韓國精密工學會 2002年度 春季學術大會論文集 pp.624~627 KSPE 02S209

형상 엔드밀 공구를 이용한 LED금형의 방전전극 가공에 관한 연구

김형찬*(전북대학교 대학원), 이희관(전북대학교 TIC), 황금종(전북대학교 대학원),
공영식(전북지방중소기업청), 양균의(전북대학교)

A Study on Machining Electrode for LED Mold with Shaped End-Mill

Hyung-Chan Kim*, Hi-Koan Lee, Jing-Chung Huang, Young-Sik Kong, and Gyun-Eui Yang

ABSTRACT

A study on machining electrode for LED(Light Emitted Diode) mold with shaped end-mill is presented. The electrode machining by shaped end-mill has been used for maximizing the productivity in manufacture of semiconductor mold. However, it has not been researched systematically for many difficulties such as the making of shaped end-mill, generation of tool path due to distinctive tool geometry, and so on.

Tool path is generated on the shaped end-mill geometry and cutting force to provide accurate and efficient machining of electrode. The verification program can drive enhancement of productivity, selecting cutting conditions from experiment function of cutting force. Also, compensation of tooling and maching error can make the electrode accurate by modifying tool path. Therefore, the research on machining with shaped end-mill can contribute to enhancement of accuracy and productivity in building semiconductor mold.

Key Words : Electrode (방전전극), Shaped end-mill (형상 엔드밀), Tool path (가공경로), Cutting condition (절삭조건), Productivity (생산성)

1. 서론

고속가공(High Speed Machining)은 일반적으로 주축의 고속회전속도, 고속이송속도, 공작기계의 큰 동력 등을 이용하여 기존의 가공보다 더 높은 소재 제거율을 얻을 수 있는 가공방식이라 할 수 있다.[1),(2)] 고속가공기술은 저경도 재료에 대해서는 폭넓게 적용되고 있지만 고경도 재료의 고속가공기술에는 해결해야 할 문제들이 많이 남아 있는 실정이다.

이러한 고경도 재료의 고속가공의 대체 가공방식으로 전기적인 스파크 방전을 이용한 방전가공(Electrical-Discharge Machining)을 들 수 있다.[3),(4)] 방전가공은 고속가공에 비해 생산성이 낮고, 고속가공기술의 발달로 인해 비중이 감소되고 있지만 고경도 재료의 금형, 고정밀 반도체 금형 등의 정밀가공 분야에서 아직도 상당한 비중을 차지하고 있으며 꾸준히 기술개발을 시도하고 있다.[5]

방전가공에서 절삭공구의 역할을 하는 방전전극의 정밀도는 방전조건과 함께 중요하다. 따라서, 전극 가공이 중요하며 제작시간을 단축하기 위해서는 고속가공이 필요하다. 전극의 정밀도는 재료의 성분에 영향을 받기도 하지만 그것을 가공하는 공구의 정밀도가 상당한 영향을 미친다.[4),(6)] 또한, 한번 가공으로 최종형상을 완성할 수 있는 절삭공구를 사용하여 고속가공하면 고효율 가공이 가능하지만, 상업적 범용성 등의 한계 때문에 특수공구에 대한 연구는 거의 보고되고 있지 않는 실정이다.

본 논문에서는 제품의 최종형상을 단시간내 가공하도록 제작한 특수공구를 형상 엔드밀 공구라고 하였으며, 형상 엔드밀의 가공경로에 대한 연구를 수행하고자 한다. 또한, 고속가공의 적용과 형상공구에 의한 가공물(흑연, graphite)의 절삭에 대해 가공시 발생하는 절삭력 실험식을 이용하여 프로그램을 제작, 툴링 및 가공오차를 고려하여 가공경로를 수정함으로써 LED 방전전극의 가공공정에 있어서 정밀도 및 생산성을 향상시키는 방안에 대해 제시하고자 한다.

2. 형상 엔드밀 공구

2.1 형상 엔드밀 공구의 제작

형상 엔드밀은 공구의 크기 및 형상에 제한이 있어 소형 가공물, 절삭량이 적은 곳, 그리고 단순·정밀한 형상의 가공 등에 주로 사용되며 표면조도 및 형상의 정밀도를 높일 수 있다. 또한, 반복가공시 동일한 치수의 제품을 얻을 수 있어 생산성을 크게 향상시킬 수 있다. Fig. 1은 본 논문에 사용되어진 비대칭 절삭날을 가진 형상 엔드밀의 단면형상을 보여주고 있으며 가공물의 최종형상은 Fig. 9와 같다. 절삭형태는 밀링공구와 같이 중심축을 주축으로 회전하면서 공구의 선단(tip)이 CL(Cutter Location) 점이다. 절삭날 중 반경(R) 값을 가진 절삭날은 전극 상단부의 형상을 가공하며 R을 가진 원호절삭날이라 전극의 하단부를 생성하는 절삭날을 직선절삭날이라 정의하였다.

