

해석 해의 온도곡선을 이용한 템퍼비이드 용접공정 평가기술

이호진*·† · 이봉상* · 박광수** · 변진귀** · 정인철**

*한국원자력연구원, 원자력재료연구부

**두산중공업, 기술연구원

Techniques for Estimating Temper Bead Welding Process by using Temperature Curves of Analytical Solution

Ho-Jin Lee*·†, Bong-Sang Lee*, Kwang-Soo Park**, Jin-Gwi Byeon** and In-Chul Jung**

*Dept. of Nuclear Materials Research, KAERI, Daejeon 305-353, Korea

**Corporate R&D Institute, Doosan Heavy Industries & Construction, Changwon 641-792, Korea

†Corresponding author : hjlee1@kaeri.re.kr

(Received January 13, 2010 ; Revised March 25, 2010 ; Accepted June 28, 2010)

Abstract

Brittle microstructure created in a heat affected zone (HAZ) during the welding of low alloy steel can be eliminated by post-weld heat treatment (PWHT). If the PWHT is not possible during a repair welding, the controlled bead depositions of multi-pass welding should be applied to obtain tempering effect on the HAZ without PWHT. In order to anticipate and control the tempering effect during the temper bead welding, the definition of temperature curve obtained from the analytical solution was suggested in this research. Because the analytical solution for heat flow is expressed as a mathematical equation of weld parameters, it may be effective in anticipating the effect of each weld parameter on the tempering in HAZ during the successive bead depositions. The reheating effect by the successive bead layer on the brittle coarse grained HAZ formed by earlier bead deposition was estimated by comparing the overlapped distance between the temperature curves in the HAZ. Three layered weld specimens of SA508 base metal with A52 filler were prepared by controlling heat input ratio between layers. The tempering effect anticipated by using the overlapped distance between the temperature curves was verified by measuring the micro-hardness distribution in the HAZ of prepared specimens. The temperature curve obtained from analytical solution was expected as a good tool to find optimal temper bead welding conditions.

Key Words : Temper bead welding, Tempering, Analytical solution, Temperature curve, Overlap

1. 서 론

저합금강을 용접하는 경우 용접 열영향부 (HAZ) 에는 조대화된 마르텐사이트와 같은 취약한 조직이 형성된다. 이와 같이 취약한 조직을 제거하고 건전한 용접부를 얻기 위해서는 용접 후 후열처리 (PWHT) 를 수행하여 취약한 조직에 템퍼링 효과를 부여해야 한다. 그러나 복잡한 플랜트 현장에서 이루어지는 보수용접의 경우 다른 배관이나 장치에 의한 열적 기계적 간섭에

의해 후열처리가 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 경우 제어된 용접 비이드 적층 방법, 즉 템퍼 비이드 (temper bead) 용접을 수행하여 후열처리 없이 용접재에 템퍼링 효과를 부여할 수 있다. ASME Code Section IX 에서는 원전 배관이나 용기의 보수 용접에 적용할 수 있는 후열처리 면제 조건의 템퍼비이드 용접에 대한 내용을 제시하고 있다^{1,2)}.

두 개의 비이드 층을 높이 방향으로 적층하는 경우 아래층에 의해 형성된 열영향부는 위층 비이드 적층에 사용된 용접 열에 의해 템퍼링 될 수 있다. 아래층에

사용된 입열량보다 큰 용접 입열 량으로 위층을 용접하는 경우 아래층에 형성된 열영향부의 미세조직까지 재가열시켜 미세화하거나 혹은 템퍼링 시킨다. 이와 같이 세 개 이상의 비이드 적층을 통해 후열처리 없이 열영향부에 템퍼링 효과를 부여하는 용접 방법을 템퍼비이드 용접이라고 한다^{3,4)}.

최적의 템퍼비이드 용접조건을 선정하기 위해서는 용접 시편을 제작하고, 열영향부의 미세경도를 측정된 후 템퍼링의 정도를 측정 비교하여 최적의 조건을 찾는 방법을 사용한다. 이 방법은 여러 가지 조건에 대한 많은 개수의 용접시편이 필요하며, 용접 조건의 범위를 잘못 선정하는 경우 최적의 템퍼비이드 용접조건을 얻지 못할 수 있다. 더욱이 용접전류, 용접속도, 비이드 층 간 입열량 비율 등의 여러 용접변수들이 중첩되어 열영향부에 템퍼링 영향을 주게 되므로 각각 변수에 대한 템퍼링 민감도를 예측하기 어렵다.

