

실험계획법을 이용한 M2-Cu 기능성 경사 재료의 마이크로 드릴링 특성 평가

심종우^a, 최대철^b, 신기훈^a, 김홍석^{a*}

Characterization of Microscale Drilling Process for Functionally Graded M2-Cu Material Using Design of Experiments

Jongwoo Sim^a, Dae Cheol Choi^b, Ki-Hoon Shin^a, Hong Seok Kim^{a*}^a Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 101811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 July 2015

Revised 10 September 2015

Accepted 17 September 2015

Keywords:

Microscale drilling

Functionally graded material

Cutting force

Design of experiments

Analysis of variance

ABSTRACT

In this study, a microscale drilling process was conducted to evaluate the cutting characteristics of functionally graded materials. A mixture of M2 and Cu powders were formed and sintered to produce disk specimens of various compositions. Subsequently, a microscale hole was created in the specimen by using a desktop-size micro-machining system. By using design of experiments and analysis of variance, it was found that the M2-Cu composition, spindle speed, and the interactions between these two factors had significant effects on the magnitude of cutting forces. However, the influence of feed rate on the cutting force was negligible. A mathematical model was established to predict the cutting force under a wide range of process conditions, and the reliability of the model was confirmed experimentally. In addition, it was observed that increasing the wt% of Cu in an M2-Cu specimen increased the high-frequency amplitude of cutting forces.

1. 서론

최근 산업의 첨단화와 함께 복합화, 고기능화 된 제품의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이에 부응하기 위한 신소재의 개발이 절실한 상태이다. 기능성 경사 재료(FGM: functionally graded materials)는 소재 내부의 성분을 연속적으로 변화시켜 다양한 물성을 가지게 하는 재료^[1,2]로 사출금형, 공구재료, 광섬유, 의료기기, 방탄제품 등 다양한 산업분야^[3-5]에서 다기능 제품을 생산하기 위하여 널리 활용되고 있다.

FGM 관련 선행 연구에서, Beal 등^[6]은 도포된 분말에 레이저 빔을 선택적으로 조사하여 소결하는 SLS(selective laser sintering) 방식을 사용하여 H13-Cu FGM을 제조하고 그 특성을 분석하였고, Ann 등^[7]은 금형코어의 설계 및 제작에 세 가지 재료를 적용하여 열전도성을 확보하고자 하였다. Nemat-Alla 등^[8]은 분말야금법을 사용하여 FGM 제조 공정을 단순화하고자 하였으며, 그 미세구조 분석을 통하여 기공이나 크랙이 없는 FGM을 생산할 수 있음을 보였다.

이와 같이 현재까지 FGM 관련 연구는 주로 FGM 제조 방법이나 열용량, 열전도, 굽힘응력 등 물성 분석에 관한 연구에 집중되어

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6333

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: hongseok@seoultech.ac.kr (Hong Seok Kim).

있다. FGM 제품을 생산하기 위해서는 후가공으로 기계가공이 필요한 경우가 대부분이기 때문에 FGM 가공 특성에 대한 연구도 매우 중요하다. Biermann 등^[9]은 실험 및 해석을 통하여 기능성 경사 강(functionally graded steel) 선삭 시 잔류응력에 대한 연구를 진행하였고, Irgolic 등^[10]은 인공신경망(artificial neural network) 이론을 이용하여 FGM 가공시 절삭력을 예측하고자 하였다. FGM은 여러 가지 물성을 가지는 재료가 혼합되어 구성된 소재이기 때문에 단일재료와 비교할 때 보다 복잡한 절삭 메커니즘을 가지게 된다. 하지만 이와 관련된 연구는 현재까지도 매우 드문 상태이기 때문에 기초연구의 필요성이 매우 높다. 또한 최근에는 제품의 소형화 추세와 함께 마이크로 형상을 가지는 제품의 정밀가공 필요성도 급격히 증가하고 있다^[11]. 따라서 본 연구에서는 FGM에 대한 마이크로 드릴링 실험을 통하여 FGM 가공 메커니즘에 대한 이해를 넓히고자 하였고, FGM의 마이크로 가공 특성에 대해서도 분석하고자 하였다.

