

방전가공시 측면 플러싱 장치를 활용한 가공성 향상

맹희영*, 박 근⁺, 신승환⁺⁺

(논문접수일 2005. 8. 5, 심사완료일 2005. 12. 9)

Improvements of Electro Discharge Machining Process using Side Flushing Devices

Hee-young Maeng*, Keun Park⁺, Seung-hwan Shin⁺⁺

Abstract

The present works concerns a side flushing device for the improvement of the conventional Electric-Discharge Machining(EDM) process. In the EDM process, chips are usually generated as the workpiece is removed, and deposited between the electrode and the workpiece. This sediment degrades the surface finish of the machined product as well as the processing efficiency. In the present study, a flushing device with additional side injection equipments is proposed in order to remove the deposited chips effectively. Through numerical simulations, the validity of the proposed device is verified, and the influence of process parameters is investigated. Experiments have been also carried out in the die sinking EDM process. It was observed that the process efficiency and the surface finish are improved by virtue of the proposed flushing device.

Key Words : EDM(방전가공), Side flushing devices(측면 플러싱 장치), Flow analysis(유동해석), EDM characteristics(방전 특성), Gap size(간극 크기)

1. 서론

방전가공은 금형산업에서 필수적인 가공법으로 금형제작의 전체 가공시간에서 약 60~70%를 차지하고 있다.

방전가공의 가장 우수한 장점은 재료의 경도에 관계없이 복잡한 가공물 표면을 높은 형상정밀도로 가공할 수 있는

점이다. 그렇지만 방전가공은 미세한 방전에 의하여 재료를 제거하는 방식이기 때문에 다른 기계가공방식에 비하여 가공시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 전극과 피가공물 사이에 가공칩, 가공액의 열분해에 의해 생성되는 탄소가스 등 많은 가공생성물이 발생하므로 방전능률을 높이는 데에 한계가 있다⁽¹⁾.

* 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (maeng@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172번지

+ 서울산업대학교 기계설계자동화공학부

++ (주)경동보일러

방전가공이 진행되는 동안 전극과 피가공물 사이의 생성물은 전극의 운동에 의한 가공액의 유동에 따라 적당한 밀도로 존재할 경우에는 방전에 도움을 줄 수 있지만, 필요이상 과잉으로 존재하게 되면 가공속도 및 표면거칠기를 저하시키는 주된 원인이 된다.

그 때문에 칩 배출기구는 방전능률과 균일한 다듬질 면에 영향을 미치는 가장 중요한 비전기적 인자이다. 특히 가공생성물이 배출되기 어려운 깊은 홈이나 전극면적이 넓은 경우에는 가공효율이 극히 저하하게 되어 오래 전부터 강제적으로 칩을 제거하는 배출기구, 즉 플러싱 장치(*flushing devices*)를 사용하는 시도가 있었다^(2,3).

지금까지 응용되고 있는 대표적인 플러싱 방법으로는 분출법, 흡인법, 분사법이 있지만, 방전가공의 종류나 전극의 형상에 따라 단점이 나타나고 있어 실용상 큰 효과를 나타내고 있지 못하다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 보다 효율적으로 극복하기 위하여 새로운 유형의 칩 배출장치로서 측면 플러싱 장치(*side flushing devices*)를 고안하였다⁽⁴⁾.

본 장치는 공작물의 상면에 덮개를 씌우고 덮개 내부에 전극이 경계 면을 가공하면서 들어가는 기구이다. 그렇게 함으로써 전극의 한쪽 면은 덮개관의 내부에, 다른 면은 외부에 위치하게 되어 안에서 밖으로 가공액이 유동하고 이 흐름을 따라 칩이 효과적으로 배출되도록 제작하였으며, 추가 가공이나 장비가 필요 없이 경제적으로 활용될 수 있는 장점이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 방전특성과 관련하여 가공액의 유동해석을 통해 측면 플러싱 장치의 특성 메카니즘을 실증적으로 검증하고자 하였다. 방전 갭에서 발생하는 유동기구를 유한요소법을 통해 해석하였으며, 그 결과를 실험적으로 검토하는 과정을 통해 전극과 피가공물 사이에 쌓이게 되는 칩을 보다 효과적으로 배출시킬 수 있는 방안을 도출하고자 하였다.

2. 측면 플러싱 장치의 원리

방전가공시 가공성능(가공속도, 표면 거칠기, 전극 소모율 등)과 밀접한 관련이 있는 대표적인 파라미터는 피크 전류치(I_p), 펄스온타입(τ_p), 휴지시간(τ_r) 등과 같은 전기적 요소가 있으며, 비전기적인 요소로서는 가공액의 유동상태, 서보기구의 응답성, 가공액의 순도 등을 들 수 있다.

방전 가공액은 방전 후 생성되는 가공칩을 빠르게 냉각시켜 고체로 만들므로써 전극 측에 부착되는 것을 방지하고, 또한 가공칩의 이동을 쉽게 하여 연속방전의 안정성을 증진시켜 준다. 또 가공액은 주로 휴지시간 사이에 비산된 분해

가스, 가공칩, 타르 등을 극간 밖으로 배출하여 극간의 잔류이온을 신속하게 소결시켜 절연의 회복을 빠르게 한다.

