

WEDM 프로세스의 방전 안정성 향상을 위한 실시간 미세제어에 관한 연구

권신[#], 남성호^{*}, 양민양^{**}

A Study on the Real-time Micro Control of WEDM Process for the Improvement of Discharging Stability

Shin Kwon[#], Sung-Ho Nam^{*} and Min-Yang Yang^{**}

ABSTRACT

Some studies have shown that unstable factors are inherent in WEDM process, causing the instability of the discharging pulse to reach about 40~60% in normal machining. Transient stability is an important subject in WEDM process since there is a close relationship between stability and machining performance, such as the characteristics of a machined surface, machining speed and problem of instability like wire rupture phenomenon. Among the many machining parameters affecting WEDM machining state, three specific parameters (V_r , I_p , off time) are major controllable variables that can be applied in transient stability control. And, this research investigates the implementation and analysis of real-time micro control of the discharging stability of WEDM (Wire Electric Discharge Machining) process.

Key Words : Wire Electric Discharge Machining, WEDM (와이어 방전 가공), Real-time (실시간), Micro Control (미세 제어), Discharging Stability (방전 안정성), Unstable Discharging Ratio (불안정방전율)

1. 서론

생산 산업에서의 기술 발전에 따라 높은 강도와 높은 경도를 갖는 새로운 소재들이 개발, 적용되고 있다. 이러한 재료를 가공하기 위하여, 기존의 절삭 가공법이 아닌 방전가공, 초음파 가공, 레이저 가공 등의 특수 가공의 적용이 더욱 증가하고 있는 추세이다. 특히, 와이어 방전 가공(Wire Electric Discharge Machining, 이하 WEDM)은 보통

지름 0.005mm ~ 0.3mm 의 가는 와이어를 전극(electrode)으로 사용하여 방전가공을 수행하므로 복잡한 형상 등의 고정밀 가공에 유리하다. 또한, 가공을 위하여 재료의 특성 중 전도성(conductivity)만이 요구되므로, 다양한 재료를 가공할 수 있는 장점이 있어, 그 응용 범위가 항공기 부품산업, 초정밀 금형산업, 의공학 및 MEMS 등으로 더욱 확대되고 있다. 일반적으로, WEDM 프로세스에서의 대표적인 문제 중 하나는 와이어 단

접수일: 2004년 9월 20일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail gongjak@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3264

* 생산기술연구원 나노가공팀

** 한국과학기술원 기계공학과

선(rupture) 등을 비롯한 불안정성 문제이다.^{1, 3-8} 특히, 이러한 불안정성은 예측 불가능하게 임의로 나타날 수 있기 때문에, 보통 전체 프로세스에서의 가공조건을 제한하게 되어 가공속도와 효율성을 제한하는 문제로 이어진다.

본 연구에서는 WEDM 프로세스의 미소시간 단위의 방전 불안정성을 관찰하여, 이를 호전시키기 위한 실시간 미세제어 시스템을 구현한다. 이를 실현하기 위하여, 제어의 개요, 제약조건, 안정성 기준, 제어전략 등을 논한 후, PC를 플랫폼으로 하는 하드웨어/소프트웨어적 실시간 접근 방법 및 설계 구조를 설명하고 검증한다. 구현된 제어 시스템의 시간 특성에 대하여 고찰하고, WEDM에 본 연구의 실시간 미세제어를 적용한 가공 결과로부터 안정성과 효율, 가공성능이 동시에 모두 향상될 수 있음을 확률/통계적 방법에 따라 수치적으로 보인다.

2. WEDM 가공 프로세스에서의 미소시간 단위의 방전 안정성

2.1 WEDM 프로세스

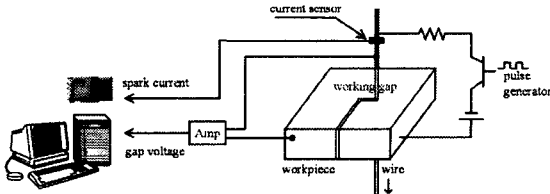


Fig. 1 Schematic diagram of WEDM process and monitoring

Fig. 1은 WEDM 프로세스와 모니터링의 개요를 나타내는 그림이다. WEDM은 그림에서와 같이 직류전원과 펄스생성 회로로부터 와이어 전극과 공작물에 가공전압 펄스를 가하는 상태에서 공작물이 고정된 테이블을 NC(Numerical Control)장치에 의해 이송하여 방전을 일으킨다. 전압이 가해진 상태에서 두 도체를 근접시키기에 따라 극간 사이의 공간에는 높은 에너지의 전장(electric field)이 형성되고, 극간의 절연상태가 파괴되어 순간적으로 높은 전류가 흐르게 되는 것이 방전 원리이다. 방전이 일어날 때, 순간적으로 두 도체 사이에 플라즈마 채널(plasma channel)이 형성되고 이때 발생하는

고온의 열에 의해 공작물이 녹고, 녹은 부분은 방전 시 발생하는 압력에 의해 공작물에서 분리되며, 가공액이나 대기에 의해 냉각되어 다시 재결정을 이룬 후 응고되어 중력과 가공액에 제거되는 과정을 거친다. 본 연구의 선행 연구²에서 실시간 모니터링 시스템을 구현하였으며, 방전이 일어날 때 극간의 전압과 전류를 직접 모니터링하였다.