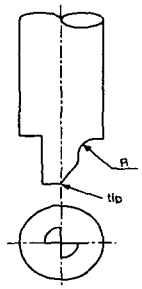


Fig. 1 Shaped end-mill for electrode

2.2 가공경로 생성

형상 엔드밀은 절삭시 두개의 절삭날 중 어느 것이 먼저 가공물을 절삭하더라도 최종형상은 같게 되며 공구의 선단이 이동하는 경로는 Fig. 2와 같다.

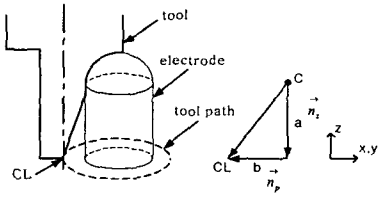


Fig. 2 Strategy of tool path

전극의 중요한 부분은 반구부위이므로 형상 엔드밀에 대한 CL 데이터를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$CL = C + a\overrightarrow{n_z} + b\overrightarrow{n_p} \tag{1}$$

여기서, C는 R을 가진 원호절삭날의 반경 중심점, $\overrightarrow{n_z}$는 C점에서의 Z축 단위벡터, 그리고 $\overrightarrow{n_p}$는 단위벡터이이며 a, b는 전극의 높이와 직경에 관한 치수이다.

3. 형상 엔드밀 공구의 가공경로

3.1 절삭력 및 파괴강도 계산

전극은 인장강도보다 전단강도가 작으며 취성이 강한 세라믹재료이며 지름이 매우 작다. 이것은 가공시 가공면의 미세한 균열과 충격에 매우 약하다는 것을 나타내며 절삭공구의 정밀도, 가공기계, 재료의 치밀도(density) 등에 상당한 영향을 받는다. 또한, 가공시 전극에 Fig. 3과 같이 굽힘 모멘트와 비틀림 모멘트가 동시에 작용하고 있다고 생각할 수 있으며 피로가 누적된 전극의 하단부에서 파단이 발생한다. 절삭면적(A)은 Fig. 4에서 A_2와A_3의 합이며 공구가 절삭할 때의 단면치수를 보여준다.

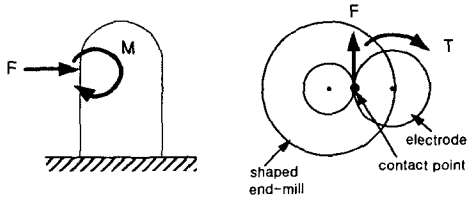


Fig. 3 Cutting force and moment

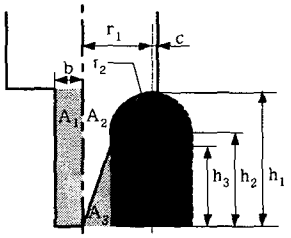


Fig. 4 Section of electrode

세라믹 재료인 흑연은 취성재료이므로 최대 주응력설을 이용하여 전극 하단부의 파단을 일으키는 임계절삭력(F_c)을 구할 수 있다. 아래의 식 (2)은 최대 주응력설에 의한 상당굽힘응력(σ_e)이며 이를 이용하여 임계절삭력을 구한다.

$$\sigma_e = \frac{1}{2}(\sigma + \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}) = Y \tag{2}$$

여기서, Y는 허용인장응력, σ 는 굽힘응력이며 τ 는 비틀림에 의한 전단응력이다. 위의 제시된 식들을 이용하기 위해서는 허용인장응력을 구해야 하지만, 시험방법 및 여러 가지 요인으로 인해 정확한 값을 구하지 못하여 공구동력계(KISTLER 9257A)로

실제 절삭력을 측정하였다. 측정시 가공조건은 형상 엔드밀(R 0.73mm)로 3,500rpm으로 놓고 이송속도를 10mm/min씩 증가시켰다. Fig. 5는 위와 같은 조건으로 전극 60개를 가공하여 이송속도에 따른 절삭력을 평균하여 그래프로 나타낸 것이다. 이송속도가 증가할수록 절삭력이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 전극의 파단은 60mm/min에서 발생하였고 임계 절삭력은 4.6066kg이다.