특히 형조방전가공(*die-sinking EDM*)에서 가공면적이 커지면 균일한 분사가 어려워지며 분사가 약한 곳에서는 칩이 쌓이게 되므로 집중방전을 일으키기 쉽다.

그 때문에 전극 면적이 넓은 경우에는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 자동점프제어(AJC, *auto jumping control*) 기능을 사용함으로써 원활하지 못한 칩의 배출을 보완하기도 한다.

그러나 분사 중 잔류하고 있는 칩이 많거나 홈이 깊은 경우에는 AJC 기능으로도 가공칩의 배출이 불가능하여 방전속도가 저하되고 방전 집중이 발생하여 가공 정밀도를 해치게 된다. 또 전극의 하강 시 분사되는 가공액은 전극이나 공작물면에 간섭되어 내부의 극간에 제대로 전달되지 못한다.

이를 극복하고자 본 연구에서는 Fig. 2 (a)에서 보이는 바와 같이 연속적인 테두리를 갖는 하부관과 그 둘레를 따라 내부공간이 형성된 상부관으로 밀폐된 공간을 형성시키고 이 공간에 분사노즐을 통해 강제로 가공액을 공급시키는 측면 플러싱 장치를 고안하였다. 이 장치는 Fig. 2 (b)에서 보이는 바와 같이 도전 접촉제를 사용하여 공작물의 가공부위에 부착시키며, Fig. 2 (c)에서 보이는 바와 같이 가장자리를 전극이 방전가공을 수행하면서 파먹어 들어가게 하는 원리이다. 그렇게 되면 측면 플러싱 장치의 일부가 절단되면서 밀폐 공간이 전극 사이의 작은 갭으로 외부로 개방됨과 동시에, 분사노즐을 통해 강제 유입되는 가공액이 밀폐 공간을 거쳐 전극과 공작물사이에 형성된 미세한 간극을 밀어내면서 바깥쪽으로 분출되게 된다.

이 장치를 사용하게 되면 방전시간에 상관없이 내부공간의 압력을 일정하게 유지할 수 있고, 가공면적이 넓은 경우

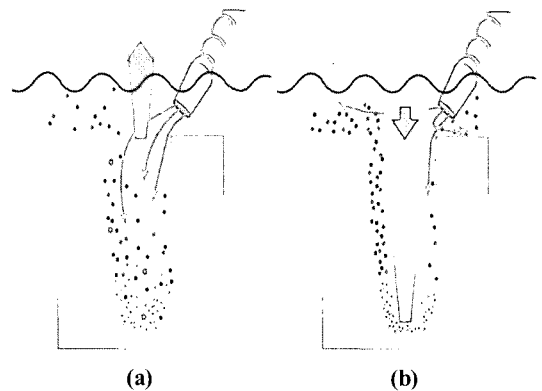


Fig. 1 Open flushing method by auto jumping control

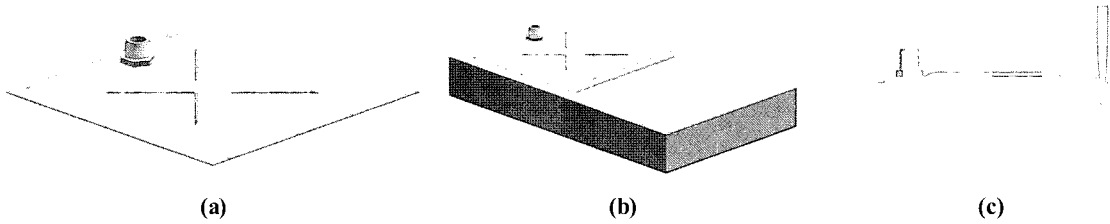


Fig. 2 Side flushing devices attached before on workpiece

나 깊은 홈 또는 슬릿이 가공되는 경우에도 극간에 잔류하고 있는 가공칩을 효과적으로 배출할 수 있다.

3. 가공액의 유동해석

3.1 유체에 대한 가정과 경계조건

본 연구에서 사용된 가공액은 Newtonian 유체의 비압축성으로 가정하였으며⁽⁵⁾, 가공중 방전이 이루어질 때의 상태 변화는 무시했다. 유동 해석과 열 해석을 동시에 수행하기 위해 ANSYS의 CFD모듈인 FLOTTRAN^(6,7)을 사용하여 2차원 모델로 단순화하여 연성해석을 수행하였다.

본 유동해석은 입구에서 층류를 형성하여 아래 부분으로 유체가 들어오면서 흐름이 급격하게 변화하게 되어 난류를 형성(Reynolds수가 4000이 넘음)하게 되므로, 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

이때 Navier-Stokes 방정식의 미지수 개수를 방정식의 수에 맞추어 줄여야하는 난류 완결문제(closure problem)가 발생하게 되어, 이를 해결하기 위하여 난류 와점성 모델(turbulent eddy viscosity model)을 사용하였다.

