

## 레이저 클래딩 공정의 3차원 유한요소 모델링

조계평<sup>a</sup>, 시호문<sup>b\*</sup>, 이흥식<sup>b</sup>, 조종두<sup>b</sup>

<sup>a</sup>중국 서안교통대학, <sup>b</sup>인하대학교 기계공학부

### Three-Dimensional Finite Element Modeling of Laser Cladding Process

Guiping Zhao<sup>a</sup>, Ho-Mun Si<sup>b\*</sup>, Heungshik Lee<sup>b</sup>, Chongdu Cho<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Xi'an Jiao Tong University, China

<sup>b</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University  
253 Yonghyun-Dong, Nam-Ku, Incheon 402-751, Korea

(Received 20 September 2004 ; accepted 13 October 2004)

#### Abstract

This paper describes a three-dimensional transient finite element model for a laser cladding process. In the model, an adaptive finite element technique is used for dilution control. Using the proposed finite element model, the effects of process parameters such as scanning speed, laser's power, and preheating on the dilution of clad layer, the shape of melting pool, and the temperature distribution are calculated. It is also shown that the optimal process parameters for the required dilution can be determined from the proposed finite element model. An experiment is performed to validate the proposed model. The numerical results are compared with experimental ones.

*Keywords* : Laser cladding, Dilution, Finite element modeling

## 1. 서 론

레이저 클래딩은 레이저 광(光)을 모재(母材) 표면에 조사(照射)하여 국부적인 용융부위를 형성하고, 동시에 개질재(改質材)를 용융부위에 공급함으로써 모재 표면에 개질재를 패딩(padding)하는 표면 개질법의 하나이다. 레이저 클래딩은 다른 표면 개질 공정에 비해 대기 중에서 수 밀리미터 정도의 비교적 두꺼운 개질 층을 고속으로 얻을 수 있으며, 열영향부의 크기가 작기 때문에 모재의 열변형이나 손상이 적은 장점을 갖고 있다. 최근 들어 레이저 클래딩은 터빈 블레이드 및 자동차의 엔진밸브 등과 같은 부품의 표면 가공 및 표면 손상 보수에 널리 사용되고 있다.

레이저 클래딩 공정을 통해 우수한 개질 층을 얻기 위해서는 레이저 광의 조사방법, 이동속도 및 출

력, 개질재의 공급방법, 예열조건, 회석반응과 같은 공정변수가 표면 품질에 미치는 영향에 대한 이해가 필수적이다. 이를 위해 실험 및 수치해석을 통한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 레이저 클래딩 공정에서의 응고 거동 및 미세 금속 조직에 관한 연구<sup>1,2)</sup>, 레이저 클래딩의 공정변수에 관한 연구<sup>3-6)</sup>, 레이저를 이용한 재료의 용융, 클래딩 및 합금화 공정의 모델링에 관한 연구<sup>7-10)</sup>, 적응 유한요소법을 적용한 레이저 공정의 수치해석 모델에 관한 연구<sup>11-13)</sup>, 회석제어 실험에 관한 연구<sup>14,15)</sup> 등이 보고되었다. 그러나 온도분포 해석과 회석 제어를 위한 수치모사에 관한 연구결과는 상대적으로 미흡하다. Hoadley 등<sup>16)</sup>은 클래드(Clad) 종단면에 대한 2차원 유한요소 모델을 제시하고 준 정상 온도분포 및 용융 역의 형상을 계산하였다. 그러나 그들의 모델에서는 2% 미만의 이상적인 회석 반응이 가정되었다. Kim과 Peng<sup>17)</sup>은 레이저 광의 이송방향과 수직인 횡 방향 단면에 대한 2차원 과도 유한요소 모델을 제안하고

\*Corresponding author. E-mail : hmsi@dreamwiz.com

이를 회석제어에 적용하였다. 그러나 횡 방향 단면에 적용된 그들의 2차원 해석모델은 레이저 광의 이동이 온도 분포 및 회석에 미치는 영향이 고려될 수 없는 한계를 지니고 있다. 언급한 2차원 유한요소 모델들은 이상적인 가정과 모델 자체의 한계로 인해 레이저 클래딩의 실제 공정 조건이 정확히 반영될 수 없는 한계를 지니고 있다. 따라서 공정조건이 회석, 온도분포, 용융 역의 형상 등에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 실제 공정조건을 정확히 반영할 수 있는 3차원 유한요소 모델이 요구된다.

이에 본 연구에서는 레이저 광의 분포, 출력 및 이송속도, 예열의 영향 등을 고려할 수 있는 적용 유한요소 기법이 적용된 3차원 과도 유한요소 모델을 제안하였으며 이를 통해 회석 정도, 용융 역의 형상, 온도 분포를 예측하였다. 또한 레이저 광의 출력 및 이송속도가 회석 및 온도분포에 미치는 영향을 정량적으로 계산하였다. 아울러 제안된 유한요소 모델의 검증을 위하여 와이어 송급 방식의 Nd:YAG 레이저 클래딩 실험을 수행하였으며 이의 결과를 해석결과와 비교하였다.

## 2. 레이저 클래딩의 유한요소 모델링

### 2.1 유한요소 모델

그림 1은 와이어 송급 방식의 레이저 클래딩 공정에 대한 개략도이다. 레이저 클래딩 공정에 대한 수치 모델에서는 일반적으로 라그랑지 수식화 기법이 적용된다. 본 연구에서도 이를 적용하였으며 그림 1에서와 같이 모재 위에 고정된 기준 좌표계를 설정하였다. 레이저 광과 수직인 모재 표면에서 광의 진행방향을 양의 y방향으로 설정하였다.

레이저 클래딩 공정에 대한 열역학 에너지 평형 방정식은 다음과 같다.

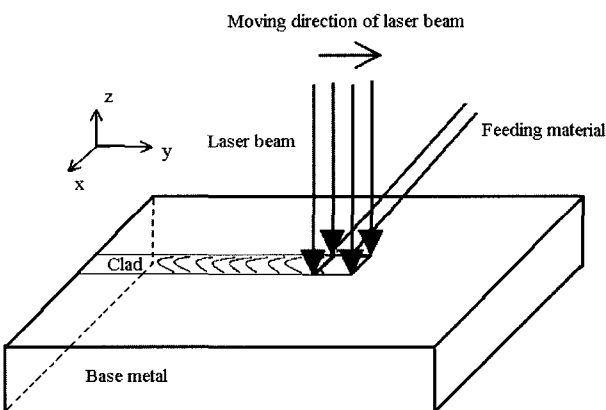


Fig. 1. Schematic diagram of an analysis model.

$$\rho C \frac{dT}{dt}(\hat{x}, t) = \nabla \cdot \tilde{k}(t) \nabla T + Q(\hat{x}, t) \quad (1)$$

식 (1)에서  $\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 비열,  $\tilde{k}$ 는 열전도도  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $\hat{x}$ 는 열원이며  $Q$ 는 공간좌표이다. 유한요소 정식화 과정을 식 (1)에 적용하면 최종적으로 식 (2)와 같은 유한요소 방정식을 얻는다.

$$\tilde{C}(T) \hat{T}(t) + \tilde{K}(T) \hat{T}(t) = \hat{F}(T, t) \quad (2-a)$$

$$\hat{T}(\hat{x}, 0) = T_0(\hat{x}) \quad (2-b)$$

$$T = T^p(\hat{x}, t) \quad (2-c)$$

$$q = q^p(\hat{x}, t) \quad (2-d)$$

식 (2)는 비선형 과도 열전도 문제이므로 이를 풀기 위해서는 매 시간 증분마다 반복계산을 수행하는 수치적분이 요구된다. 본 연구에서는 매 시간 증분에서의 반복계산 알고리즘으로 수정된 뉴턴 방법 (Modified Newton method)을 이용하였다. 또한 해석의 정확성을 위하여 상(相)변화 시 수반되는 용융 잠열을 고려하였다.

