

# 대경간공간구조 초대직경용접공심구마디점의 용접잔류 응력에 미치는 3차원다층용접방식의 영향

리남혁, 리영섭

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자, 기술자들은 주체적인 립장에 튼튼히 서서 과학연구사업을 하여야 합니다. 그리하여 우리 나라의 공업을 주체화하는데서 절실하게 나서는 과학기술적문제들을 풀어야 합니다.》(《김일성전집》 제77권 262페이지)

대경간공간구조의 마디점에는 여러가지가 있지만 그중 용접공심구마디점은 구조가 간단하고 힘받이가 합리적이므로 널리 리용되고있다. 용접공심구마디점과 경간사이의 용접잔류응력평가와 관련한 선행연구[2-4]에서는 비교적 작은 직경을 가진 용접공심구와 단층순서용접을 전제로 하여 평가하는것이 기본을 이루고있으며 초대직경용접공심구와 그 시공을 위한 다층공간용접의 영향을 정확히 반영하지 못한 부족점을 가지고있다.

론문에서는 유한요소법으로 대경간공간구조의 초대직경용접공심구마디점의 용접잔류응력에 미치는 3차원다층용접방식의 영향을 정량적으로 평가하였다.

## 1. 용접과정의 모의해석

### 1) 재료의 물리적속성

용접과정에 모체재료와 용접재료는 녹음점보다 훨씬 높은 온도까지 가열되며 이 과정에 재료는 열변형뿐아니라 고체-액체-고체상태변화과정까지 거치면서 큰 잔류응력을 산생시키게 된다. 고찰하는 용접공심구와 경간재료는 일반적인 Q235(류동한계 235MPa)이며 용접재료로 여러가지를 쓸수 있지만 여기서는 일반용접봉 D802 (C0.7~1.44, Si≤2, Mn≤2, Cr25~32, Fe≤4, W3~6, 기타≤4, 나머지 Co)를 리용하며 용접재료의 류동상온에서 류동한계를 450MPa로 본다.

재료의 열구조속성은 온도에 따라서 심하게 변하며 특히 녹음점을 계선으로 온도에 따라 급격히 변한다.

### 2) 용접열효률과 등가상대변화시간

#### (1) 용접열효률

열효률은 용접과정해석에서 중요한 파라메터의 하나이다. 용접과정에 모체재료와 용접재료가 받는 열량은 열력학의 1법칙으로부터

$$Q = \eta \int_{t_{wr}} u i dt \quad (1)$$

이다. 여기서  $\eta$ 는 열효률,  $u, i$ 는 시간에 따르는 전류와 전압,  $t_{wr}$ 는 실지용접시간이다.

이제  $\eta$ 가 취할수 있는 값범위를 고찰하자.  $Q$ 는 용접재료와 모체재료가 받는 열량

으로서 적어도 용접재료가 받는 열량 즉 용접물이 녹고 온도가 증가하는 동안 받아들이는 열량보다 작지 말아야 한다. 고찰하는 용접재료를 이상적인 결정체로 보면 녹음이나 응고와 같은 상태변화과정에 열전달은 온도변화를 일으키지 못하므로 용접물의 온도는 녹음점으로 일정하고 모임상태변화만 일어난다. 따라서  $\eta$ 는

$$\frac{\rho_w V_w \left[ \int_{T_{air}}^{T_\lambda} C_s dT + \lambda + \int_{T_\lambda}^{T_{max}} C_l dT \right]}{\int_{t_{wr}} uidt} < \eta < 1 \quad (2)$$

을 만족시켜야 한다. 여기서  $C_s$ ,  $C_l$ 은 온도에 따르는 용접재료의 고체와 액체상태에서의 비열,  $T_{air}$ 는 대기온도,  $T_\lambda$ 는 녹음점,  $T_{max}$ 는 용접물의 평균온도,  $\lambda$ 는 비녹음열이다.

