한국기계가공학회지, 제7권, 제4호, pp.128～134 (2008. 12)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7 No. 4, pp.128～134 (2008. 12)

비 제어 상태의 레이저 직접 금속성형공정에서 적층높이의 모델링

장 윤 상#

Modeling of Deposition Height in the Uncontrolled Laser Aided Direct Metal Deposition Process

Yoon-Sang Chang#

ABSTRACT

Models of the deposition heights in the uncontrolled laser aided direct metal deposition process are constructed for the enhancement of the process integrity. Linear and non-linear statistical models as well as fuzzy model are utilized as the modeling methods. The predictability of the models are evaluated with the values of the sum of square error. The algorithm to use the models in the feedback controlled system is suggested to increase the deposition height accuracy within a layer.

Key Words : Laser Aided Direct Metal Deposition(레이저 직접 금속성형), Statistical Modeling(통계적 모델링), Fuzzy Modeling(퍼지 모델링), Deposition Height(적층 높이)

1. 서 론

제품의 사용주기가 짧아짐에 따라 현대 제품의 경쟁력은 개념설계, 상세설계, 시작품제작, 시험 및 평가, 재수정 등 여러 단계의 설계 시간 축소를 요구하고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 폴리머를 대상으로 개발된 신속시작(rapid prototyping)기술은 세라믹이나 금속을 대상으로 한 3-D Printing, Selective Laser Sintering, Uniform Droplet Spray 등의 공정이 차례로 개발되며 신속조형(rapid manufacturing; RM)으로 확장되었다 [1]. 연구되고 있는 여러 가지 RM 기술 중 레이저를 이용한 직접 금속조형 (Laser Aided Direct Metal Deposition: LADMD)은 3차원의 CAD 모델로부터 금속 제품을 직접 성형하는 레이저 클래딩(laser cladding) 기술이다 [2]. Laser engineered net shaping (LENS), direct light fabrication (DLF), controlled metal build-up (CMB), 또는 direct metal deposition (DMD)로 불리는 이 기술은 기본적으로 모두 같은 개념이며, 레이저 클래딩 기술을 기본으로 하고 있다. 국내의 경우 플라스틱을 대상으로 한 RP기술은 많이 연구되고 있으나 금속재료를 대상으로 한 레이저 이용 적층성형공정은 아직 초기 연구단계이며, 2001년에 LADMD 기술을 상용화한 업체가 국내 최초로 설립되어 자동차 제조업체 등과 협력하여 기술 개발 및 적용을 시작하였으나 기술적인 자료는 회사 기밀사

교신저자 : 수원대학교 기계공학과
E-mail : yschang@suwon.ac.kr

항으로 학계에 발표되지 않고 있다 [3].

LADMD 시스템은 기본적으로 레이저 시스템과 분말재료 공급장치로 이루어진 레이저 클래딩시스템에, 공정의 자동화를 위한 CAD/CAM 및 수치제어 시스템으로 이루어진다. 또한 시스템에 따라 성능향상을 위하여 적층 크기를 제어할 수 있는 피이드백 제어 시스템이 구성되기도 한다. 클래딩 공정의 기술적인 문제점 중 하나는 얼마나 정확하게 기하학적 형상을 만드는가에 있다. 이상적인 경우는 성형표면이 평평하고 높이가 일정하여야 하나, 분말재료의 공급이 정확하게 일정하지 않고 레이저 출력도 변동이 있기 때문에 실제로는 그렇지가 못하다. 적층 높이가 일정치 않으면 층간 경계사이에서 void 같은 예기치 않은 결함이 발생하기 쉽고 결함보완을 위한 열처리나 후처리 절삭가공의 부담이 커지게 된다. 이러한 문제점을 해결하려면 용융점의 크기나, 가열온도, 응고시간 등을 제어하여야하나 분말재료의 사용률이나 열 전달률 등을 제어하는 것은 거의 불가능하다. 적층 높이 등 기하학적 완성도를 얻기 위해서는 레이저 출력, 레이저 빔 지름, 재료 공급률, 가공속도, 경로중첩도 등 LADMD 공정의 주요 변수를 제어하는 것이 효과적이며, 제안된 방법 중 하나는 레이저의 비에너지(specific energy)와 분말재료 공급량을 feedback으로 제어하는 것이다 [1]. 피이드백 제어 시스템의 기본 기능은 공정상 발생하는 적층높이를 감지 대상으로 하여, 과 적층 발생시에 에너지(레이저 출력)와 재료를 조절하여 최대 적층 높이를 직접 제한하는 것이다.

