

대면적 전자빔 폴리싱 공정 시 발생하는 온도 분포 유한요소해석 연구

김지수^a, 김진석^b, 강은구^b, 이석우^b, 박형욱^{a*}

Finite Element Analysis of Large-Electron-Beam Polishing-Induced Temperature Distribution

J. S. Kim^a, J. S. Kim^b, E. G. Kang^b, S. W. Lee^b, H. W. Park^{a*}^a Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), UNIST-gil 50, Ulsan 689-798, Republic of Korea^b Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), KITECH Cheonan Headquarters 35-3 Hongcheon-ri, Ijang-myeon, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 330-825, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

| | | | |
|----------|----|----------|------|
| Received | 16 | August | 2013 |
| Revised | 3 | December | 2013 |
| Accepted | 8 | December | 2013 |

Keywords:

Electron beam polishing
Finite element model
Temperature distribution
Melting depth
SUS304

ABSTRACT

Recently, the use of large-electron-beam polishing for polishing complex metal surfaces has been proposed. In this study, the temperature induced by a large electron beam was predicted using the heat transfer theory. A finite element (FE) model of a continuous wave (CW) electron beam was constructed assuming Gaussian distribution. The temperature distribution and melting depth of an SUS304 sample were predicted by changing electron-beam polishing process parameters such as energy density and beam velocity. The results obtained using the developed FE model were compared with experimental results for verifying the melting depth prediction capability of the developed FE model.

1. 서론

최근 정밀기계 가공이 급속도로 발전하면서 의료기기, 나노/마이크로 패턴 등의 가공에 많이 사용되고 있다. 최근 출시되고 있는 제품들은 형상이 복잡할 뿐만 아니라 고정정, 고정밀의 가공을 요구하고 있다. 이러한 제품들의 품질은 주로 제품가공의 마지막 단계인 후처리 공정에서 결정된다. 고정정, 고정밀의 후처리 공정을 위해 최근 연구되고 있는 것이 전자빔을 이용한 후처리 공정이다. 전자빔을 이용한 후처리 공정은 전기에너지만을 이용하기 때문에 공정 후 오염물질의 발생이 없어 고정정, 환경 친화적 공정이 가능하다. 또한, 복잡한 형상의 후처리 공정을 단시간 안에 완료할 수

있다는 큰 장점을 가지고 있다. 전자빔을 이용한 후처리 공정이 보급화 되기 위해서는 공정 결과를 예측할 수 있는 모델을 만드는 것이 선행되어야 한다^[1-3].

본 논문은 전자빔 공정 내의 조작 가능한 변수에 따른 온도분포에 관한 해석과 그 결과를 보여주고 있다. 먼저 가우시안 분포를 가지는 전자빔의 특성을 고려하고 실제 실험에 사용된 장비와 부합하는 변수를 적용하여 에너지 분포를 수식화 하였다. 다음으로 이를 이용하여 Fourier가 제안한 열전도 방정식을 풀어 온도분포를 해석하고 결과를 분석하였다. 마지막으로 진행된 해석과 동일한 조건을 적용하여 CW (Continuous Wave) 전자빔을 이용한 실험을 진행하고 해석결과와 비교 분석하여 해석 모델의 타당성을 검증하

* Corresponding author. Tel.: +82-52-217-2376

Fax: +82-52-217-2309

E-mail address: hwpark@unist.ac.kr (H. W. Park).

였다. 본 논문에서 제안된 해석 모델을 이용하여 구한 결과와 실험을 통해 얻은 결과를 비교하여 해석 모델이 실제 실험에 가까운 결과를 보여주는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 모델을 이용하여 전자빔 공정 시 온도분포와 용융깊이, 가공정도의 개략적인 예측이 가능하다고 사료된다.

2. 전자빔 모델 수식화

2.1 이론적 배경

금속, 폴리머 등의 고체 물질에서의 열전도를 예측하기 위하여 Fourier의 열전도 방정식을 사용하였다. 아래의 식은 Fourier의 열전도 방정식을 보여주고 있다^[4].

