

대입열용접 특성

김 희 진, 유희수
한국생산기술연구원

Characteristics of High Heat Input Welding

Hee Jin Kim, H. S. Ryu
Korea Institute of Industrial Technology

Abstracts

용접입열 (heat input)은 용접시에 외부로부터 가해지는 열량으로 정의되기 때문에, 대입열용접은 용접입열량이 높은 용접이라고 정의할 수 있다. 통상적으로는 기존에 사용하던 용접기법보다 입열량이 높은 경우에 이를 대입열 용접기법이라고 부르게 되는데, 최근에는 편면 SAW 및 EGW기법 등이 대입열 용접기법으로 통칭되고 있다. 이들 기법의 공통된 특징은 one-pass 용접이라는 것과 용접열영향 부에서의 열전달이 2차원적이라는 것이다. 본 연구에서는 Rosenthal의 해석식을 이용하여 이들 두 기법의 열전달 특성을 fusion line 위치에서 분석하여 보았는데, 두께에 따른 열전달 특성에 있어서 커다란 차이를 보여 주게 됨을 확인하였다. 편면 SAW에서는 열이력이 두께의 영향을 받아 두께(입열)가 증가함에 따라 고온에서의 유지시간은 증가하고 냉각속도는 느려지게 된다. 그러나 EGW에서는 입열과 두께가 일차함수적인 관계를 가지고 있기 때문에 열이력에 미치는 두께(입열)의 영향이 없다는 결과가 도출되었다. 이러한 차이로 인하여 편면 SAW에서는 강판 두께가 증가함에 따라 fusion line에서의 충격인성은 저하할 것으로 예상되는 반면에 EGW에서는 두께의 영향을 받지 않을 것으로 예상되었다. 그럼으로 EGW용 대입열용접용 강재의 '대입열 용접성'을 정량적으로 평가할 목적으로 '적용 가능한 최대입열 수준' 또는 '적용 가능한 최대 강판두께' 등으로 평가하는 것은 의미가 없는 것이다. 단지 강판의 두께에 따라 강재의 화학조성이나 제조공정에 있어 차이가 있다면, 이로 인한 'EGW 용접성'의 차이는 있을 수 있다.

Key Words : High heat input welding, Electro-gas welding, Rosenthal equation

1. 대입열용접의 정의

용접입열 (heat input)은 용접시에 외부로부터 가해지는 열량으로 정의되는데, 아크용접에서는 단위길이 당 부가되는 전기적 에너지로 (kJ/cm 또는 kJ/mm의 단위로) 수치화하여 나타내지는 것이다¹⁾. 따라서 대입열용접은 용접입열량이 높은 용접이라고 할 수 있는데, '어느 수준 이상의 입열을 대입열용접이라고 한다' 라고 하는 기준은 정해진바 없다. 통상적으로 기존에 사용하던 용접기법보다 입열량이 높은 경우에 이를 대입열 용접기법이라고 부르게 된다. 예를 들면 수동용접이나 반자동용접은 용접입열이 10~20 kJ/cm 수준인데, SAW용접은 50 kJ/cm이상의 수준임으

로 SAW용접기법이 개발되었을 1940년 초에는 SAW기법이 대입열용접이라고 불리었을 것이다. 이후 1970년 들어서면서 편면SAW기법 (one-side SAW)이 개발되어 용접입열이 100 kJ/cm 이상으로 상승하게 됨에 따라 당시에는 편면 SAW기법이 대입열용접의 대명사가 되었다. 그런데 최근 500 kJ/cm 이상의 입열을 요구하는 탄뎀EGW (tandem electro-gas welding)기법이 조선분야에서 적용되면서 대입열용접이라는 용어가 국내 용접산업계에서 재차 거론되고 있다.

용접산업계에서 대입열 용접기법을 지속적으로 개발 적용하고자 하는 이유는 용접생산성을 향상시키고자 하는 단 하나의 이유 때문이다. 용접생산성을 높이기 위한 방안으로는 용접속도를

높이는 방법과 용접패스 수를 줄이는 방법이 있는데, 용접 패스수를 줄이기 위해서는 단위시간에 용접되는 금속의 양, 즉 용착속도 (deposition rate)를 높여야 한다. 그런데 용착속도는 용접전류에 비례하기 때문에 용착속도를 높이기 위해서는 보다 높은 전류를 사용해야 하고 그 결과 용접입열이 증가하여 대입열용접이 되는 것이다.