우선 M2와 Cu로 구성된 혼합 분말을 가압 및 소결하여 다양한 조성 비율을 가지는 FGM 시편을 제작하였고, 이를 마이크로 가공 시스템을 이용하여 드릴링 가공하였다. 실험계획법과 분산 분석을 통하여 스피indle 속도, 이송량, 소재의 조성 비율이 절삭력에 미치는 영향을 분석하였고, 이를 최소자승모차법을 이용하여 수학적 모델로 표현하였다. 또한 소재의 조성 비율에 따른 절삭력 곡선의 패턴 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

본 연구에서는 M2 공구강과 Cu로 구성된 FGM을 시편으로 사용하였다. M2 및 Cu 분말을 다양한 비율 (100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 0:100 wt%)로 혼합한 뒤 가압성형과 소결(sintering) 공정을 거쳐 Fig. 1과 같이 직경 30 mm, 두께 4 mm의 시편[12]을 제작하였다. 본 재료는 사출금형이나 절삭공구 제조 공정에서 필요한 강성을 유지하면서 열전도 특성을 향상시킬 목적으로 사용될 수 있다^[12].

2.2 마이크로 드릴링 실험

마이크로 영역에서 FGM 시편의 가공특성을 평가하기 위하여 Table 1과 같이 두 가지 수준의 스피indle 속도, 이송량(feed rate), M2와 Cu의 혼합비율을 변수로 선정하였다. 각 변수의 영향 및 상관관계를 분석하기 위하여 2³ 완전요인실험(full-factorial experiment)을 실시하였고, 실험의 설계변수행렬(matrix for design variables)은 Table 2와 같다. 각각의 실험조건에서 100 μm 깊이의 드릴링 가공을 실시하여 절삭력의 크기와 프로파일을 측정하였



Fig. 1 Photos of FGM specimens

Table 1 Variable levels for the FGM machining experiment

Variable	Unit	Low level (level=-1)	High level (level=1)
Spindle speed (x1)	rpm	12000	24000
Feed rate (x2)	μm/s	500	1000
M2-Cu composition (x3)	wt%	80:20	20:80

Table 2 Matrix for design variables

Test	Run order	Spindle speed	Feed rate	M2-Cu composition
1	4	12000	500	80:20
2	5	24000	1000	80:20
3	1	12000	500	80:20
4	7	24000	1000	80:20
5	8	12000	500	20:80
6	2	24000	1000	20:80
7	3	12000	500	20:80
8	6	24000	1000	20:80

고, 이를 수학적으로 모델링하였다. 또한 세 번의 반복실험을 통하여 모델의 정확성을 향상시키고자 하였다. 본 연구에서 절삭력의 크기는 드릴링 추력(thrust force)을 측정하여 사용하였다.

Fig. 2에 나타난 것처럼 본 연구의 실험을 위하여 3축 스테이지, 스피indle, 공구동력계로 구성된 소형의 기계가공 시스템을 구축하였다. 스피indle은 최대속도 80,000 rpm, 정확도 1 μm의 BLDC 형식을 사용하였고, 3축 이송을 위해서는 최대 이송량 50 mm의 스텝 모터 슬라이더를 사용하였다. 또한 압전식 공구동력계와 LABVIEW 시스템을 사용하여 드릴링 시 추력의 변화를 관찰하였다. 마이크로 드릴은 직경 500 μm, 헬릭스 각(helix angle) 30°의 초경 트루스