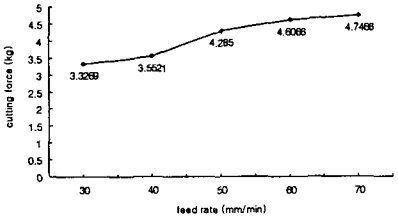


Fig. 5 Cutting force and feed rate (3,500rpm)

동일한 공구를 사용하여 회전속도를 6,600rpm으로 가공한 결과 30mm/min에서 임계절삭력이 발생하였다. 위의 두 가지 실험결과를 보면 공구의 회전속도가 높으면 절삭력이 증가하는 것을 알 수 있다.

공구 회전속도와 절삭면적이 일정한 경우 Fig 8에서 절삭력과 이송의 함수관계를 보면 근사 1차임을 알 수 있다. 따라서, 가장 적합한 근사함수(E)를 구하기 위해 최소자승법(least square method)을 이용하였으며 식 (3)과 같다.

$$E = \sum_{i=1}^{n} [F_i - (af_i + b)]^2 \qquad (3)$$

여기서, F는 절삭력, f는 이송속도, a와 b는 함수의 계수들이며 이 함수가 최소값을 갖기 위해서는 a와 b에 대한 각각의 편도함수가 0이 되어야 한다.

Fig. 6은 Fig. 5의 데이터를 이용하여 최적의 근사함수를 구한 후 그래프로 비교한 것으로 근사곡선과 실험데이터가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 근사함수에 의한 절삭력을 예측하여 적정 절삭조건을 선정할 수 있다.

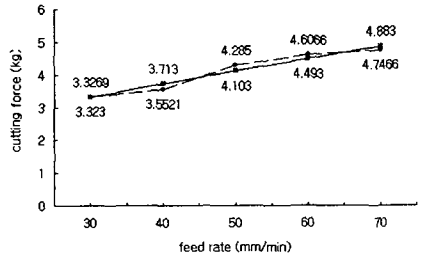


Fig. 6 Comparison of experimental cutting force and linear cutting force

3.2 절삭조건 선정

전극을 안전하게 가공하기 위해 본 논문에서는 1회 가공과 단계가공하는 방법을 이용하였다.

1회 가공시 전극의 지름이 크면 공구의 이송 및 회전속도에 대한 영향을 받지 않지만, 매우 작을 경우에는 무시할 수 없게 되므로 이송속도를 조절하여 가공한다. 단계가공은 절삭깊이를 여러 번 나누어 가공하는 방법으로서 절삭력이 임계값 이상일 경우와 가공시간 단축을 위해 적용할 수 있다. offset량은 XY평면상에서 전극의 반경방향으로 주었다.

위의 두 가지 방법은 가공기계, 공구의 정밀도, 가공재료, 작업자의 Z축 보정 등의 오차요인들을 고려해야 하며 가공시 접근과 후퇴시 가공경로가 접선연속을 유지해야 한다.

Fig. 7은 절삭력 예측에 대한 방법을 적용한 프로그램의 flow chart를 나타낸 것이다.

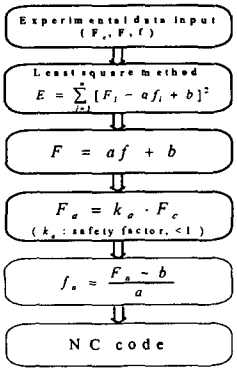
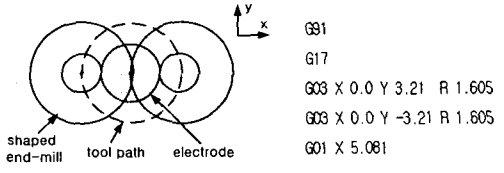


Fig. 7 Process of program

3.3 방전전극 제작

3.3.1 가공

실험에 사용된 가공기계는 3축 수직 밀링 머시닝센터(Hwacheon co., SIRIUS-2)이며 가공물은 구리를 용침(infiltration)시켜 제조한 흑연(EDM-C3, POCO.com)을 사용하였다. 공구는 형상 엔드밀(R 0.73mm)을 사용하였다. Fig. 8(a)는 공구경로이며 (b)는 작성된 NC 데이터를 보여준다. Fig. 9는 패턴가공한 정삭용 전극(Φ 1.42mm)들을 보여주고 있다.



(a) CL data (b) NC code

Fig. 8 CL data and NC code of shaped end-mill (R 0.73mm)

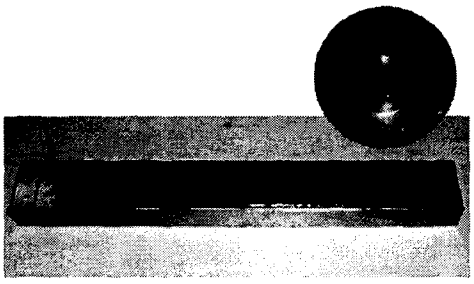


Fig. 9 Machined electrode

또한, 앞 절에서 언급된 두 가지 가공방법을 비교하기 위해 실제 형상 엔드밀(R 0.73mm)을 이용하여 3,500rpm으로 각각 전극 60개를 가공하였다.

