

데스크톱 건성 방전가공 시스템의 개발 및 실험적 성능평가

Development of Desktop Dry Electrical Discharge Machining (EDM) System and Experimental Performance Evaluations

이상원^{1,✉}, 오영석¹, 안수홍¹

Sang Won Lee^{1,✉}, Young Seok Oh¹ and Soo Hong Ahn¹

¹ 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

✉ Corresponding author: sangwonl@skku.edu, Tel: 031-290-7467

Manuscript received: 2009.8.11 / Accepted: 2009.10.5

This paper addresses the design and fabrication of desktop die-sinking dry electrical discharge machining (EDM) system and its experimental performance analysis. The developed desktop dry EDM machine has the horizontal configuration with the size of 300×200×260mm. The experimental performance analysis is conducted to investigate the effects of EDM conditions and dielectric gas temperature on the surface roughness of EDMed slots and number of EDM sparks. The experimental results demonstrate that low feed rate and large electrode displacement are good for better surface roughness and more number of EDM sparks. In addition, low temperature of dielectric gas results in better surface roughness.

Key Words: Desktop Die-Sinking Dry EDM Machine (데스크톱 형조 건성방전가공기), Dry EDM Milling (건성 방전밀링가공), EDM Condition (방전가공조건), Dielectric Gas Temperature (절연기체온도), Surface Roughness (표면거칠기),

1. 서론

최근에 마이크로 및 메소급 형상 및 부품 제조에의 적용성이 확대되고 있는 방전가공(Electrical discharge machining, EDM)은 탈이온수나 기름과 같은 절연성 액체 내에서 공구전극 및 가공소재 간에 고전압을 가하여 미세한 양의 가공파편을 소재로부터 제거함으로써 원하는 형상을 가공하는 기술이다. 기존의 방전가공과는 다르게 건성방전가공은 절연성 매질로서 기존의 액체 대신에 공기나 산소와 같은 기체를 사용한다. 즉, Fig. 1에 주어진 것처럼 건성방전가공의 경우, 튜브형태의 공구전극을 통해 공기나 산소와 같은 절연기체를 공급하고 공구전극과 가공소재 간에 고전압을 가하여 스파크를 발생시켜 소재를 가공하게 된다.¹

이러한 건성방전가공은 일반 습식방전가공과

비교하여 공구전극 마멸율이 작고, 표면경화층이 얇으며 잔류응력이 작은 장점을 가지고 있다. 또한, 방전간극이 일반 습식방전가공의 경우보다 훨씬 작음으로써 향상된 부품 및 형상의 정밀도를 얻을 수 있다.

건성방전가공 기술에 대한 연구는 일본의

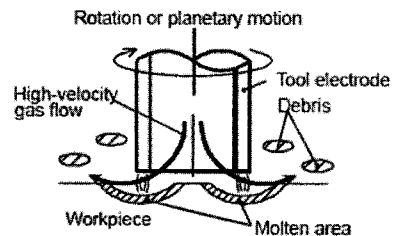


Fig. 1 Schematic overview of die-sinking dry EDM process¹

Kunieda 교수에 의해 최초로 시도되었다. 즉, 고압의 공기 및 산소를 절연기체로 사용하는 형조(die-sinking) 건성 방전가공에 대한 연구를 수행하여 가공성을 분석하였다.¹ 또한, Kunieda²는 산소를 절연기체로 사용한 고속 3 차원 건성 방전 밀링가공기를 제작하여 가공성능 및 특성 분석에 관한 연구를 수행하였다. 즉, 고속의 건성 방전 밀링가공을 위해 산소를 이용한 준폭발모드를 발생시켜 재료제거율을 급격히 증가시킴으로써 거친가공(roughing)에 응용하였다. 또한, 낮은 재료제거율을 갖는 일반모드는 미세정밀가공에 응용하였다. Zhanbo³ 등은 건성 방전 밀링 및 드릴링 가공의 특성을 연구하여 방전펄스 지속시간에 따른 재료제거율 및 공구전극 마멸율과 가공성을 분석하여 표면가공에의 적용성을 연구하였다.