용접시 전류와 전압이 일정하다고 가정하고 용접재료의 비열을 고체와 액체상태에서의 평균비열로 환산하면 식 (2)는

$$\frac{\rho_w V_w [\bar{C}_s (T_\lambda - T_{air}) + \lambda + \bar{C}_l (T_{max} - T_\lambda)]}{\int_{t_{wr}} uidt} < \eta < 1 \quad (3)$$

로 쓸수 있다. 여기서

$$\bar{C}_s = \frac{1}{(T_\lambda - T_{air})} \int_{T_{air}}^{T_\lambda} C_s dT, \quad \bar{C}_l = \frac{1}{(T_{max} - T_\lambda)} \int_{T_\lambda}^{T_{max}} C_l dT$$

이다. 이로부터 전압과 전류, 실지용접시간과 그 시간동안 흘러내린 용접물의 질량을 대입하면  $\eta$ 의 값범위를 확정할수 있다. 즉 고체상태에서 용접물의 평균비열  $678 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ , 액체상태에서 용접물의 평균비열  $1512 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ , 전압  $20\text{v}$ , 전류  $200\text{A}$ , 한 용접부위의 체적  $1.02 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ , 실지 용접시간  $5.3\text{s}$ 를 고려하면 열효율은 최소  $78.23\%$ 로서 선행연구[1]의 수동전호용접의 경우와 일치한다.

## (2) 등가상태변화시간

다음으로 모임상태가 변할 때 열전달을 고찰하자. 실지유한요소모의에서는 녹음과 응고과정에 온도변화가 일어나지 않는것으로 하여 해당한 모임상태변화열량을 반영하지 못한다. 따라서 모의에서 고려하는 열량은 실지 주고받는 열량에서 모임상태변화과정에 주고받는 열량 즉 녹음열을 녹을 때에는 덜어주고 식힐 때에는 더해줘야 한다. 이로부터 유한요소모의에서 등가상태변화시간개념을 정의하여 모임상태변화과정에 주고받는 열량을 등가상태변화시간으로 환산하여 용접시간에서 덜어주고 식힐시간에서 더해주는 방법을 도입하여 열해석의 정확도를 높였다.

용접과정에 열전달속도가 일정하다고 가정하면 등가상태변화시간  $\tau_{eq}$ 는

$$\tau_{eq} = \frac{\lambda}{\left[ \int_{T_{air}}^{T_\lambda} C_s dT + \lambda + \int_{T_\lambda}^{T_{max}} C_l dT \right]} t_{wr} \quad (4)$$

로 정의할수 있다. 식 (3)을 고려하면 등가상태변화시간은

$$\tau_{eq} = \frac{\lambda}{[\bar{C}_s(T_\lambda - T_{air}) + \lambda + \bar{C}_l(T_{max} - T_\lambda)]} t_{wr} = \eta_m t_{wr} \quad (5)$$

로도 정의할수 있다. 따라서 유한요소모의에서 리용하는 등가용접시간과 등가식힘시간은

$$\begin{cases} t_{we} = t_{wr} - \tau_{eq} = (1 - \eta_m) t_{wr} \\ t_{ce} = t_{cr} - \tau_{eq} = t_{cr} - \eta_m t_{wr} \end{cases} \quad (6)$$

이다. 여기서  $t_{we}$  는 등가용접시간,  $t_{ce}$  는 등가식힘시간,  $t_{cr}$  는 실지식힘시간이다.

일반적인 용접과정을 고려하여 대기온도  $20^\circ\text{C}$ , 용접물의 녹음점  $1500^\circ\text{C}$ , 용접과정의 평균온도  $2000^\circ\text{C}$ , 실지용접시간을 5s, 용접사이의 식힘시간을 4.5s로 가정하면 등가상태변화시간은 식 (5)로부터 약 0.5s로 예산되며 이 경우 유한요소모의에서 리용하는 등가용접시간은 식 (6)으로부터 4.5s, 용접사이의 등가식힘시간은 5s로 계산된다.

### 3) 용접열원천모형과 경계조건

#### (1) 열원천모형

열원천모형은 선행연구[1]에서 제기한 시간에 무관계한 가우스분포함수를 리용하면 다음의 식과 같이 계산된다.

$$q(r) = \frac{\eta UI}{2\pi r_a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_a^2}\right) \quad (7)$$

여기서  $q(r)$ 는 열원천중심에서  $r$ 만큼 떨어진 거리에서 열흐름( $\text{W/m}^2$ )이며  $\eta$ 는 식 (3)으로부터 구한 열효율(%),  $r_a$ 는 용접물의 반경이다.