LADMD 공정을 이용한 금속 제품의 성형공정은 이미 그 가능성을 입증 하였지만 성형하고자하는 제품의 형상이나 재료학적 품질을 만족시키려면 아직 연구하여야 할 여지가 많다. 사용자의 입장에서 주요 관심사 중의 하나가 형상의 완전성(integrity)이다. 현재 개발된 대부분의 LADMD 공정은 2.5 차원의 물체를 주요 성형 대상으로 하고 있다. 기존의 개발된 피이드백 제어 시스템을 이용하여 적층 높이를 제어함으로써 정확한 높이로 적층하는 것은 가능하나 과적층시 레이저 출력의 차단에 의한 높이제어는 재료에 void를 발생시킬 수 있다. 다른 문제점은 반구형상의 부품이나 테이퍼형상의 물체를 성형하기 위하여 같은 층(layer)에서 적층 높이를 달리하려 하거나 3차원의 자유 형상을 성형하는 문제이다. 기존의 피이드백 제어 시스템은 optical sensor에서 이상 높이의 발생 유무만을 감지하기 때문에 같은 층 내에서 변화하는 적층 높이의 이상 유무를 감지하기 위해서는 한 단계 향상된 감지 시스템이 요구된다. 이 시스템은 수 msec 안에 발생하는 기울기의 미세한 높이 차이를 감지할 수 있는 정밀도를 가져야 한다. 따라서 공정의 분석을 통한 적층 특성을 파악하여 적층높이를 예측하고 그 예측모델을 통하여 높이 오차를 적절히 보정해 줄 수 있는 공정 변수의 조정 알고리듬의 개발은 형상의 완전성을 달성하는데 적절한 방법이 될 것이다.

본 연구에서는 레이저 직접 금속조형 공정의 특성을 분석하여 공정의 완성도를 향상시키기 위하여 기하학적 형상 특성인 적층높이를 피이드백 제어 시스템이 작동하지 않은 비 제어 공정 상태에서 공정변수인 레이저 출력 및 재료 공급률에 대하여 모델링하였다. 적층높이의 모델링에는 비선형 모델링이 가능한 통계기법과 퍼지(fuzzy) 모델링 방법을 사용하였다. 선형 및 비선형 통계 모델과 퍼지 모델을 비교하여 가공공정의 예측성을 평가하고 비 제어 공정에서 구성된 모델을 이용하여 피이드백 제어공정에서 형상의 완성도를 높이는 방법을 제시하였다.

2. 레이저 직접 금속성형공정

본 연구에 사용된 데이터는 선행연구에서 구성된 Fig. 1의 LADMD 시스템을 이용하여 피이드백 제어가 작동하지 않는 상태에서 얻었다 [4, 5]. 대상 재료는 공구 및 금형 재료로 산업체에서 많이 사용하는 AISI H13 공구강을 사용하였다. 레이저 시스템은 1.75kW 출력의 F7 초점 head assembly가 탑재된 CO_2 레이저를 사용하며, 레이저 빔의 지름 및 모우드는 각각 0.7mm(1mm), TEM 00이다.