실험적인 방법을 사용하기 전에 유한요소법과 같은 전산해석을 통해 이와 같은 각각의 변수에 따른 템퍼링 효과를 예측할 수 있으나 각 변수에 대한 템퍼링 영향 정도를 평가하기 위해서는 각 변수의 여러 조건에 대하여 개별적인 계산을 수행해야하므로 많은 노력과 수고가 요구된다. 따라서 이와 같은 방법 이외에 현장에서 손쉽게 템퍼비이드 용접의 최적 조건을 예측하기 위한 새로운 방법이 요구되고 있다⁵⁾.

본 연구에서는 다층용접에서 각 비이드 적층에 의한 열영향부의 템퍼링 효과를 기존의 용접 열 유동 해석해를 이용하여 예측 및 평가하는 방법을 제시하고, 이 방법이 실제 템퍼비이드 용접 평가에 적용할 수 있는지를 실험을 통해 확인하였다. 용접 열 유동 해석 해의 경우 수식 형태로 표현되므로 유한요소 방법에 의한 전산해석에 비해 각 용접변수의 효과를 수학적으로 손쉽게 예측할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 해석해의 경우 많은 가정을 통해 얻어진 식이므로 실제 용접물의 적용에 많은 한계를 갖는다. 따라서 이러한 한계 내에서 실제 용접물에 대한 최적의 템퍼비이드 용접 공정을 예측하고 평가에 적용할 수 있는지를 확인하고자 하였다. 본 연구에서는 기존의 용접 열 유동 해석 해를 사용하여 온도곡선을 정의하고, 각 비이드 층으로부터 얻어진 온도곡선의 관계로부터 용접 열영향부의 템퍼링 정도를 예측하였다.

2. 비이드 층 사이에서의 템퍼링 효과

저합금강의 용접 후 모재에 형성된 열영향부는 최고 도달 온도와 냉각속도에 의해 다음과 같이 네 개의 영역 (sub-HAZ) 으로 구분될 수 있다. 약 1000 °C ~

용융온도 사이는 조대 결정립 영역 (Coarse Grained HAZ : CG HAZ), 약 900 °C ~ 1000 °C 사이는 미세 결정립영역 (Fine Grained HAZ : FG HAZ), 약 720 °C ~ 900 °C 사이는 임계 간 영역 (Inter-Critical HAZ : IC HAZ), 그리고 약 650 °C ~ 720 °C 사이는 미 임계영역 (Sub-Critical HAZ : SC HAZ) 으로 구분 한다. 각 영역은 그 간격이 좁고 미세조직이 복잡하게 변하므로 정확히 경계를 구분하기는 어렵다^{3,4)}.

한 개의 비이드가 적층되는 동안 형성된 취약한 조대 결정립 영역의 열영향부는 그 옆에 겹쳐서 적층되는 비이드 혹은 그 위에 적층되는 비이드의 용접 열에 의해 재가열되어 조직이 미세화 되거나 템퍼링 된다. 임계 간 영역에 해당하는 온도 범위, 즉 A1 온도 이상으로 재가열되는 조대 결정립 영역의 열영향부는 미세조직의 변화를 보이며 미세화 된다. Fig. 1 에서 보듯이 두 개의 비이드 적층 상태에서 아래층에 의해 형성된 열영향부에 위층의 용접 열에 의한 재가열 온도 분포 양상을 나타내고 있다. Fig. 1 과 같은 조건에서 최소한 식 (1) 의 조건을 만족하는 경우 아래층 용접 시 형성된 열영향부에 템퍼링 효과를 부여할 수 있다⁶⁾. 식 (1) 은 템퍼링의 효과 요인 중에서 냉각 속도를 고려하지 않고 최고 도달 온도만을 고려한 조건이므로 이 식은 용접 물에 템퍼링을 부여할 수 있는 필요/충분조건이 아니라 최소한의 필요조건임을 알 수 있다.

$$P < C < R \tag{1}$$

위 식에서 P 는 위 비이드 층의 용융 깊이와 조대화 결정립 두께를 포함한 두께이며, C 는 아래 비이드 층의 모재 용융깊이와 평균 덧살 두께의 합을 나타내며, R 은 위층에 의해 형성된 모재 용융깊이와 재가열 깊이의 합을 나타낸다. 아래 비이드 적층에 형성된 열영향부에 위의 비이드 적층 용접 열이 전달되기 위해서는 아래 비이드 적층의 용접 입열량 보다 둘째 용접 입열량이 커야 한다. 본 연구에서는 식 (1) 의 조건을 템퍼링이 발생하기 위한 최소한의 조건으로 하고, 용접 입열량에 의한 열 유동 해석 해를 사용하여 각 비이드 적층 시 형성되는 용융선 이하의 영역에서의 온도 곡선을 계