2.2 미소시간 단위의 방전 불안정성

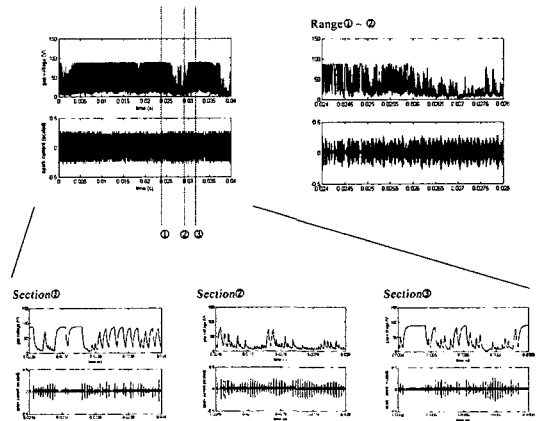


Fig. 2 Monitored WEDM process

Fig. 2는 이를 이용하여 WEDM 프로세스를 상세히 모니터링 한 결과이다. 전체 약 40ms 정도의 시간 동안의 전압펄스와 방전전류의 파형을 관측한 것이다. 약 25ms 이후에 5ms 정도의 시간 동안 방전전압이 기준전압(지령전압)에 이르지 못한 상태에서 방전이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 section ①, ②, ③은 각각 좌상 그림에서의 각 ①, ②, ③ 순간을 확대한 것이다. 특히 section ②에서 불안정한 방전을 확인할 수 있으며, section ③에서도 미소시간 단위의 불안정한 방전 영역을 확인할 수 있다. WEDM 프로세스에서 이와 같은 불안정한 영역은 예측 불가능하게 랜덤(random)하게 관찰되며, 보통 기준전압에 이른 후 방전이 일어나는 안정한 상태로 자연 회복되기도 하지만, 그렇지 못하는 경우 가공면에 큰 손상을 입히거나, 가공이 중단되고, 와이어가 단선되는 치명적인 결과가 생길 수도 있다.

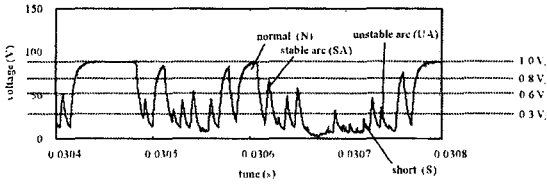


Fig. 3 Discharging voltage pulse profile

Fig. 3 은 WEDM 프로세스에서의 가공전압 펄스를 자세히 나타낸 것으로 방전이 일어날 때의 전압의 수준(level)에 따라 방전의 안정성을 구분한 것이다. 지령된 기준전압에 이르는 충분한 전압으로 충전 후에 이루어지는 방전을 정상방전(normal discharging), Fig. 2 section ②에서와 같이 전압이 형성되지 않은 채 스파크(spark) 전류가 흐르는 상황을 쇼트(short), 이와 유사한 형태로 적은 전압 하에서 이루어지는 방전을 불안정 아크방전(unstable arc discharging), 정상방전과 유사한 형태의 방전을 안정 아크방전(stable arc discharging)으로 구분하였으며, 단위시간당의 방전상태의 불안정 정도를 나타내는 불안정방전을 R_U 는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Unstable discharging ratio } (R_U) \\
 & = \frac{N. \text{ of short pulses} + N. \text{ of unstable arc pulses}}{N. (\text{number}) \text{ of total pulses}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Table 1 Monitoring 1ms instability

Current 1ms unstable discharging ratio		Next 1ms stability of discharging	
Instability	Counts	Stable	Unstable
90%	136/1000	8/136 (6%)	128/136 (94%)
80%	187/1000	34/187 (18%)	153/187 (82%)
70%	292/1000	83/292 (29%)	209/292 (71%)

Avg. unstable discharging ratio during whole 1sec 61%
Test duration : 1sec (1000 records set)

Table 1 은 미소시간 단위에서의 미세제어의 필요성을 나타내는 1ms 단위의 안정성 판별 테스트를 보인다. 앞에서 불안정성을 나타낸 Fig. 2 와 같은 상황을 식 (1)에 따라 수치적으로 나타낸 것이다. 임의의 방전가공 상태를 측정된 것이며, 현재의 1ms 가 불안정방전을 90%인 불안정방전 상태이면 현재 이후의 1ms 는 94%가 불안정방전 상태로, 6%가 안정방전 상태로 나타난다. 현재 1ms 의 불안정방전율이 80%, 70%인 각각의 경우도 조사하였으며, 이로부터 현재 1ms 의 방전안정 상태와 다음 1ms 의 방전안정 상태는 깊은 관계(correlation)가 있음을 알 수 있고, 이에 따라 1ms 단위의 실시간 미세제어가 필요하며, 의미가 있음을 알 수 있다.