### 2.2 레이저 광의 분포

가우스 분포를 갖는 레이저 광에 의한 열속(熱束)은 다음과 같이 표현하였다.

$$q^p(\hat{x}, t) = \frac{3\eta P}{\pi r^2} \exp \left\{ -3 \left[ \left( \frac{x}{r} \right)^2 + \left( \frac{y-vt}{r} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 레이저의 출력,  $\eta$ 는 흡수율,  $v$ 는 레이저 광의 이송 속도,  $r$ 은 가우스 분포를 갖는 레이저 광의 표준편차이다. 한편 사각형의 영역 내에 일정한 강도의 레이저가 조사된다고 가정할 때의 열속은 다음과 같이 표현하였다.

$$q^p(\hat{x}, t) = \frac{\eta P}{l \times w} \quad (4)$$

여기서  $w$ 은 레이저 조사영역의 폭,  $l$ 은 레이저 조사영역의 길이이다. 레이저 광의 흡수율은 공급되는 개질재 및 모재의 종류, 모재의 표면 다듬질 정도 및 산소 함유량, 보호 가스의 공급량 등에 의해 변하며 일반적으로 모재와 개질재는 레이저 출력의 30~60% 정도를 흡수한다<sup>21)</sup>. 본 연구에서는 60%의 흡수율을 가정하였다.

### 2.3 회석 제어

회석(dilution)은 클래드에서 모재 금속이 차지하는 비율로 정의하며 레이저 클래딩에 의해 개질된 재료의 표면 품질을 결정하는 중요한 요소이다. 회

석이 클수록 클래드의 기계적 성질 및 부식에 대한 저항성이 저하된다. 따라서 양질의 개질 표면을 얻기 위해서는 공정이 진행되는 동안 희석 정도를 적절히 조절하는 것이 요구된다. 일반적으로 10% 정도까지의 희석반응이 허용되지만 보다 우수한 표면 품질을 위해서는 3~8%의 희석반응이 바람직하다<sup>20)</sup>. 본 연구에서는 아래에 기술하는 바와 같이 적응 유한요소 기법을 적용하여 레이저 출력 및 레이저 광의 이송 속도에 따른 희석 반응 변화를 예측하였다.

2.3.1 클래드의 윤곽 단면

유한요소 해석에서 희석에 대한 평가를 하기 위해서는 먼저 클래드 단면윤곽에 대한 정의가 요구된다. 일반적인 클래드의 단면 윤곽 형상을 그림 2에 나타내었다. 폭에 대한 높이의 비율이 높을수록 반원형태를 보이며, 작아질수록 클래드의 상면이 평평해진다. 이러한 클래드 단면의 윤곽형상들은 그림 3에서 보는 바와 같이 직선 부와 원호의 단순화된 조합으로 표현할 수 있다. 클래드 상단의 평평한 부위를 클래드의 자유표면으로 정하고 자유표면에서 모재까지는 원호의 형태를 가지는 것으로

정의할 수 있다. 즉 그림 3(a)의 경우 자유표면은 없으며  $x_s - x_m$  부위가 원호 부분에 해당되며, 그림 3(b)의 경우에는  $x_o - x_s$  부가 클래드의 자유표면에 해당되고  $x_s - x_m$ 가 원호의 형태로 표현된다.  $x_m$ 은 클래드가 모재와 만나는 점으로, 모재의 용융선 상에 있게 된다. 또한  $x_s$ 는 클래드 재료가 공급되어 용융이 시작되는 위치이며,  $x_o$ 는 용융된 상태를 유지하는 마지막 위치이다. 이상적인 혼합을 가정할 경우 희석 인자는 단순화된 클래드 단면윤곽 형상을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d = \frac{h_b}{h_b + h_c} \times 100 \tag{5}$$

여기서  $h_b$ 는 모재 표면에서 용융역 최하단까지의 거리,  $h_c$ 는 모재 표면에서 클래드의 최상단부까지의 거리를 나타낸다(그림 3 참조).

2.3.2 적응 유한요소 기법 및 희석제어

유한요소 해석에서 공정의 진행에 따른 클래드의 단면 변화를 올바르게 고려하기 위해서는 클래드 영역에 구성된 유한요소 격자망은 수정되어야 하며, 이러한 수정은 레이저 광의 이송속도에 맞추어 공정 진행방향으로 진행되어야 한다. 클래드의 상부 단면형상을 규정하는 기하학적 변수들은  $x_m, x_s, h_c$  등이다. 이 모든 변수를 독립적으로 고려하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 본 연구에서는  $x_s, h_c$ 는 고정된 것으로 가정하였으며  $x_m$ 을 유일한 변수로 고려하였다. 이러한 가정을 바탕으로 유한요소 격자의 수정 및 희석 제어는 다음과 같이 수행된다.

단계1: 변수  $x_m$ 은 최초  $x_m = x_s + h_c$ 의 값을 갖는다고 가정한다. 이와 같은 가정에 의해 클래드 단면의 상부 윤곽은  $x_o$  및  $x_s$ 를 직선으로 연결하는 자유표면과  $x_s$ 과  $x_m$  연결하는 반경  $R = h_c$ 의 원호로 구성된다. 유한요소 격자는 모재 및 고정된 클래드 상부 영역에 구성된다.

단계2: 준 정상상태로 이르렀다고 간주할 수 있는 임의의 시간에서의 온도 분포로부터 모재의 용융 등온선을 결정한다. 이때 용융 등온선이 단계1에서 가정된  $x_m$ 과 닿지 않을 경우, 용융 등온선이 모재의 자유표면을 관통하는 위치의  $x$  좌표를 새로운  $x_m$ 으로 가정하고  $x_m$ 과  $x_s$  사이의 반경  $R = \{h_c^2 + (x_m - x_s)^2\}/2h_c$ 인 원호의 일부에 해당하는 윤곽을 새로이 지정한다. 가정된  $x_m$ 과 용융 등온선이 만날 때까지 이 단계를 반복한다.