#### (2) 경계조건

온도경계조건으로서 경간의 구의 반대쪽 끝부분온도를 대기온도로, 구와 경간결면, 매 단계에 따르는 용접충결면에 자연대류경계조건, 주위대기온도를  $20^\circ\text{C}$ 로 설정하고 구조경계조건은 구에 관하여 경간의 반대쪽 끝부분에 고정경계를 설정하였다.

#### 4) 용접부위

여기서는 외경이 30cm이고 두께가 3cm인 속이 빈 강철구에 외경이 9cm이고 두께가 1.5cm, 길이가 1.5m인 강철관을 용접하는 경우 구와 막대사이의 용접부에 생기는 잔류응력을 고찰한다. 논문에서 용접공심구의 열소성처리 및 반구의 호상용접을 포함한 구의 제작과정에 생긴 잔류응력은 무시하며 용접시 예열은 진행하지 않는다. 한층에 등간격으로 12개의 용접부위를 설정하고 3개의 층으로 반복하여 총 36개의 용접부위를 설정하였다. 용접과정에 전류와 전압이 일정하고 용접봉에서 단위시간당 녹아내리는 용접물의 체적이 같다는 전제하에서 매 부위의 용접체적과 시간을 일정하게 설정하였다.

#### 5) 용접방식

용접방식은 세가지로 나누어 고찰한다. 방식 1은 한층에서 대칭으로 12개의 부위를 용접하는 방법으로 3개의 층을 용접하는 대칭다층용접방식이고 방식 2는 한층에서 순서대로 12개 부위를 용접하는 방법으로 3개의 층을 용접하는 다층순서용접방식이며 방식 3은 한 부위 편속 3개의 층을 용접하고 대칭으로 12개 부위를 용접하는 대칭단층용접방식이다.

#### 6) 용접시간

한부위용접시간은 4.5s, 자연대류에 의한 식힘(용접휴식)시간은 5s이며 이때 12개의

용접부위를 3개의 층으로 용접하는데 걸리는 총용접시간은 337s이고 용접결속후 자연대류에 의한 식힘시간은 4h로서 총모의시간은 14 742s이다.

유한요소모의에서 풀이의 수렴성을 위하여 용접할 때 시간걸음은 극히 짧게( $\geq 10^{-3}s$ ), 해석시간의 단축을 위하여 용접결속후 마지막식힘시간의 시간걸음은 길게( $\leq 10s$ ) 준다.

## 2. 해 석 결 과

### 1) 온도마당해석결과

용접방식 1의 경우 용접결속직후(337s) 용접부위의 최고온도는  $1685.9^{\circ}C$ 이며 용접후 자연대류로 4h동안 식힌 후(14 742s)에는  $25.724^{\circ}C$ 로서 주위의 대기온도( $20^{\circ}C$ )로 다간다. 용접방식 2, 3의 경우도 같은 시간동안 식힌 후 용접부위의 온도가  $25.772^{\circ}C$ ,  $25.758^{\circ}C$ 이다.

용접과정에 용접부위에서 온도가 제일 높아지는 순간과 최고온도는 용접방식에 따라 차이 나는데 방식 1의 경우 99.5s일 때(첫번째 층 11번째 용접구역에서)  $1968.96^{\circ}C$ , 방식 2의 경우 109s일 때(첫번째 층 12번째 용접구역에서)  $2032.13^{\circ}C$ , 방식 3의 경우 299s일 때(두번째 층 11번째 구역에서)  $2073.96^{\circ}C$  정도로서 방식 1의 경우 최고온도가 제일 낮고 방식 3의 경우 온도가 제일 높으며 온도차는  $105^{\circ}C$  정도이다. 이로부터 각이한 용접방식중 다층대칭용접의 경우 용접부위에서의 최고온도가 제일 낮다는 결론을 얻을수 있다.

다음으로 시간에 따르는 온도변화를 보기 위하여 첫 용접부위의 중간점에서 용접과정(0~400s)에 따르는 온도변화를 고찰한다. 그래프에서 알수 있는바와 같이 매 경우 고찰하는 점에서의 온도는 최고  $1820^{\circ}C$  정도로서 차이가 없지만 온도변화에서는 일련의 차이가 있다.