이상에서 기술한 바와 같이 대입열용접이 적용되는 용접기법은 시대적으로 바뀌면서 현재에는 500kJ/cm이상의 용접입열이 적용되는 탄뎀EGW기법을 칭하는 대명사가 되어 있다. 500 kJ/cm이상의 용접입열이 적용되는 용접기법에는 ESW (electro-slag welding)기법도 있는데 국내에서는 활성화 되어 있지 않아서 이에 대한 관심은 그리 크지 않은 것 같다.

이러한 상황에서 대입열용접을 용접입열량을 기준으로 하여 구분하고, 100kJ/cm 이상의 입열을 요하는 기법을 대입열용접이라고 임의적으로 규정한다면, 이에 는 편면SAW, EGW 와 ESW기법이 해당하는 것이다. 만약 500kJ/cm 이상으로 정의한다면 탄뎀EGW나 ESW기법으로 한정된다.

2. 대입열 용접기법의 특성

앞에서 언급하였듯이, 광범위한 대입열용접에는 편면SAW, EGW, ESW기법 등이 있는데, 이들은 용접입열량이 100kJ/cm 이상이라는 것이다. 그런데 기술적인 측면에서 이들이 가지는 공통된 특징을 보면 이들은 모두 한 패스 (one-pass)용접으로 주어진 용접을 끝낸다는 것이다. 단지 차이가 있다면 편면SAW는 아래보기 자세이고, EGW와 ESW는 입향상진자세로 용접이 이루어진다는 것이다.

편면SAW기법은 V-개선 내부에 금속분말을 살포하고, 한 개 또는 여러 개의 용접와이어 전극을 사용하여 주어진 두께의 강판을 아래보기 자세에서 one-pass로 SAW용접하는 것이다. 현재 국내 조선사에서 적용 가능한 강판의 최대 두께는 32mm정도 이다.

본 기법에서는 그루브 각도가 크기 때문에 강판두께가 증가함에 따라 필요한 용착금속의 양이 (그루브 면적이) 이차원적으로 증가하여 용접입열량이 강판의 두께에 따라 이차원적으로 증가하는 것이 특징이다(그림 1).

한편 EGW기법의 개선형상은 I-형상과 유사하

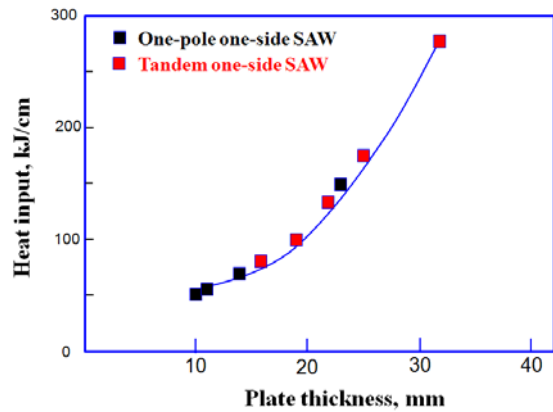


그림 1 편면SAW에서 강판 두께에 따른 입열량 변화

며, 55mm의 강판까지는 한 개의 전극을 사용하는 one-pole EGW로 시공 가능하고 그 이상의 두께에서는 2개의 전극을 사용하는 탄뎀 EGW기법을 적용되고 있다.

표 1은 EGW에서 사용되는 용접조건을 예를 보여주는 것인데²⁾, 35mm 강판을 one-pole EGW로 용접하게 되면 용접입열은 250kJ/cm 수준이고 70mm 강판을 탄뎀EGW로 용접하게 되면 용접입열은 480 kJ/cm 수준으로 상승하게 된다. 결과적으로 강판의 두께가 2배로 증가하여 용접입열도 2배 정도 증가한 것이다.