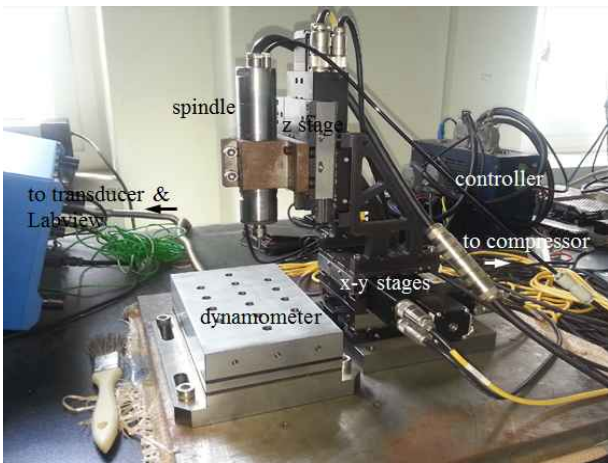
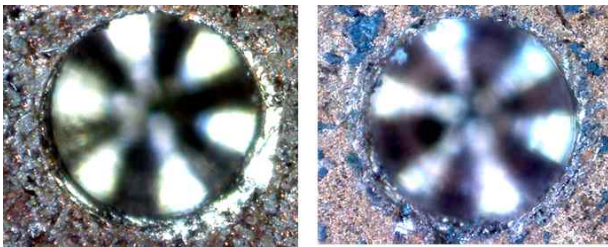
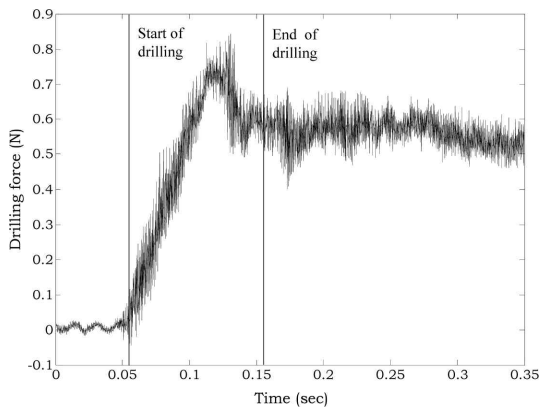


Fig. 2 Experimental set-up of the micro-cutting system for the FGM machining experiment



(a) Photos of drilling holes (diameter=500 μm)



(b) Cutting force curve (spindle speed=12,000 rpm, feed rate=500 μm/s, M2-Cu wt%=80:20)

Fig. 3 Drilling holes and cutting force of FGM specimens

트 드릴을 사용하였고, 모든 실험은 윤활제를 사용하지 않는 건식 상태에서 수행되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

가공된 시편의 사진과 절삭력 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 드릴을 이용한 물리적 가공이기 때문에 가공된 구멍의 품질은 다른 가

Table 3 Analysis of Variance—Thrust force for FGM drilling process

Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	Calculated F value
mean	3.131	1	3.131	5055.71
x1	0.0204	1	0.0204	32.90
x2	0.00111	1	0.00111	1.78
x3	0.256	1	0.256	407.71
x12	0.00202	1	0.00202	3.25
x13	0.0488	1	0.0488	78.82
x23	0.00169	1	0.00169	2.72
x123	3.44×10^{-5}	1	3.44×10^{-5}	0.05
Residual	0.00991	16	0.00991	
Total	3.468			

공 방법에 비하여 매우 우수한 것을 볼 수 있다. 또한 구멍의 품질은 M2와 Cu의 조성 비율에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 절삭력은 가공 시작 시점에서 드릴과 시편간의 충격하중 때문에 급격히 증가하였고, 점차 안정화 되는 추세를 보였다. 가공이 종료된 이후에도 드릴과 칩과의 상호작용 때문에 드릴이 원래 위치로 복귀하기 전까지는 어느 정도 절삭력이 유지되었다. 스피들 속도, 이송량, 재료의 조성이 변할 때에도 유사한 패턴의 절삭력 곡선이 관찰되었다. 하지만 고주파로 발생하는 절삭력의 변동 진폭은 실험 조건에 따라 차이가 있었다.

실험 변수에 따른 절삭력의 변화를 분석하기 위하여 각 실험조건에서 최대 절삭력 값을 측정하여 분산분석(ANOVA: analysis of variance)을 실시하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 95%의 신뢰도(confidence level)를 가정한 F값이 $F_{1,16,0.95}=4.49$ 이기 때문에 스피들속도(x1)와 M2와 Cu의 조성 비율(x3), 그리고 두 변수의 상호작용(x13)이 절삭력 크기에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 하지만 특이한 점은 이송량(x2)이 절삭력의 크기에 미치는 영향이 거의 없다는 것이었다.