LADMD 공정의 공정변수는 구성하는 시스템의 특성에 따라 달라질 수 있으며 적층높이, 레이저 출력, 레이저 빔 지름, 재료 공급률, 가공속도, 경로중첩도 등의 주요 공정 변수가 있다. 피이드백 제어 시스템이 작동한 상태에서 LADMD 공정의 기하학적, 재료적 특성을 분석한 결과 이러한 변수 중에서도 용융점의 크기를 결정하는 레이저 출력과 적층 크기를 결정

하는 재료 공급률이 적층특성을 결정하는 가장 중요한 공정 변수이었다[4, 5]. 특히 레이저 출력을 제어하는 상태에서는 재료 공급률의 적층높이에 대한 영향은 절대적이다. 위에서 언급한 바와 같이 같은 층 내에서 변화하는 적층 높이의 이상 유무를 감지하기 위한 적층높이의 모델링에는 피이드백 제어 시스템이 작동하지 않은 비 제어 공정 상태에서에서의 데이터가 필요하다. 비 제어상태에서 적층높이와 공정변수인 레이저 출력 및 재료 공급률의 관계를 모델링하기 위하여 Table 1의 데이터를 사용하였다[6]. Fig.2는 레이저 출력과 재료 공급률에 대한 적층높이의 그래프이다. Fig. 2와 같이 적층높이는 레이저 출력과 재료 공급률에 대하여 비선형적인 관계를 갖고 있으며, 따라서 모델링에는 비선형 모델링의 통계기법과 퍼지 모델링 방법을 사용하였다.

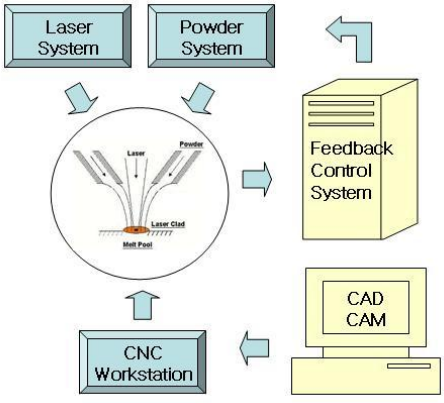


Fig. 1 Schematic diagram of LADMD system

Table 1 Experimental conditions

Process Variables	Unit	Magnitude
Laser Power	W	300 ~ 750 (10 Levels)
Powder Flow Rate	g/min	1 ~ 10 (10 Levels)

3. 비선형 통계모델

공정을 제어할 수 있는 수학적인 모델을 구성할 수 있다면 시스템의 성능을 표현하고 제어할 수 있는 예측모델로서 바람직하다. 여러 연구기관에서 시스템의 분석은 많이 행하여 졌으나 공정변수를 이용한 공정특성의 governing equation은 아직까지 발표되지 않았다. 따라서 예측모델 구성의 첫 번째 단계로 통계 소프트웨어, SAS를 이용하여 수학적인 비선형 모델을 제시하였다.

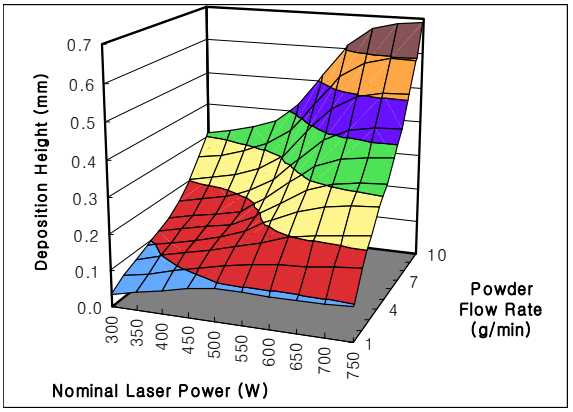


Fig. 2 Plot of deposition height data

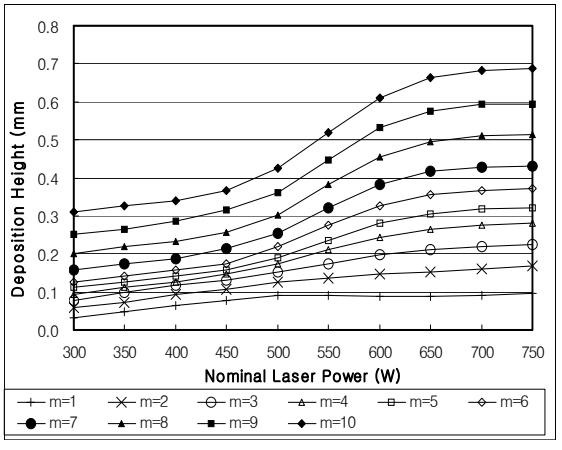


Fig. 3 Plot of deposition height vs. laser power

Fig. 2를 2차원으로 변환한 Fig. 3을 보면 저 출력의 레이저에서 적층이 제대로 이루어지지 않다가 출력에 비례하여 적층되며 레이저 출력이 어느 정도 이상이 되면 분말재료의 공급제한으로 적층 높이가 커지지 않음을 보인다. 적층높이는 레이저 출력에 대하여 3차 polynomial 함수 또는 sigmoid 함수로 접근할

