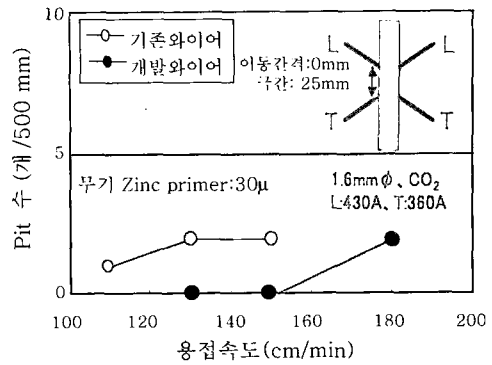


Fig. 7 Features of 2 pole-1 pool CO<sub>2</sub> welding process using metal type FCW

Zn 도포강판 수평 필릿용접의 고능률화를 도모하기 위한 2전극 1 pool CO<sub>2</sub>용접법, 즉 twin tandem 용접을 들 수 있다<sup>4)</sup>. 용접재료로서는 내기공성이 우수한 전용 메탈게 FCW가 개발되어 있다. 1 pool화 및 용접재료면에서 용융급속·슬래스물성을 최적화하는 것에 의해 pool의 응고속도를 적게 하고 가스의 부상을 용이하게 함으로써 고속에서의 내기공성을 향상시킨다.

##### 4.2 레이저용접 적용현황

일본에서는 제조업 경쟁력 강화를 위해서 철구조물체의 레이저 적용이 시급한 과제로 인식하고 있으며 레이저용접이 지닌 한계, 예를 들어 발전기가 고가이며 안전문제 등을 위해 로봇, 갠트리나 전용기에 의한 완전 자동화가 필요한 점, 시공 가능한 루트간격 범위가 좁다는 점, 용접결합의 완전한 방지가 어렵고 급열급냉으로 인해 용접이음부가 경화되는 점 등의 문제가 해결되면 급격히 적용이 확대될 것으로 예상된다.

교량용 box-girder를 예로 든 레이저용접 조립공법의 개념도를 Fig. 8에 나타낸다<sup>7)</sup>.

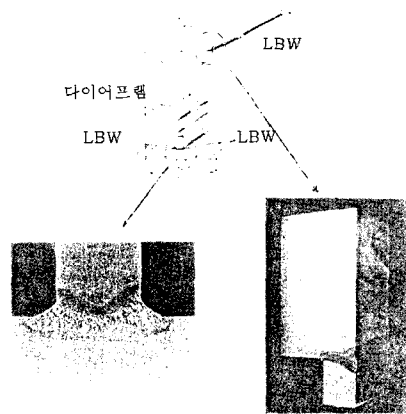


Fig. 8 An example of laser welding application to box-girder for bridge

현재 플랜지/웹 이음부는 코너이음부 또는 필릿이음부이며 돌러가면서 용접을 실시하는 경우가 많지만 레이저 용접 적용에 의해 블록을 정반에 놓아둔 그대로 수평자세에서의 용접이 가능하다. 그 결과 위험한 회전 횟수가 줄어드는 것 외에 용접공수가 단축된다. 또한, 현재 각강 관리의 필릿용접을 실시하는 리브, 스티프너도 판두께 만큼의 완전용입용접이 가능해져 용접공수가 줄어든다. 피로강도가 낮을 것으로 생각되지만 실험에 의해 아크용접에 의한 필릿이음부와 동등 수준 이상인 것이 확인되었다. 또한 거대지진과 같은 상황에서 소성화되는 단면에서는 리브의 필릿용접은 전단응력으로 파단될 것으로 예상된다. 이 경우 리브는 보강재로서의 기능을 초기 단계에서 상실하므로 각강 증가에 의한 강도확보가 이뤄지고 있다. 그러나 레이저용접 이음부는 모재와 동등한 강도를 지니므로 최종한계강도의 향상도 기대될 뿐만 아니라 좌굴에 영향을 미치는 잔류응력의 저감에도 효과가 있을 것으로 예상된다. 게다가 필릿용접을 레이저용접으로 대체하는 것에 의해 용접금속이 감소하고 경량화된다. 레이저용접은 변형이 적어서 판넬 공법에 있어서 정도 관리가 용이하다는 점외에 블록정도도 향상된다. 그 결과 현장용접이음부의 용착량의 변화 폭이 줄어든다. 현지 가설에 있어서 정도 관리의 노력도 줄일 수 있다.

최근 IISI 교량분과위원회의 보고에 따르면 영국에서는 강바닥판 조립에 Fig. 9와 같이 레이저용접을 적용하고 있음이 보고되고 있다<sup>5)</sup>. 앞으로 레이저/아크 복합 열원을 이용한 고효율 용접기술의 개발이 활발해지면 건축 토목산업 분야에 있어서도 기존의 아크용접을 대체하는 공법으로서 그 적용의 확대가 예상된다.