한편 고체벽(rigid impermeable walls)에 대한 경계조건

으로는 $v_{wall} = 0$ 인 경우(벽면 근처에서의 속도기울기가 급격해지고 벽면 전단력이 증가하는 특성)를 고려한 White와 Launder and Spalding의 “Log-Law of the Wall” 벽함수(wall function) 방정식을 사용하였다^(5,7).

3.2 측면 플라싱장치의 모델링

방전가공의 기본 모델로서 Fig. 3 (a)에서 보이는 바와 같이, 기름 등의 가공액으로 채워진 5~50 μ m정도의 극간에 공구전극과 피가공물 간에 아크방전을 발생시키고, 매초 수 1,000~수 10,000회의 방전이 발생하여 하나의 펄스로 절연 파괴가 생기는 장소에서 방전전류가 집중되어 아크기둥을 형성하며, 그 즉시 전류밀도가 높은 전자가 흘러 피가공체의 한 점을 때리는 원리를 적용하였다.

Fig. 3 (b)에서 보이는 바와 같이 방전 갭 사이의 아크기둥의 온도가 6,000~7,000K에 달하고 금속의 녹은 부분은 가공액과 닿아서 다시 응고하여 작은 구슬모양으로 비산하여 가공액과 함께 극간에서 배출되는 것으로 하였다⁽⁸⁾.

이때 난류 열·유동 해석은 ANSYS의 FLOTTRAN을 사용하였는데, 본 연구에서는 가공칩은 극간이라는 유로를 통과해서 배출구로 빠져나가는 가공액의 흐름과 같다고 가정하

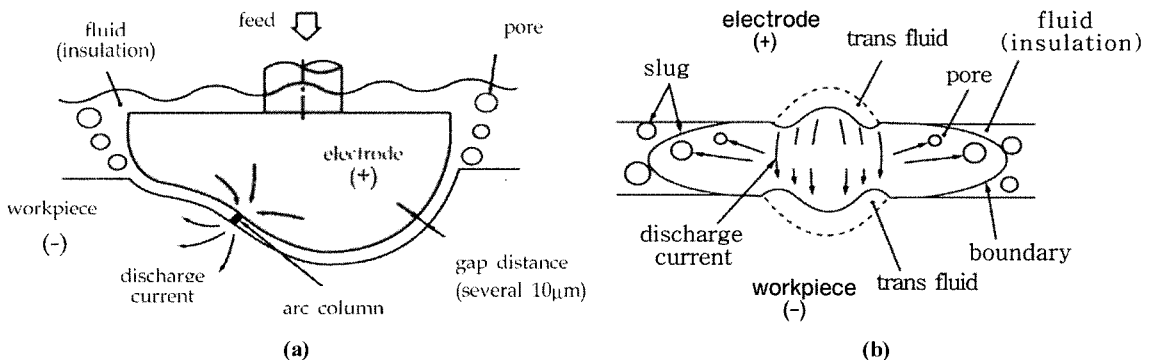


Fig. 3 The concept of EDM and pillar of an arc

였다. 해석을 통해서 전극과 피가공물의 고온사이를 흐르는 가공액의 속도를 구한 후 실험 데이터와 비교하여 상호연관성을 분석하였다.

Fig. 4는 피가공물에 측면 플러싱장치를 부착한 후 전극을 이용하여 가공이 이루어지고 있는 가공깊이가 $Z = -5\text{mm}$ 일 때 입구 쪽으로 유입된 가공액이 극간을 거쳐 출구로 빠져나가는 흐름을 보여준다.

이때 Fig. 5는 입구에서 출구까지의 가공액의 경로를 유한요소모델로 나타낸 것으로 하부판과 상부판이 수직으로 놓여진 박스형의 밀폐구조로 모델링한 것이다.

그리고 Fig. 6은 벽면에서의 no slip condition을 사용한 FEA 모델의 경계조건을 나타낸 것으로, 펄스온타임(τ_p)과 휴지시간(τ_r) 등의 방전조건에 따라 극간에서 변화되는 온도분포를 해석하기 위한 것이다.

전극과 피가공물의 표면온도는 Xia의 유한차분법⁽³⁾을 이용한 비정상 열전도해석법으로 평균온도를 구하였으며, 또한 전극과 피가공물 표면은 극간에서 방전유가 흐르는 단면의 폭과 동일하게 모델링하였다. 해석에 사용된 물성치는

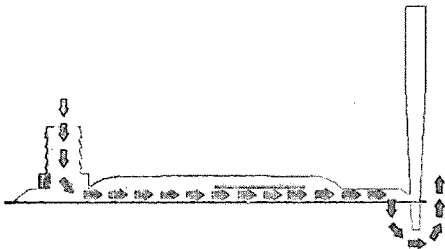


Fig. 4 The path of EDM oil

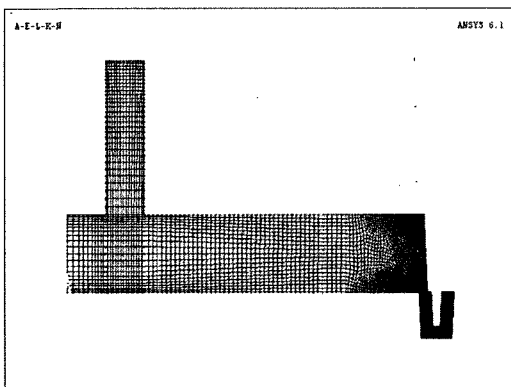


Fig. 5 Finite element modeling

Table 1 및 Table 2와 같으며, 가공액은 (주)KHS의 vitol-2를 사용하였고, 전극은 99.9% 순동으로 하였으며, 피가공물은 용접구조용 압연 강재인 SM45C로 하였다. 한편 ANSYS FLOTRAN에 입력된 solution algorithm은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

