

## 적층접합체에 대한 잔류응력 측정법의 제안

### A Proposal of Measuring Method of Residual Stress in Bonded Joint.

김응준\*, 강희신\*

\* 한국기계연구원 용접기술연구부

#### 1. 서론

일반용접에서의 막대기 용접이음을 선접합이라하면 적층접합체의 접합부는 면접합으로 그 차원이 달라지게 될 뿐, 적층접합체에 있어서도 그 접합수단이 열적인 경우에는 접합부를 중심으로 잔류응력이 생성되게 된다.

적층접합체의 경우는 적층접합되는 재료의 특성 즉, 열팽창계수, 탄성계수, Poisson's ratio 등이 서로다른 뿐만 아니라 그 층의 두께도 다른 경우가 대부분으로, 특히 thermal spray 와 같이 coating에 의한 적층접합체의 경우는 coating층의 두께가 수십  $\mu\text{m}$ 이하인 경우도 있다.

이러한 이유로부터 일반 막대기 용접이음부에 대한 잔류응력의 측정 및 해석 방법은 매우 다양하게 발전되어 왔으나, 적층접합체에 대한 잔류응력의 연구는 그다지 활발하지 못한 것이 현실이다.

예를들어, coating에 의한 적층접합체의 잔류응력 측정방법은 지금까지 표 1<sup>1)</sup>에서와 같이 2가지의 방법만이 제안되고 있으며, 이들 측정방법에도 표에 나타낸것과 같은 문제점들을 갖고 있다.

본 연구는 적층접합체에 대한 잔류응력의 측정 및 해석방법에 관한 기초적 연구로서 잔류응력 생성기구에 서로다른 재료의 beam이론을 적용하는 방법으로 적층접합체의 잔류응력 측정 및 해석을 위한 기본 model에 관하여 검토하였다.

#### 2. 적층접합체의 잔류응력 생성

그림 1.은 coating 등에 의한 서로다른 재료의 적층접합체의 경우 잔류응력의 생성기구를 모식적으로 나타낸 것이다.

재료의 열팽창계수의 차에 의하여 잔류응력이 생성되는 이유를 간략하게 설명하기 위하여 먼저, 그림 1.의 (i)과 같이 coating층과 모재(substrate)가 완전히 분리된 상태를 생각한다. coating 중 coating층만이 온도 변화를 하는 것으로 가정하면 coating에 완료된 순간의 coating층의 길이는 냉각에 따라 점차 짧아져 실온에 이르게 되면 어느 일정길이에 도달하게 된다.

이렇게 온도변화에 따른 coating층만의 길이 변화에 주목하면, 그림 1.의 (i)에서 실선으로 나타낸 실온에서의 coating층의 길이를 외력에 의하여 coating이 완료된 순간의 길이(점선으로 표시)로 복원시키는 경우 coating층에는,

$$\sigma_1 = E_c \alpha_c (T_2 - T_1)$$

$E_c$  = coating층의 탄성계수

$\alpha_c$  = coating층의 열팽창계수

$T_2$  = coating이 완료된 순간의 coating층의 온도

$T_1$  = 실온에서의 coating층의 온도

의 응력이 걸리게 된다.

물론 이러한 응력  $\sigma_1$ 은 위의 가정외에도 다음의 가정을 고려한 것이다.

- 판두께 방향의 열팽창 무시
- 탄성계수, 열팽창계수, Poisson's ratio는 온도와 무관하게 일정

다음, 그림 1.의 (ii)에서와 같이  $\sigma_1$ 에 의하여 coating이 완료된 순간의 길이가 된 coating층을 그상태에서 모재에 접합시킨후 외력을 제거하면 접합체에는 그림 1.의 (iii)과 같은 응력이 잔류하게 되며 이렇게 잔류한 응력이 적층접합체의 잔류응력이다. 따라서 그림 1.의 (iii)은 위의 가정들을 고려한 경우의 coating완료후 실온에서의 적층 접합체의 접합상태와 같게 생각할 수 있다. 즉, coating층의 냉각에 의하여 발생한 열응력  $\sigma_1$ 은 실온상태의 접합체에 굽힘과 함께 잔류응력을 생성시킨 것으로, 모재에는 굽힘에 의하여 발생한 응력  $\sigma_3$ 이 분포하게되고 coating층은 열응력  $\sigma_1$ 으로 부터 굽힘에 의하여 해방된 응력을 뺀 응력( $\sigma_2$ )이 분포하게 된다.