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (1)$$

여기서 T는 온도, t는 시간, ρ는 소재의 밀도, C는 소재의 비열, k는 열전도율, 그리고 \dot{q} 은 열 유속을 나타낸다. 진공상태에서 전자빔의 조사가 진행되는 점을 감안하여 열의 대류와 복사는 없는 것으로 가정하였다. 또한 온도의 초기 조건은 실온으로 가정하였으며, 경계조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ at } x = y = z = 0 \quad (2)$$

$$T(\infty, t) = T_0 \quad (3)$$

식 (2)에서 볼 수 있듯이, 초기에 반경방향과 높이방향으로의 온도 변화는 없는 것으로 가정하였고, 반 무한의 평면을 가정하여 반경방향으로 무한대의 거리를 갖는 위치에서 온도는 실온으로 설정하였다. 또한 빠른 해석의 진행을 위해서 다음 세 가지의 가정을 하였다.

1. 전자빔의 에너지 밀도 분포는 반경 방향으로 대칭을 이룬다.
 2. 시편은 균질의 소재로 이루어져있다.
 3. 소재의 녹는점 이상의 온도에서 상변태는 고려하지 않는다.
- 해석 결과에서 소재의 녹는점 이상의 온도로 올라간 부분은 전부 용융 깊이로 고려하였으며, 소재의 표면은 완전한 평면으로 설계하여 해석을 진행하였다.

2.2 Gaussian 모델기반 전자빔 모델링

전자빔은 빔의 중앙 지점이 가장 큰 에너지를 가지고 반경 방향으로 중심에서 멀어질수록 에너지 밀도가 감소하는 가우시안 분포

의 에너지 밀도를 가진다. 따라서 실험에 사용된 전자빔에 상응하는 가우시안 분포 모델을 만드는 것이 중요하다. 가우시안 분포를 표현하기 위한 식으로 제안된 모델 중 Goldak의 모델을 사용하여 전자빔의 에너지 밀도를 표현하였다. 아래의 식은 Goldak이 제안한 모델을 보여주고 있다^[5,6].

$$I(x, y, z) = \frac{nP}{\pi abc} \cdot \exp\left[-\frac{nx^2}{a^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{ny^2}{b^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{nz^2}{c^2}\right] \quad (4)$$

식 (4)에서 P는 전자빔의 최대 파워, n은 빔의 분포 모양을 결정하기 위한 변수를 나타낸다. 또한 a, b, c 역시 빔의 분포 형태를 결정하는 변수이다. 각각의 변수에 실제로 실험에 사용된 CW전자빔에 상응하는 변수를 적용하면 원하는 가우시안 분포 모델을 얻을 수 있다. 실험에 사용된 전자빔과 동일한 분포를 얻기 위해서 n에는 3을, a, b, c는 모두 전자빔의 반경을 적용하였다. Fig 1은 해석 모델에 적용된 열 유속의 가우시안 분포를 나타내며, 전자빔의 반경은 빔의 원점으로부터 파워가 최대 파워의 e^{-2} 배가 되는 부분까지의 거리로 하였다. 유한요소해석모델에서의 열 유속은 반경방향으로 대칭을 이룬다. 이로부터 얻어진 식은 다음과 같다.

$$I(x, y) = \frac{3P}{\pi \sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{3(x^2 + y^2)}{\sigma^2}\right] \quad (5)$$

위의 에너지 강도를 이용하여 열 유속을 표현하면 그 식은 다음과 같다.

