

## Micro-EDM 채널가공에서 초음파 가진의 영향

임희성<sup>a</sup>, 홍민성<sup>b\*</sup>

## Effect of Ultrasonic Vibration on Micro-EDM Channel

Heesung Lim<sup>a</sup>, Minsung Hong<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Ajou University,  
206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Ajou University,  
206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 7 November 2016  
Revised 12 December 2016  
Accepted 14 December 2016

## Keywords:

Micro-electro discharge machining  
Ultra-sound  
Vibration  
Channel machining  
Bolt-clamped Langevin type transducer  
Confocal laser scanning microscope

## ABSTRACT

Micro-EDM is one of the recent fine-machining technologies. Micro-EDM is widely used in precision processes because products manufactured via EDM are free from workpiece hardness. However, the debris produced during the process cause many problems such as reduced precision of the process. The first solution of this problem involves using the milling hole process. Micro-EDM hole process involves an electrode moving rapidly in the vertical direction via a servo system to disperse debris. However, this process can cause reduced work efficiency owing to contact between the electrode and workpiece. In this study, ultrasonic vibration is added to micro-EDM channel machining. Ultrasonic vibration removes the debris during machining and enables precision machining. Consequently, a clean work environment for the subsequent processes is maintained.

## 1. 서론

Micro-EDM(Micro-electro discharge machining)은 전해 작용으로 생성된 기체 절연막(gas film)의 열에너지를 이용한 특수 가공법으로 이러한 방전 현상은 공작물의 미세 구멍 또는 미세 채널 가공에 적용 가능하다. 이러한 장점은 복잡한 형상을 재료에 구애받지 않고 고정밀도로 가공이 가능하다. 이 때문에 널리 이용되고 있으며, 연구 또한 활발히 진행되고 있는 추세이다<sup>1,2)</sup>.

채널(channel) 형상 가공은 미세 금형(die), 잉크젯 노즐, 반도체, X-ray, 광학부품 등의 미세 구멍과 채널에 그 수요가 점점 늘어나고 있다. 하지만 가공 진행 시 나타나는 단점이 있다.

보통 방전 가공 시 생기는 부산물(debris)을 줄이기 위해 일반 홀 가공이 아닌 밀링 홀 가공 방법을 사용한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 밀링 홀 가공은 일반 홀 가공과 달리 전극이 아래위로 빠르게 움직이면서 발생하는 가공 부산물을 구멍 밖으로 빼내는 작업을 가공 시에 병행한다. 이러한 방법으로 깊은 구멍을 가공할 때 가공 능률을 향상시킬 수 있다. 하지만 이 가공 방법은 전극과 공작물의 충돌에 의한 가공능률 저하가 있을 수 있다. 특히 채널 가공 시에는 옆으로 빠진 부산물이 다음 가공 때 공작물의 가공을 방해할 수 있기 때문에 밀링 홀 가공법을 사용하더라도 잔해들에 대한 문제점이 여전히 남아있는 상태가 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 여러 방법들이 제안되고 있다. 40

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2526

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: mshong@ajou.ac.kr (Minsung Hong).

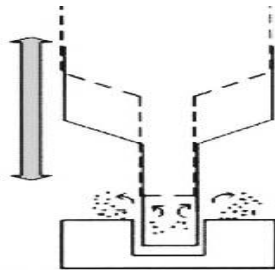


Fig. 1. Milling hole process

kHz 초음파에 대한 영향을 보고한 바가 있지만 전극에 초음파 진동을 가함으로 생기는 재료 제거율 향상을 간략히 보고하였고<sup>[3]</sup>, 미세 축 가공에서 전극 공구에 PZT계 압전소자(piezoelectric actuator)로 100 Hz~1 kHz 진동으로 부산물로부터의 지속적인 가공성을 위한 가공 중 진동 실험을 통해 가공 효율이 약 50% 향상됨을 밝혔다<sup>[4]</sup>. 본 연구에서는 Micro-EDM 채널 가공에 직접 세척용 초음파를 가진하여 실험을 진행하였다. 초음파를 가진함으로써 부산물을 흠어지게 하고 이로 인해 가공성이 개선되었는지 관찰하였다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 Micro-EDM