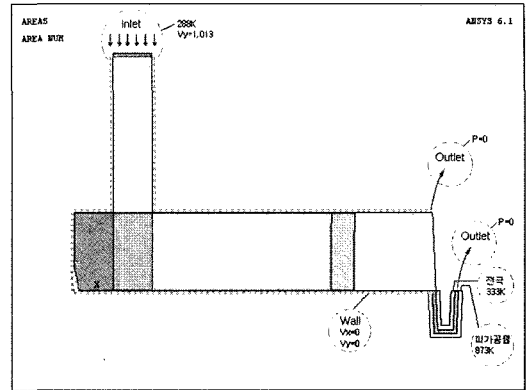


Fig. 6 Boundary conditions

Table 1 Material properties of fluid

Material Properties	EDM OIL(MAT1)
Density [kg/mm^3]	0.76
Viscosity [mm^2/s]	1.881
Thermal conductivity [$\text{W}/\text{mm}\cdot\text{C}$]	1.53328×10^{-4}
Specific heat [$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{kg}\cdot\text{C}$]	1,994,099

Table 2 Material properties of non-fluid

Material Properties	Workpiece (MAT2)	Electrode (MAT3)
C	485,742	385,000
DENS	7.861×10^{-6}	8.9×10^{-6}
KXX	0.0498	0.393

Table 3 Solution algorithm

FLOW	Solves the momentum and pressure equations
TURB	Activates the turbulence model
TEMP	Solves the temperature equation
COMP	Uses the compressible algorithm
TRAN	Activates the transient solution algorithm

3.3 유동해석 결과 및 고찰

3.3.1 속도분포

본 해석은 가공깊이를 -5mm씩 가산하여 가공액의 흐름을 해석하였다. Inlet에서 유입된 유체는 측면 플러싱 장치의 하부판에 부딪히고 일정한 높이의 내부공간을 거쳐 두 개의 출구를 통해 유출되는데, 처음에는 전극과 방전이 이루어지는 상부판으로 빠져나간 다음 극간 사이를 통과한다.

Fig. 7은 X-Y단면에서 각 깊이마다의 분사되고 있는 가공액의 속도분포이다. 방전시간이 깊어질수록 상부판에서의 속도가 상승함에 따라 극간에서는 점점 하강하였다. 즉 가공

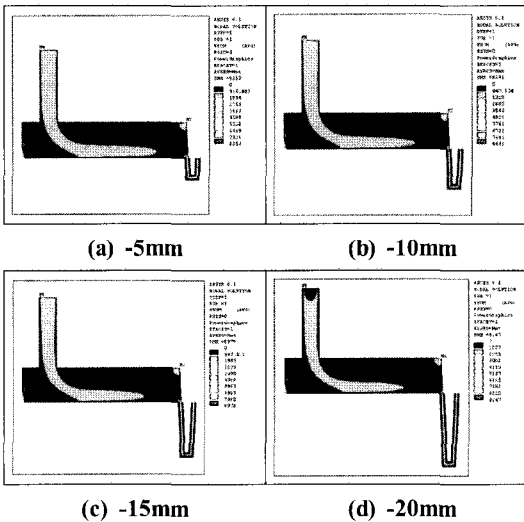


Fig. 7 Velocity distribution of processing depth

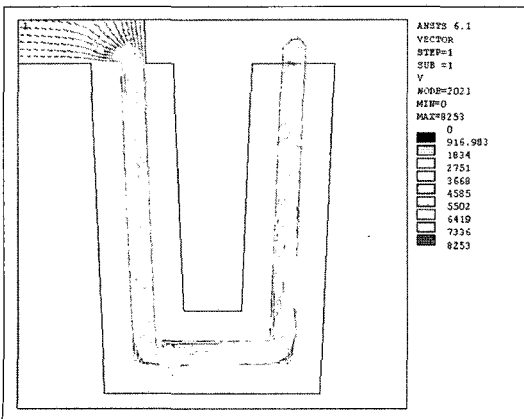


Fig. 8 Velocity profile in the discharge gap

깊이가 깊어질수록 가공액에 의해서 배출되는 가공생성물의 양도 비례하여 작아짐을 알 수가 있다.

Fig. 8~9는 두 출구에서의 속도분포를 벡터로 본 것이며, 상부판의 출구에서 유속의 최대점이 발생하였다. 극간의 입구에서 출구까지 층류와 난류상태를 반복하는 간헐유동(intermittent flow)이며, 교란이 증감하고 있다. 그리고 분사입구를 기준으로 전극과 마주보고 있는 방향을 안쪽으로 했을 때 피가공물 표면에 흐르는 유속을 바깥쪽과 비교한 결과, 전극의 바깥쪽 갭이 안쪽보다 다소 크게 나타나는데, 이는 연속방전이 보다 안정적으로 일어난다는 것으로 고찰할 수 있다.