$$\delta q = P \delta t = I(x, y) \delta x \delta y \delta t \quad (6)$$

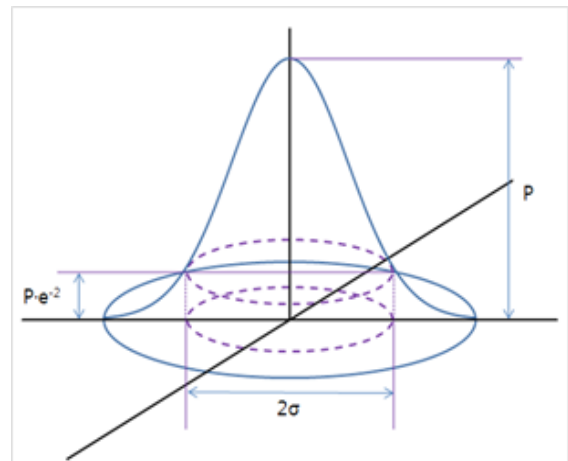


Fig. 1 Illustration of the gaussian distribution model

3. 유한요소해석 모델 구축

3.1 유한요소해석 조건 및 방법

본 연구에서 유한요소해석은 ANSYS 14.0 Workbench를 이용하여 진행하였다. 식 (1)과 (5)를 이용하여 전자빔이 가지는 에너지를 해석상에서 열 유속의 형태로 적용할 수 있다. 해석에 사용된 시편의 크기는 반 무한의 평면을 가정하기 위하여 300 × 300 mm로 설정하였으며 두께는 1 mm로 설정하였다. 빔의 크기가 2.5 mm인 점을 감안할 때 시편의 크기는 반무한의 평면을 가정하기에 충분하다고 사료된다. 전자빔이 움직이면서 조사되는 점을 감안하여 전체 좌표계 안에서 움직이는 원형 좌표계를 하나 더 생성하여 원형 좌표계를 기준으로 전자빔의 열 유속을 적용하였다.

해석은 메쉬의 모양이 균일하고 단순한 열 해석임을 감안하여 모델의 요소를 고체 1로 선택하여 진행하였다. 생성된 원형 좌표계를 기준으로 전자빔의 에너지 분포를 적용하고 원형 좌표계는 시편의 표면을 따라 일정한 속도로 움직일 수 있도록 설계하여 에너지 빔이 조사되면서 움직일 때의 온도분포를 확인할 수 있도록 하였다. 최종적으로 해석은 과도 열전도 해석을 기반으로 진행하였다⁷⁾.

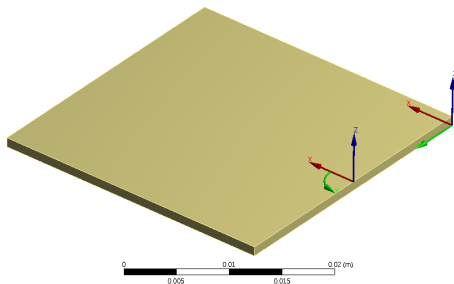


Fig. 2 Configuration of the finite element model

Table 1 Parameters of the electron beam process

| No. | V_a (kV) | I (mA) | f (mm/s) | E_{bd} (W/cm^2) |
|-----|------------|----------|------------|-----------------------|
| 1 | 30 | 7.5 | 0.5 | 3600 |
| 2 | 30 | 7.5 | 3 | 3600 |
| 3 | 30 | 7.5 | 10 | 3600 |
| 4 | 30 | 20 | 10 | 9600 |
| 5 | 30 | 20 | 17 | 9600 |
| 6 | 30 | 20 | 20 | 9600 |

Table 2 Material properties of the SUS304

| | |
|---|-------|
| Thermal conductivity ($W/m \cdot K$) | 16 |
| Specific heat capacity ($J/kg \cdot K$) | 598 |
| Density (kg/m^3) | 8,000 |
| Melting point ($^{\circ}C$) | 1,400 |

실제 실험에서 조작성이 가능한 변수는 가속전압, 전류, 빔의 이송 속도이다. 따라서 변수에 따른 온도분포의 영향을 알아보기 위하여 6가지 조건으로 해석이 진행되었다.

Table 1에서 V_a 는 가속전압, I 는 전류, f 는 전자빔의 이송속도, E_{bd} 는 전자빔의 파워 밀도를 나타낸다. 파워 밀도를 계산한 식은 아래와 같다.

$$E_{bd} = \frac{V_a \times I}{Beam\ Area} \quad (7)$$

여기서 E_{bd} 는 최고점의 파워 밀도를 표현한다. 해석에 사용된 시편의 물성치는 실험에서 사용된 것과 동일한 SUS304소재의 물성치를 적용하였다. 식 (1)에서 볼 수 있듯, 해석에 물성치는 소재의 비열, 열전도율 그리고 밀도가 사용되었다. Table 2는 SUS304의 물성치를 보여준다.