단계3: 단계2를 통해 최종적으로 얻어진 준 정상상태의 용융 등온선으로부터  $h_b$ 를 구할 수 있으며



(a)



(b)

Fig. 2. Section profiles of single clad tracks. (a) Transverse section (b) Transverse section (c) Longitudinal section.

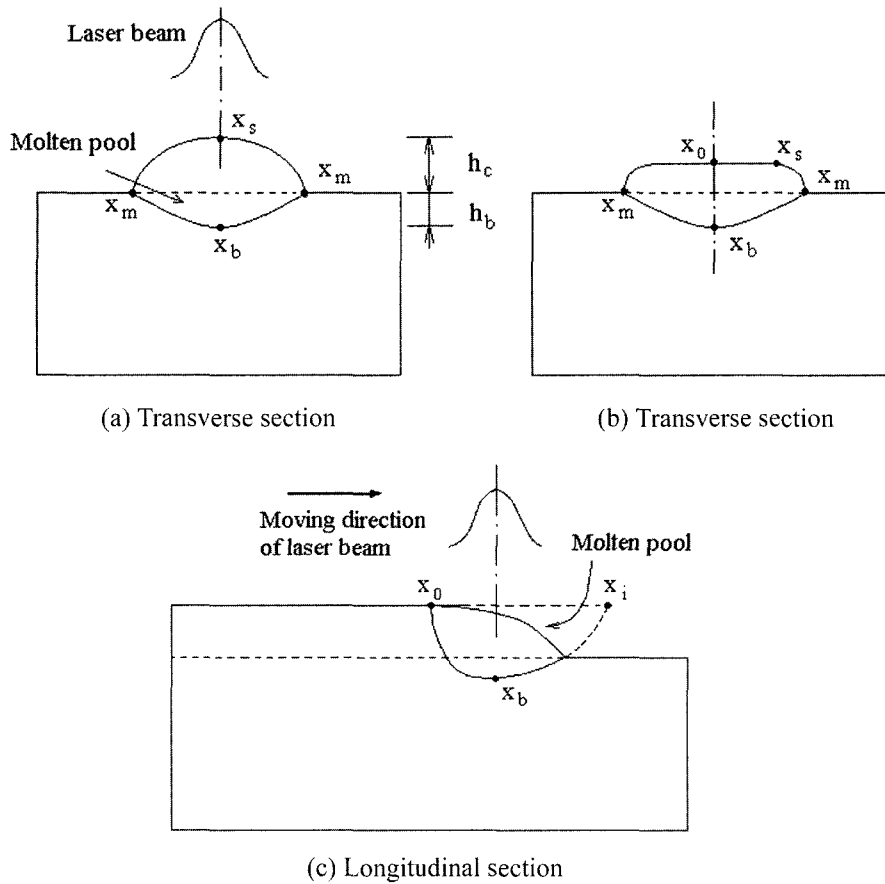


Fig. 3. Schematic diagram of transverse and longitudinal sections of clad layer.

식 (5)에 의해 희석 인자를 계산할 수 있다. 희석제어를 위한 해석에서는 만일 추정된 희석이 원하는 정도가 아닐 경우, 원하는 희석상태가 얻어질 때까지 레이저의 출력과 이송 속도를 적절히 조정하여 단계 1~2를 반복한다.

### 3. 해석 및 토의

#### 3.1 문제의 설정

해석 결과의 비교 논의를 위해 Kim과 Peng<sup>17)</sup>에

의해 고려된 레이저 클래딩 공정을 수치 모사하였다. 고려된 레이저 클래딩 공정에서는 크기 100 mm × 50 mm × 20 mm의 Inconel 600 모재 위에  $h_c = 0.4$  mm의 일정한 Inconel 690 클래딩 층이 형성된다. 레이저 광의 이송속도는  $v = 3.33$  mm/s이며 모재 표면의 직사각형 영역(3 mm × 3 mm)에 수직으로 일정하게 조사된다. 사용된 레이저의 출력은  $P = 456$  W이며 이 에너지의 60%가 초기온도  $T_o = 298$  K인 모재에 흡수되는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 모재 및 개질재의 물성은 표 1에 정리하였다. 그림

Table 1. Physical properties of materials used in calculation

	Inconel 600	Mild steel	Aluminum	Inconel 690
$k$ (W/m · K)*	23	74.1	225	37.7
$h$ (W/m <sup>2</sup> · K)*	100	100	100	100
$c$ (J/kg · K)*	580	482	1,067	836
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )*	8,420	7,870	2,385	7,950
$T_{m}$ (K)*	1,643	1,803	933	1,555
$L$ (J/kg) <sup>†</sup>	145,000	245,235	39,300	145,000

\* : obtained from (17), <sup>†</sup>: obtained from (19)

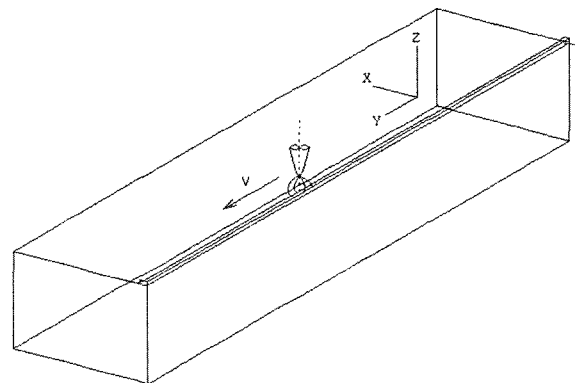


Fig. 4. Schematic diagram of a laser cladding model.

4는 레이저의 진행방향에 대한 대칭성이 고려된 클래딩 공정의 개략도이며, 그림 5는 8절점 육면체 요소로 이산화된 해석영역을 보여준다.

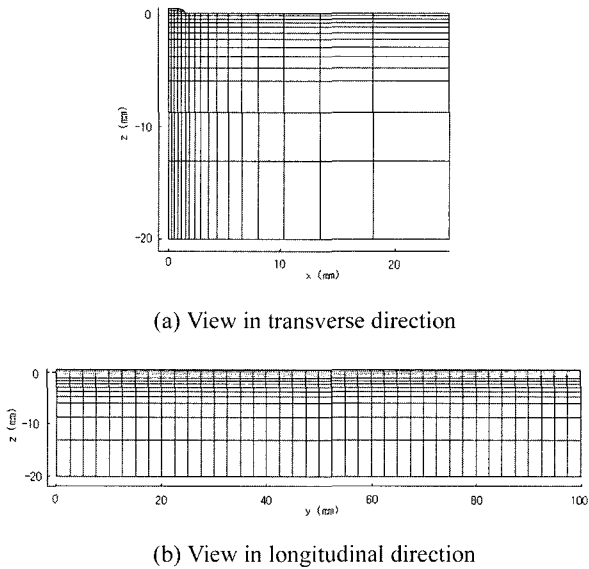


Fig. 5. A mesh consisting of 8-node brick elements: (a) view in transverse direction (b) view in longitudinal direction.