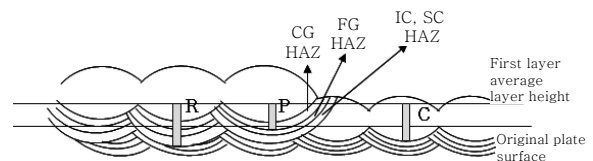


Fig. 1 Tempering conditions between two deposited weld layers

산하고 그 관계로 부터 템퍼링 정도를 예측하고자 하였다.

3. 용접 열영향부의 온도 분포 계산

많은 연구자들은 용접 아아크가 이동하는 한 개의 비이드 적층과정을 준 정상상태로 가정한 후 열 유동 해석 결과를 수학적으로 표현하고자 하였다. 점 열원, 일정한 열 물성, 간단한 용접부 형상을 가정하여 수학적으로 표현하는 해석 해의 경우 실제 용접 열 유동을 정확히 표현하기는 어려우나 수학적 표현이 가능하므로 쉽게 적용할 수 있는 장점을 갖는다. 식 (2) 에 의하면 임의의 위치에서의 온도 변화는 위치, 시간, 용접 아아크의 입열량, 아아크의 이송속도, 소재의 열 물성 등에 의해 결정된다. 반 무한 평판에서의 용접에 의한 온도 분포는 준 정상상태로 가정하는 경우 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다⁷⁾.

$$\theta - \theta_0 = MF \tag{2}$$

$$M = \frac{Qv}{4\pi\lambda\kappa} \tag{2-1}$$

$$F = \frac{1}{\rho} e^{-(\rho+\xi)} \tag{2-2}$$

$$\xi = \frac{v}{2\kappa} w \tag{2-3}$$

$$\eta = \frac{v}{2\kappa} y \tag{2-4}$$

$$\zeta = \frac{v}{2\kappa} z \tag{2-5}$$

$$\rho = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2} \tag{2-6}$$

용접재의 온도 분포는 식 (2) 에서 보듯이 M 과 F 의 곱으로 표현된다. 무차원 변수 M 은 입열 량의 크기를 결정하는 변수로서 용접 열원의 열 밀도 Q , 용접 열원 속도 v , 열 전도계수 (thermal conductivity) λ , 열 확산계수 (thermal diffusivity) κ 로 결정된다. 무차원 변수 F 값은 온도의 분포를 나타내는 항으로써 v , (w, y, z) , 와 κ 로 결정되는 이동 좌표 무차원 변수 ξ, η , 와 ζ 의 함수 형태로 표현되며, θ_0 는 초기 온도를 나타낸다. 여기서 w 는 용접방향, y 는 가로방향, z 는 모재의 두께 방향 좌표를 나타낸다.

식 (2) 를 사용하여 계산한 용접 열영향부에서의 온도 분포가 열영향부의 템퍼링 효과를 해석할 정도로 충분히 정확한가를 확인하고, 여러 가지 가정으로 얻어진

위와 같은 해석 식을 사용하는 경우 적용할 수 있는 초기 온도 및 등가의 일정 열 물성 등을 결정하기 위해 유한요소 방법으로 계산된 온도분포와 비교하였다.

Fig. 2 와 같이 20 mm × 150 mm 의 모재에 세 개의 비이드 덧살 층을 2 mm, 2.7 mm, 그리고 3.3 mm 높이로 각각 적층하는 경우에 대하여 유한요소 방법으로 2차원 열 유동 해석을 수행하였으며 경계조건으로 용접물 표면의 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 첫째 비이드 적층의 용접 입열량은 1886W 이며, 용접 속도는 0.003 m/sec, 용접 효율은 90% 로 하였다. 각 비이드 적층 입열량 비는 1:1.26:1.5 로 하였다. 비이드 적층을 모델링하기 위해 요소 재생성 (element rebirth) 방법을 사용하였다⁸⁾. ABAQUS 상용코드를 사용하여 계산하였으며 물성은 Fig. 3 과 같은 SA508 저합금강 소재 및 용가재에 대한 물성을 사용하였다.