3. WEDM 실시간 미세제어 시스템

3.1 제어 변수의 설정

WEDM 프로세스는 매우 많은 조건들에 따라서 가공상황이 변할 수 있다. 상호 의존적인 관계의 조건들이 많으며, 이들 모두의 관계를 해석적으로 분석하여 정확히 밝히기에는 어려움이 있다. 따라서, WEDM 의 온라인 제어에서 일반적으로 테이블 이송속도 정도가 제어변수로 사용되고 있으며,³ 기존의 적응제어 관련 연구들에서 가공펄스의 휴지시간이 온라인 제어변수로 활용되기도 하였다.⁴

Table 2 Machining parameters in WEDM process (with time scale)

Time scale	Machining parameters
μs (10^{-6} second)	Pulse on time, pulse off time peak current, reference voltage
ms (10^{-3} second)	Table feedrate, average voltage
s (second)	Wire speed, wire tension, flushing pressure
m (minute)	Fluid conductivity, fluid temperature

Table 2 에 보인 바와 같이 각 가공조건들은 WEDM 프로세스에 영향을 주는 시정수(time constant)에 따라 구분 지을 수 있으며, 수십 kHz

로 방전이 일어나는 WEDM 프로세스를 적극적, 능동적으로 제어하기 위해, 본 연구에서 추구하는 미세제어를 실현하기 위해서는 ms 이하의 시정수를 갖는 요소들을 제어변수로 삼아야 한다. 테이블 이송속도의 경우 기계적인 동특성에 따라 시정수가 보통 수백 ms 에 이르므로, 본 연구에서 지적인 ms 단위의 미소 방전 불안정성에 대처하기에 한계가 있으며, 이에 본 연구에서는 미세제어에서의 제어변수로 기준전압(reference voltage, V_r), 피크전류(peak current, I_p), 휴지시간(pulse off time)을 활용한다.

3.2 제어 규칙(Rule)을 정하기 위한 기초 실험

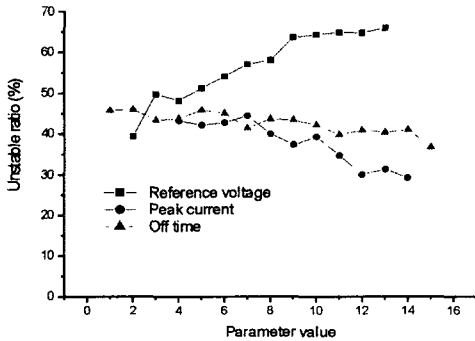


Fig. 4 Unstable discharging ratio vs. control variables

3.2.1 가공조건과 불안정방전을

3.1 절에서 정한 제어변수에 따른 WEDM 방전 상태의 불안정방전을 Fig. 4 에 나타내었다. 기준 전압의 증가에 따라 불안정방전은 급격히 증가하며, 휴지시간과 피크전류를 증가시키기에 따라 불안정방전은 감소하였다. 자세한 관계는 저자의 지난 연구²에서 밝힌 바 있으며, 본 연구에서는 이의 결과를 응용한다.

3.2.2 가공속도와 가공면 거칠기

Fig. 5 는 가공속도와 가공면 거칠기와의 관계를 실험적으로 보인 것이다. 일반적으로 가공면 거칠기를 설정한 후 가공을 행할 시에 이들 데이터로부터 가공속도에 제한을 두게 된다. 가공면 거칠기는 가공속도, 즉 가공에너지에 거의 단순 비례하는 관계를 가지며, 그 비례상수는 공작물의 두께에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 가공속도와 가공면 거칠기를 일반적인 방법에 의해서는 동시에 향상시킬

수 없게 되는 것이다. 이러한 가공상황은 2.2 절에서 지적인 미소시간 단위의 불안정방전 영역을 방치한 상태에서의 관계로, 본 연구에서는 이러한 미소시간 단위의 불안정방전 상태를 최소화하는 제어를 통하여 가공속도와 가공면 거칠기의 동시 향상을 꾀하며, 예상되는 손실보다 적은 한쪽의 손실로 다른 한쪽의 이득을 얻고자 하는 것이다. Fig. 5 의 결과로부터 10mm 두께의 가공물의 경우, 10%의 가공속도의 이득은 가공면 거칠기에서의 약 10%의 손실로 이어짐을 예측할 수 있다.

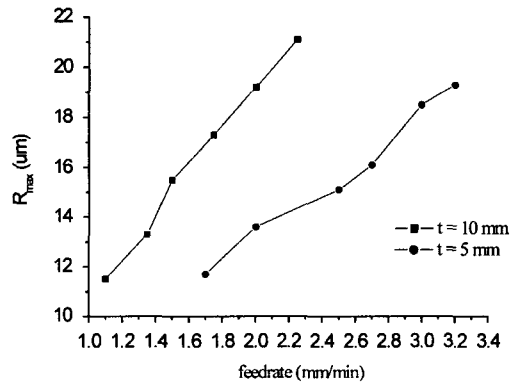


Fig. 5 Surface roughness (R_{max}) vs. feedrate

3.3 PC 기반 실시간 제어 시스템

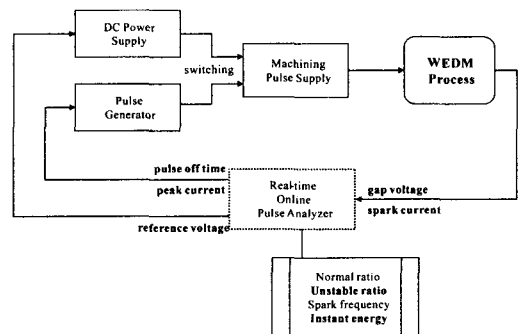


Fig. 6 Block diagram of the micro control system for WEDM process

Fig. 6 은 실시간 미세제어 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것으로, WEDM 프로세스의 극간 전압과 스파크 전류를 모니터링하여 실시간 온라

인 펄스해석 시스템에서 불안정방전을 도출해 내며, 제어가 필요한 경우를 판별하여 직류전원 공급장치와 펄스 생성회로에 새로운 가공조건을 지령하는 과정을 나타낸다. 그림에서의 제어 루프는 실시간 소프트웨어로 구현되어 가공이 진행되는 중의 일정한 미소시간마다 무한히 동작한다.