빔의 이송속도는 단위시간 당 이동하는 빔의 거리를 조정하여 결정하였다. 전체 해석이 진행되는 시간은 단위시간 당 이동하는 빔의 거리의 총 합이 전체 사용된 시편의 길이와 같게 설정하여 진행하였다. 해석 결과에 의한 용융깊이의 관찰은 원형 좌표계의 y축을 따라 절단한 면을 기준으로 하였으며, 전체 온도분포의 변화가 정상상태에 도달하였을 때를 측정하기 위하여 빔의 시작점으로부터 200 mm 이동한 후의 용융깊이를 측정하였다.

4. 유한해석 결과 및 실험 결과 분석

4.1 해석결과 및 용융깊이

3절에서 제안된 방법을 기반으로 해석모델을 설계하고 SUS304에 대한 해석을 수행하였다. 해석은 Feed에 따른 온도분포의 영향과 전자빔의 에너지에 따른 온도분포의 영향, 두 가지 방향으로 진행되었다. Fig. 3은 각각 다른 전자빔의 에너지 밀도와 이송속도에 따른 해석 결과를 보여주고 있다. 빨간 테두리의 그림이 에너지 밀도가 3,600 W/cm^2 의 경우이며 검정색 테두리의 그림이 에너지 밀도가 9,600 W/cm^2 의 경우이다. 가로축은 각각의 Feed를 나타내며, 세로축은 에너지 밀도를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 전자빔의 이송속도가 증가할수록 온도분포의 범위가 좁아지는 것을 알 수 있다. 또한, 같은 이송속도를 가지며 에너지 밀도가 증가하였을 경우 월등히 넓은 범위에서 고온의 온도분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 각각의 경우에 대하여 원형 좌표계의 x축을 따라 자른 단면의 온도분포를 보여주고 있다.

Fig. 4에서 주황색으로 표시된 부분이 녹는점인 1,400 $^{\circ}C$ 이상의 온도분포를 나타낸다. 용융깊이는 해석결과와 단면 그림에서 녹는점 이상의 부분을 삭제한 후 남아있는 부분의 두께를 측정하여 표

현하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 해석결과로서 전자빔의 에너지 밀도가 각각 3,600 W/cm²일 경우와 9,600 W/cm²일 경우에 전자빔의 이송속도에 따른 용융깊이의 경향성을 보여주고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 해석 결과에 따른 용융깊이는 전자빔의 이송속도가 증가할수록 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 에너지 밀도가 9,600 W/cm²일 경우에는 전자빔 이송속도가 3,600 W/cm²일 경우에 비하여 월등히 큰 경우를 중심으로 해석을 하였는데 이는 시편의 두께가 1 mm인 점을 감안하였을 때, 시편이 완전히 녹아서 뚫리는 경우를 고려하여 설정한 값이다. Fig. 7의 그래프에서는 전자빔의 이송속도가 10 mm/s로 동일한 경우 에너지 밀도에 따른 차이를 보여주고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 에너지가 3,600 W/cm²에서 9,600 W/cm²으로 약 2.5배 정도 증가했을 경우 시편의 용융깊이는 10배 이상 증가한 것으로 나타났다. 지금까지의 결과는 SUS304 한 종류의 소재만을 이용하였고 데이터 숫자도 6개에 불과해 정확한 용융깊이의 예측은 힘들다고 할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안된 모델은 전자빔이 시편 상에서 1회의 직선이송을 했을 경우 온도분포를 예측할 수 있다. 전자빔 폴리싱 공정에서 전자빔이 같은 시편 상의 다른 구간에 1회 이상 조사가 되었을 경우, 가공 반경이 겹치는 구간이 발생하여 불균일한 전자빔 가공이 이루어지면서 시편 상에서 발생하는 온도분포와 다른 해석결과를 나타