실험 변수의 주 효과(main effect)와 상호작용 효과(interaction effect)를 분석한 Fig. 4과 Fig. 5에서도 동일한 결과를 관찰할 수 있었다. 절삭력의 크기에 가장 큰 영향을 미치는 실험 변수는 M2와 Cu의 조성 비율(x3)이었고, 그 다음으로는 스피들 속도(x1)였다. M2의 조성 비율이 작아지고 스피들 속도가 커질수록 절삭력의 크기가 감소하였는데, 이는 M2가 Cu에 비하여 단단한 소재이고 빠른 절삭속도에서 공구면의 마찰이 감소하는 것을 고려할 때 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 상호작용의 경우에는 M2와 Cu의 조성비율과 스피들 속도에 의한 상호작용 효과(x13)만이 두드러졌다. M2의 조성 비율이 감소할수록 스피들 속도의 영향이 줄어드는 것은 주목할 만하다. 이는 절삭속도에 따라 M2와 Cu의 절삭저항이 감소하는 구간이 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다.

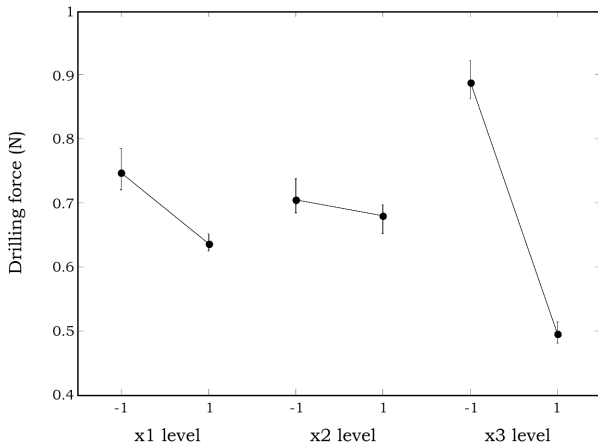


Fig. 4 Main effects of design variables

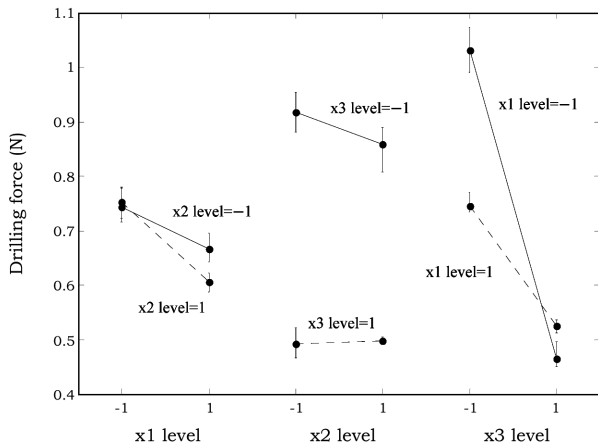


Fig. 5 Two-factor interaction effects of design variables

3.2 모델링 및 고찰

본 연구의 절삭력 분석 결과를 검증하고 제시된 실험조건 부근에서 공정변수에 따른 절삭력의 변화를 정량적으로 예측하기 위하여 다음의 수학적 모델을 수립하였다.

$$F = -0.0561x_1 - 0.198x_3 + 0.0869x_1x_3 + 0.696 \quad (1)$$

여기서 F 는 절삭력의 예측값이고, x_1 과 x_3 는 각각 M2와 Cu의 조성 비율과 스피들 속도의 수준(level) 값으로, Table 1을 참고하여 다음의 식에 따라 결정된다.

$$x_1 = \frac{\text{spindle speed} - 18000}{6000} \quad (2)$$

$$x_3 = \frac{50 - M2 \text{ wt\%}}{30} \quad (3)$$

식 (1)은 본 연구에서 절삭력에 현저한 영향을 미치는 인자로 확인된 x_1 , x_3 및 상호작용 x_1x_3 를 이용하여 절삭력의 크기를 선형적으로 모델링 한 것으로, 모델의 계수는 최소자승법(least square method)을 활용하여 결정하였다.