### 3. 서로다른 재료의 Beam이론<sup>2),3)</sup>

그림 2.와 같이 탄성계수가 서로다른( $E_1, E_2$ )재료로 이루어진 적층접합체의 beam이 굽힘 moment를 받는 경우를 생각하면, beam의 횡단면은 굽힘이 발생한 후에도 평면 그대로가 되며 단면에서의 strain  $\epsilon$ 의 분포는 중성축 N-N으로 부터의 거리에 비례하게된다(직선 CD). 즉, beam의 중앙을 지나는 수평축 ZZ으로 부터 거리  $y$ 만큼 떨어진 위치에서의 strain  $\epsilon$ 는, ZZ축과 NN축의 거리를  $e$  라하고 중성면의 곡률반경을  $\rho$  라하면,

$$\epsilon = \frac{y-e}{\rho}$$

로 주어지며, 재료(1)과 (2)에 작용하는 응력은

$$\sigma_{(1)} = E_1 \epsilon = \frac{E_1(y-e)}{\rho}, \quad \sigma_{(2)} = E_2 \epsilon = \frac{E_2(y-e)}{\rho}$$

가된다. 여기서  $\rho$ 와  $e$ 는 미지수로, 응력에 의한 힘과 moment의 평형조건으로부터

$$e = \frac{h_1 h_2 (E_2 - E_1)}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E_1 I_1 - E_2 I_2}$$

과 같이 구해진다.

여기서  $E_1 < E_2$ 의 경우 재료(2)를 기준으로하여 구한 등가 단면 관성moment(I)를 이용하여 단면상의 중성축 NN으로부터  $y$ 만큼 떨어진 위치에서의 굽힘응력을 구하면

$$\sigma = \frac{M_y}{I}$$

가되며, 이 굽힘응력  $\sigma$ 의 분포는 그림2의 우측 그림을 확대한 그림 3의 직선C'E로 표시된다.

따라서 등가단면관성 moment(I)가 재료(2)를 기준으로 구하여졌으므로 직선C'E중 재료(2)의 구간의 응력은 D'E, 즉

$$\sigma_{(1)} = E_2 \varepsilon$$

가되며, 재료(1)의 구간의 응력 CD는

$$\sigma_{(1)} = E_1 \varepsilon = \frac{E_1}{E_2} \sigma_{(1)}$$

가 된다.

#### 4. 서로다른 재료의 Beam이론의 적층접합체의 잔류응력 해석에의 적용

그림 4.의(i)은 coating층과 모재가 분리되어있는 상태에서 coating층의 길이는 coating이 완료된 후 실온에서의 길이를 나타낸 것이며, 모재는 그림 1.의 (i)에서의 모재와 같은 모재를 상부의 길이가 coating층의 길이와 같게 되도록 굽힘 moment를 가한 상태를 나타낸 것이다. 이 상태에서 그림 4.의 (ii)와 같이 coating층과 모재를 접합 시킨후 그림 4.의 (i)에서의 굽힘 moment와 역방향의 굽힘 moment를 가하여 그림 4.의 (iii)과 같이 접합체를 수평하게 하면 앞에서 언급한 서로 다른 재료의 beam이론 으로부터 coating층에는  $\sigma_4$ 의 응력이 존재하게 되고 모재에는  $\sigma_5$ 의 응력이 존재하게 된다.

따라서 그림 1.의 (iii)에서의 응력  $\sigma_3$ 와 그림 4.의 (iii)의 응력  $\sigma_5$ 는 같게 되며, 그림 1.의 (i)에서의 열응력  $\sigma_1$ 과 그림 1.의 (iii)에서의 coating층에 잔류하는 응력  $\sigma_2$ , 그리고 그림 3.의 (iii)의  $\sigma_4$ 와의 사이에는

$$\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_4$$

의 관계가 성립하게 된다.