또한 가공깊이에 따른 극간에서의 유속을 비교한 결과에 따르면, 가공깊이가 깊어질수록 극간을 흐르는 유속이 조금씩 느려지므로 처음 -5mm보다는 -20mm로 갈수록 방전시간도 길어지겠지만, 유속의 감소하는 기울기가 완만한 것으로 보아 방전시간에 있어서 큰 차이는 없는 것으로 나타나고 있다.

3.3.2 출구속도 프로파일

Fig. 10에는 각 깊이에서의 출구속도 프로파일을 나타내었다. X축은 극간의 거리를 나타내고 있으며, 판의 중심에서 가장 빠른 유속을 가지고 벽면으로 갈수록 유속은 점점 줄어들게 되고 벽면에서의 속도는 0이 되고 있어서 관내 유동해석이 비교적 안정적으로 해석되고 있음을 보여준다.

3.3.3 온도분포

외부 열원에 의해 열이 고체를 통해 전달되고 내부에는 일정 온도를 가진 유체가 흐르고 있는데, 먼저 Fig. 11과 같

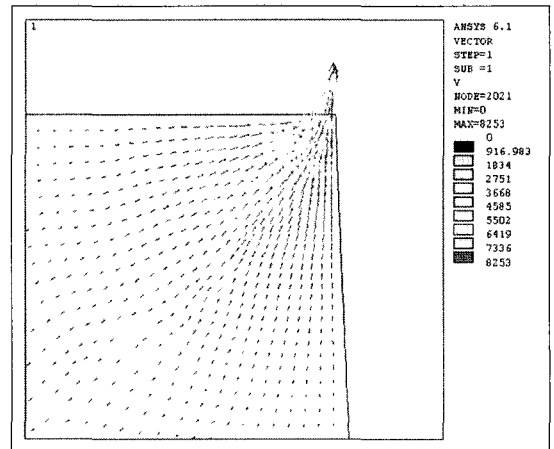


Fig. 9 Velocity profile in the upper part of the Side Flushing Devices

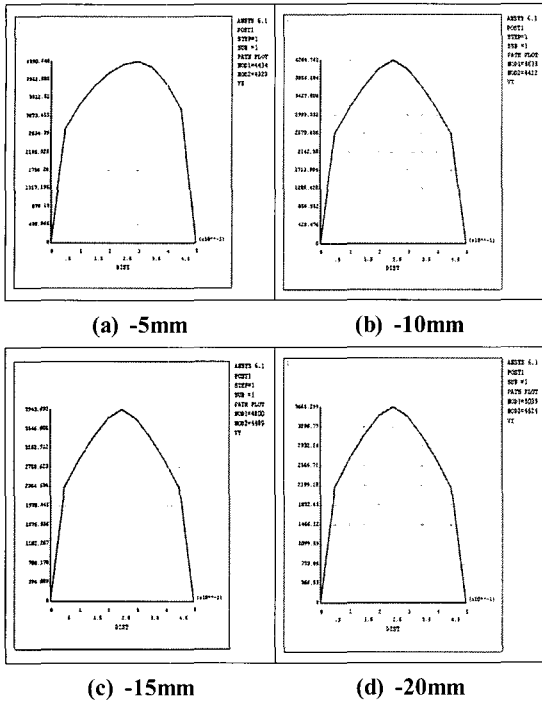


Fig. 10 Path plot of the outlet velocity of processing depth

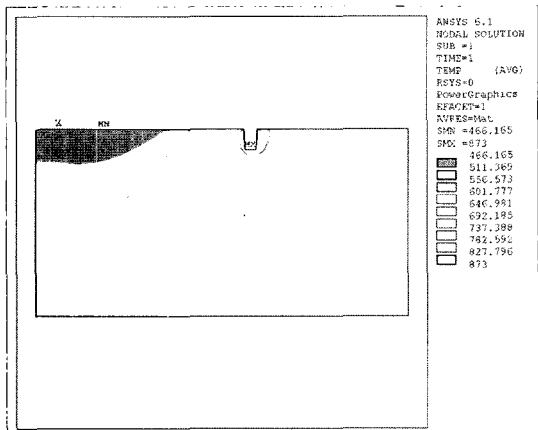


Fig. 11 Temperature analysis results in the workpiece

이 피가공물의 대류 열전달해석을 통하여 온도분포를 구한 후 FLOTTRAN에서 thermal 경계조건을 적용하여 유동과 열의 연성해석을 수행하였다.