Zhang⁴ 등은 초음파 진동을 적용한 건성방전가공 기술을 개발하여 방전개로전압, 방전펄스 지속시간, 초음파 진동 진폭 등의 방전변수가 재료제거율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, Tao⁵ 등은 건성 및 유사 건성 방전 밀링 가공에 관한 실험적 연구를 수행하여 가공특성을 분석하였다. 산소를 절연성 매질로 이용하는 건성방전가공 및 절소와 물의 혼합물을 절연성 매질로 이용하는 유사건성방전가공에 관한 연구를 통해 방전가공변수가 재료제거율 및 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다.

기존의 건성방전가공에 관한 연구는 주로 대형 방전가공기에서 수행되고 있어서 미소한 방전간극 제어가 난이하여 전기단락 현상이 자주 발생한다. 이로 인해 방전가공 품질의 저하가 초래되어 마이크로 및 메소급 정밀 형상 및 부품 제조에의 적용성이 나빠진다. 또한, 대형 방전가공기의 사용은 에너지 소비의 증가와 가공 및 유지비용의 증가를 초래하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 데스크톱 크기의 초소형 건성방전가공기를 제작하여 에너지 및 비용을 절감하고 정밀도를 향상시켜 효율적인 마이크로 및 메소급 형상 및 부품 제조에 적용하고자 한다.

본 논문은 데스크톱 크기의 형조 건성방전가공기의 설계, 제작 및 실험적 성능평가에 관한 것으로서 2 장에서는 3 축 데스크톱 형조 건성방전가공기의 설계 및 제작에 관하여 기술하고 있다. 3 장에서는 가공조건 및 절연기체 온도에 따른 표면거칠기에 관한 실험적 연구결과를 통해 제작된 3 축 데스크톱 형조 건성방전가공기의 성능분석에 관하

여 기술하고 있다. 최종적으로 4 장에는 결론이 주어져 있다.

2. 데스크톱 건성 방전가공기의 설계 및 제작

마이크로 및 메소급 형상 및 부품의 가공을 위한 건성 방전가공기의 개발을 위해 상대적인 정밀도 향상 및 에너지 소비와 비용의 감소를 달성할 수 있는 데스크톱 크기를 갖는 메소 스케일 공작기계 시스템 기술을 도입하였다.⁶ 데스크톱 건성 방전가공기 외형의 체계적인 설계를 위해 그래프 이론을 도입하였고, 이를 기반으로 데스크톱 건성 방전가공기를 4 단계 계층구조로 구분하고, 각 기계부품 및 연동장치간의 기능적 적합성을 고려하였다.⁷

상기한 방법론을 통해 도출된 다수의 외형설계안 중 전문가 설계 이론의 관점에서 기구학적 부품 배치의 균일화 및 이동 질량의 최소화 기준에 적합한 외형 설계안이 최종적으로 선정되어 실제 데스크톱 건성방전가공기 제작에 이용되었다. 선정된 3 축 데스크톱 형조 건성방전가공기 외형 설계의 3D 모델이 Fig. 2에 주어져 있다. 또한, Fig. 2에 주어진 모델을 기반으로 제작된 형조 건성 방전가공기의 사진이 Fig. 3에 주어져 있다.

Fig. 2와 3에서 알 수 있듯이 도출된 기계시스템 외형은 수평형이다. 또한, Fig. 3에서 알 수 있듯이 공구전극의 운동자유도는 1 자유도이고, 가공물의 운동자유도는 2 자유도로 구성되어 공구전극과 가공물 간의 3 자유도 상대운동이 구현된다.