이와 같이 EGW에서 용접입열은, root gap 및 groove angle에 따라 다소의 차이는 있지만 그림 2에서 보여 주는 바와 같이, 강판의 두께가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가한다는 것이 특징이다. 그림 2의 직선적인 관계를 수식화하면 식(1)과 같이 아주 간단한 식으로 표현된다. 즉 두께가 1 mm 증가함에 따라 용접입열은 7.3 kJ/cm 씩 직선적으로 증가한다는 것이다.

$$\text{용접입열(kJ/cm)} = 7.3 \times \text{강판두께(mm)} \quad (1)$$

표 1 EGW의 대표적인 용접조건

강판 두께 (mm)	전극 수	용접조건			용접 입열 (kJ/cm)
		전류 (A)	전압 (V)	속도 (cpm)	
35	one	380	38	3.4	254
70	two	380	38	3.5	477
		380	36		

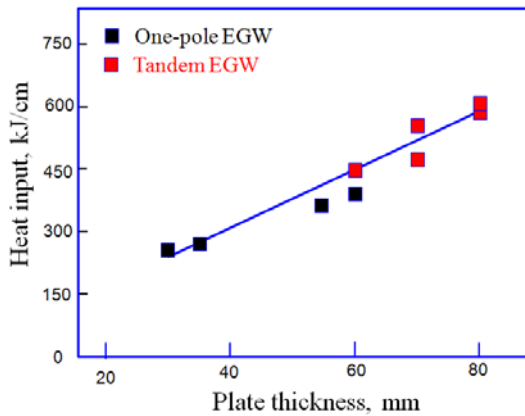


그림 2 EGW에서 강판 두께에 따른 입열량 변화

3. 대입열 용접부의 열전달 특성

용접에 의해 추가되는 용접열은 모재로 전달되어 fusion line (FL)에 인접한 부위는 매우 높은 온도로 가열되었다가 냉각된다. 그리고 최고 가열온도 및 냉각속도는 HAZ부의 미세조직 및 기계적성질 등을 지배하는 매우 주요한 변수이다. 다층용접부의 FL에서는 용접이 진행되는 동안 수회의 열사이클이 추가되는데, 첫 번째 사이클에서는 용융온도까지 가열되지만 두 번째 pass에서는 보다 낮은 온도로 가열되었다가 냉각된다. 그렇기 때문에 다층용접부의 FL에서는 조대화된 조직의 일부가 두 번째 이후의 열사이클에 의해 미세화될 수 있고, 그로 인하여 FL에서의 충격인성이 향상될 수 있는 것이다. 그러나 대입열용접(편면 SAW 및 EGW)은 한 번의 용접pass로 용접을 완료하는 것이기 때문에 HAZ에 추가되는 용접 열사이클은 1회 뿐이다. 그럼으로 대입열용접에서는 중첩 열사이클에 의한 조직 미세화 효과를 기대할 수 없는 것이다.

다음으로는 열전달 방향의 차이이다. 다층용접에서는 세 방향, 즉 폭방향(x-direction), 용접선 방향(y-direction) 그리고 두께방향(z-direction)으로 열전달이 이루어지기 때문에 3차원적인 열전달(three-dimensional heat transfer)이 일어난다. 그런데 대입열용접에서는 두께방향으로의 열전달이 없기 때문에 2차원적인 열전달(two-dimensional heat transfer)이 일어난다는 것이다. 따라서 동일한 입열조건이라고 하더라도, 대입열용접(편면 SAW 및 EGW)에서는 고온에서

의 유지시간이 길어지게 되고 냉각속도는 느려지게 되는 것이다.

4. EGW 용접부의 열전달 특성

대입열용접용접부는 편면 SAW기법이든 EGW 기법이든 간에 2차원적인 열전달이 이루어진다는 사실은 동일한데, 두께에 따른 열사이클 이력(thermal history)에 있어서는 차이가 있기에 이에 대해 보고하고자 한다.