Table 4 Values of the design variables for confirmation experiments

Case	Spindle speed (rpm)	Feed rate ($\mu\text{m/s}$)	M2-Cu composition (wt%)
1	12,000	1,000	60:40
2	12,000	1,000	20:80
3	12,000	2,000	0:100
4	24,000	1,000	100:0
5	24,000	2,000	60:40
6	24,000	2,000	20:80
7	48,000	500	60:40
8	48,000	1,000	40:60
9	48,000	500	20:80

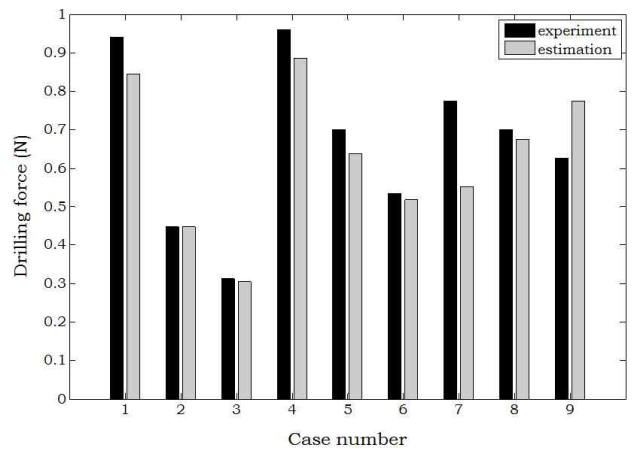
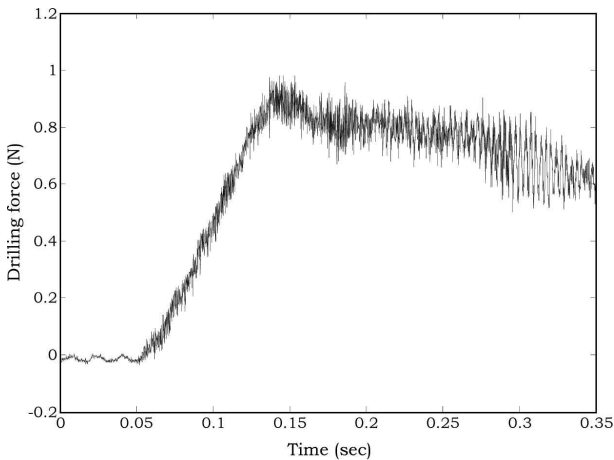


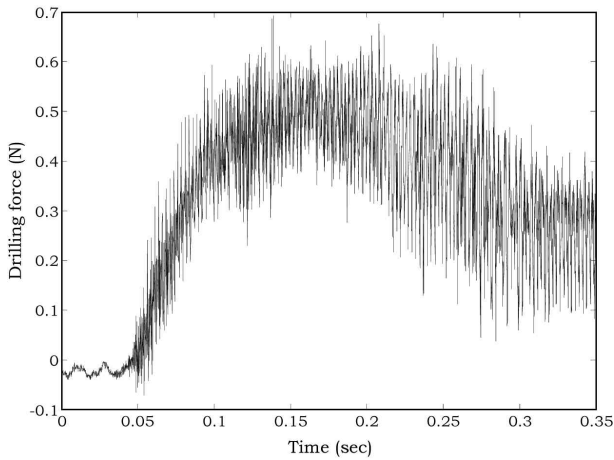
Fig. 6 Comparison between experimental measurements and mathematical estimations