Fig. 12는 2개 출구에 대해 방전가공동안 극간에 대한 평

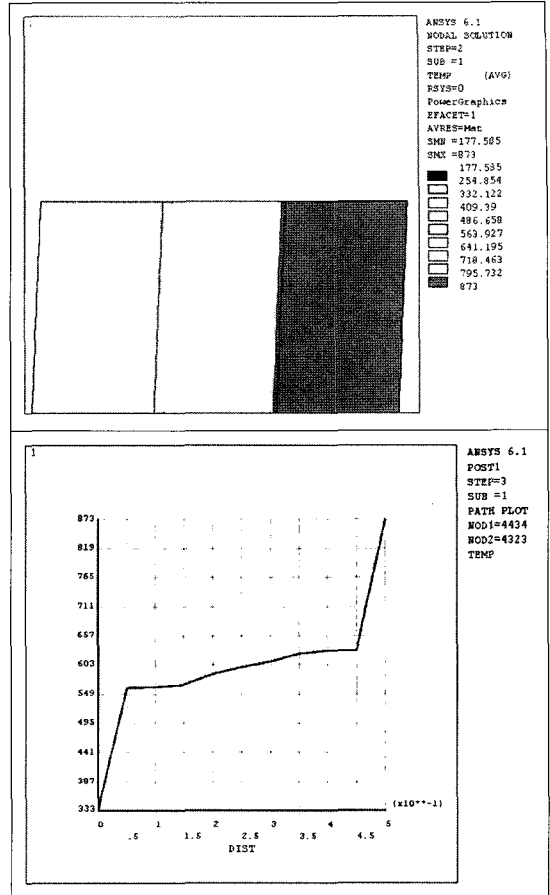


Fig. 12 Temperature distribution regarding outlet of processing depth

균 온도분포를 나타낸 것으로 여기서 X축 항목인 DIST의 0과 5는 각각 전극과 피가공물의 경계이며, 전극과 피가공물의 표면온도는 가공깊이가 깊어질수록 아주 미소하게 증가함을 보여주고 있다.

4. 측면 플래싱 장치의 성능평가 실험

4.1 실험장치 및 방법

고안된 측면 플래싱 장치는 방전가공조건 이외에도 형상 및 압력 등 여러 변수에 따라 그 성능이 달라진다. 본 연구에서는 Fig. 13에서 보이는 바와 같이 박스형의 밀폐구조로 측면 플래싱 장치를 알루미늄 소재로 제작하였는데, 치수의 정확성을 기하기 위하여, 밀링가공으로 홈을 파내어 밀폐된 공간을 형성시켰다.

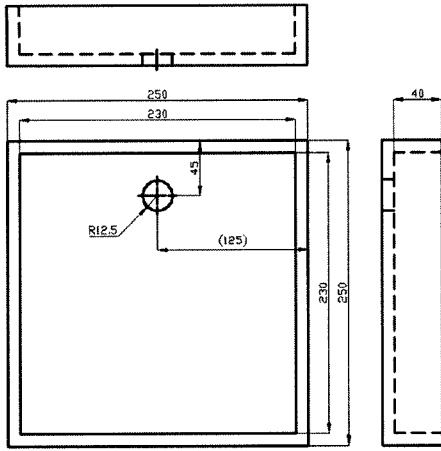


Fig. 13 Drawing of a side flushing devices

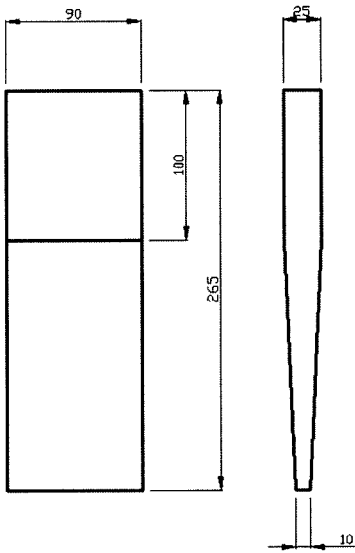


Fig. 14 Drawing of a copper electrode

한편 전극에 있어서는 협소한 저부가공 시에 칩이 배출되는 정도를 쉽게 비교할 수 있도록 Fig. 14에서 보이는 바와 같이 테이퍼가 들어간 깊은 홈의 형상을 사용하였다. 피가공물에 있어서는 금형의 일반부품 및 die plate에 많이 쓰이는 용접구조용 압연 강재인 SM45C 탄소강을 사용하였다.

실험은 (주)진영정기의 형조방전가공기 JDE-30U모델기계를 사용하였으며, Table 4에 제시된 조건으로 기존의 플라싱 방법과 가공시간을 비교하였다.

Table 4 EDM conditions for an experiment

Conditions	Unit	Side flushing method	Spout method	Suction method	Eject method
Pulse-on time(τ_p)	μs	100	100	100	100
Dwell time(τ_r)	μs	20	20	20	20
Peak current(I_p)	A	11	11	11	11
Discharge voltage	V	50	50	50	50
Eject pressure	kg/cm ²	1.0			1.0
Spout pressure	kg/cm ²		1.0		
Suction pressure	cmHg			20	
A-D(Jump time)	sec		1	1	1
A-U(Jump height)	mm		0.6	0.6	0.6