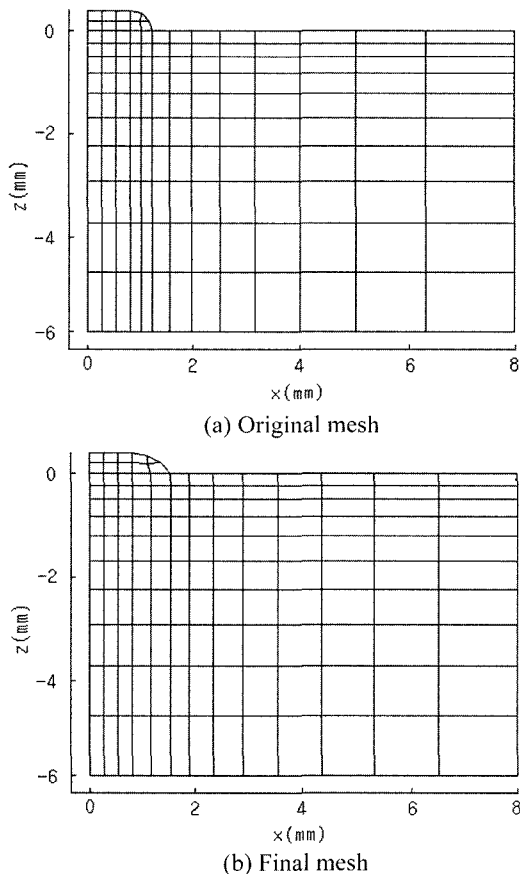


Fig. 6. Zoomed view of mesh in transverse direction: (a) original mesh (b) final mesh.

### 3.2 온도 분포, 용융 역 및 희석

그림 6은 적응격자 기법에 의해 수정된 유한요소 격자를 수정 전의 격자와 비교한 것이다. 그림 7은 4.8초 경과 후  $y = 16 \text{ mm}$ 인 지점에서의 횡단면에 대한 온도 분포인데 모재의 용융온도인  $1643 \text{ K}$ 의 온도 등고선이 클래드와 모재의 접촉부인  $x_m$ 과 일치함을 확인할 수 있다. 이것은 적응 유한요소 기법이 효과적으로 적용되었음을 의미한다. 그림 8은 20초 경과 후의 온도분포를 나타낸 것이다. 레이저 클래딩 공정은 일반적으로 공정 시작 후 수 초 이내에 준 정적 상태에 도달하기 때문에 이것은 준 정상상태의 온도분포에 해당한다. 4.8초, 7.2초 및 14.0초 경과 후의 온도 분포를 그림 9에 나타내었다. 각 시각에서 용융 역의 형상은 매우 유사하다. 그림에서 관찰되는 용융 역 크기의 차이는 각 시간 증분 마다 수행되는 반복계산의 허용오차(tolerance error)에 기인한 것이다. 그림 10은 4.8초, 7.2초, 9.9초 및 14.0초 경과 후 모재 상부 표면의 중앙( $x=0$ )에서의 온도를  $y$ 축을 따라 도시한 것이다. 한편 그림 11은 시각 4.8초, 7.2초 및 14.0초 경과 후  $y=24 \text{ mm}$ 에 위치한 횡단면 상부 표면에서의 모재 온도를  $x$ 축을 따라 나타낸 것이다. 그림 9~11을 통

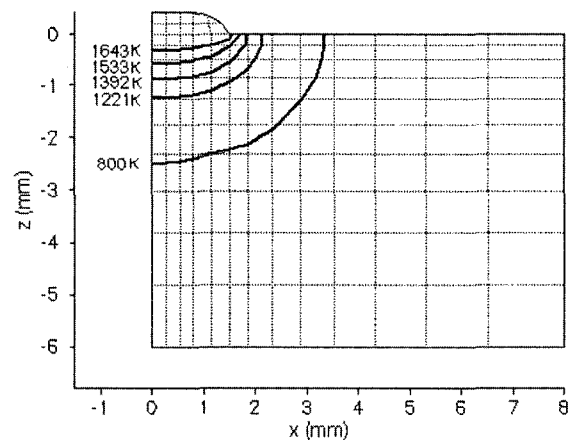


Fig. 7. The size of melting pool and temperature contour near the pool.

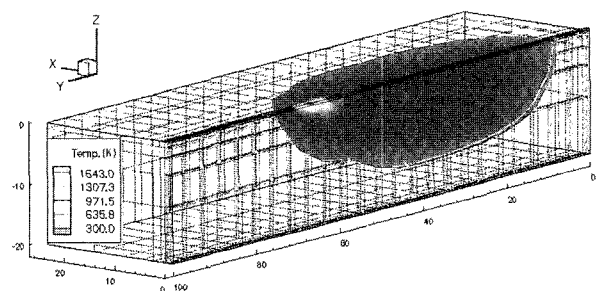


Fig. 8. Three-dimensional quasi-steady state temperature profile.

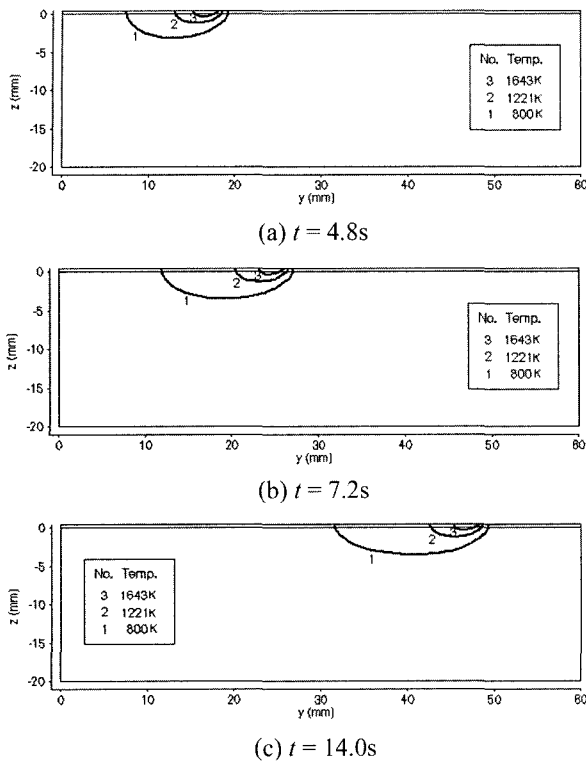


Fig. 9. Quasi-steady state temperature distribution (a) at 4.8s (b) at 7.2s (c) 14.0s.