위와 같은 용접조건과 동일한 조건으로 해석 해를 사용하여 온도분포를 구하였다. 실제 용접아아크는 점열원이 아니므로 좀 더 가까운 모사를 위해 한 개의 아아크를 4 개의 점열원으로 가정하여 식(2) 를 적용하였다. 각각의 용접 열원에 대한 온도 분포를 계산한 후 총 합을 구하여 열영향부에서의 온도 분포를 계산하였다⁹⁾. 임의의 비이드가 적층되는 경우 비이드 용융선의 중앙에서, 즉 무차원 변수 ξ, η 는 0 으로 하고 모재 방향으로의 온도 분포를 구하였다. 재료의 적절한 등가 열 물성을 찾기 위해 몇 개의 온도에서의 물성을 넣어 가면서 온도분포의 변화를 확인하였다.

유한요소 방법 과 해석 해로부터 얻어진 용융선 밖의

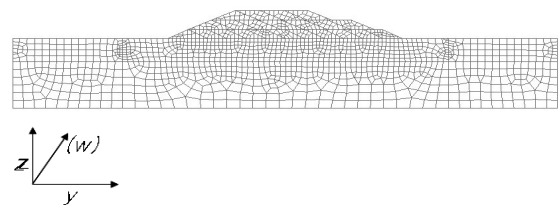


Fig. 2 Meshed domain of three layer weldment

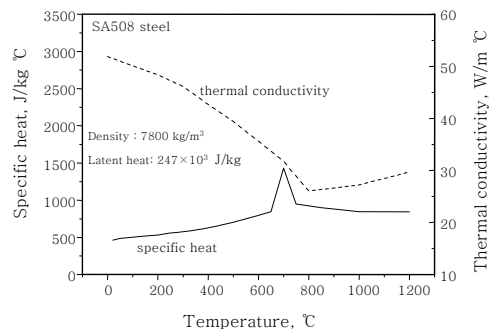


Fig. 3 Temperature dependent thermal properties of SA508 steel for calculation

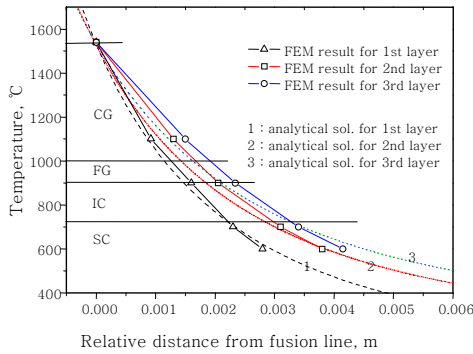


Fig. 4 Comparison of temperature curves calculated by analytical solution and finite element method

온도 분포, 본 논문에서는 온도곡선으로 정의한 곡선을 각각 구하여 비교하였다. Fig. 4 에서와 같이 각 적층에 의한 온도 분포는 용융온도 (1530 °C) 에 해당하는 위치를 0 에 일치시켜 서로 비교하였다. 식 (2) 에 사용된 재료의 열 물성은 일정한 값으로서 SA508 소재의 350 °C 물성, 즉 44.4 W/m°C 의 열 전도계수와 1.1×10^{-5} m²/sec 의 열 확산계수를 사용하고, θ_0 는 inter-pass 온도를 사용한 결과 Fig. 4 와 같이 두 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다¹⁰⁾.

Fig. 4 는 전산해석과 해석 해를 사용하여 얻어진 결과로서 세 개의 비이드 층이 적층되는 경우, 각 비이드 적층에 대하여 용융선으로부터의 거리에 따른 온도 분포를 비교하고 있다. 이와 같이 용융선을 일치시키는 경우 서로 다른 변수로 수행된 용접에 의한 열영향부의 형상을 쉽게 비교할 수 있다. Fig. 4 와 식 (2) 에서 보듯이 온도곡선은 지수함수 형태로 감소하므로 임의의 용접 입열 량 증가에 대하여 조대 결정립 영역에 해당하는 온도의 영역의 폭 증가에 비해 낮은 온도영역인 임계 간 영역이나 미 임계 영역의 폭 증가가 상대적으로 크다. 따라서 비이드 층 간 입열 량의 증가에 의해 아래 비이드 층을 통과하여 재 가열이 이루어지고, 모재 열영향부의 조대 결정립 영역에 템퍼링 효과를 부여할 수 있음을 예측 할 수 있다.