제작된 데스크톱 건성 방전가공기의 전체크기는 300×200×260mm 이며, 이는 일반적인 대형 방전

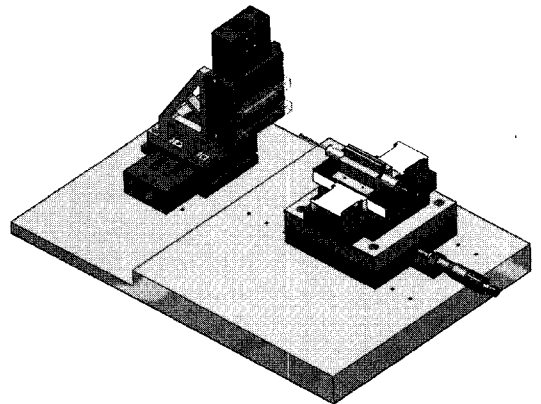


Fig. 2 3-D solid model of desktop dry EDM machine

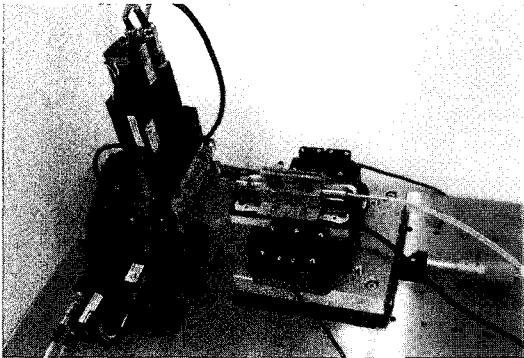


Fig. 3 Photo of developed desktop die-sinking dry EDM machine

가공기 크기의 약 1/1000 에 해당된다. 공구전극 이송을 위해 사용된 인치웸 기반 압전소자 선형 슬라이드는 Alio Industry 사의 AI-D4-5000E 이며, 총 변위가 50 mm 이고, 최대속도는 250mm/s, 이동 분해능은 0.1 μ m 이다. 이러한 압전소자 기반 선형 슬라이드의 사용을 통해 미소 방전간극의 신속한 운동제어가 가능하게 된다. 또한, 가공물 이송을 위해 사용된 스크류 기반 선형 슬라이드는 Parker 사의 MX80ST 이며, 총 변위가 50mm 이고, 최대속도는 40mm/s, 이동 분해능은 0.5 μ m 이다.

3. 건성 방전 밀링 가공 성능 평가

3.1 방전가공조건과 표면거칠기

제작된 데스크톱 건성 방전가공기의 가공성능을 평가하기 위해 건성 방전 밀링 가공을 수행하여 직선 슬롯을 가공하였고, 가공 표면의 표면거칠기를 측정하였다. 건성 방전 밀링 가공 실험을 수행하기 위해 RC 형 방전펄스 발생기를 사용하였고, 튜브형태의 공구전극을 사용하여 고압의 공기를 방전영역에 공급하였다. 공구전극으로는 외경이 3.2mm 이고, 내경이 1.8mm 인 구리 전극을 사용하였고, 0.3MPa 의 압력을 갖는 공기를 전극을 통해 방전영역에 공급하였다.

건성 방전 밀링 가공 실험의 조건은 Table 1 에 정리되어 있다. Table 1 에 나타난 것처럼 방전개로 전압(Open gap voltage), 횡방향 이송속도(Feed rate), 공구전극의 이동변위(Electrode displacement)를 가공 변수로 총 8 가지의 실험을 수행하였다. Table 1 에 주어진 건성 방전 가공 조건에 따라 수행된 방전 밀링 가공의 사진이 Fig. 4 에 주어져 있다.

Table 1 Machining conditions for dry EDM experiments

Cases	Work-materials	Open gap voltage (V)	Feed rate (μ m/sec)	Electrode displacement (μ m)
1	Brass	25	75	20
2		25	75	50
3		25	150	20
4		25	150	50
5	Steel	30	75	20
6		30	75	50
7		30	150	20
8		30	150	50

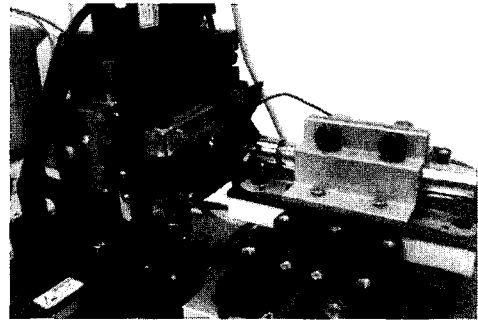


Fig. 4 Photo of dry EDM milling of brass workpiece

황동을 가공소재로 한 경우 (Cases 1~4), 가공된 슬롯의 사진이 Fig. 5 에 주어져 있다. 또한, 가공 슬롯의 바닥면 표면거칠기 측정결과가 Fig. 6 에 주어져 있다.