기준 불안정방전율($R_{U,cr}$)은 가공조건 데이터북 등으로부터 설정한 가공상황에서의 평균 불안정방전율로 설정할 수 있으며, 임의로 발생하는 기준 불안정방전율 이상의 상태를 제어하기 위해서는, Fig. 4 에서의 제어변수-불안정방전율 관계에 따라, 제어변수들을 재설정해 주게 된다. 불안정방전율이 기준치보다 높게 나타나는 미소구간에 대해서 새로운 기준전압은 낮게, 피크전류는 높게, 휴지시간은 길게 설정해주어야 한다. 가공조건 변화에 대하여, 가공에너지는 균일한 상태를 유지해야 하며, 본 연구의 대상 기계인 Mithubishi WEDM DWC-120F 의 경우 전압 파라미터(parameter)와 전류 파라미터 각각이 방전 에너지에 미치는 영향을 고려하여 Table 3 과 같은 제어 이득(gain) P 를 설정하였다.

Table 3 Control gain P

P = 0	V_r parameter - 2	I_p parameter + 0
P = 1	V_r parameter - 2	I_p parameter + 1
P = 2	V_r parameter - 4	I_p parameter + 2
P = 3	V_r parameter - 6	I_p parameter + 3

3.3.1 실시간 제어 하드웨어

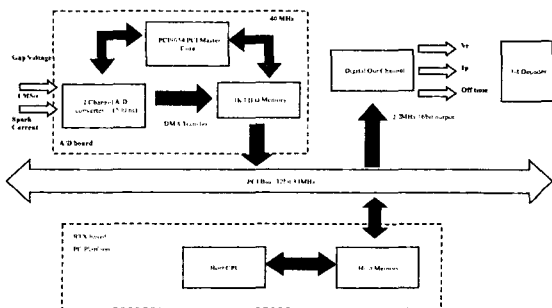


Fig. 7 PC-based machining control hardware structure

Fig. 7 은 Fig. 6 의 제어 블록 다이어그램을 실현

하기 위한 PC 기반 하드웨어 구조를 설명한다. 가공상황을 모니터링 하는 A/D (Analog to Digital)보드와 PC 에서 판별 및 연산 후 WEDM 으로 새로운 가공조건을 부여하기 위한 디지털 출력보드가 PC 와 PCI (Peripheral Component Interconnect) 인터페이스를 통하여 연결된다. A/D 보드에서 가공상황의 극간전압과 스파크 전류 값을 20MS/s 의 속도로 획득하여 A/D 보드 상의 임시 메모리(FIFO-First In First Out)에 저장한다. 저수준(low level) 소프트웨어 접근 방법으로 PCI 마스터(master) 칩인 PCI9054 에 직접 접근하여, DMA 전송(Direct Memory Access transferring)을 통하여 호스트 PC 의 메모리 영역으로 32 비트(bit), 33MHz(32 비트당 약 0.03 μ s)의 속도로 전송이 가능하며 호스트 PC 의 CPU (Central Processing Unit)는 이 데이터를 2.4GHz 의 CPU 속도로 연산하여 그 결과에 따라 32 비트, 2MHz(32 비트당 0.5 μ s)의 속도로 연결된 디지털 출력 보드와 디코더(decoder)를 통하여 WEDM 컨트롤러의 펄스 생성회로와 직류 전원 생성부로 새로운 가공조건을 부여한다. WEDM 컨트롤러 내부의 회로 구성은 시간 응답성이 수십 ns (10^{-9} second)로 매우 빠른 IC (Integrated Circuit)들로 구성되어, 가공상황의 파악에서부터 새로운 가공조건 설정에까지 하드웨어상의 시간의 결정은 A/D 보드와 호스트 PC 사이의 데이터 전송, 호스트 PC 에서 WEDM 컨트롤러의 펄스생성부로의 가공조건 값 전송 시의 시간들이 결정하게 되며 이론적인 계산에 따라 약 15 μ s 정도가 소요 되므로, 본 하드웨어 구조가 WEDM 프로세스의 미세 제어에서의 요구 시간을 만족함을 알 수 있다.