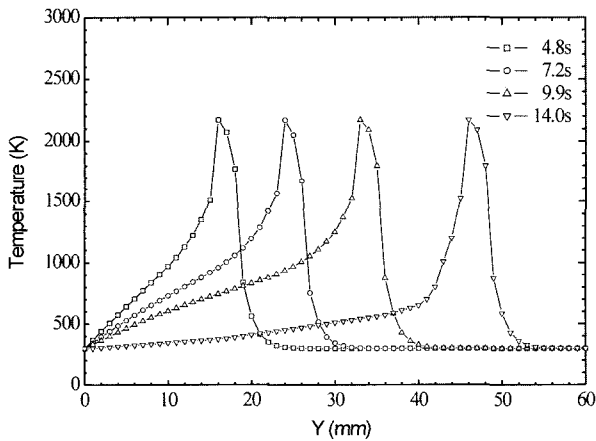


Fig. 10. Quasi-steady state temperature distribution at different time along longitudinal direction.

해 앞서 언급한 바와 같이 공정시작 후 빠른 시간 안에 준 정상상태에 도달하는 레이저 클래딩 공정의 특성을 확인할 수 있다.

모재의 종류에 따른 영향을 파악하기 위해 연강과 알루미늄을 모재로 하고 Inconel 690을 개질재로 사용하는 경우를 고려하였다. 동일한 개질재가 사용되지만 연강과 알루미늄의 열전도도가 Inconel 600에 비해 훨씬 높기 때문에 Inconel 600에 대해 상대적으로 높은 레이저 출력, 즉 연강의 경우에는  $P = 1310 \text{ W}$ , 알루미늄의 경우에는  $P = 1407 \text{ W}$ 를 적

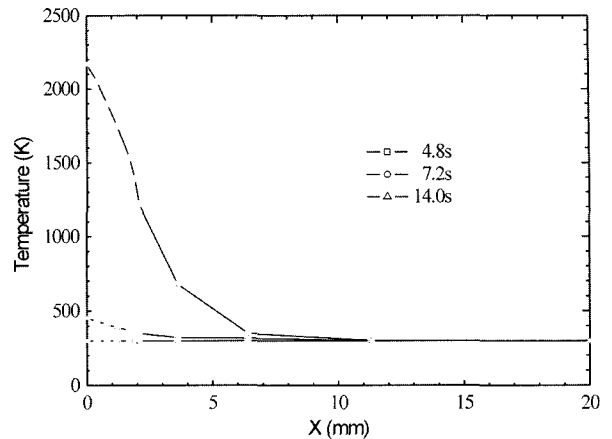


Fig. 11. Quasi-steady state temperature distribution at different time along transverse direction.

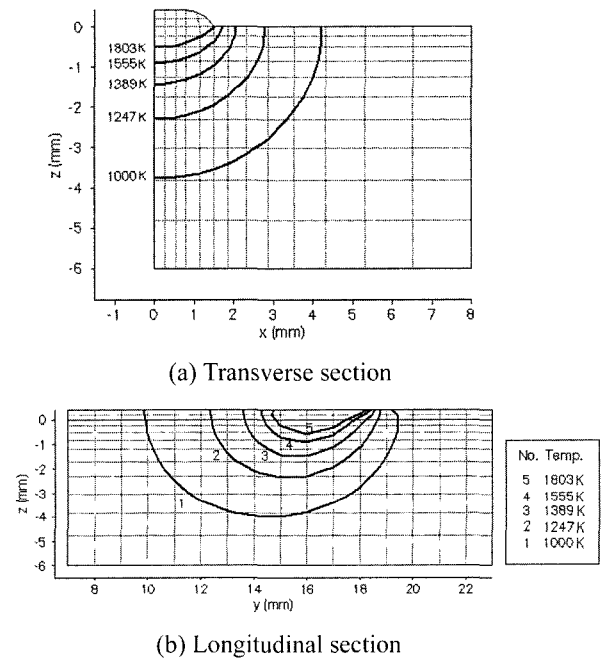


Fig. 12. The size of molten pool and temperature contour near the pool in transverse and longitudinal section for mild steel.

용하였다. 레이저 출력 이외에는 앞서 고려한 문제와 동일한 해석 조건을 적용하였다. 그림 12와 13은 각각 연강과 알루미늄이 모재로 사용된 경우에 대해 용융 역 부근에서의 횡단면과 종단면에서의 온도 분포를 도시한 것이다. 그림 14는 세 종류의 모재에 대해 공정이 진행되는 동안의 희석변화를 나타낸 것이다. 세 종류의 모재 모두에 대해 희석은 공정 초기 매우 빠른 속도로 증가하며 수 초 내에 일정한 수렴 값에 도달함을 확인할 수 있다. Inconel 600을 사용한 경우의 희석이 27%로 나타났다. 또한 연강과 알루미늄이 모재로 사용된 경우에는 각각 42%, 78%의 과도한 희석이 발생하였는

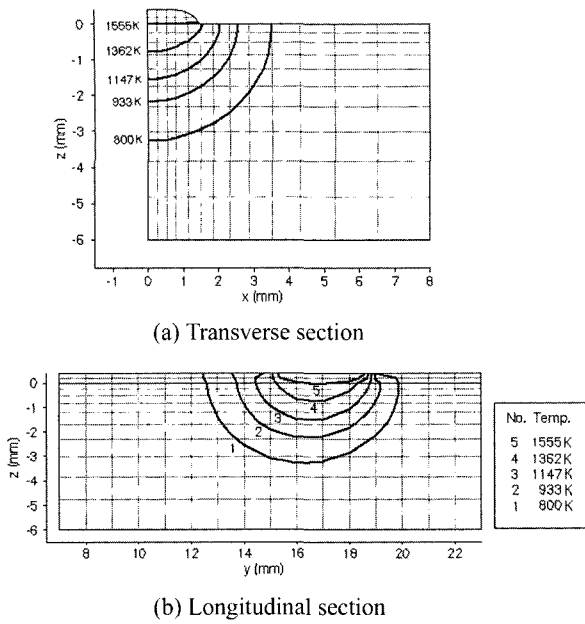


Fig. 13. The size of melting pool and temperature contour near the pool in transverse and longitudinal section for aluminum.

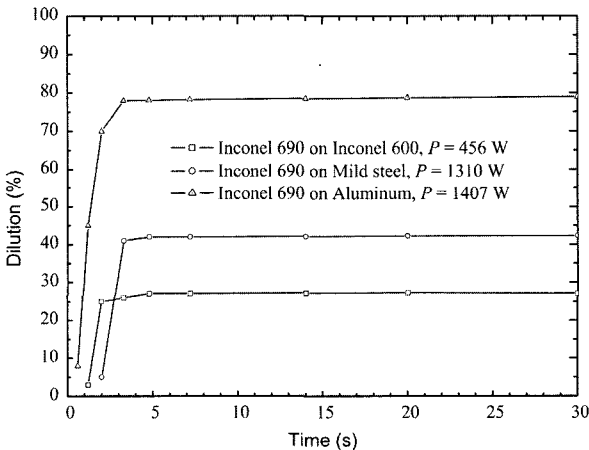


Fig. 14. The variation of dilution of molten pool during cladding (present calculation).