Fig. 6 에서 알 수 있듯이, 횡방향 이송속도가 75 μ m/sec 이며, 공구전극 이동변위가 50 μ m 인 case 2 의 방전 밀링 가공 슬롯 바닥면 표면거칠기가 가장 우수함을 알 수 있다. 이는 횡방향 이송속도가 상대적으로 느리고, 공구전극의 이동변위가 큰 경우 가공면의 표면거칠기가 우수함을 의미한다.

철을 가공소재로 한 경우(Cases 5~8)의 가공된

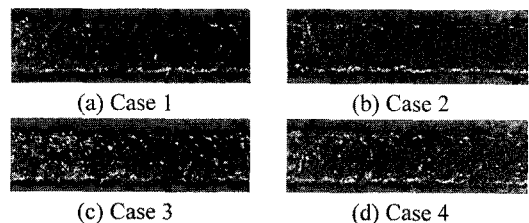


Fig. 5 Photos of dry EDM milled slots (Brass)

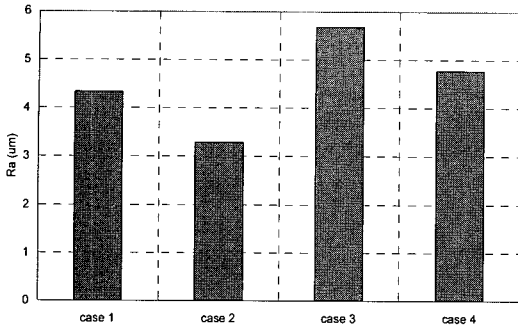


Fig. 6 Surface roughness of dry EDM milled slots (Brass)

슬롯의 사진이 Fig. 7 에 주어져 있다. 철의 경우, 비용융 에너지가 황동의 경우보다 크기 때문에 가공소재로부터 동일한 양을 제거하기 위해 더 많은 에너지가 요구되어 방전개로전압을 30V 로 설정하였다. 따라서, 방전간극에 가해지는 에너지가 커지고 전기단락이 더 자주 나타나게 되어 가공소재가 황동인 경우와 비교할 때 표면거칠기가 전체적으로 나빠진 것을 알 수 있다.

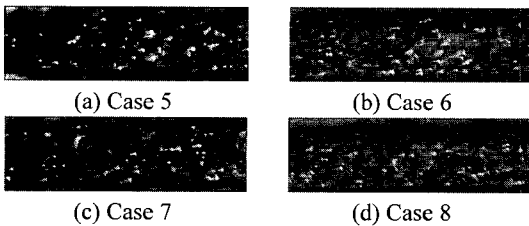


Fig. 7 Photos of dry EDM milled slots (Steel)

가공소재가 철인 경우 가공 슬롯 바닥면의 표면거칠기 측정결과가 Fig. 8 에 주어져 있다. Fig. 8 에서 알 수 있듯이 가공소재가 철인 경우에도 횡방향 이송속도가 75μm/sec, 공구전극 이동변위가 50μm 인 case 6 이 가장 우수한 표면거칠기 결과를 보였다.

따라서, Fig. 6 과 Fig. 8 에 주어진 가공 슬롯 바닥면 표면거칠기 측정결과로부터 가공소재와 관계 없이 횡방향 이송속도가 느리고 공구전극의 이동변위가 클 때, 방전 밀링 가공 표면거칠기가 우수함을 알 수 있다.