3.3.2 소프트웨어 구조 및 설계

3.3.1 절의 하드웨어를 실시간으로 구동하기 위해서는 실시간 제어 소프트웨어가 요구된다. 실시간성을 확보하지 못한 Microsoft 사의 Windows2000 을 운영체제(OS, operating system)로 하는 본 연구의 PC 환경에서 실시간성을 갖추기 위하여 VenturCom 사의 RTX(Real Time eXtension)을 활용한다. RTX 는 OS 의 서브시스템(subsystem)으로 PC 상에 독립적으로 구성되며 최소 0.05 μ s 의 분해능을 갖는 내부 실시간 클럭(clock)을 제공하여, 본 연구에서 목표로 하는 1ms 의 실시간 루프를 안정하게 구현할 수 있었다. Fig. 8 은 이런 환경에서 구현한 WEDM 제어 소프트웨어에서의 가공조건 제

어모듈을 나타낸 것이다. 이 모듈은 독립적인 구동을 위하여 독립 쓰레드(thread)로 구현되었으며, 1ms의 시간 루프로 동작한다.

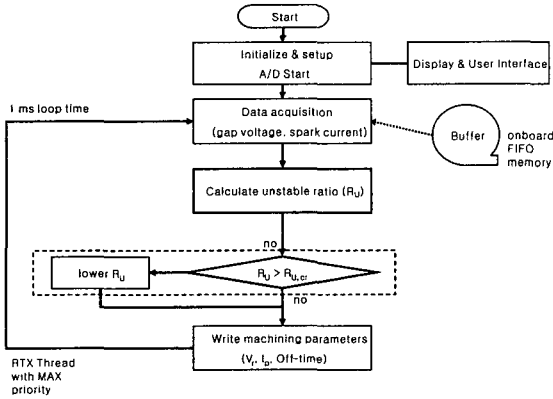


Fig. 8 Real-time control S/W structure and flow

3.4 제어 시스템의 구현 및 시간 특성 검토

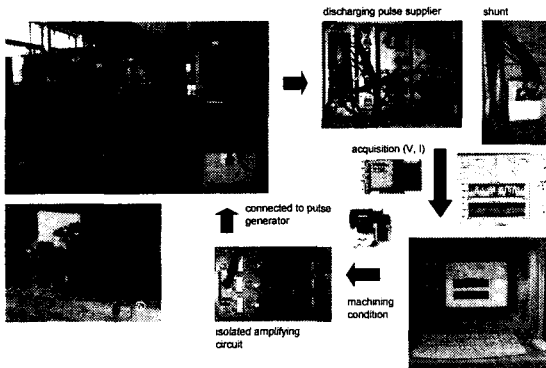


Fig. 9 System implementation

Fig. 9 는 구현된 시스템의 사진들을 보인다. WEDM 컨트롤러 애드온(Add-on)형태로 PC 기반 컨트롤러를 구성하였으며, 본래 컨트롤러의 방전펄스 공급부로부터 방전전압과, 분기시켜 측정한 방전전류를 PC 상의 PCI 보드들의 입력으로 전달한다. PC 는 제어 알고리즘을 거쳐, 디지털 출력보드와 격리된(isolated) 증폭회로를 거쳐 본래 컨트롤러의 가공 조건 조절 단자로 새로운 값을 부여하게 된다. 증폭회로는 PC 의 디지털보드 출력단과 WEDM 의 가공 조건 제어회로를 연결하는 인터페이스 회로로 3-

8 디코더(decoder)를 이용하여 확장된 라인을 확보 하였으며, WEDM 컨트롤러의 전압 레벨에 맞는 증폭과, 인터페이스 부 양단의 보호를 위해 고속 FET 증폭회로를 구현한 것이다.

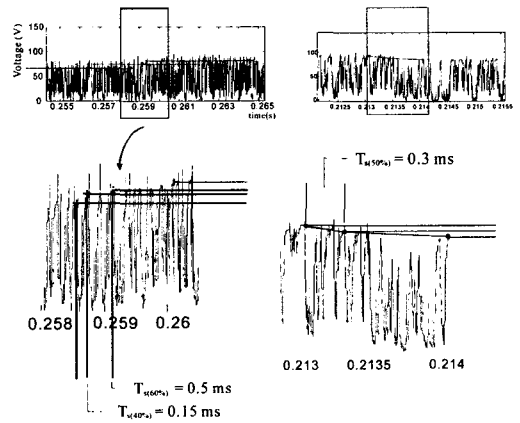


Fig. 10 Settling time of whole system

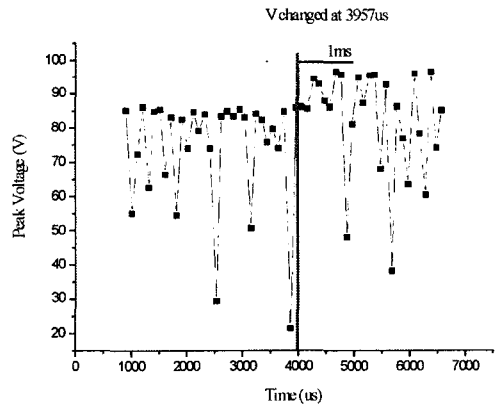


Fig. 11 Time delay

Fig. 10 과 Fig. 11 은 구현한 실시간 제어 시스템의 시간 특성을 검토한 것으로 각각, 정착 시간(settling time)과 시간 지연(time delay)를 측정된 것으로, 본 연구에서 목표로 하는 1ms 단위의 미세 제어에 적합함을 확인할 수 있다. 원하는 변경 상태는 정확한 물리량을 갖는 값이 아닌, 상대적인 가공상태의 변화이므로 0.5ms 이내에 원하는 값의 60%이상을 추종하는 시스템으로 충분하다.