4. 시편제작 및 미세경도 측정

Table 1 과 같은 용접조건으로 네 종류의 시편을 제작한 후 해석 해의 온도곡선을 이용한 열영향부의 템퍼링 효과 예측 방법을 적용하였다. 모재는 20 mm 두께의 SA508 Gr.3 소재를 사용하였으며, 용가재는 Ni 합금인 A52 를 사용하여 Fig. 5 와 같이 세 개의 비이드 층을 적층 하였으며 후열처리는 수행하지 않았다. 이와 같은 시편은 저 합금강의 예방 보수에 사용되는

Table 1 Weld layer deposition conditions of three layer deposited weldments

Specimen No.	Bead layer No.	Peak current (A)	Base current (A)	Wire feed (mm/min)	Voltage (V)	Weld speed (mm/min)	Energy ratio	Layer height (mm)
T1	1	293	146	1488	11	124	1	2.5
	2	213	146	1265	11	124	0.8	2.3
	3	213	146	1265	11	124	0.8	3
T2	1	271	136	1955	11	150	1	2.1
	2	301	211	2541	11	150	1.26	2.4
	3	361	253	3049	11	150	1.56	3
T3	1	293	146	1488	11	124	1	1.8
	2	293	146	1488	11	124	1	1.8
	3	293	146	1488	11	124	1	2.8
T4	1	229	114	1430	11	110	1	1.8
	2	343	171	2145	11	110	1.5	2.5
	3	343	171	2145	11	110	1.5	4.2

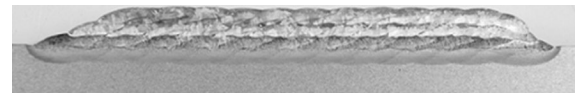


Fig. 5 Typical cross section of three layer deposited weldment

오버레이 용접에서 후열처리 없이 열영향부의 템퍼링 효과를 부여하기 위한 템퍼비이드 용접 평가용 시편이다. 펄스 형 자동 GTAW 를 사용하여 용접하였으며, 예열 및 inter-pass 온도는 66 °C 로 하였다. 같은 층에서 비이드와 비이드의 겹침 비율은 50 % 로 하였다. Table 1 의 비이드 층의 높이는 아래 비이드 층 용융선에서 그 위에 적층된 비이드 층의 용융 선까지의 거리로서 용접 후 제작된 시편으로부터 측정하였다.

Table 1 과 같은 조건으로 제작된 시편의 열영향부 템퍼링 정도를 비교하기 위해 미세경도를 측정하였다. 미세경도의 변화는 템퍼비이드 용접 후 템퍼링 정도를 비교하기 위해 많이 사용되고 있는 비교 측정 방법으로 알려져 있다³⁾. Fig. 6 에서 보듯이 Table 1 의 T1 시편의 열영향부에서 가장 큰 미세경도 값을 나타내고 있다. T1 시편의 경우 둘째 층이 첫째 층보다 입열량이 적으므로 예상했던 대로 가장 템퍼링 효과가 적게 나타나고 있다. 그러나 이 경우에도 한 개의 비이드 적층에 의해 형성된 열영향부의 마르텐 사이트 조직에서 측정되는 400 Hv 이상값 보다 적은 350 Hv 이하의 값을 보이고 있는 것으로 보아 비이드와 비이드 간의 겹침과 다층용접에 의한 낮은 온도에서의 템퍼링 효과가 어느

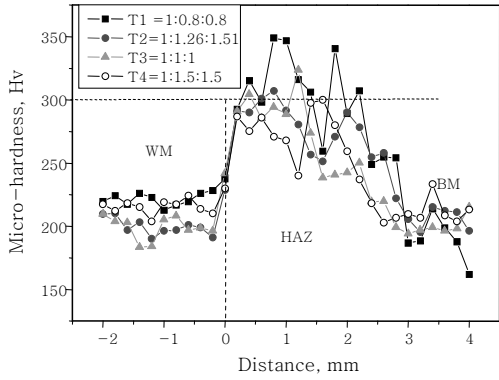


Fig. 6 Micro-hardness distributions around the HAZ of the specimens which are prepared with welding condition listed in Table 1