데 이것은 높은 출력의 레이저가 적용되었음을 의미한다. 특히 알루미늄의 경우에는 높은 열전도도에도 불구하고 낮은 용융온도로 인해 모재에 과도한 용융이 발생된 것으로 파악된다. 동일한 조건에 대한 Kim과 Peng<sup>17)</sup>의 해석 결과를 그림 15에 나타내었는데 그림에서 확인할 수 있듯이 세 모재 모두에 대해 70% 이상의 희석이 예측되었으며, 공정이 진행함에 따라 계속 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 짧은 시간 안에 준 정상상태에 이르는 레이저 클래딩 공정의 특성과는 거리가 먼 것이며 이는 모재와 레이저 광 사이의 상대적 운동이 고려되지 않았기 때문이다. 따라서 그들이 사용한 2차원 유한요소 모델을 이용해서는 타당한 해석 결과,

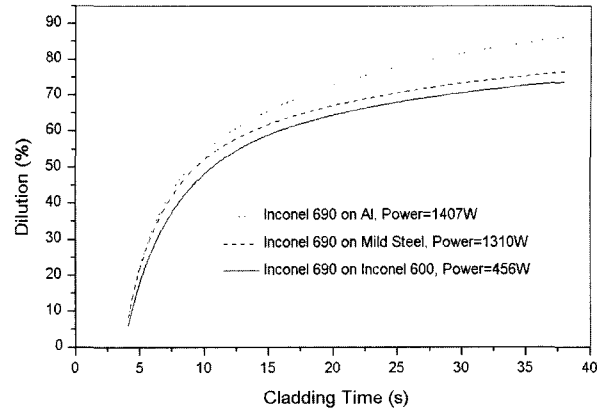


Fig. 15. The variation of dilution of molten pool during cladding<sup>17)</sup>.

특히 희석에 대한 신뢰성 있는 정량적인 정보를 얻는 것이 불가능함을 알 수 있다.

### 3.3 희석 제어 및 공정 변수

본 연구에서는 일정한 높이의 클래드 층이 연속적으로 형성되며, 클래드 상부 단면의 자유표면 부( $x_o - x_s$ )가 일정하게 유지된다고 가정하였기 때문에 클래드의 단면 형상을 결정하는 변수는 클래드의 폭이다. 클래드의 폭은 레이저 광의 초점 거리, 출력 및 이송 속도 등에 영향을 받는다. 이들 중 가장 중요한 요소는 이송속도와 출력이며 원하는 희석을 위해 요구되는 레이저 광의 이송속도와 출력에 관한 정보는 실제 공정에서 매우 유용하다. 이에 본 연구에서는 Inconel 690을 Inconel 600 위에 클래딩 하는 경우에 대해 아래에 기술되는 세가지 해석을 수행하였다.

먼저 조사되는 레이저 빔의 출력을  $P = 456 \text{ W}$ 로 고정시킨 후 5%의 희석을 위해 요구되는 레이저 빔의 이송 속도를 계산하였으며 이의 결과를 그림 16에 도시하였다. 예상했던 바와 같이 이송 속도가 증가할수록 희석은 선형적으로 감소하는 것으로 나타났으며 5%의 희석을 위해서는  $v = 4.85 \text{ mm/s}$  이상의 이송 속도가 요구되는 것으로 나타났다. 그림 17은 이송 속도가 4.85, 3.33 및 1.66 mm/s인 경우에 대해 용융 역 부근에서의 온도 분포를 도시한 것이다. 이 때의 희석은 각각 5%, 27% 및 52%로 나타났다.

이번에는  $v = 3.33 \text{ mm/s}$ 의 레이저 빔의 이송 속도에 대해 역시 5%의 희석을 위해 요구되는 레이저 출력을 계산하였으며 그림 18에 결과를 나타내었다. 레이저 출력이 커질수록 희석도 커지며  $P = 340 \text{ W}$ 의 레이저 출력이 가해질 때에 원하는 희석 정도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그림 19(a)는 5%의

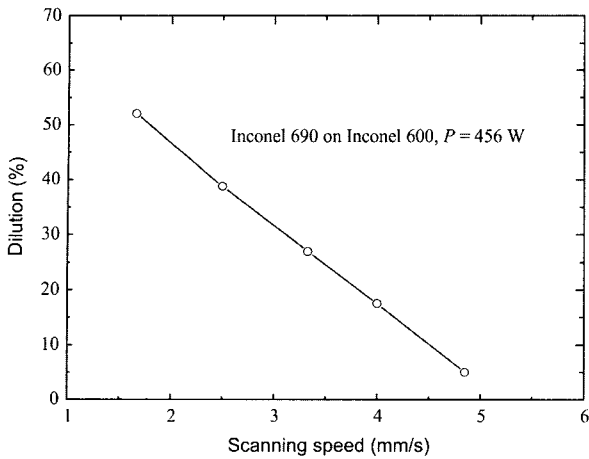


Fig. 16. The effect of scanning speed on dilution.

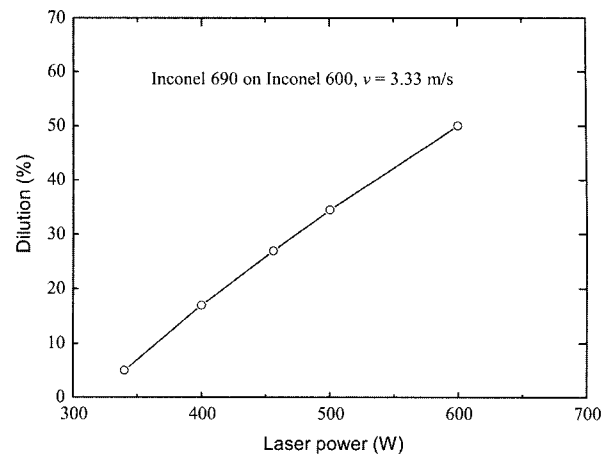


Fig. 18. The effect of laser power on dilution.

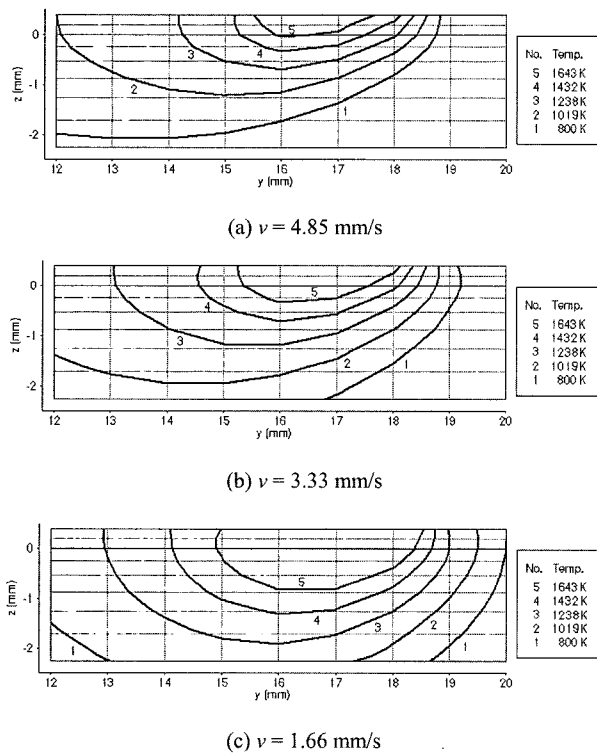


Fig. 17. The melting pool and temperature contour near the pool in longitudinal section for different laser speed.