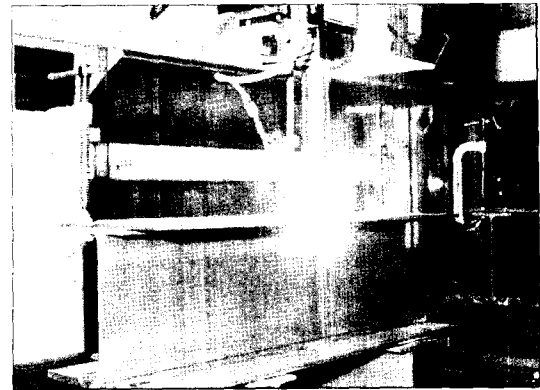


Fig. 9 Application of laser welding in manufacturing a bridge structure

### 4.3 건축철골에 있어서 이중용접

일본의 경우 1998년 개정된 건축기준법과 관련하여 2000년 6월 1일 부로 시행된 시행령에서 철골조 건축물의 구조내력상 중요한 부재의 재료로서 스테인리스강이 규정되어 탄소강과 동등한 구조재료로서 사용되게 되었다<sup>10)</sup>. 이러한 법 개정에 의해 스테인리스강의 우수한 내식성·내구성과 외장성을 건축분야에 적용하는 것이 가능해지므로 보다 안전성과 경제성이 우수한 건설구조물을 제작 가능하게 되었다. 이러한 스테인리스강의 특징을 살리면서 보다 경제적으로 건축구조물을 제작하는 과정에서 탄소강과 조합한 철골구조가 필연적으로 발생한다. 따라서, 건축분야에 있어서 스테인리스강과 그 용접재료, 그리고 스테인리스강과 탄소강의 이중용접에 관한 시공기술과 관련한 법령에 의한 제약과 용접시공상의 유의점에 대하여 정리하였다.

Table 4 Comparison of JIS G4321 stainless steel for building structure and conventional stainless steels

STD No.	Symbol of Type	Proof Stress, MPa		Tensile Strength MPa	Yield Ratio %	Elongation %
		0.1%	0.2%			
JIS G4321	SUS304A	235 min.	N/A	520 min.	60 max.	35 min.
JIS G4303	SUS304	N/A	205 min.	520 min.	N/A	40 min.
JIS G3136	SN400B	0.2% offset stress 235~355		410~510	80 max.	22 min.
JIS G4321	SUS304N2A	325 min.	N/A	690 min.	60 max.	35 min.
JIS G4303	SUS304N2	N/A	345 min.	690 min.	N/A	35 min.
JIS G3136	SN490B	0.2% offset stress 325~445		490~610	80 max.	21 min.

주1) JIS G4303: 스테인리스 강봉  
 JIS G3136: 건축구조용압연강재  
 주2) SN400B, SN490B 규격치는 판두께 16~40mm의 값

앞서 언급한 일본의 건축관련법에 의한 건축구조용 스테인리스강은 JIS G4321<sup>9)</sup>에 규정된 SUS304A, 316A, 304N2A 및 SCS13AA-CF강이다. 여기서 기호 끝의 A는 「Architecture」를 의미하며 기존의 JIS 재와 차이는 Table 4에서 알 수 있듯이 0.1%내력과 항복비의 규정치이다.

스테인리스강을 이용한 건축구조물에 있어서 그 경제성을 고려하면 필연적으로 탄소강 철골과의 조합이 발생한다. 이 경우, 용접접합부는 스테인리스강과 탄소강과의 이종용접이 필요한데 주로 SUS304A(또는 SUS316A)와 SN400B와의 용접접합이다<sup>10)</sup>. 이러한 스테인리스강과 탄소강의 이종용접은 통상 309계 용접재료를 사용하지만 이 때 유의해야 할 점은 용접부에서 용융금속 중에 Ni, Cr 등이 SN400B에 의해 과도하게 희석되어 오스테나이트와 수%의 페라이트를 포함하는 건전한 용접금속조직을 형성할 수 없게 되어 응고균열이나 지연균열이 생기기 쉽게 된다는 점이다.

이종용접을 실시하여 건전한 용접이음부를 얻기 위해서는 용접재료의 선정이 가장 중요하다. 건축구조용 스테인리스강의 이종용접용 용접재료를 선정하는 경우 기본적인 고려사항은 다음과 같다.

- 1) 용접이음부의 특성들이 건축기준법이 정하는 요구치를 만족할 것.
  - 2) 강재의 용접성 측면에서 본 적합성, 즉 용접균열 등이 발생하지 않을 것.
  - 3) 사용하는 용접재료는 건축기준법 또는 정부가 지정하는 용접재료일 것.
  - 4) 경제적인 용접일 것.
- 스테인리스강의 용접시공법으로서는 탄소강과 같이 SMAW, FCW에 의한 MAG용접, 솔리드와이어에 의한 MIG TIG 및 SAW가 이용 가능하다. 이종용접시 유의점으로는 최종적으로 이종이음부 용접금속의 조직을 오스테나이트 기지에 몇 %의 델타 페라이트가 혼재하는 조직이 되게 하는 것인데 이를 안정적으로 얻기 위해서는 다음과 같은 점이 중요한 사항이다.