4. 제어 결과 및 고찰

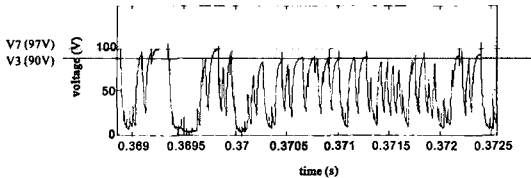


Fig. 12 Micro control result

Fig. 12 는 본 연구의 실시간 미세제어를 통한 결과에서의 전압펄스 프로파일의 한 예를 보여준다. 기준전압이 약 97V 인 상태를 유지하는 중에 과도한 불안정방전을 나타낸 이후, 기준전압이 90V 정도로 감소되는 구간이 나타나는 것을 볼 수 있다. 불안정 정도가 완화된 약 1ms 이후에 다시 원래의 기준전압으로 회복해가는 것을 확인 할 수 있다. 그러나, 변경 이후의 가공조건에 대해서도 일정 정도의 불안정 방전은 이루어질 수 있으므로, 전체적인 제어의 결과를 확인하기 위해, 통계적인 방법으로 결과를 분석해야 한다.

4.1 실시간 미세제어의 결과 - 안정성과 효율의 향상

Table 4, Table 5 는 각각 실시간 미세제어를 적용하기 전과 후의 방전상태에 대하여 1ms 단위로 모니터링하여 분석한 결과이다. Table 4 는 900ms, Table 5 는 1000ms 를 측정된 결과이며, Table 5 는 Table 4 와 동일한 가공조건 중에 제어이득을 1 로 설정하여 제어를 해준 결과이다. 우선 전체 구간에 걸쳐서 제어 후의 결과에서 90%이상 불안정한 방전이 이루어지는 1ms 구간이 16/1000(=1.6%)로 제어 전 37/900(=4.1%)보다 감소하였음을 확인할 수 있다. 80%이상의 불안정한 방전이 이루어지는 1ms 구간 역시 제어 후 59/1000(=5.9%)로 제어 이전 94/900(=10.4%)보다 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이는 특히 위험한 구간으로 볼 수 있는, 불안정한 방전율이 높게 나타나는 구간이 크게 감소하여, 전체적인 안정성이 향상되었음을 의미한다. 또한 본 제어시스템이, 불안정한 방전 이후의 상태를 호전시키는데 얼마나 효과가 있는지를 확인할 수 있다. 제어 전의 Table 4 에서는 현재 1ms 가 90%의 불안정방전율을 보인 37 회 중에서, 그 이후의 1ms 에서 31/37(84%)가 불안정상태를 유지하며,

23/37(62%)는 초기 90% 방전불안정율 이후 2ms 이상 불안정방전 상태가 지속됨을 알 수 있다. 제어 이후(Table 5)에는 현재 1ms 가 90%의 불안정방전율을 보인 16 회 중에서 각각의 경우가 10/16(63%), 6/16(38%)로 나타나, 제어 전의 자연 회복되는 경우에 비하여 불안정방전의 지속 상태의 확률이 각각 21%, 25%만큼 크게 줄었음을 확인할 수 있다. 이는 본 연구의 실시간 미세제어 시스템의 미소시간 단위의 안정방전 회복능력을 검증하는 것이다. Table 에는 각각 현재 1ms 의 불안정방전율이 80%와 70%인 경우에 대해서도 분석하였으며, 특히 불안정율이 높게 나타나는 경우에 효과적임을 알 수 있다.

Table 4 1ms stability of discharging (before control)

Unstable ratio in 1ms	next 1ms		next 1~2ms	
	stable	unstable	stable	unstable
90% (37/900)	6/37	31/37 (84%)	8/37 (21%)	23/37 (62%)
80% (94/900)	33/94	61/94 (65%)	22/94 (23%)	39/94 (41%)
70% (209/900)	91/209	118/209 (57%)	48/209 (23%)	70/209 (33%)

Table 5 1ms stability of discharging (after control)

Unstable ratio in 1ms	next 1ms		next 1~2ms	
	stable	unstable	stable	unstable
90% (16/1000)	6/16	10/16 (63%)	4/16 (25%)	6/16 (38%)
80% (59/1000)	26/59	33/59 (56%)	15/59 (25%)	18/59 (30%)
70% (161/1000)	76/161	85/161 (52%)	41/161 (25%)	44/161 (27%)

Table 6 은 보다 많은 경우에 대한 실험으로 검증한 결과를 정리한 것이다. 기준조건 V09 107 O(off time)08 (각각 기준전압, 피크전류, 휴지시간, 이하 동일)에서 평균 62.5%의 불안정방전율을 보였으나, 본 연구의 미세제어 이후, 각 이득 값에

Table 6 Experimental results : stability & efficiency enhancement

	Normal discharging ratio (R_N , %)	Unstable discharging ratio (R_U , %)	Relative R_U	Long unstable period (N/sec)	Average power sum ($W \cdot 100\mu s$)	feed. / P_{avg}	feed. / R_{max}
V09 I07 O08	23.0	62.5	-	31	812	3.30	168
control 1 (V_r only) 9 7 8 → 5 7 13	24.8	56.5	-9.6%	7	776	3.52	185
control 2 (gain $P=1$) 9 7 8 → 7 8 13	26.8	52.8	-15.5%	6	836	3.71	189
control 3 (gain $P=2$) 9 7 8 → 5 9 13	26.4	53.5	-14.4%	8	828	3.55	181
control 4 (gain $P=3$) 9 7 8 → 3 10 13	28.0	52.0	-16.8%	6	852	3.63	185
(comparing with) 6 7 13	29.5	54.1	-13.4%	15	740	3.37	165
(comparing with) 9 8 8	23.9	61.5	≈	24	884	3.42	164