Table 1 의 Case1 및 Case 2 에 대하여 방전전압의 모니터링 및 측정 결과가 Fig. 9 에 주어져 있다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이 동일한 방전가공 시간에서 공구전극 이동변위가 50μm 인 경우가 20μm 인 경우에 비하여 더 많은 스파크가 발생함을 알 수 있다.

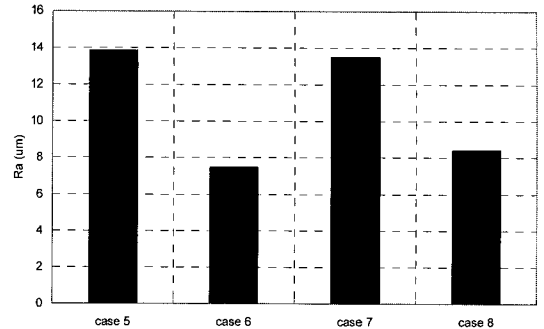


Fig. 8 Surface roughness of dry EDM milled slots (Steel)

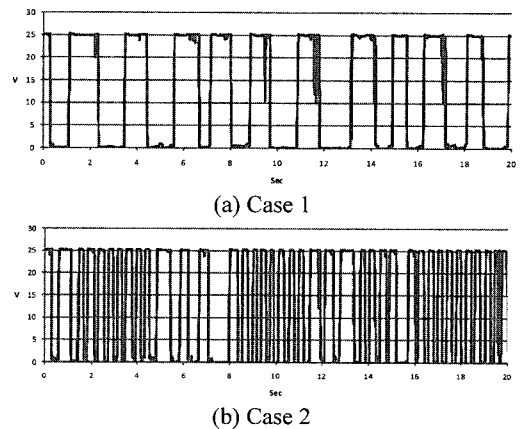


Fig. 9 Discharge voltage (V) profiles at two different electrode displacement conditions: (a) case 1 (20 μm), (b) case 2 (50 μm)

이는 공구전극의 이동변위가 20μm 인 경우, 건성방전 밀링 가공 시 발생하는 가공소재의 파편이 방전간극으로부터 효과적으로 제거되지 못해 전기 단락이 더 많이 발생하고 이로 인해 공구전극의 후진운동이 지연되어 발생하는 현상으로 분석될 수 있다. 상기한 현상으로 인하여 Fig. 6 과 Fig. 8 에서 알 수 있듯이 공구전극의 이동변위가 50μm 인 경우에 20μm 인 경우보다 방전가공의 효율성이 더 높게 되어 더 우수한 표면거칠기를 얻게 된다.

3.2 절연기체온도와 표면거칠기

건성 방전 밀링 가공 시 공급되는 절연기체 (Dielectric gas) 온도의 영향을 분석하고자 방전영역에 각각 상이한 온도의 공기를 공급하였다. 공급된 공기의 온도는 각각 -5°C, 25°C, 75°C 이며, -5°C 의 냉각공기는 Vortex tube 를 통해 공급되었고, 75°C 의 가열공기는 헤어드라이어 를 통해 공급되

었다. 또한, 공기온도 25°C 의 경우에는 상온의 공기가 공급되었다. 절연기체의 온도를 고려한 건성 밀링 가공 실험 시스템의 사진이 Fig. 10 에 주어졌다. 또한, 실험조건은 Table 2 에 정리되어 있다.

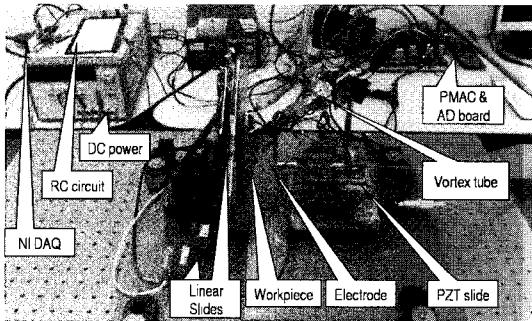


Fig. 10 Photo of the experimental system of dry EDM milling considering dielectric gas temperature