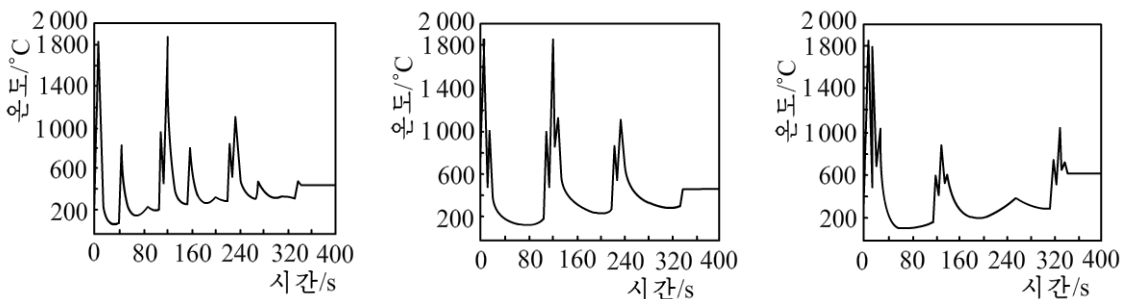


그림 1. 시간에 따르는 온도변화

방식 1에서는 전체 용접구간에서 한층용접시간간격(114s)으로 두번 최고  $1820^{\circ}C$  정도까지 온도가 증가하며 한층용접시간안에서는 대칭용접의 영향으로 린접부위에 용접할 때  $800^{\circ}C$ ,  $1000^{\circ}C$  근방으로 두번 증가하는 기록을 보여주고있다. 또한 방식 2에서는 전체 용접구간에서 한층용접시간간격(114s)으로 두번 최고  $1820^{\circ}C$  정도까지 온도가 증가하며 한층용접시간안에서는 순서용접의 영향으로 서서히 감소하다가 한층용접이 끝나는 마감에 다시 증가하는 기록을 보여주고있다. 그리고 방식 3의 경우는 첫 순간만  $1820^{\circ}C$  까지

온도가 증가하고 전체 용접구간에서 대칭용접의 영향으로 린접부위에 용접할 때 800°C, 1 000°C 근방으로 두번 증가하는 기록을 보여주고있다.(그림 1)

## 2) 응력마당해석결과

일반적으로 대부분의 유한요소프로그램들은 열-구조결합마당해석에서 온도마당과 응력마당을 순차적으로 해석하는 순차적해석법(집전환해석법) 또는 온도마당과 응력마당을 매 걸음마다 동시에 해석하는 직접해석법을 제공한다. 직접해석법을 리용하든 집전환해석법을 리용하든 리론적으로 온도마당해석은 응력마당해석의 선행공정이며 모든 용접해석의 최종목적은 잔류응력평가이다. 용접결속직후(337s)의 구조전체에서 본미제스열응력은 최대 333MPa정도이며 용접후 4h 지난 다음(14 742s)의 본미제스잔류응력은 최대 400MPa이다.

시간에 따르는 응력변화를 보기 위하여 첫 용접부위의 중간점에서 용접과정(0~400s)에 따르는 응력변화를 평가한다.

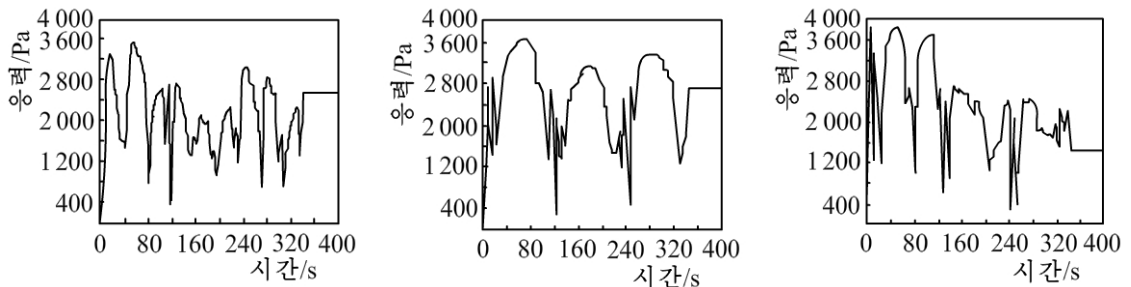


그림 2. 시간에 따르는 응력변화

그래프에서 알수 있는바와 같이 매 경우 고찰하는 점에서의 응력은 최고 350~380MPa정도이며 응력변화는 온도변화에 관계된다. 고찰하는 점에서 용접후 4h 지난 다음(14 742s)의 잔류응력분포는 방식 1의 경우 256MPa, 방식 2의 경우 275MPa, 방식 3의 경우 148MPa로서 일련의 차이가 있다.(그림 2)