2차원적인 열전달은 주로 박판을 one-pass용접하는 경우를 대상으로 하여 HAZ특성을 수학적으로 연구함에 있어 자주 사용되는 가정인데 이러한 박판의 경우에는 두께의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 후판용접에서는 적용 기법에 따라 열이력에 차이가 있을 것으로 생각되어 본 고찰을 하게 되었다. 용접부에서의 열전달 특성은 1941년에 Rosenthal이 최초로 이론적인 해석 결과를 보고하였는데^{3,4}, 그는 강판 표면에 열원(heat source)이 있다고 가정하였으며 표면에서의 열전달(surface heat transfer)은 무시하였다. 이후 Tanaka 등⁵은 표면 열전달을 고려한 해석식을 보고하였고, Kasuya 등⁶은 열원의 위치까지 고려한 해석식을 도출하였다. 대입열용접에서는 열원이 강판 내부에 존재하고, EGW의 경우에는 동담금(copper shoe)에 의한 표면 열전달이 크기 때문에 Rosenthal의 해석식은 적합하지 않다. 하지만 본 보고에서는 Rosenthal의 해석식이 보다 간단하기 때문에 그의 해석식을 사용하여 열전달 특성의 차이를 밝혀보고자 하였다.

Rosenthal Eq.에서 2차원 열전달을 가정하고 FL에서의 냉각시간을 구해보면 식 (2)와 같이 표현된다. $\Delta t_{800-500}$ 은 FL에서의 온도가 800°C부터 500°C까지 냉각되는데 소요되는 시간이며, q/v 는 용접입열 (HI)이고 t 는 판재의 두께이다. 그리고 식 (2)에 나타난 다른 변수들은 모두 재료 상수이며, T_0 는 강판의 온도이다.

$$\Delta t_{800-500} = \frac{(q/v)^2}{4\pi\kappa c \rho (T)^2} \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right] \quad (2)$$

즉 $\Delta t_{800-500}$ 은 $(HI/t)^2$ 에 비례하는 값이 된다. 그런데 편면 SAW에서는 그림 1에서 보여주는

바와 같이 (HI/t)가 t의 함수이며, t가 증가함에 따라 증가하게 된다. 따라서 강판두께(t)가 증가함에 따라 $\Delta t_{800-500}$ 는 증가하게 되는 것이다. 그러나 EGW에서는, 그림 2와 식 (1)에서 보여준 바와 같이, (HI/t)가 7.3으로 일정함으로 $\Delta t_{800-500}$ 는 일정한 값을 가지게 된다. 다시 말하면 EGW에서의 냉각속도는 강판의 두께에 관계없이 항상 일정하다는 것이다.

한편, 2차원적인 열전달 상태에서 주어진 온도 (T)보다 높은 온도로 유지되는 시간 ($t_{>T}$)은 식(3)으로 계산된다.

$$t_{>T} = f_2(T) \frac{(q/v)^2}{\kappa c \rho (t)^2} \left[\frac{1}{(T_m - T_0)^2} \right] \quad (3)$$

이 식에서 보듯이 $t_{>T}$ 도 (HI/t)²에 비례하는 값이다. 그럼으로 $t_{>T}$ 도 편면SAW 용접부에서는 두께에 따라 증가하지만 EGW 용접부에서는 두께에 관계없이 일정한 값을 가지게 된다.

이상에서 기술한 바와 같이 EGW용접부에서는 2차원적인 열전달 특성으로 인하여, 즉 (HI/t)가 일정하기 때문에 모재 두께가 다르다고 하여도 HAZ에서의 열이력은 동일하다는 것이다.

5. 대입열 용접용강의 정의

일반적으로 대입열 용접용강은 높은 입열조건에서도 HAZ에서의 기계적성질이 만족되는 강으로 인식되고 있다. 용접입열이 높아지면 고온에서의 유지시간이 길어지고 냉각속도가 느려지기 때문에 미세조직이 취화 되어 기계적성질, 특히 인성이 크게 저하하게 되는 것이 일반적인 현상이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 개발된 강종이 '대입열용접용 강'인데, 이들은 고입열 용접 조건에서도 충분한 인성치를 확보할 수 있도록 특별히 제조된 강이라고 인식하고 있다. 그렇다면 대입열용접용 강은 용접 가능한 최대입열을 기준으로 하여 구분되어 저야 할 것이다. 예를 들면 '적용 가능한 최대입열이 300 kJ/cm인 강재', 또는 '600 kJ/cm의 입열까지도 용접 가능한 강재' 등으로 명명되어야 한다는 것이다. 그리고 이러한 방법으로 강재가 구분되면, 그림 2에 근

거하여 EGW용접 가능한 최대 두께를 예측할 수 있을 것이다. 예를 들면 300 kJ/cm가 최대입열인 강재라면 40mmt의 두께까지 가능할 것이고 600kJ/cm의 입열까지 적용 가능한 강재라면 EGW 적용 가능한 최대 두께는 80mmt가 되는 것이다.