Table 2 Dry EDM milling conditions considering of dielectric gas temperature

Cases	Work-materials	Open gap voltage (V)	Feed rate ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)
1	Brass	37.5	150	-5
2			100	-5
3			150	25
4			100	25
5			150	75
6			100	75

Table 2 에서 알 수 있듯이 절연기체 온도의 영향을 명확하게 파악하기 위해 방전개로전압을 37.5 V 로 설정하여 재료제거율을 증가시켰다. 건성 방전 밀링 가공 실험은 Table 2 에 주어졌듯이 횡방향 이송속도와 절연기체온도를 공정변수로 선정하여 총 6 번이 수행되었다. 이 경우, 구리 공구 전극의 이동변위는 50 μm 로 고정되었다.

황동을 가공소재로 하여 수행한 건성 방전 밀링 가공의 실험 결과가 Fig. 11 에 주어졌다. Fig. 11 은 건성 방전 밀링 가공된 슬롯의 광학 현미경 사진을 보여주고 있다. 또한, 각 가공 슬롯의 표면 거칠기 측정결과가 Fig. 12 에 주어졌다. Fig. 12 에 주어졌듯이 절연공기의 온도가 낮을수록 건성 방전 밀링 가공 슬롯의 표면거칠기가 향상됨을 알 수 있다. 또한, 횡방향 이송속도가 100 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 인

경우의 가공 슬롯 표면거칠기가 150 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 경우에 비하여 더 우수함을 알 수 있다. 즉, 횡방향 이송속도가 100 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이고, 절연공기의 온도가 -5 $^{\circ}\text{C}$ 인 Case 2 의 경우, 건성 방전 밀링 가공 슬롯의 표면거칠기가 가장 우수하다.

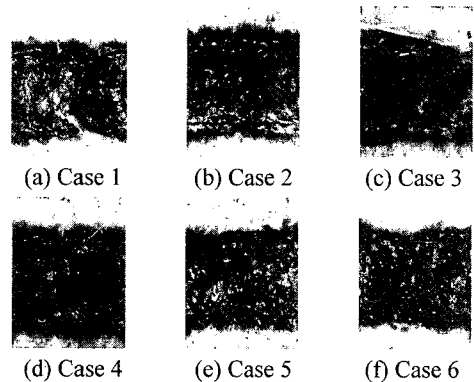


Fig. 11 Optical microscopic photos of EDM milled slots on brass workpieces

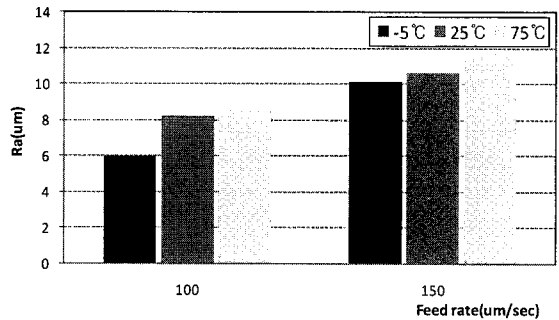


Fig. 12 Surface roughness of dry EDM milled slots (Brass) according to input air temperature and feed rate

이는 절연공기의 온도가 낮을수록 건성 방전 밀링 가공 시 발생하는 파편의 냉각이 가속되어 공구전극이나 가공소재에 재부착되지 않고 방전간극에서 더 용이하게 제거되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 절연냉각공기로 인한 방전파편의 효과적인 제거는 방전가공 중 전기단락의 비율을 감소시켜 스파크 횡수를 증가시키는 효과를 가져온다. Fig. 13 에 6 가지 실험 경우에 대한 방전 스파크 횡수의 비교 결과가 주어졌다. Fig. 13 에서 알 수 있듯이 절연공기의 온도가 낮을수록 방전스파크 횡수가 증가되며 횡방향 이송속도가 낮을수