이제 용접후 4h 지난 다음(14 742s)의 용접부위에서 잔류응력을 좀더 구체적으로 고찰하자. 먼저 본미제스잔류응력분포를 보면 매 방식의 경우 최대잔류응력은 모두 재료의 류동한계근방이지만 분포는 각이하다. 방식 1과 3의 경우 잔류응력분포는 구와 경간의 련결축에 관하여 대칭이지만 방식 2의 경우는 잔류응력분포가 비대칭이며 용접시작부위에 큰 응력이 집중되고 용접방향에 따라 감소하는 경향을 나타내고있다. 따라서 방식 2의 경우 잔류응력분포는 비대칭을 이루며 즉 힘반이능력이 불균형을 이룬다.

다음으로 주응력벡토르와 최대당김잔류응력을 보면 용접방식에 관계없이 최대당김응력이 나타나는 위치는 용접을 시작하는 각도방향에서 제일 옷층결면이라는것을 알수 있다.

용접잔류응력은 방식 1과 3의 경우 당김-누름구역이 4번 바뀌며 방식 3의 경우 최대당김응력은 방식 1보다 1.36배, 140MPa 더 증가한다. 방식 2의 경우 원주방향을 따라 당김에서 누름으로 서서히 변한다. 자리표성분별응력에서는 축방향응력과 원주방향응력이 기본을 이루며 이 경우 응력분포는 역시 방식 1과 3의 경우 대칭, 방식 2의 경우가 비대칭이며 최대응력은 방식 3의 경우가 방식 1의 경우에 비하여 반경방향응력의 경우 1.26배(46MPa), 원주방향응력의 경우 1.17배(57MPa), 축방향응력의 경우 1.34배(130MPa) 더 크게 나타난다.

## 맺 는 말

1) 유한요소법으로 용접과정을 해석할 때 녹음이나 응고효과를 고려하기 위한 등가상태변화시간은 실지용접시간의 14.6%에 해당한다. 이로부터 녹음과정의 모의시간은 실지용접시간보다 등가상태변화시간만큼 작아지고 응고과정의 모의시간은 실지식힘시간보다 등가상태변화시간만큼 커진다.

2) 대경간공간구조의 초대직경용접공심구마디점의 3차원용접에서 순서용접의 경우 잔류응력분포가 비대칭이며 용접시작부위에 큰 응력이 집중되고 용접방향에 따라 감소하는 경향성을 나타내고있는것으로 하여 대칭용접에 비하여 잔류응력분포는 비대칭을 이루며 이로 하여 마디점의 힘반이능력이 불균형을 이룬다. 또한 단층용접의 경우 최대응력 값이 다층용접의 경우보다 훨씬 크게 나타나며 반경방향응력의 경우 1.26배(46MPa), 원주방향응력의 경우 1.17배(57MPa), 축방향응력의 경우 1.34배(130MPa) 더 크게 나타난다. 따라서 대경간공간구조의 초대직경용접공심구마디점을 용접할 때 다층대칭용접을 진행하여야 힘반이능력이 대칭이며 잔류응력준위를 낮출수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. Michaleris; Minimization of Welding Distortion and Buckling: Modelling and Implementation, Elsevier, 3~4, 2011.
- [2] Zhao Zhong-Wei et al.; Weld World, 60, 61, 2016.
- [3] 刘锡良, 陈志华; 钢结构, 4, 52, 1991.
- [4] 袁志军; 南昌大学, 2, 36, 2010.

주체108(2019)년 12월 15일 원고접수

## **Influence of Three Dimensional Multi-Layer Welding Method on Welding Residual Stress at Super Diameter Welded Hollow Sphere Joint in Large Span Structure**

*Ri Nam Hyok, Ri Yong Sob*

This paper evaluates the influence of three dimensional multi-layer welding methods on the welding residual stress at super diameter welded sphere joint in large span structure. In addition, the effectiveness of multi-layer symmetric welding method is proved quantitatively through comparison with single layer symmetric welding method and multi-layer sequential welding method.

**Keywords:** multi-layer symmetric welding, large span structure