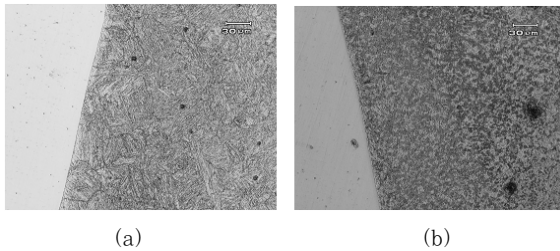


Fig. 7 Microstructures in coarse grained HAZ after welding. (a) T1 specimen and (b) T2 specimen

정도 나타나고 있는 것으로 보여 진다. T2, T3, T4 시편의 경우 조대 결정립 영역에서 300 Hv 이하의 값을 보여주고 있으며 T4 시편의 템퍼링 정도가 크게 나타나고 있는 것을 볼 때 셋째 층보다 둘째 층에 의한 템퍼링 효과가 크게 작용하는 것으로 예측된다. Fig. 7은 T1 시편과 T2 시편의 용융선 근처에서의 미세조직을 나타내고 있다. T1 시편의 경우 마르텐사이트 조직에서 나타나는 래스(lath) 조직이 선명히 보이며, T2 시편의 경우 래스 조직이 템퍼링되어 선명히 보이지 않는다.

5. 해석 해를 이용한 템퍼링 효과 평가

식 (2) 와 같은 용접 열유동 해석 해를 사용하여 세 개의 비이드 층이 적층되는 경우에 대한 템퍼링 효과를 해석하였다. Table 1 과 같이 시편을 제작한 조건을 사용하여 해석 해의 입력 값으로 사용하였다. 식 (2) 는 소재의 열 물성이 온도의 함수가 아닌 일정한 값으로부터 얻어진 식이므로 SA508 모재에 A52 용가재를 사용한 이중 재료 용접의 열 유동을 정확히 모사하기는 어렵다. 본 연구에서는 모재에 비해 용가재의 부분이

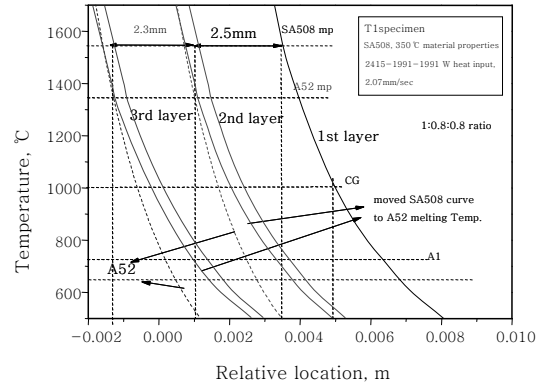


Fig. 8 Anticipation of tempering effect on the coarse grained HAZ of T1 specimen

작아 열 유동 해석에 A52 용가재의 물성보다는 SA508의 열 물성에 크게 의존한다고 가정하였다. 단지 용융선을 결정하는 용융온도는 둘째 층 및 셋째 층의 경우 A52 용가재의 용융온도로 약 1350 °C 를 사용하였다. 해석 해의 입력 값으로 Fig. 4 의 비교 과정에서 얻은 SA508 강의 350 °C 의 열 물성을 등가 열 물성으로 적용하였다.

비이드 층 간 입열량 비를 1:0.8:0.8 의 비로 제어한 경우 각 비이드 층에서 얻어진 온도곡선을 Fig. 8 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 둘째 층 및 셋째 층으로부터 얻어진 온도곡선을 첫째 층으로부터 얻어진 용융선에 대하여 비이드 높이, 즉 비이드 적층으로 형성된 용융선과 용융선 사이의 거리, 만큼 평행이동 하였다. 따라서 Fig. 8 의 가로축은 첫째 비이드 적층으로부터 얻어진 위치에 대한 온도분포를 기준으로 하여 각 비이드 적층에 의한 상대적 위치를 나타낸다. Fig. 8 에서 보듯이 첫째 비이드 층의 용융선은 모재의 용융 온도 즉 약 1530 °C 온도 위치에서 용융선이 형성되고, 둘째 층의 경우 첫째 층으로부터의 용융선 사이의 거리가 2.5 mm 이므로 A52 용가재 내에서 형성되는 둘째 비이드 층의 용융선의 경우 A52 용융온도인 약 1350 °C 의 위치를 첫째 층의 용융선 위치로부터 상대적으로 2.5 mm 좌측에 위치하도록 평행 이동하였다. 결과적으로 Fig. 8 에서 보듯이 각 온도곡선은 상대적인 용융선의 위치와 각 비이드 적층에 의한 재가열 온도분포를 나타내므로 비이드 적층에 의한 템퍼링 정도를 평가할 수 있는 자료를 함축적으로 포함하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8 에서 보듯이 첫째 층의 온도곡선에서 1000 °C 에서 용융 온도까지의 영역에 해당하는 영역이 취약한 조대 결정립 영역이라고 할 때, 둘째 층의 온도곡선 중