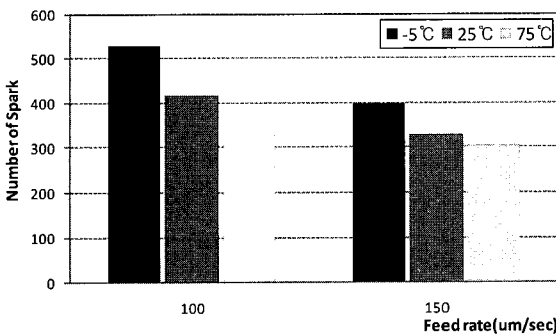


Fig. 13 Number of sparks during dry EDM milling process according to input air temperature and feed rate

록 방전 스파크 횟수가 증가된다. 그리고, Fig. 12 와 13 을 비교할 때 방전 스파크 횟수가 많을수록 건성 방전 밀링 가공 슬롯의 표면거칠기가 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 데스크톱 형조 건성 방전가공기의 제작과 가공조건 및 절연기체 온도에 따른 방전 밀링 가공 성능분석에 관한 연구를 수행하였다.

데스크톱 형조 건성 방전가공기는 3 자유도 수평형 외형을 기반으로 제작되었고 전체 크기가 300x200x260mm 이다. 또한, 압전소자 선형 슬라이드와 스크류 선형 슬라이드를 장착하여 각각 공구 전극 및 가공소재의 이송운동을 구현하였으며, 압전소자 선형 슬라이드를 통해 미소 방전간극의 신속한 운동제어를 가능하게 하였다.

제작된 데스크톱 형조 건성 방전가공기의 성능을 평가하기 위해 방전개로전압, 횡방향 이송속도 및 공구전극 이동변위의 3 가지 가공변수를 고려한 방전 밀링 가공 실험을 수행하였다. 가공소재로서 황동과 철을 사용한 실험을 통해 횡방향 이송속도가 느리고(75µm/sec) 공구전극의 이동변위가 큰 경우(50µm), 방전 밀링 가공 슬롯의 표면거칠기가 우수함을 확인하였으며, 이 때 방전스�파크의 횟수도 더 많음을 확인하였다.

또한, 방전영역에 가해지는 절연공기의 온도가 방전 밀링 가공 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 절연공기를 각각 냉각 (-5°C), 상온 (25°C), 가열 (75°C)의 3 가지 상태로 나누어 방전영역에 공급하였고, 이에 따른 방전 밀링 가공 슬롯의 표면거칠

기 및 방전스파크 횟수를 측정하였으며, 절연공기의 온도가 낮을수록 표면거칠기가 향상되고 방전 스파크의 횟수도 증가됨을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 2006 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2006- 331-D00038).

참고문헌

1. Kunieda, M. and Yoshida, M., "Electrical Discharge Machining in Gas," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp. 143-146, 1997.
2. Kunieda, M., Miyoshi, Y., Takaya, T., Nakajima, N., Zhanbo, Y. and Yoshida, M., "High Speed 3D Milling by Dry EDM," Annals of the CIRP, Vol. 52, No. 1, pp. 147-150, 2003.
3. Zhanbo, Y. U., Takahashi, J., Nakajima, N., Sano, S., Karato, K. and Kunieda, M., "Feasibility of 3-D Surface Machining by Dry EDM," International Journal of Electrical Machining, Vol. 10, pp. 15-20, 2005.
4. Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Deng, J. X., Qin, Y. and Niu, Z. W., "Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, No. 1-3, pp. 135-138, 2002.
5. Tao, J., Shih, A. J. and Ni, J., "Experimental Study of the Dry and Near-Dry Electrical Discharge Milling Processes," Trans. of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, No. 1, Paper No. 011002, 2008.
6. Lee, S. W., Mayor, R. and Ni, J., "Dynamic Analysis of a Mesoscale Machine Tool," Trans. of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, No. 1, pp. 194-203, 2006.
7. Shinno, H. and Ito, Y., "Computer Aided Concept Design for Structural Configuration of Machine Tools: Variant Design using Directed Graph," Trans. of ASME Journals of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 109, pp. 372-376, 1987.