수 있을 것으로 예상된다. 3차 polynomial 모델은 SAS의 REG procedure로 모델링이 가능하여 polynomial 기본 모델은 적층높이(*T*)를 레이저 출력(*L*)과 재료 공급률(*M*)에 대하여 식(1)과 같이 구성하였다. 여기서 재료 공급률은 그래프를 검토한 결과 2차의 함수로도 표현이 가능하여 2차로 구성하였다.

$$T = aL^3 + bL^2 + cL + dM^2 + eM + fLM + g \qquad (1)$$

데이터에서 적층높이의 크기(10^{-3}대)와 레이저 출력의 크기(10^2대)가 차이가 커서 적층높이의 단위 mm를 μm로, 레이저 출력 단위 W를 kW로 변환하였다. 주어진 100개의 데이터를 사용하여 회기분석 모델을 구성한 결과는 식(2)와 같다.

$$T = -6654.9L^3 + 10461.4L^2 - 5186.9L + 2.43M^2 - 34.25M + 96.98LM + 876.9 \qquad (2)$$

이 모델의 R^2 =0.99, MSE=349.6 이며 모든 변수의 p-value는 0.0001 이하로 적절한 모델이 구성되었음을 알 수 있다.

2절에서 구성할 fuzzy 모델과의 형평성을 맞추기 위하여 fuzzy 규칙에서 사용할 12개의 대표값을 100개의 원 데이터로부터 Table 2와 같이 선정하였다. Table 2의 12개의 데이터에 대하여 다시 회기분석 모델을 구성한 결과는 식(3)과 같다.

$$T = -9156.5L^3 + 14336.9L^2 - 7012.7L + 3.2M^2 - 34.2M + 87.4LM + 1116.9 \qquad (3)$$

이 모델의 R^2 =0.99, MSE=877.2 이며 p-value는 가장 큰 값이 L변수의 0.065로, α=0.1로 가정했을 때 모든 변수의 p-value가 0.1 이하로 모든 변수를 모델의 구성에 의미 있는 변수로 보고 포함시켰다.

일반적으로 통계적 모델링에 많이 사용하는 선형 회기 방법은 비선형 회기표현식을 선형으로 변환할 수 있어야 사용 가능하며, 따라서 적합한 모델을 구성하는데 한계가 있다. sigmoid 모델은 선형으로의 변환이 불가능하여 SAS의 NLIN procedure를 이용하였다. NLIN procedure는 비선형 모델의 모수들의 최소제곱 또는 가중최소제곱 추정을 수행하여 모델을 구성한다. 비선형 모델링은 선형 모델링에 비하여 모델의 선정과 추정이 더 복잡하다. 선형 모델에서처럼 회기 변수들의 간단한 나열 대신에 회기표현식을 지정해 주고, 변수이름을 선언하여야 하며, 모수의 초기치를 지정해 주어야 한다. 또한 성공적인 모델의 적합을 보장하지도 않는다. 그러므로 예측모델 및 초기치가 상당히 중요한데, 그래프의 형상을 분석하여 sigmoid 형태의 기본 모델을 식(4)와 같이 구성하였다. 또한 parameter의 초기치를 a, b, c, d, e, f, g에 대하여 각각 300, 20, 0.525, 150, 100, -10, 3로 적용하였다.

$$T = \frac{a}{1 + e^{(-bL+c)}} + d + (M-7)(eL + f + gM) \qquad (4)$$

100개의 원 데이터에 대한 NLIN procedure의 결과 구성한 모델은 식(5)와 같다.