- 1) MIG·MAG용접법에서는 모재의 희석이 과도하지 않게 저전류, 저속도 용접조건을 선정한다.
  - 2) 모재의 종류에 맞추어 적절한 용접재료를 선정한다.
  - 3) 모재 희석이 커지기 쉬운 SAW에서는 그 적용에 앞서 충분히 용접시공 조건을 확인한다.
- 실제로 스테인리스강 건축구조에 있어서 이종용접이 행해지는 경우는 SN400 + SUS304A(또는 316A) 조합과 SN490 + SUS304N2 조합을 대표적으로 생각할 수 있다. 전자의 경우, 일반적으로 309계 용접재료를 사용하여 적절한 희석이 얻어지는 용접조건으로 시공하

면 용접금속 조직이 오스테나이트 기지에 수%의 δ-페라이트를 함유하는 형태로 금속학적으로는 문제가 없다. 그러나 용접부 강도 특성에 관해서는 항상 overmatch를 원칙으로 하는 탄소강의 건축설계의 개념에서 보면 SUS304A 모재에 비해 용접금속은 undermatch가 되기 쉬워지는 문제가 생긴다. 이러한 경우, 이종용접용 용접재료로서는 범용의 309계 용접재료보다 강도 수준이 높은 309Mo, 309MoL 등과 같은 용접재료가 바람직하다.

후자의 경우, 고강도화를 목적으로 개발된 SUS304N2 강은 기존의 SUS304A강에 비해 0.2wt% 정도의 질소를 첨가한 고질소 스테인리스강이다. 이러한 고질소 스테인리스강을 일반적인 용접재료로 용접하면 용접금속 중 다량의 질소가 혼입되게 되므로 용접금속 중 페라이트량이 예상보다 저하되는 경향이 있다. 이 때문에 309계 용접재료를 사용하더라도 용접금속 중에는 적절한 페라이트량이 확보되지 못하여 고온균열이나 지연균열 발생과 같은 문제를 야기한다. 이를 방지하기 위해서는 보통보다 모재희석이 적게끔 시공조건을 설정하거나 혹은 309계 용접재료보다 페라이트 함유량이 많은 309Mo, 309MoL계 용접재료를 사용하는 것이 유효한 수단이다.

이상에서 살펴보았듯이 스테인리스강을 건축구조에 적용하고 그 이음부의 강도 특성을 평가한 경우 동종이음부나 이종이음부에 관계없이 용접금속은 undermatch가 되는 것이 현재 스테인리스강 용접재료의 현실이다. 이종용접에 사용되는 YF309도 강도면에서 YF308과 거의 동등 수준이므로 동종 접합부나 이종접합부에서 undermatch 현상은 생기게 된다. 내력설계의 관점에서는 235MPa 수준은 분명하지만 스테인리스강재가 지닌 높은 강도와 연성 특성을 구조물에서 유효하게 활용하려면 소성역을 넘는 용접이음부에서의 변형능이 중요하므로 건축용 스테인리스 용접재료로서는 고강도재의 개발이 필요한 과제이다.

## 5. 맺음말

다른 산업분야에서와 마찬가지로 건축 토목산업에 있어서도 용접부의 건전성 및 품질 향상과 함께 용접시공의 total cost 저감이라는 시장의 요구는 점점 높아져리라고 예상된다. 따라서, 본 기사에서는 주로 일본을 비롯한 선진국에서 최근에 화제가 되고 있는 용접관련 기술개발 동향 특히, 새로운 건축구조용강의 개발현황과 용접재료 신용접시공법과 관련한 최근의 개발동향에 대하여 개략적으로 논의하였다. 이러한 논의를 바탕으로 앞으로 국내 건축 토목산업에 있어서 핵심적인 생산 기반기술로서 용접기술의 발전에 큰 진전이 있기를 기대해 본다.



## 참고 문헌

1. Korea Iron & Steel Association: www.kosa.or.kr
2. H. Okamoto: Innovative steel for building structure and its application, Journal of Japanese Welding Society, 71-7(2002), 503-505(in Japanese)
3. ASTM A709/A709M-03: Standard specification for carbon and high strength low-alloy structural steel shapes, plates, and bars and quenched and-tempered alloy structural steel plates for bridges (2003)
4. F. Koshishi: Welding materials, Journal of Japanese Welding Society, 72-2(2003), 108-111(in Japanese)
5. JIS Z3312: MAG welding solid wires for mild steel and high strength steel (1999)
6. JIS Z3313: Flux cored wires for gas shielded and self-shielded metal arc welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel (1999)
7. Y. Nakanishi: Development of welding process and structural technology, Journal of Japanese Welding Society, 72-3(2003), 5-11(in Japanese)
8. T.Y. Yoon: RIST Internal Report(2003)
9. JIS G4321: Stainless steel for building structure(2000)
10. T. Maruyama: 建築鐵骨における異材溶接, 溶接技術, 2003년 2월호, 83-88



- 장용성(張雄成)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 윤태양(尹泰亮)
- 1956년생
- RIST 토목구조연구팀장
- 강교량 및 철재 도로시설물
- e-mail : tyoon@rist.re.kr