720 °C 이상의 온도 영역과 겹치는 영역이 거의 없다. 즉 둘째 층 적층에 의해 첫째 층의 조대 결정립 영역이 미세화 되기는 어려운 조건임을 알 수 있다. 셋째 층에 의한 재 가열 효과 역시 650 °C 이상의 영역으로 가열 되지 못하므로 템퍼링 효과를 거의 주지 않고 있음을 예상할 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 6의 미세경도 결과와 Fig. 7의 미세조직의 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 8에서의 은선 곡선은 SA508 소재의 열 물성 대신 A52 열 물성, 즉 열 전도계수 18.1 W/m°C, 열 확산계수 $4.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 사용한 경우이다¹¹⁾. 이 곡선은 SA508 모재와 A52 용가재를 사용하는 이중재 료 용접에서 얻을 수 있는 하한 온도곡선이라고 생각할 수 있다.

Fig. 9, 10, 11은 비이드 층의 용접 입열량 비를 1:1.26:1.51, 1:1:1, 그리고 1:1.5:1.5로 각각 제어한 T2, T3, T4의 용접조건들로부터 얻어진 온도 곡선들을 나타내고 있다. Fig. 9에서 보듯이 T2 시편 모재에 형성된 열영향부는 셋째 층 보다는 둘째 비이드 층에 의해서는 약간의 미세조직의 미세화와 함께 재 가열에 의한 템퍼링 효과가 예측된다. 둘째 비이드

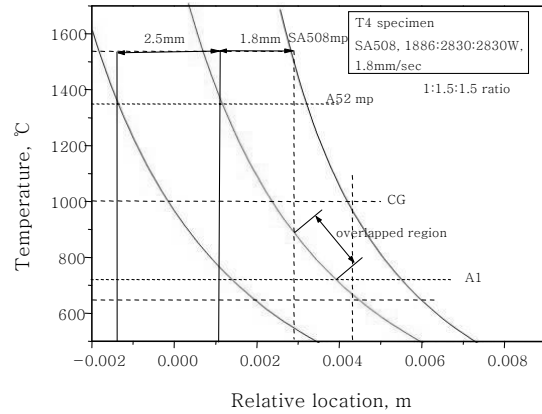


Fig. 11 Anticipation of tempering effect on the HAZ of T4 specimen

층에 의해 형성된 열영향부는 다시 셋째 층의 입열에 의해 재 가열되어 템퍼링되는 것을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 겹치는 영역 (overlapped region)으로 표시된 부분은 첫째 비이드 적층에 의해 형성된 조대 결정립 영역 중에서 둘째 비이드 적층 시 형성된 A1 온도 이상의 영역과 겹치는 영역을 나타낸다. 본 연구에서는 A52 용가재를 사용하였으므로 둘째 층 적층에 의해 형성된 열영향부의 템퍼링 정도는 고려하지 않았으나 저합금 동종재료 용접의 경우 각 비이드 적층으로부터 얻어지는 온도곡선을 모두 고려하여 용착금속부에서의 템퍼링 정도도 평가할 필요가 있다.

Fig. 10, 11에서 보듯이 T3과 T4 시편의 경우 A1 온도 이상의 재 가열에 의한 미세조직 미세화가 Fig. 9 경우 보다는 많이 발생할 수 있을 것으로 예측되며, 열 영향부 조대 결정립 영역에 넓게 재 가열 템퍼링이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 둘째 층에 의한 템퍼링 효과가 매우 크게 영향을 주는 것을 알 수 있으며 따라서 1:1.5:1.5의 경우 큰 템퍼링 효과가 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에 의하면 층간 입열량 비가 1:1:1인 T3 시편이 1:1.25:1.51인 T4 시편과 거의 유사한 템퍼링 효과를 보이는 것을 알 수 있는데 이것은 일반적으로 알려져 있는 템퍼비이드 용접의 경우와는 다른 결과이다. 그러나 해석 해를 이용한 평가 방법을 사용하는 경우, 즉 Fig. 10의 경우에서 볼 수 있듯이 각 비이드 적층 시 용융 선 사이의 거리가 Fig. 9의 경우에 비해 짧고 이것이 온도곡선 사이의 겹침량을 증가시켜 큰 템퍼링 효과를 나타내는 것을 알 수 있다. Table 1에서 보듯이 1:1:1로 층간 입열량 비를 제어한 T3 시편의 경우 wire feed량이 상대적으로 적어 비이드층의 높이가 작아져 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 예상된다.