회석이 발생하는 출력  $P = 340\text{ W}$ 일 때의 용융 역부근에서의 온도 분포이며, 그림 19(b)는 48%의 높은 회석이 예상된 출력  $P = 600\text{ W}$ 의 경우의 온도 분포이다.

세 번째로 주어진 이송 속도에 대하여 원하는 클래드 높이( $h_c$ )와 5% 이하의 회석을 얻기 위한 레이저 출력을 계산하였으며 이의 결과를 그림 20에 나타내었다. 일정한 레이저 광의 이송 속도 하에서는 원하는 클래드 높이와 요구되는 레이저 출력은 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났다.

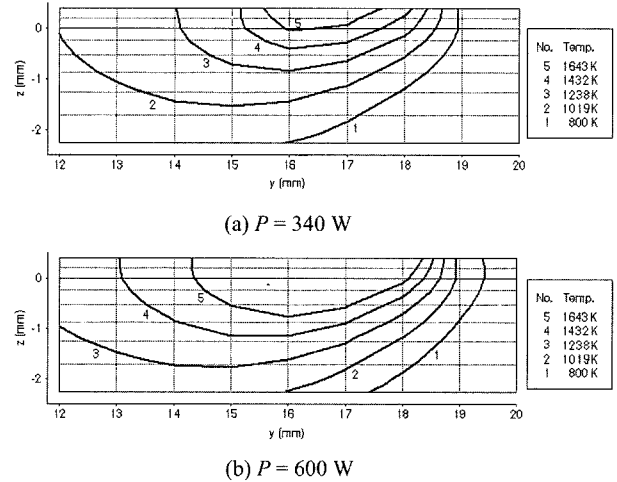


Fig. 19. The melting pool and temperature contour near the pool in longitudinal section for different laser power.

레이저 클래딩 공정에서 레이저 광의 조사 면적보다 넓은 범위의 클래딩 층을 형성하기 위해서는 트랙의 겹침이 요구된다. 그런데 연속적으로 진행되는 겹침 공정에서는 이전 공정의 영향으로 모재가 높은 온도 상태에 있기 때문에 현 공정의 회석이 증가하는 경향이 있다. 본 연구에서는 모재의 초기온도를 균일한 분포를 갖는 특정 예열 온도로 지정하는 방법으로 이전 공정에 의한 예열의 효과를 고려하였다. 또한 예열로 인해 모재의 흡수율이 변하지만 해석의 용이함을 위해 일정한 것으로 고려하였다. 그림 21은 모재의 예열 온도에 따른 클래드 층의 회석 변화를 도시한 것이다. 모재의 예열 온도가 높아질수록 회석은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 앞서 모재가 예열되지 않은 경우 출력  $P = 456\text{ W}$ 와 이송 속도  $v = 3.33\text{ mm/s}$ 의 조건 하에서 회석은 5%로 나타났다. 그러나 예열 온도가 500 K인 경우 21%로 급격히 높아졌다. 또한 그림



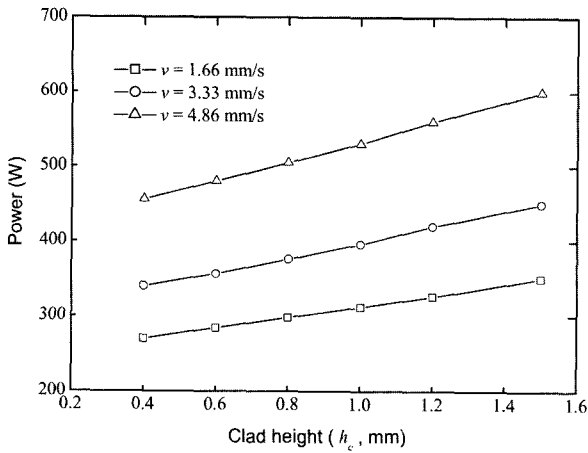


Fig. 20. The effect of clad height and laser scanning speed on laser power for low dilution  $d < 5.0\%$ .

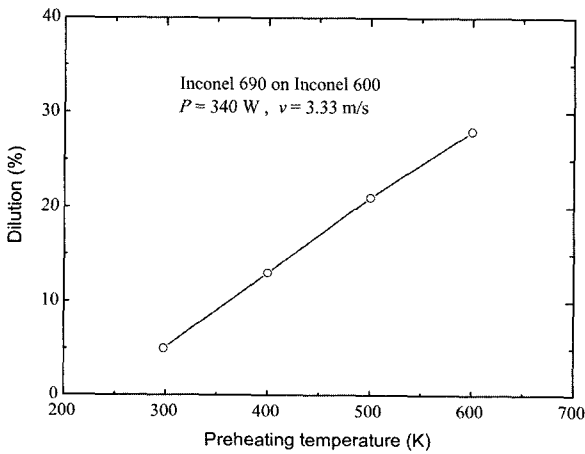


Fig. 21. The effect of preheating temperature on dilution.

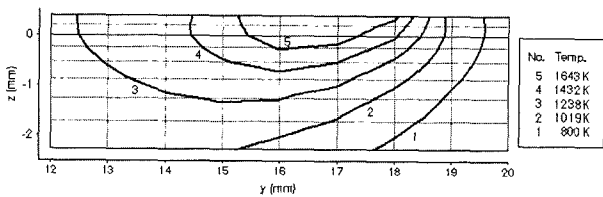
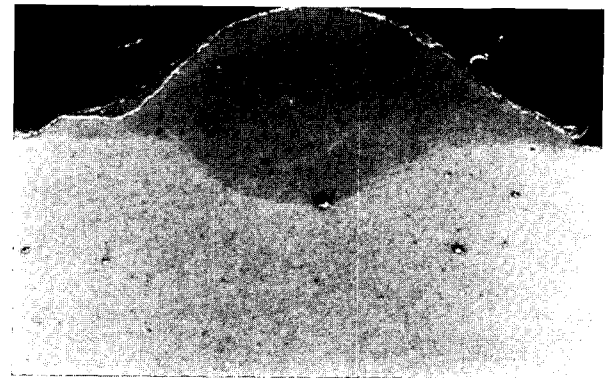


Fig. 22. The melting pool and temperature contour near the pool in longitudinal section for preheating temperature  $T = 500$  K.