Table 2 Selected data for modeling

Laser(kW)	Powder(g/min)	Thichness(um)
0.3	1	33.02
0.3	7	157.48
0.3	10	309.88
0.45	1	78.74
0.45	7	213.36
0.45	10	365.76
0.6	1	88.9
0.6	7	383.54
0.6	10	609.6
0.75	1	95.25
0.75	7	431.8
0.75	10	688.34

$$T = \frac{314.7}{1 + e^{(-13.73L+0.53)}} + 153.7 + (M-7)(96.90L - 17.17 + 2.43M) \qquad (5)$$

한편 Table 2의 12개의 데이터에 대한 signomial 모델은 식(6)과 같이 구성되었다.

$$T = \frac{295.8}{1 + e^{(-15.48L+0.52)}} + 146.0 + (M-7)(87.41L - 12.02 + 3.18M) \qquad (6)$$

Table 3 Data for Fuzzy Modeling

Laser Power		Powder		Deposition Height		
Data		Data		Data	Model1	Model2
0.3	Low	1	Low	33.02	H1	H1
0.3	Low	7	M-High	157.48	H5	H5
0.3	Low	10	High	309.88	H7	H7
0.45	M-Low	1	Low	78.74	H2	
0.45	M-Low	7	M-High	213.36	H6	H6
0.45	M-Low	10	High	365.76	H8	H8
0.6	M-High	1	Low	88.9	H3	H2
0.6	M-High	7	M-High	383.54	H9	H9
0.6	M-High	10	High	609.6	H11	H11
0.75	High	1	Low	95.25	H4	
0.75	High	7	M-High	431.8	H10	H10
0.75	High	10	High	688.34	H12	H12

4. Fuzzy 모델

데이터의 비선형성으로 인한 규칙의 복잡성을 해결할 수 있는 한 방법이 퍼지 로직을 이용하여 예측 시스템을 구성하는 것이다. Fuzzy controller를 이용한 실시간 적층높이의 제어를 위하여 fuzzy 예측모델을 구성하였다. MATLAB의 Simulink 및 Fuzzy Logic Toolbox를 이용하여 LADMD 공정의 적층높이를 나타내는 논리 규칙을 생성하고 퍼지 시스템을 구성하였다.

구성된 FIS(Fuzzy Inference System)은 레이저 출력과 재료 공급률의 2개 input과 적층높이 1개의 output으로 Fig. 4와 같다. Table 2로부터 fuzzy 규칙에 사용된 데이터는 Table 3과 같이 변환되었다. 레이저 출력은 Low, Mid-Low, Mid-High, High의 4 수준이고, 재료 공급률은 Low, Mid-High, High 의 3 수준이다. 한

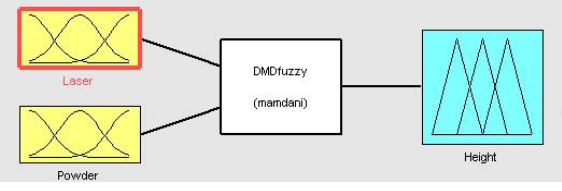
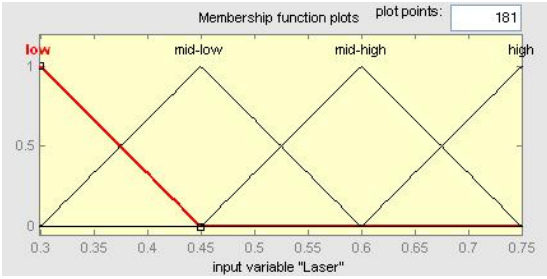
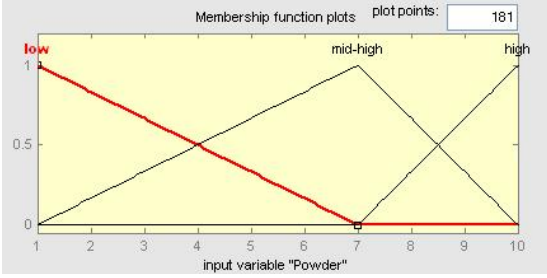