그러나 앞에서 기술하였듯이, EGW의 열전달이 2차원적이고 (HI/t)가 일정함으로 HAZ에 겪게 되는 열사이클은 두께에 관계없이 동일한 것이다. 결국 40mmt강재나 80mmt강재나 EGW용접부에서는 동일한 열사이클을 받게 되어 열화정도도 동일하다는 것이다. 이러한 이론적 해석이 정당하다면 HAZ의 열화정도도 FL으로부터의 거리만의 함수일 뿐 두께의 영향은 없다는 것이다.

이상의 결과에서 보여 주었듯이, EGW의 열이력은 두께의 영향을 받지 않기 때문에, 강재측면에서 보면 입열 수준은 아무런 의미가 없는 수치인 것이다. 입열 수준이 다르다고 하더라도 HAZ에서의 열이력은 동일하기 때문이다. 따라서 중요한 것은 입열 수준이 아니라 'EGW의 열이력'인 것이다. 결론적으로 말하면, 강재의 '대입열 용접성'을 평가함에 있어 그 평가의 척도는 입열 수준이 될 수 없다는 것이다. 즉 '어느 수준의 입열까지 적용가능하다'라는 평가는 있을 수 없고, "EGW용접이 가능하냐? 안하냐?" 하는 문제인 것이다. 입열이 높은 70mmt 강판의 EGW 용접부에서 충격치를 만족하지 못하였다면, 35mmt 강판으로 하여 입열을 낮춘다고 하더라도 HAZ의 충격치는 향상되는 것이 아니고 75mmt 용접부와 동일한 수준을 보여 줄 것으로 예상되는 것이다. 이러한 예상은 많은 가정을 가지고 수행된 것이기 때문에 향후 이러한 예측을 검증할 수 있는 시험이 진행되었으면 한다.

6. 맺 음 말

대입열용접의 입열 기준은 고입열 용접기법이 개발되는 과정에 변화하여 왔는데, 최근에는 편면 SAW 및 EGW기법 등이 대입열 용접기법으로 통칭되고 있다. 이들 기법의 공통된 특징은 one-pass 용접이라는 것과 용접열영향부에서의 열전달이 2차원적이라는 것이다. 그런데 Rosenthal의 해석식을 이용하여 이들 두 기법의 열전달 특성을 분석하여 보면, 이들 두 기법의 열

전달 특성에 있어서 차이를 보여 주게 된다. 즉 편면 SAW에서는 열이력이 두께의 영향을 받아 두께(입열)가 증가함에 따라 고온에서의 유지시간은 증가하고 냉각속도는 느려지게 된다. 그러나 EGW에서는 입열과 두께가 일차함수적인 관계를 가지기 때문에 열이력에 미치는 두께(입열)의 영향이 없다는 것이다. 이러한 차이로 인하여 편면 SAW에서는 강판 두께가 증가함에 따라 fusion line에서의 충격인성은 저하할 것으로 예상되는 반면에 EGW에서는 두께의 영향을 받지 않을 것으로 예상된다. 그럼으로 EGW용 대입열용접용 강재의 대입열 용접성을 평가함에 있어 사용 가능한 최대입열 수준 또는 적용 가능한 최대 강판 두께 등으로 평가하는 것은 의미가 없다고 판단된다. 단지 강판의 두께에 따라 강재의 화학조성이나 제조공정에 있어 차이가 있다면, 이로 인한 'EGW 용접성'의 차이는 있을 수 있다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회: 용접·접합 용어사전, 2000, 228
2. 윤진오: 제6회 조선·해양용 강재 발전 심포지움, 경주, 2009. 11
3. D. Rosenthal: Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, *Welding Journal*, **21-5** (1941), 220-s
4. D. Rosenthal: The theory of moving source of heat and its application to metal treatments *Trans. AIME*, **43-11** (1946), 849
5. S. Tanaka: A study on heat conduction of a moving heat source, *Journal of JWS*, **13-9** (1943), 347
6. T. Kasuya, N. Yurioka: Prediction of welding thermal history by a comprehensive solution, *Welding Journal*, **72-3** (1993), 107-s