Table 7 Experimental results : performance enhancement

	Ra (μm)	Rmax (μm)	Feed. ($\mu m/min$)		Relative feed.	Relative roughness	
			avg.	dev.		Ra	Rmax
V09 I07 Off08	2.53 (99%± 0.05)	16.1 (99%±0.5)	2706	196.4 (7.3%)			
control 1 ($P=0$) 9 7 8 → 5 7 13	2.29 (99%± 0.04)	14.5 (99%±0.4)	2681	164.7 (1.3%)	≈ (-0.9%)	-9.5%	-10%
control 2 ($P=1$) 9 7 8 → 7 8 13	2.40 (99%± 0.04)	15.1 (99%±0.4)	2848	143 (5%)	+5.2%	-5.1%	-6.2%
control 3 ($P=2$) 9 7 8 → 5 9 13	2.53 (99%± 0.04)	16.2 (99%±0.4)	2926	156 (5.4%)	+8.1%	≈	≈
control 4 ($P=3$) 9 7 8 → 3 10 13	2.73 (99%± 0.06)	16.7 (99%±0.6)	3097	166.2 (5.4%)	+14.5%	+8%	+3.7%
(comparing with) 6 7 13	2.27 (99%± 0.05)	15.1 (99%±0.4)	2468	219 (8.8%)	-8.8%	-10.3%	-6.2%
(comparing with) 9 8 8	2.89 (99%± 0.06)	18.5 (99%±0.6)	3027	324 (10.7%)	+11.9%	+14.2%	+14.9%
(comparing with) 3 10 13	3.95 (99%± 0.08)	23.7 (99%±0.8)	3965		+46.5%	+56%	+47%

따라서 불안정방전율은 상대적으로 각각 -9.6%, -15.5%, -14.4%, -16.8% 줄어들었음이 확인되었다. 기준전압만을 약화시킨 이득 0의 경우보다 피크전류를 증가시키는 제어를 함께 해주는 경우에 불안정방전율이 더 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 3.2.1 절의 기초 실험에서 피크전류와 불안정방전율의 관계 및 설명으로부터 유추할 수 있다. WEDM 프로세스에서의 큰 위험성으로 지적되는, 30 펄스 이상 길게 지속되는 불안정 방전상태의 경우 제어 전의 경우 1 초당 평균 31 회 정도가 감지되었으나, 그 수치가 제어 이후에 10 회 이하로 크게 감소하여 미세제어를 통하여, 이 점에서의 위험도가 1/3 수준으로 감소하였다는 것을 의미한다. 제어 이후의 효율의 증가를 검증하기 위하여 제어 전후의 평균 투입 에너지를 분석하였고, 이에 대한 이송속도의 비율과, 이송속도와 표면거칠기의 비율을 분석하였다. 제어 이전에 $feedrate/P_{avg}$ 는 3.30 으로 제어 이후 이 값은 3.52, 3.71, 3.55, 3.63 으로 약 9%정도 균등히 향상함을 확인할 수 있다. 이는 불안정방전율이 감소하는 만큼 WEDM 프로세스의 효율이 향상되었음을 의미한다. 또한 다른 효율 지수인 $feedrate/R_{max}$ 또한 제어 전에 168 이 제어 이후 평균 185 로 10%이상 상승하였다. 이 또한 불안정방전율이 감소하는 만큼 상대적으로 표면거칠기는 좋아지고, 불안정방전율의 감소로 평균극간전압은 상승하고 이에 따라 결정되는 이송속도 역시 상승하기 때문에 나타나는 결과이다. 제어 이후와 비슷한 불안정방전율을 갖는 가공조건 셋(set)인 V06 I07 O13 의 경우, 불안정방전율은 미세제어의 결과에 크게 미치지 못하지는 않으나, 이는 평균 투입 에너지가 10%이상 작은 가공상태로 얻어지는 결과이므로, 그만큼 효율면에서는 부족하게 되는 것이다.

4.2 실시간 미세제어의 결과 - 가공 성능의 향상

4.1 절에서 WEDM 프로세스의 실시간 미세제어를 통하여 불안정방전율이 감소하고, 특히 위험도가 높아지는 긴 불안정방전 구간이 감소하는 것을 확인하였다. 불안정방전이 지속되는 경우 이는 평균극간전압에 영향을 주고, 이에 따라 결정되는 테이블 이송속도를 낮추기 때문에 성능에 제한이 있게 된다. 또한 이렇게 불규칙적인 상태에 따라 방전상태 및 이송속도가 매우 불규칙적으로 변할 수