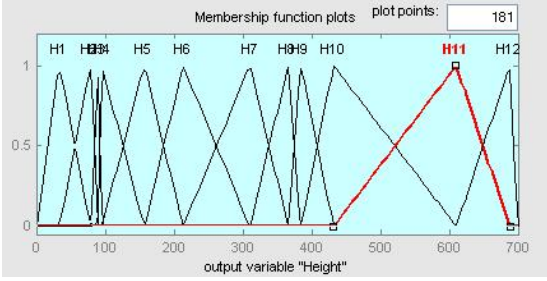
Fig. 4 Fuzzy inference system in MATLAB



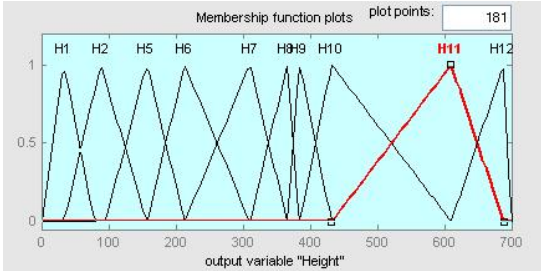
(a) Laser power



(b) Powder mass flow



(c) Deposition height for model 1



(d) Deposition height for model 2

Fig. 5 Membership functions for fuzzy model

편 적층높이는 크기에 따라서 H1～H12 의 12 수준으로 구성하였다. fuzzy 모델 구성을 위한 membership function은 삼각형 상을 사용하여 Fig. 5와 같이 구성되었다. Fig. 5(c)의 적층높이 데이터 H2, H3, H4는 크기가 거의 같아서 특별히 구별할 필요가 없을 것으로 예상되어 Table 3의 Model1의 적층높이 변수를 Model2와 같이 10 수준으로 변환하여 Fig. 5(d)와 같이 membership function을 재구성하였다. Table 4와 같이 fuzzy 규칙이 만들어졌고, Fig. 6은 fuzzy 규칙에 의한 surface plot이다.

Table 4 Fuzzy rules of model 2

IF		THEN
Laser	Powder	Height
Low	Low	H1
Low	Mid-High	H5
Low	High	H7
Mid-Low	Low	H2
Mid-Low	Mid-High	H6
Mid-Low	High	H8
Mid-High	Low	H2
Mid-High	Mid-High	H9
Mid-High	High	H11
High	Low	H2
High	Mid-High	H10
High	High	H12

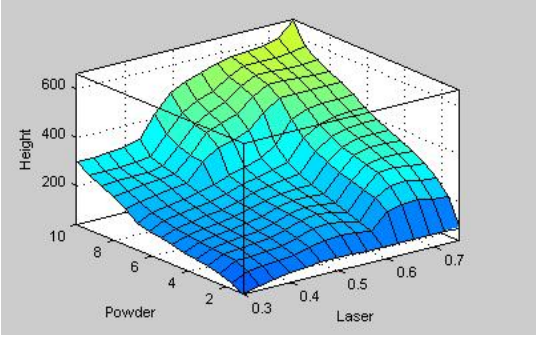


Fig. 6 Surface plot of fuzzy rules

5. 모델링 평가

앞에서 구성된 2개의 polynomial, 2개의 signomial, 2개의 fuzzy 모델의 예측성능을 평가하기 위하여 100개의 원 데이터의 레이저 출력 및 재료 적층률을 독립변수(input data)로 하여 적층높이를 계산(mapping)하였다. 모델 성능 평가는 식(7)과 같이 모델에 의한 예측값(T_M)과 원 데이터와의 차이(residual)의 제곱의 합인 *SSE*(sum of square error) 값을 이용하였다.

$$SSE = \Sigma(T-T_M)^2 \quad (7)$$

각 모델에 대한 SSE값은 Table 5와 같다. SSE 값이 가장 작은 모델은 100개의 원 데이터로 만든 signomial 모델이다. 통계적 모델에서 12개의 선택된 데이터로 만든 모델들은 원 데이터로 만든 모델들에 비하여 약 2배의 SSE 값을 보였다. Fuzzy 모델은 유사한 적층높이 3개를 하나의 수준으로 만든 모델이 더 우수한 예측성능을 보였다. 12개의 선택된 데이터로 만든 3개의 모델 No. 2, 4, 6을 비교해 보면 통계적 모델이 fuzzy 모델보다 예측성능이 우수하고 signomial 모델이 polynomial 모델보다 약간 우수함을 알 수 있다.