#### 5. 결론

Coating 등에 의한 적층접합체에 존재하는 잔류응력의 생성기구를 서로다른 재료의 beam이론을 적용함으로써 model화 하는 방법에 대하여 검토하였다. 얻어진 잔류응력 생성기구의 model은 thermal spray coating 등에 의한 적층접합체의 열응력해석의 기본 model로서 사용될 수 있음은 물론, 새로운 잔류응력 측정방법의 제안 가능성을 시사하고 있다.

#### 참고문헌

- 1) 豊田政男 : インターフェイス メカニックス(1991)
- 2) S.P.Timoshenko, D.H.Young : Elements of Strength of Material (1981)
- 3) 寺澤一雄, 松浦義一 : 材料力學 (1975)

표 1. 박막의 잔류응력 측정법의 원리와 특징

방법	원리	특징과 문제점
기판변형법	얇은 기판위에 박막형성시 기판의 탄성변형량으로부터 잔류응력측정	- 기판의 물성치만으로 측정된다. - 측정용기판과 실제기판의 차이에 의한 영향, 기판온도의 영향, 막형성중의 변화측정가능 - 막 자체의 응력은 측정 불가
X선 회절법	X선에의하여 결정격자 정수, 또는 면간격으로부터 strain을 측정하여 응력을 산출	- 막의 종류를 불문하고 측정가능 - 실제조건에서의 측정 - 막의 X선정수를 막두께 등에 따라 정확히 파악할 필요성, 측정영역, 깊이 등의 문제, micro crack과 측정치와의 관계

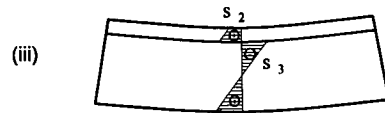
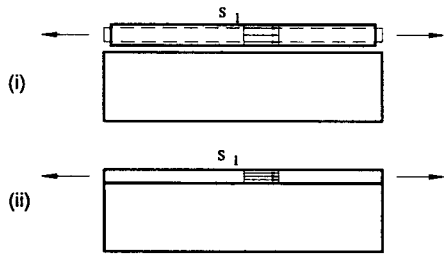


Fig. 1. A model illustrating the distribution of residual stress in bonded joint

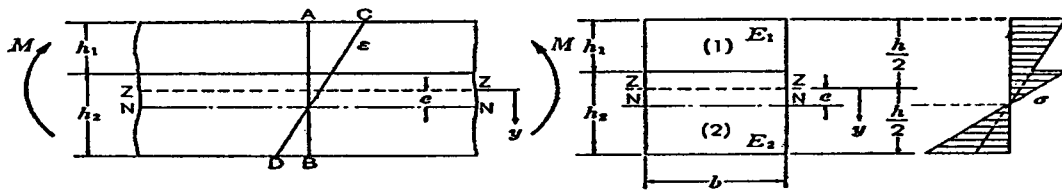


Fig. 2. Beam of two materials

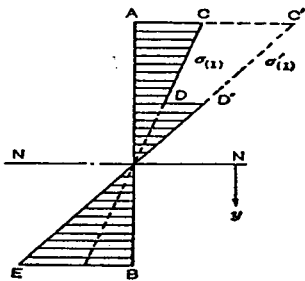


Fig 3. Stress distribution on the beam of two materials

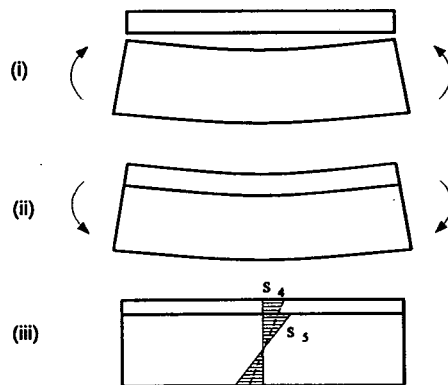


Fig 4. Application of the theory of beam of two materials on the bonded joint