식 (1)의 절삭력 모델링 결과를 검증하기 위하여 Table 4에 제시된 임의의 실험조건에서 검증실험을 수행하였다. Fig. 6에 나타난 것처럼 모델의 예측결과는 전체적으로 측정된 실험결과 값과 매우 잘 일치하였다. 스피들 속도가 12,000 rpm과 24,000 rpm인 경우 (Case 1~6) 최대오차는 Case 1의 10%였다. 하지만 스피들 속도가 48,000 rpm인 경우(Case 7~9)의 오차는 증가하여 Case 7과 Case 9의 경우 각각 28%와 27%의 오차가 관찰되었다. 이는 수학적 모델이 스피들 속도 12,000 rpm과 24,000 rpm에서 수행된 실험결과에 기반하여 수립되었기 때문인 것으로 판단된다. 이 범위를 벗어난 경우에는 선형적 모델링 기법의 한계가 나타나거나, 절삭속도의 변화 등에 따라 실험변수의 정량적인 영향 지수가 다소 변할 수 있다. 따라서 항우 반응표면분석법(response surface method) 등을 활용하여 보다 넓은 범위에서 공정조건에 따른 절삭력의 변화를 분석할 필요가 있다.

앞에서 언급한 것처럼 본 연구에서는 이송량이 절삭력에 미치는



(a) M2-Cu wt%=80:20



(b) M2-Cu wt%=40:60

Fig. 7 Comparison of cutting force curves at different M2-Cu composition values (spindle speed=12,000 rpm, feed rate=500 μm/s)

영향이 매우 적은 것으로 관찰되었다. 하지만 이송량은 가공 시 절삭인의 절입깊이(depth of cut)와 밀접하게 관련된 인자로, 이송량의 증가는 절삭력의 선형적인 증가를 가져오는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 마이크로 영역에서의 드릴링 공정에 대한 연구를 수행하였기 때문에 절삭인의 절입깊이가 최대 3 μm 이하이다. 이와 같은 마이크로 영역에서는 미변형 칩두께의 크기가 공구선단 반경의 크기보다 작아지면서 경작력(ploughing force)의 상대적인 비율이 증가하고, 크기효과(size effect)가 나타나게 된다. 이러한 절삭 메카니즘의 변화^[47]로 인해 일반적인 이송량과 절삭력의 관계는 유효하지 않을 수 있다. 향후 보다 넓은 범위에서 수행된 실험 결과를 바탕으로 FGM의 가공에서 나타나는 크기효과에 대한 연구를 실시할 계획이다.

본 연구에서는 FGM 가공 시 공정조건의 변화에 따른 최대 절삭력의 변화와 예측에 초점을 맞추었다. 하지만 절삭력의 최대값 뿐 아니라 가공 중 일어나는 절삭력의 변화 패턴도 FGM 가공특성을

판단하는데 중요한 정보가 될 것이다. 따라서 Fig. 7에 서로 다른 M2와 Cu의 조성 비율을 가지는 시편에 대한 절삭력 측정결과를 표시하였다. Cu의 조성 비율이 증가할수록 고주파로 변화하는 절삭력의 변동 진폭이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 본 연구의 FGM 시편은 서로 다른 물성을 가지는 입자들을 혼합하여 기압성형 및 소결한 것으로 단일재료에 비하여 균질성이 떨어지기 때문에 절삭력의 변동 진폭도 커질 것으로 판단된다. 또한 단일재료 절삭 시에도 Cu는 M2에 비하여 절삭력의 변동 진폭이 큰 것으로 관찰되었는데, 이는 Cu의 조성 비율 증가에 따라 절삭력의 고주파 진폭이 커지는 원인이 될 것이다. 향후 조성 비율 및 가공 조건에 따른 절삭력의 진폭 변화에 대한 정량적인 연구도 수행할 계획이다.

4. 결론

본 연구에서는 M2와 Cu로 구성된 FGM 시편에 대한 마이크로 드릴링 공정을 수행하여 FGM의 절삭 메카니즘을 이해하고 절삭 성능을 향상시키고자 하였다. M2와 Cu 분말을 다양한 조성 비율로 혼합하고 성형 및 소결하여 디스크 형태의 시편을 제작하였으며, 마이크로 머신을 이용하여 다양한 스핀들 속도, 이송량, 소재의 조성 비율 조건에서 마이크로 드릴링 실험을 수행하였다.