낼 수 있다. 그러나 본 연구는 빠르게 전자빔 폴리싱의 가공 조건을 설정하기 위한 해석 모델을 제안하는 것에 목적을 두고 수행되었기 때문에 해석에 소요되는 시간을 최소화하기 위하여 1회의 직선이송을 가정하였다. 실험 결과와 제안된 모델을 이용한 해석결과

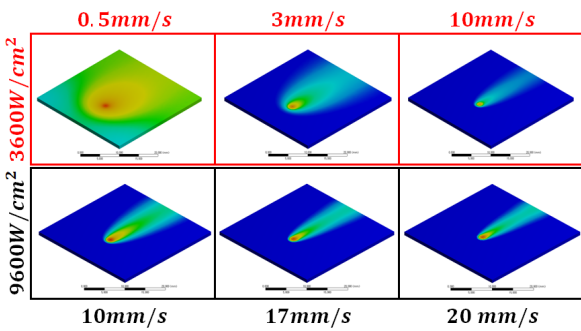


Fig. 3 Prediction result of the temperature distribution for the SUS304 after irradiation

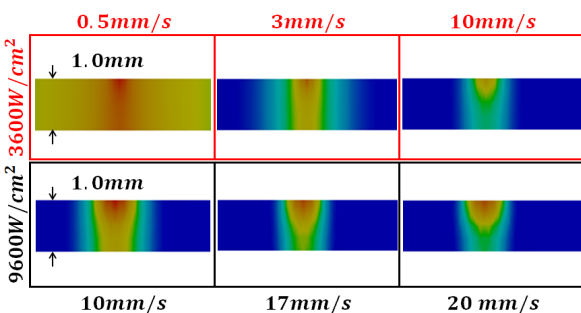


Fig. 4 Cross section view of the temperature distribution along the x-axis for the SUS304 after irradiation

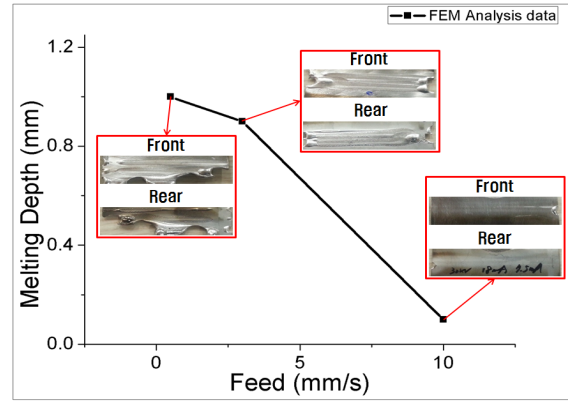


Fig. 5 FEM results of the melting depth, and its experimental image in case of 3,600 W/cm²

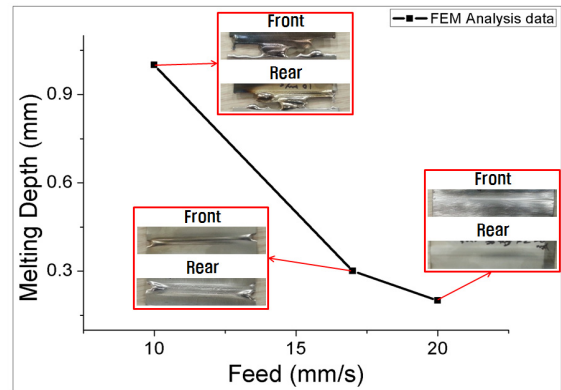


Fig. 6 FEM results of the melting depth, and its experimental image in case of 9,600 W/cm²

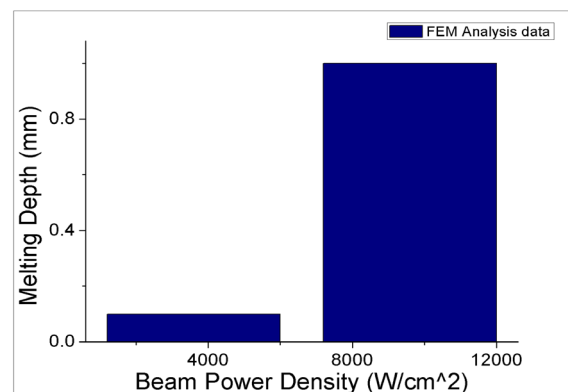


Fig. 7 FEM results of the melting depth with the velocity of 10 mm/s according to the different energy density