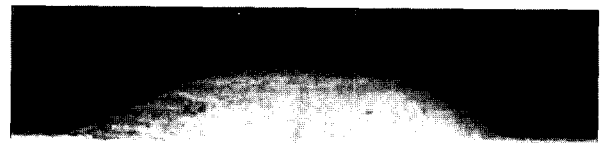
22를 그림 19(a)와 비교해 보면 모재의 예열에 의해 클래드 층의 희석이 증가하였음을 알 수 있고 열영향부 역시 광범위해 졌음을 명확히 확인할 수 있다.

#### 4. 실험적 증명

앞서 논의된 유한 요소 모델의 검증을 위하여 평균 출력 220 W, 최고출력 5.5 kW의 TEM00 모드의 Nd:YAG 레이저를 이용하여 Inconel 600을 Inconel



(a)  $v = 1.5$  mm/s



(b)  $v = 2.1$  mm/s

Fig. 23. Cross section of clad layer obtained from experiments for cladding Inconel 600 on Inconel 600 at cladding speed of (a)  $v = 1.5$  mm/s, (b)  $v = 2.1$  mm/s.

600 위에 클래딩 하는 실험을 수행하였다. 개질재는 와이어 송급 노즐을 통해 38 mm/s의 속도로 일정하게 공급되었으며 보호가스로는 아르곤이 사용되었다. 실험 장치 및 조건에 관한 내용은 참고문헌<sup>23)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

그림 23은 레이저 광의 이동속도가  $v = 1.5$  및 2.1 mm/s인 경우에 대해 얻어진 클래드의 단면 모양이다. 클래드 재료의 폭이 모재 용융 역의 폭 보다 넓게 자리잡은 것을 볼 수 있다. 이것은 용융된 클래드 재료의 일부가 모재의 용융 역을 넘어선 곳까지 흐른 뒤 냉각과정에서 결합된 것으로 보인다.

제안한 레이저 클래딩 공정의 3차원 유한요소 해석 기법을 검증하기 위해 위의 실험 공정을 모사하였다. 레이저 광의 분포는 식 (3)을 이용하여 표현하였으며 이 때 표준편차는  $r = 2.5$  mm으로 하였다. 그림 24는 클래딩 속도  $v = 1.5$  및 2.1 mm/s에 대해 해석된 결과로 얻어낸 클래드 층의 단면도이다. 각각의 클래딩 속도에 대하여 클래드 층의 깊이는 0.7 mm와 0.4 mm로 나타났으며 희석은 각각

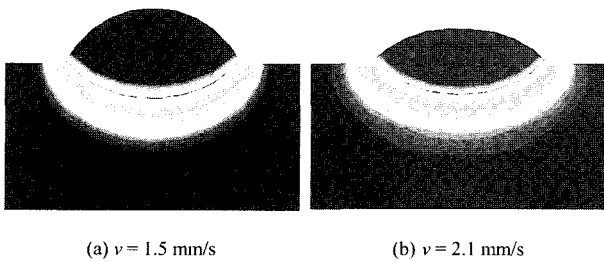


Fig. 24. Cross section of clad layer obtained from simulations for cladding Inconel 600 on Inconel 600 at cladding speed of (a)  $v = 1.5$  mm/s (b)  $v = 2.1$  mm/s.

25%와 22%였다. 이러한 결과는 그림 23에 나타난 실험 결과와 매우 잘 일치한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 레이저 클래딩 공정의 수치 모사를 위해 3차원 비선형 유한요소 해석 모델을 제안하였다. 해석모델에서는 공정 진행에 따른 클래딩 모양의 변화를 고려하기 위해 적응 유한요소 기법이 적용되었으며, 또한 희망하는 희석을 얻기 위해 요구되는 출력 및 이송 속도에 관한 정량적인 정보를 도출할 수 있도록 희석제어 알고리즘이 구현되었다. 이를 ABAQUS와 연계하여 문헌에 나타난 예제에 적용하였으며 이를 통해 적절한 희석 정도를 갖는 클래딩 층의 형성을 위해 요구되는 레이저 이송속도 및 출력에 관한 정보를 도출할 수 있음을 보였다. 또한 제안된 해석 기법이 공정 시작 후 빠른 시간 내에 준 정적 상태에 도달하는 클래딩 공정의 물리적 특성 역시 잘 모사하고 있음을 확인하였다. 단일 트랙의 겹침으로 인한 모재의 예열이 희석 및 용융 역의 형상에 미치는 영향을 살펴보았으며, 최종적으로 제안된 해석 기법의 타당성 검증을 위해 실험을 모사하였으며 이의 결과를 실험 결과와 비교 논의하였다. 결론적으로 본 연구를 통해 제안된 해석 기법을 이용하여 레이저의 출력 및 이송 속도 등의 함수로서 레이저 클래딩 공정을 정밀하게 모사할 수 있었다.

## 참고문헌

1. S. Kou, S. C. Hsu, R. Mehrabian, Metall. Trans., B 12 (1981) 33.
2. P. S. Mohanty, J. Mazumder, Metall. Mater. Trans., B 29 (1998) 1269.
3. Kar, J. Mazumder, Metall. Trans., A 20 (1989) 363.
4. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen, Metall. Trans., A 15 (1984) 2175.
5. J. D. Damborenea, Surf. Coat. Tech., 100 (1998) 377.
6. M. Bamberger, W. D. Kaplan, B. Medres, L. Shepeleva, J. Laser. Applications, 10 (1998) 29.
7. Kar, J. Mazumder, Laser Processing Surface Treatment and Film Deposition, (1996) 129.
8. Kar, J. Mazumder, Acta Metal. Mater., 36 (1988) 701.
9. A. Rostami, A. Raisi, Numer. Heat Tr. A-Appl., 31 (1997) 783.
10. M. Picasso, C. F. Marsden, J. D. Wagniere, A. Frenk, M. Rappaz, Metall. Mater. Trans., B 25 (1994) 281.
11. P. Nithiarasu, Int. J. Heat. Mass. Transf., 36 (2000) 223.
12. A. Mahrle, J. Schmidt, D. Weiss, Int. J. Heat. Mass. Transf., 36 (2000) 117.
13. U. Ziegler, Comput. Phys. Commun., 116 (1999) 65.
14. J. M. Yellup, Surf. Coat. Tech., 71 (1995) 121.
15. Y. Yang, Applied Surface Science, 140 (1999) 19.
16. F. A. Hooley, M. Rappaz, Metall. Trans., B 23 (1992) 641.
17. J. D. Kim, Y. Peng, KSME Int. J., 14 (2000) 177.
18. Y. T. Pei, J. T. M. De Hosson, Acta. Mater., 48 (2000) 2617.
19. G. Zhao, H. M. Si, C. Cho, J. D. Kim, J. Kor. Soc. Precision Eng., 18 (2001) 134.
20. Y. Li, J. Ma, Surf. Coat. Tech., 90 (1995) 1.
21. L. J. Li, J. Mazumder, Trans. Metall. Soc. AIME, (1984) 35.
22. K. Uenishi, K. F. Kobayashi, Intermetallics, 7 (1997) 553.
23. J. D. Kim, Y. Peng, Opt. Laser Eng., 33 (2000) 299.