Fuzzy 모델은 통계적 모델에 비하여 예측력이 부족하지만 레이저 출력 크기의 피이드백 제어에 의한 적층높이의 실시간 결정 시스템에 이용할 수 있다. 기존의 피이드백 제어 시스템은 0.01mm 수준의 높이 차이를 감지하는 센서의 정밀도와 높이의 크기에 따라서 수 msec 내에 제어 크기를 결정하는 시스템의 구성이 어렵기 때문에 정해진 하나의 레이저 크기를 입력하여 성형하도록 되어있다. 기존의 피이드백 제어에 의한 레이저 출력의 차단 시스템과 레이저 출력에 따른 적층높이 모델을 이용하여 높이 오차가 발생하였을 때 현재의 레이저 출력의 크기를 가감하는 시스템을 Fig. 8과 같이 퍼지 제어기를 이용하여 구성하는 것이 가능하다.

Table 5 Comparison of predictability

No.	Model Type	SSE	Remarks
1	Polynomial 1	32466.7	Eq. 5
2	Polynomial 2	65299.1	Eq. 6
3	Signomial 1	30731.3	Eq. 8
4	Signomial 2	62044.3	Eq. 9
5	Fuzzy 1	358260.1	12 H Levels
6	Fuzzy 2	159454.8	10 H Levels

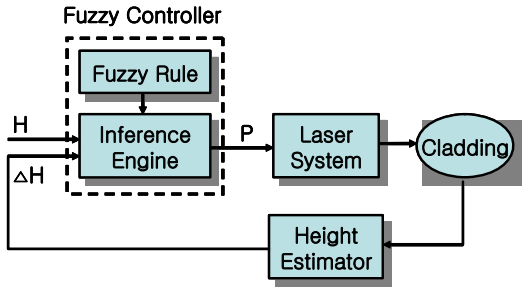


Fig. 7 Fuzzy controller for the advanced system

6. 결 론

본 연구에서는 비 제어 상태의 레이저 직접 금속성형공정에서 H13공구강의 적층높이를 공정변수인 레이저 출력 및 재료 공급률에 대하여 모델링하였다. 비선형 모델링이 가능한 통계기법과 퍼지 모델링 방법을 사용하여 예측모델을 구성하고 가공공정의 예측성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 통계적 모델은 퍼지 모델과 비교하여 우수한 예측성능을 보였으며, 통계 모델에서는 signomial 모델이 polynomial 모델보다 약간 우수함을 알 수 있었다.
2. 기존의 레이저 출력 제어 시스템에서 적층높이 모델을 이용하여 높이 오차가 발생하였을 때 레이저 출력의 크기를 가감하는 제어기를 제안하였다.
3. 제안된 모델을 이용하여 같은 적층 내에서 높이를 변화시킴으로써 형상의 완성도를 높일 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00316).

참고문헌

1. Mazumder J., et. al., “Direct Materials Deposition: Designed Macro and Microstructure,” Mater Res Innov, 3(3), pp. 118-131, 1999.
2. Mazumder J., et. al., “Rapid Manufacturing by Laser Aided Direct Deposition of Metals,” Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, part 15, MPIF, pp. 107-118, 1996.
3. 지해성, “금형제작 및 보수를 위한 레이저 직접금속성형(DMT) 기술의 응용,” 한국 CAD/CAM 학회지, 8(2), pp. 47-52, 2002.
4. Choi, J. and Y. Chang, “Analysis of Laser Control Effect for Direct Metal Deposition Process,” J Mechl Sci Technol, 20(10), pp. 1680-1690, 2006.
5. Choi, J. and Y. Chang, “Characteristics of Laser Aided Metal/Material Deposition Process for Tool Steel,” Int J Mach Tool Manu, Vol. 45, pp. 597-607, 2005.
6. Hua, Y. and J. Choi, “Adaptive Direct Metal/Material Deposition Process Using a Fuzzy Logic-Based Controller,” J Laser Appl, 17(4), 2005.