그 결과, 이송속도를 50mm/min으로 1회 가공한 시간보다 프로그램에서 2회로 단계가공한 시간에서 12.3초 단축되었으며 표면조도 역시 좋게 나타났다. 또한, 동일한 공구로 6,600rpm에서 가공한 결과 1회 가공시 30mm/min에서 파단되었지만 단계가공에서는 파단되지 않았다. 따라서, 가공시간의 차이는 작지만 수(數)천 개의 전극을 대량생산할 경우에는 상당한 시간단축을 얻을 수 있다.

3.3.2 가공 검사 및 수정

가공된 최종형상은 오차를 가지는 경우가 있고 이러한 오차를 줄이기 위해서 검증 및 수정 단계를 거친다. Table 1은 형상 엔드밀(R 1.75mm)로 가공한 정삭용 전극(ϕ 3.48mm)에 대한 측정 결과이다.

Table 1 Electrode diameter by micrometer and profile projector (unit : mm)

diameter / electrode	DM	DP
1	3.470	3.469
2	3.472	3.468
3	3.470	3.474
4	3.472	3.476
5	3.470	3.469
6	3.470	3.477
7	3.470	3.467
8	3.470	3.477
9	3.475	3.477
10	3.475	3.477
average (A_v)	3.471	3.473
machining error (E_m)	0.009	0.007

note) DM : Diameter measured by micrometer
DP : Diameter measured by profile projector

평균오차는 공구의 정밀도, 가공기계의 반복정밀도, 툴링의 오차 등 여러 가지 요인에 기인하는데 이것은 가공경로 생성시 가공오차의 평균값을 반영하여 보정함으로서 전극의 정밀도를 향상시킬 수 있으며 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_t = \frac{\phi_d + E_m}{2} \quad (4)$$

여기서, R_t는 원호 보간에 사용되는 보정된 원호 반경값, ϕ_d는 설계시 전극의 지름이며, E_m은 가공된 전극 지름의 평균오차이다.

4. 결론

본 논문에서는 형상 엔드밀을 고속가공에 이용함으로서 LED금형 전극의 가공정밀도를 유지하고 생산성을 향상시키는 고정밀·고효율 가공을 위해 다음과 같이 연구하였다.

1. 생산성을 향상시키기 위해 절삭력을 이용한 실험식 기반의 프로그램을 통해 회전속도, 절삭깊이, 이송 등의 적정한 절삭조건을 선정하여 전극의 파단 회피와 가공속도를 향상시켰다.
2. 정밀도 향상을 위해 가공 후 정밀도 검사를 수행하여 고속가공시 발생하는 툴링 오차 등에 대한 보정을 가공경로에 포함하여 고정밀가공을 수행함으로서, 형상 엔드밀을 이용한 LED금형 전극의 고속·고효율 가공에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. H. Schulz, T. Moriwaki, "High Speed Machining", Annals of the CIRP, Vol. 41/1, pp. 637-644, 1992.
2. 강재훈, "환경성과 경제성을 고려한 고속가공기술 현황", 2001한국정밀공학회지 공작기계 및 가공기술 세미나, pp. 49-62, 2001.
3. M. Nakamura, "EDM of Ceramics", Journal of the JSPE, Vol. 57, pp. 959-962, 1991.
4. 우정윤, 왕덕현, 윤존도, " 펄스지속시간에 따른 형상방전가공 특성", 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 827-831, 1997.
5. Masanori Kunieda, "Challenges in EDM Technology", Journal of the JSPE, Vol. 33, pp. 276-282, 1999.
6. 유제구, "방전가공", 대광서림, 1988.
7. 이재우, "세라믹 및 초경합금 성형체의 피절삭성", 대한기계학회논문집, 제 21권, 제 9호, pp. 1520-1530, 1997.
8. 고기훈, 서정철, 최병규, "2차원 윤곽가공에서 이송률 자동 조정", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제 5권, 제 2호, pp. 175-183, 2000.
9. 박세형, "볼앤드밀을 이용한 3차원 CNC 가공의 시뮬레이션", 박사학위논문, KIST, 1990.
10. Y. Altintas, A. Spence, "End Milling Force Algorithms for CAD Systems", Annals of the CIRP, Vol. 40/1, pp. 31-34, 1991.