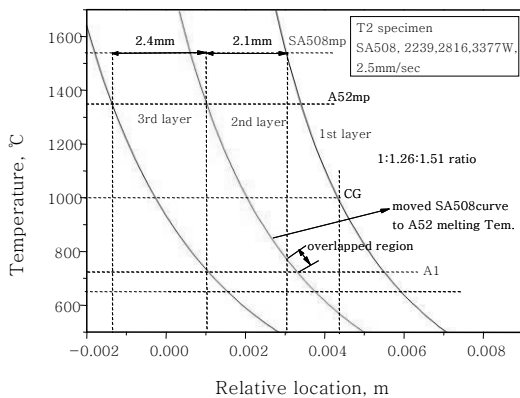


Fig. 9 Anticipation of tempering effect on the HAZ of T2 specimen

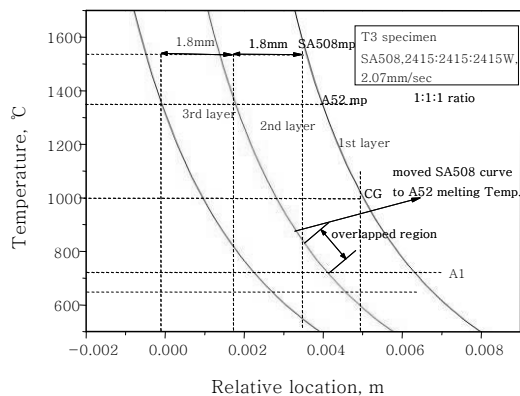


Fig. 10 Anticipation of tempering effect on the HAZ of T3 specimen

6. 결 론

저합금강 소재에 대하여 후열처리 없이 열영향부에 템퍼링 효과를 부여하고 평가하는 기술은 현장 보수용접의 주요한 기술이다. 수학적으로 얻어진 기존의 해석 해를 사용하여 용접 비이드 적층에 대한 용접 열 유동을 계산하고, 온도곡선을 구하여 각 비이드 층 사이의 재 가열 효과를 평가하는 방법은 최적의 템퍼비이드 용접공정을 예측 및 평가하기 위해 현장에서 간편히 적용할 수 있는 유용한 기법으로 생각된다. 본 연구에서는 유한요소 해석 결과와 용접시편의 미세경도 및 미세조직 측정결과를 통하여 해석 해로부터 얻은 온도곡선의 적용성을 확인하였다. 이 방법을 사용하는 경우 각 용접변수의 변화에 대하여 열영향부의 템퍼링에 미치는 효과를 수학적으로 예측할 수 있으므로 현장의 용접 조건에서 최적의 템퍼비이드 용접 변수를 선정하거나 수행된 용접에 대하여 템퍼링 정도를 평가하는데 유용하게 사용할 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 두산중공업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. A.S.Aloraier, et al.: Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes, *Journal of Materials Proceeding Technology*, **153-154**, (2004), 392-400
2. 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX, QW290, 2007, 48-50
3. Temper Bead Welding, TGN-PE-02, Welding Technology Institute of Australia, 2006
4. Walter J. Sperko, et al.: Exploring Temper Bead Welding, *Welding Journal*, July (2005), 37-40
5. Material Reliability Program: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy82/182 Butt Welds in PWRs (MRP-169), EPRI Technical Report 1012843, 2005, 6.8-6.9
6. A Klenk, et al.: Some Characteristics of Weld Repair for Creep Applications, *Weld Repair for Creep Applications*, OMMI, **2-1** (2003), 1-32
7. Koichi Masubuchi: *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, 1980, 69-73
8. J.-K. Hong: Study of Numerical Methodologies for Multi-Pass Welding Analysis, Ph.D Dissertation, The Ohio State University, 1996, 30-59
9. S. K. Jeong, et al.: An analytical solution for transient temperature distribution in fillet arc welding including the effect of molten metal, *Proc Instn Mech Engrs*, **211**, Part B, (1977), 63-72
10. M. Necati Ozisik: *Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, 1985, 82-84
11. INCONEL alloy 690, Special Metals Corporation, 2003