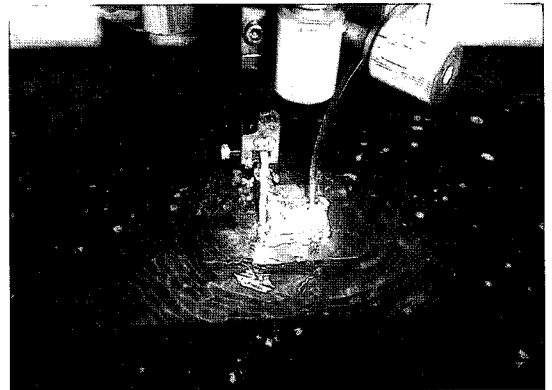


Fig. 15 EDM processing using side flushing devices

여기서 측면 플라싱장치를 부착하지 않은 분출법, 흡인법, 분사법은 가공하는 도중에 아크가 생겨 방전이 중단되었기에 AJC와 병행하여 안정적으로 가공을 수행하게 되었다. 방전능률의 차이는 가공조건에 따라서 다양하게 변화할 수 있는 것이기 때문에 피크전류치(I_p), 펄스온타입(τ_p), 휴지시간(τ_r)은 통상의 가공조건대로 설정하였다.

Fig. 15는 방전가공기의 테이블 위에 가공하기 이전 피가공물에 부착된 측면 플라싱장치와 분사노즐이 연결된 모습을 보여주고 있으며, 전극이 측면 플라싱장치의 내부공간을 지나 실질적으로 피가공물이 가공되어 그 극간 사이에서 검은색의 가공칩이 배출되는 모습을 보여준 것이다.

4.2 실험결과 및 고찰

4.2.1 해석결과와 실험치 상호연관성

극간 사이를 흐르는 가공액이 빠르게 흐를수록 방전속도도 이에 비례하게 된다. 앞서 해석된 결과와 같이 Fig. 16의 실험결과에서도 가공깊이에 따른 극간에서의 유속의 기울기는 가공시간의 증가율이 다른 플러싱 방법과 비교할 때 매우 완만하게 변화하고 있음을 보이고 있다.

가공이 완료된 후에는 간극계이지 두께에 알맞은 시험편을 방전갭 입구에 삽입하여 근사적인 두께를 측정하였는데, Table 5와 같이 바깥쪽의 갭이 0.05mm 더 크게 나왔다. 또한 전극의 표면저칠기도 측면 갭과 마찬가지로 안쪽의 경우보다 바깥쪽이 조금 더 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 측면 플러싱장치는 가공능률을 향상시키기 위해 별도로 피가공물을 예비가공해 두는 경우나 황삭가공에 보다 적합한 것으로 판단된다.

4.2.2 기존 플러싱 방법과의 비교

측면 플러싱 장치의 효과를 검증하기 위하여 본 실험에서는 우선적으로 칩 배출능력이 우수한 여러 가지의 플러싱법

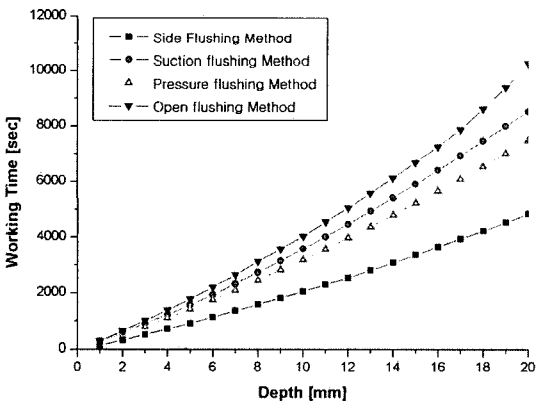


Fig. 16 Comparison of chip flushing away

Table 5 Comparison of the surface roughness and the gap size

Surface roughness(Rmax)	μm	left	11.2
		right	13.1
Gap size	mm	left	0.15
		right	0.20

을 대상으로 실험을 실시하였는데, Fig. 17은 각각의 방법으로 1mm 가공하는데 걸리는 평균적인 시간을 나타낸 것이며, Fig. 18은 깊이 20mm를 가공하는데 걸리는 총 작업시간을 나타낸 것이다. 이 결과에 따르면, 다른 플러싱 방법의 경우보다 약 1/2 정도로 가공시간을 단축시킬 수 있음을 알 수 있다. 그리고 깊이가 깊어질수록 작업시간이 더욱 두드러지게 현격한 차이를 나타내고 있는데, 이는 측면 플러싱 장치를 사용함으로써 피가공물을 관통하거나 깊은 홈의 가공에 더욱 효과적임을 증명해 주고 있다.