Table 3 Experimental measurement of melting depths

| Energy density | Feed (mm/s) | Experimental melting depth | Analytical melting depth |
|-------------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|
| 3,600 W/cm ² | 0.3 | > 1 (mm) | > 1 (mm) |
| | 3 | ~ 1 | 0.9 |
| | 10 | ~ 0 | 0.1 |
| 9,600 W/cm ² | 10 | > 1 | >1 |
| | 17 | ~ 0.5 | 0.3 |
| | 20 | ~ 0.1 | 0.2 |

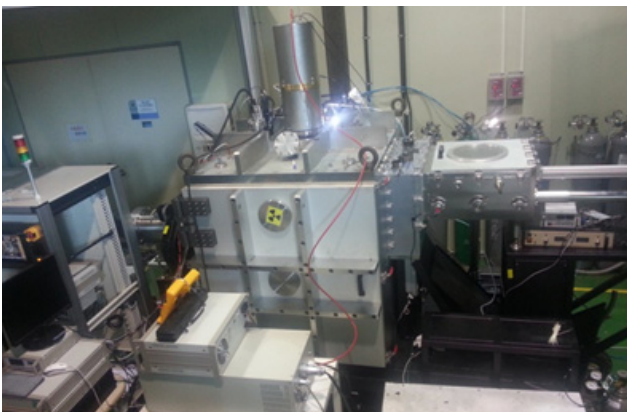
경향성이 일치한다면 제안된 모델을 이용하여 실제 실험에서의 용융깊이를 예측하는 것이 가능할 것이라고 생각하여 실험결과와 해석결과의 비교분석을 진행하였다.

4.2 해석결과와 실험결과의 비교분석

본 연구에서 제안된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 해석조건과 동일한 실험을 진행하여 결과를 비교분석 하였다. Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있는 사진들은 진행된 해석과 동일한 조건의 실험을 진행한 결과를 보여주고 있다.

실험에 사용된 시편 또한 해석에 사용된 것과 동일한 두께 1 mm를 가지는 SUS304시편을 이용하였다. Table 3는 해석결과와 실험결과를 보여주고 있다. 두 결과의 비교를 통해서 용융깊이의 예측 정확도가 10% 정도의 오차를 가지는 것을 확인하였고, 이는 소재의 흡수율에 대한 가정 때문에 발생하는 차이라고 사료된다. 그러나 실험결과와 해석결과의 경향성이 거의 일치하기 때문에 해석모델을 이용한 소재의 용융깊이 예측이 높은 신뢰도를 가진다고 판단된다. 또한 해석에 적용된 흡수율을 소재별, 에너지 별로 조정하여 적용함으로써 해석 모델의 예측 정밀도를 높일 수 있다¹⁸⁾.

Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 용융깊이가 1 mm가 넘는 해석 결과와 동일한 조건의 실험의 경우 뒷면까지 녹아 있는 것을 알 수 있다. 또한 용융깊이가 1 mm를 넘지 않으나 근접한 경우에

**Fig. 8** Experiment device for electron beam polishing

는 뒷면에 변형이 일어난 것을 알 수 있다. 이는 녹는점 근처까지 온도가 올라가 전자빔에서 발생하는 작은 압력만으로도 변형을 일으킨 것이라 사료된다. 마지막으로 용융깊이가 아주 작은 경우에는 실제 실험상에서 가공정도를 거의 확인할 수 없었다.

실험에서 특이한 점으로는 일부 실험의 경우 시편의 양 끝 면에서 가공 정도가 가장 심한 것을 알 수 있는데 전자빔이 조사되고 동시에 바로 이송되지 않고 조사가 시작된 후에 이송되기 때문에 조사되는 에너지가 양 끝 점에서 가장 높아지면서 발생하는 현상이라고 사료된다. 또한 양 끝 점에서는 소재가 한쪽방향이 열려있는 형태인데 이때 변형에 대한 저항도가 가장 작기 때문에 변형이 더 심하게 발생한 것으로 생각된다.