있으며, 이는 방전 가공면거칠기에 악영향을 줄 수 있다. 따라서, 전 구간에서의 불안정방전율을 줄이고, 길게 지속되는 불안정 방전 구간을 줄여주는 본 실시간 미세제어를 통하여 결국 이송속도 및 가공면거칠기로 대변되는 WEDM 의 가공성능이 향상될 수 있다. Table 7 은 제어이득 P 에 따른 다양한 패턴의 성능의 향상을 보이는 실험의 결과이다. 제어 전 V09 I07 O08 의 가공조건에서 R_a , R_{max} 는 각각 $2.53\mu m$, $16.1\mu m$, 평균 이송속도는 $2706(\mu m/min)$ 이다. 제어이득 P=0 인 제어 이후에 이송속도 0.9%의 손실만으로 10%의 가공면거칠기의 이득을 볼 수 있었으며, 특히 가공속도의 변동이 크게(7.3% → 1.3%) 감소한 것을 볼 수 있다. 제어이득 P=1 인 경우, 가공속도와 가공면거칠기 모두 5%이상 향상되었으며, 제어이득 P=2 인 경우, 가공면거칠기의 손실 없이 8.1%의 이송속도 향상의 결과를 얻었다. 마지막으로 제어이득 P=3 인 경우, 가공속도에서 14.5%의 큰 이득을 R_{max} 3.7%의 손실만으로 얻을 수 있었으며, 이는 3.2.2 절의 일반적인 가공속도-가공면거칠기 관계에서 예상되는 15% 수준의 가공면거칠기 손실에 비해 크게 향상된 결과이다. 제어이득에 따른 가공 결과의 차이는, 각각의 제어이득 즉, 변화의 정도에 따라서, 불안정 방전상태를 회복시키는 속도에 미치는 영향이 다르며(제어이득이 클수록 영향이 크게 미침), 1ms 단위 내에서 불안정 방전상태 회복 이후의 가공상태에 미치는 영향에 있어, 방전 에너지에 보다 큰 영향을 주는 피크전류 파라미터 값이 제어이득이 클수록 크기 때문이다. 이들 각각의 결과를 적용하면 황삭, 중삭, 정삭에 적당한 제어이득을 설정할 수 있다. 이와 비교하기 위한 미세제어를 적용하지 않은 일반 가공에서의 다른 가공조건에 대한 가공 결과도 Table 7 에 정리하였다. 본 연구의 실시간 미세제어의 적용 없이 11.9%의 가공속도의 이득을 얻은 V09 I08 O08 가공의 경우, 14.2%, 14.9%의 R_a , R_{max} 각각의 손실이 따랐다. 미세제어를 적용하는 경우 가공속도의 변화 정도도 감소하여 보다 안정적인 가공이 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 WEDM 프로세스의 안정성과 효율, 가공성능 모두를 제한하는, 임의로 예측 불

가능하게 발생하는 WEDM 가공에서의 미소 불안정 영역을 안정화하기 위한 실시간 미세제어 전략을 제시하고 구체화하였으며, PC 기반 실시간 제어 시스템을 통하여 이를 구현하여 다음의 결론을 얻었다.

첫째, WEDM 프로세스의 미소시간 단위의 불안정성을 나타내는 불안정방전율을 정의하고 이를 이용하여, 가공상태를 실시간-모니터링 하였다.

둘째, 미소시간 단위의 불안정성을 호전시키기 위한 제어변수를 설정하고 방전상태와의 관계를 실험적으로 밝혔으며, 이들 관계를 제어 룰로 삼아 실시간으로 불안정성을 호전시킬 수 있는 제어계를 설계, 구현하였다.

마지막으로, 제어 실험을 통하여 불안정방전율이 감소되고, 특히 불안정방전이 오래 지속되는 상황이 크게 억제되는 것을 확률/통계적으로 보였으며, 이를 통하여 WEDM 프로세스의 전반적인 안정성과 효율, 가공성능 모두를 향상시킬 수 있음을 황삭, 중삭, 정삭 각각에의 활용과 함께 검증하였다.

참고문헌

1. Ho, K. H., Newman, S. T., Rahimifard, S. and Allen, R. D., "State of the Art in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1247 - 1259, 2004.
2. Kwon, S. and Yang, M. Y., "Benefits of Using Instantaneous Energy to Monitor the Transient State of the Wire EDM Process," *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, In print, 2004.
3. Kinoshita, N., "Control of Wire-EDM Preventing Electrode from Breaking," *Annals of the CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp. 111 - 114, 1982.
4. Liao, Y. S. and Woo, J. C., "Design of a Fuzzy Controller for the Adaptive Control of WEDM Process," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 2293 - 2307, 2000.
5. Rajurkar, K. P. and Wang, W. M., "On-Line Monitor and Control for Wire Breakage in WEDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 219 - 222, 1991.
6. Chae, H. J. and Lee, S. Y., "Vibration Characteristics and Tension of a Wire in WEDM," *Journal of the KSPE*, Vol. 18, No. 11, pp. 86-92, 2001.
7. Seong, J. K., Kang, M. C. and Hwang, K. H., "Characteristics of Machinability and Operating Condition in Wire-Cut EDM of Die Material," *Proceedings of the KSPE Conference*, pp. 14-18, April 1996.
8. Cho, S. S. and Oh, J. H., "Influence of Current Waveform on Anode Erosion in Wire Electric Discharge Machining," *Journal of the KSPE*, Vol. 18, No. 7, pp. 127-133, 2001.