4.2.3 가공면 성상

각각의 플러싱 방법에 따른 방전가공면을 전자현미경으로 관찰하는 실험도 병행하였는데, 본 실험결과에 따르면 측

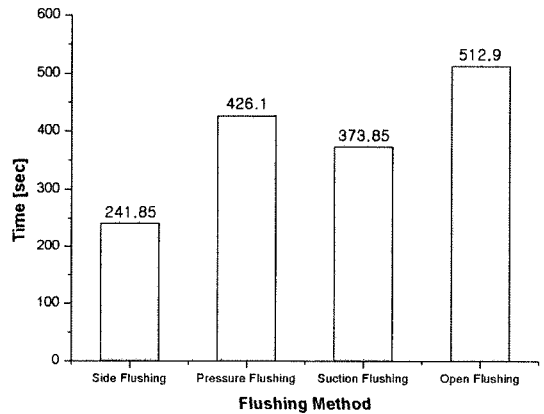


Fig. 17 Time taken to work -1mm of processing depth

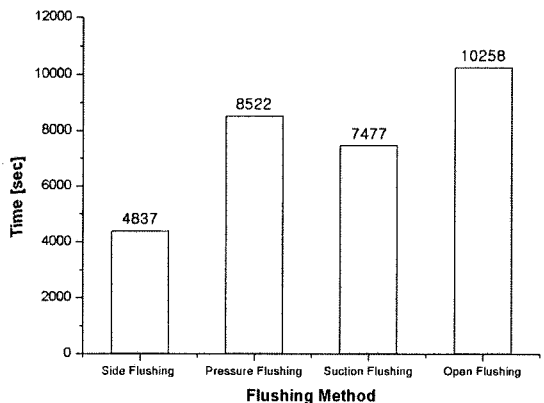


Fig. 18 Total time taken to work -20mm of processing depth

면 플라싱법을 제외한 분출·흡인법, 분사법에서는 검은색의 가공칩이 제대로 배출되지 않아 축적된 모습을 볼 수 있었다. 방전유 속에 찌꺼기의 양이 많으면 많을수록 방전을 촉진시키지만, 그 정도가 심해져서 이렇게 특정한 곳에서 가공분이나 기타 분해물이 축적되면 그 위치에서만 방전이 집중되어 공작물에 결함을 남기게 되므로, 본 장치를 부착하게 되면 분사압이 일정하게 유지되어 방전가공도중에 필연적으로 생성되는 가공분 등을 다른 플라싱 방법보다 효과적으로 배출하여 아크가 생겨 방전이 중단되는 것을 방지할 수 있는 특성을 간접적으로 검토할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 방전가공시 기존의 플라싱 장치들이 갖는 단점을 극복시키는 새로운 측면 플라싱 장치를 고안하였으며, 가공액의 유동해석과 실험적 결과들을 통해 그 효과의 우수성을 검증하였고, 이를 수행하는 과정에서 다음과 같은 사실을 알았다.

- (1) 측면 플라싱 장치는 가공액 대부분이 전극과 공작물 사이의 간극내로 공급이 되어 기존의 플라싱법보다 방전 속도가 2배정도 향상되었으며, 가공액의 압력 또한 상부판의 내부공간 전체에 걸쳐 일정하게 분산되어 가공깊이마다 균등한 작업시간을 유지할 수 있음이 확인되었다. 또한 방전가공이 진행되면서 특정한 곳에서 가공칩이나 기타 분해물이 축적되지 않아 가공면 품질이 향상됨을 알 수 있었다.
- (2) 가공면적이 넓은 깊은 홈 가공의 실험조건에서 기존의 플라싱 방법에서는 아크가 생겨 방전이 중단되거나 가공이 지체되는 경우가 있었으나, 본 측면 플라싱 장치를 사용함으로써 이를 예방하여 가공시간을 단축할 수 있었다.
- (3) 가공이 완료된 후 양쪽의 갭을 측정한 결과 약간의 차이가 있었으나, 이는 0.05mm 이하로 실용성에 문제가 없음을 확인되었다.

- (4) 측면 플라싱 장치를 부착함으로써 방전이 이루어지는 부분에 깨끗한 방전유가 공급되며, 방전이 이루어지는 동안 가공깊이에 상관없이 극간에 일정한 온도분포가 유지되므로 보다 안정적인 방전가공을 유지할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Nagayama, B., 1998, *New Technology on Electro Discharge Machining*, Applied Mechanical Engineering, Tokyo, pp. 159~205.
- (2) Saito, J., 1998, *Trends and Futures of Electro Discharge Machining Technology*, Japan Society of Engineering Investigation, Tokyo, pp. 81~136.
- (3) Xia, H., Kunieda, M. and Nishiwaki, N., 1999, "Simulation of Electrode Surface Temperature in Die-Sinking EDM Process," *J. of the Japan Society of Electrical-Machining Engineers*, Vol. 30, No. 64, pp. 271~278.
- (4) Maeng, H., Bae, T., Cha, J., Song, K. and Kim, Y., 1998, *Physical Modeling and Experimental Investigation of Electro-discharge Machining and Feeding Characteristics*, UNITEF Research Report, Jinyoung Machinery Ltd., Seoul, pp. 78~94.
- (5) Kim, K., Kim, U. and Lee, G., 1999, *Fluid Mechanics*, Intervision Pub. Company, Seoul, pp. 198~236.
- (6) ANSYS®, 2002, *ANSYS/FLOTRAN Education Manual*, Taesung SNE Ltd., Seoul, pp. 127~185.
- (7) ANSYS®, 2002, *Tutorial Collections for ANSYS Users*, Taesung SNE Ltd., Seoul, pp. 45~121.
- (8) Chu, S. and Lee, G., 2000, "Determination of EDM conditions from 3D Measuring Data of Electrode," *The Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, pp. 73~80.