SUS304의 공정 조건에 따른 해석의 결과는 실제 동일한 실험의 결과와 유사한 경향성을 가지는 것으로 나타났다. 용융깊이에 대한 정밀한 예측은 어렵지만 소재의 가공 정도를 예측하는 데에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 유한요소해석법을 통하여 CW전자빔 조사 시에 발생하는 온도분포에 대한 영향을 전자빔에 적용되는 파라미터들에 따라 알아보았고, 해석결과와 실험결과의 비교분석을 통하여 제안된 해석 모델에 대한 타당성을 평가하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) CW전자빔의 조사 후 시편상의 온도분포를 유한요소해석법을 통하여 계산하였고, 계산 결과를 통하여 가공물의 용융깊이를 예측할 수 있었다.
- (2) 전자빔의 이송속도가 증가함에 따라 용융깊이가 감소하는 것을 확인하였고, 용융깊이가 감소하는 기울기는 에너지에 관계 없이 유사한 것을 알 수 있었다.
- (3) 같은 이송속도를 가지는 경우 전자빔의 에너지 증가량에 비해 용융깊이의 증가량이 월등히 큰 것을 알 수 있었다.
- (4) 제안된 해석 모델과 동일한 조건으로 시행된 실험의 결과를 비교분석한 결과 제안된 해석 모델이 용융깊이의 예측 모델로서 타당한 결과를 도출 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

상기 해석 결과와 제안된 모델로부터 소재, 전자빔 파라미터에 따른 온도분포를 예측할 수 있고 이로부터 전자빔을 이용한 폴리싱 실험을 진행할 때 원하는 용융깊이에 따라 전자빔 파라미터를 설정할 수 있다. 본 연구에 제안된 모델에서 사용한 300 × 300 mm 시편의 전자빔 폴리싱에 소요되는 전체 시간이 1시간 이상인 점을 감안하면, 10분 이내에 완료할 수 있는 수치해석 모델을 활용하여

전자빔 가공 조건을 설정함으로써 최적 조건을 설정하는데 걸리는 시간을 크게 줄일 수 있다. 따라서 제안된 모델은 전자빔 폴리싱을 실제 제품에 적용할 때, 최종 사용자들이 더 빠르고 편리하게 전자빔 폴리싱을 도입하고 가공에 적용하는 데에 큰 도움을 줄 것이라고 사료된다.

후 기

본 연구는 정밀기계부품 가공용 고밀도 전자빔의 고속 청정 FINISHING 공정기술개발과 교육부와 한국연구재단의 울산과학 연구단지 R&D 기술개발 사업 및 지역혁신인력양성사업의 지원 (No. 2012H1B8A2026133)으로 수행되었음

References

- [1] Uno, Y., Okada, A., Uemura, K., Raharjo, P., Sano, S., Yu, Z., Mishima, S., 2007, A new polishing method of metal mold with large-area electron beam irradiation, *Journal of Materials processing technology*, 187-189 77-80.
- [2] Kim, D. M., Kim, J. S., Park, S. S., Park, H. W., Ki, H. S., 2012, Surface modification of the patterned Al6061/SUS304 metal plates using the large electron beam, *Applied surface science*, 261 458-463.
- [3] Okada, A., Uno, Y., MCGeough, A., Fujiwara, K., Doi, K., Uemura, K., Sano, S., 2008, Surface finishing of stainless steels for orthopedic surgical tools by large-area electron beam irradiation, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57 223-226.
- [4] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, United States.
- [5] Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M., 1984, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions B*, 15 134 59-69.
- [6] Nguyen, N. T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., Maeda, Y., 1999, Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources, *Welding research*, 265-274.
- [7] Tsirkas, S. A., Papanikos, P., Kermanidis, Th., 2003, Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, 134 59-69.
- [8] Fitting, H. J., 1975, The energy loss of transmitted and backscattered electrons, *Journal of applied physics*, 8 1480-1486.