실험계획법과 분산분석을 통한 연구 결과 본 연구에서 사용된 FGM의 절삭력에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 M2와 Cu의 조성비율 및 스핀들 속도였다. 주목할 점은 이송량이 절삭력에 미치는 영향이 매우 적다는 것이었는데 이는 미변형 칩두께가 공구선단의 반경보다 작아지면서 나타나는 크기효과에 기인하는 것으로 판단된다.

최소자승오차법에 의하여 수립한 수학적 모델은 다양한 공정조건에서 최대절삭력의 값을 비교적 정확하게 예측하였다. 하지만 실험 범위를 크게 벗어나는 조건에서는 절삭온도 등 절삭력에 영향을 미치는 인자의 상대적 중요성이 변하기 때문에, 선형적 모델링의 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

또한 복합재료 가공 시에는 소재의 균질성이 떨어지기 때문에 고주파로 변화하는 절삭력의 변동진폭이 단일재료에 비하여 큰 것으로 관찰되었다. 본 연구에서는 Cu의 조성 비율이 증가할수록 절삭력의 변동 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 보다 넓은 공정조건 및 소재에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 이는 다양한 응용분야에서 FGM의 적용범위를 확대하는데 기여할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, H. S., Shin, K. H., 2014, Material Pixel-based Process Planning for Layered Manufacturing of Hetrogeneous Objects, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15:11 2421-2427.
- [2] Shin, K. H., Natu, H., Dutta, D., Mazumder, J., 2003, A Method for the Design and Fabrication of Hetrogeneous Objects, *Materials & Design*, 24:5 339-353.
- [3] Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P., Ahrens, C. H., 2006, The Effect of Scanning Strategy on Laser Fusion of Functionally Graded H13/Cu Materials, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30:9 844-852.
- [4] Li, C. L., 2001, A Feature-based Approach to Injection Mould Cooling System Design, *Computer Aided Design*, 33:14 1073-1090.
- [5] Tadamalle, A. P., Reddy, Y. P., Ramjee, E., 2013, Influence of Laser Welding Process Parameters on Weld Pool Geometry Duty Cycle, *Advances in Production Engineering & Management*, 8:1 52-60.
- [6] Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P., Ahrens, C. H., 2006, Optimisation of Processing Parameters in Laser Fused H13/Cu Materials using Response Surface Method(RSM), *Journal of Materials Processing Technology*, 174:1-3 145-154.
- [7] Ahn, D. G., Kim, H. W., 2010, Study on the Manufacture of a Thermal Management Mould with Three Different Materials using a Direct Metal Tooling Process, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224:3 385-402.
- [8] Nemat-Alla, M. M., Ata, M. H., Bayoumi, M. R. Khair-Eldeen, W., 2011, Powder Metallurgical Fabrication and Microstructural Investigations of Aluminum/steel Functionally Graded Material, *Material Sciences and Applications*, 2 1708-1718.
- [9] Biermann, D., Menzelm, A., Bartel, T., Hohne, F., Holtermann, R., Ostwald, R., Sieben, B., Tiffe, M., Zabel A., 2011, Experimental and Computational Investigation of Machining Processes for Functionally Graded Materials, *Procedia Engineering*, 19 22-27.
- [10] Irgolic, T., Cus, F., Paulic, M., Balic, J., 2014, Prediction of Cutting Forces with Neural Network by Milling Functionally Graded Material, *Procedia Engineering*, 69 804-813.
- [11] Kim, H. S., 2013, Prediction of Cutting Forces and Estimation of Size Effects in End Milling Operations by Determining Instantaneous Cutting Force Constants, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22:6 1003-1009.
- [12] Jeong, J. S., Shin, K. H., 2014, Property Estimation of Functionally Graded Materials between M2 Tool Steel and Cu Fabricated by Powder Metallurgy, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 38:9 9534-958.