최근에는 반도체, 항공우주 산업의 발달로 인해 크기가 작으면서도 고기능의 정밀가공에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 정밀가공의 한 가지 방법으로써 방전가공이 주목을 받고 있다<sup>[5]</sup>. 방전가공(electro discharge machining)은 특수 가공법으로 전도성을 가진 재료를 인성, 취성, 경도, 강도와 같은 기계적 성질과 무관하게 가공할 수 있는 장점이 있어 많은 연구가 이루어지고 있다. 이런 장점은 미세가공에서 복잡한 형상을 고정밀도로 가공이 가능하므로 널리 이용되고 있다. 미세방전가공(Micro-EDM)은 단발 방전 에너지의 극소화, 정밀화된 위치결정, 방전주기의 극소한 작업을 수행함으로써 수십 마이크로에서 수백 마이크로미터 정도의 크기 또한 가공 가능하다.

방전가공은 공작물을 양극(+), 가공전극을 음극(-)으로 하여 절연액 안에서 가공하는 가공이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 가공전극에 전류를 가하여 거리가 가까워질 때 발생하는 펄스성 방전으로 인해 공작물 표면이 고온으로 되어 침식 이온화 한다.

방전가공에서 중요한 요소는 식 (1)에 보이는 축전 용량이다. EDM의 가공은 펄스 방전이 누적되어 피가공물이 용융되는 현상을 이용한 가공법이다. 그러므로 펄스 방전은 방전에너지에 의존적이다.

$$P_{single} = (C + C') \frac{e_g^2}{2} \tag{1}$$

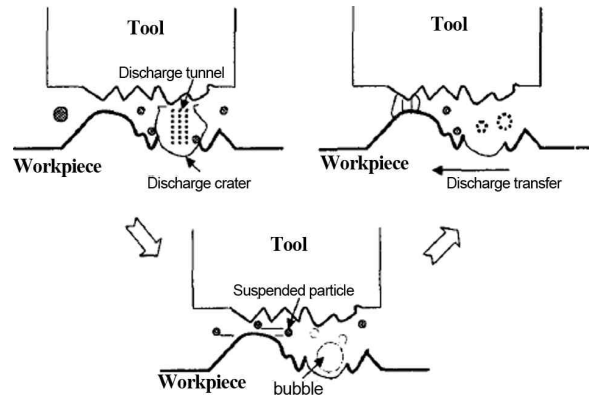


Fig. 2. Principle of Micro-EDM<sup>[6]</sup>

$e_g$ 는 방전전압,  $C$ 는 RC 회로의 콘덴서 용량  $C'$ 은 전극과 절연액 사이에 생성되는 모든 콘덴서 용량의 합이다. 마이크로 수준의 방전에너지를 얻기 위해서는 방전전압 자체를 낮추거나 전체 콘덴서 용량을 감소시켜야 한다<sup>[5]</sup>.

Micro-EDM의 가공전극의 재료로는 방전가공 특성, 가격, 피삭성 등의 요인에 의해 어느 정도로 제한되기도 한다. 현재 사용되고 있는 전극 재료는 동, 그래파이트(graphite), 은텅스텐, 동텅스텐이 대표적이지만 강, 황동 등이 사용되는 경우도 있다. 전극재와 피가공물체의 각종 조합에 대한 전극 극성의 선정과 전극 저소모 정도는 대단히 중요하다. 전극 저소모는 전극소모비 1% 이하의 조건을 의미한다. 전극 저소모 가공이 가능한 재료는 동, 그래파이트, 동텅스텐, 은텅스텐이 있다<sup>[5]</sup>.

### 2.2 초음파의 세척작용

일상생활에서의 초음파는 다양한 분야에서 널리 쓰이고 있는 중이다. 제품 생산라인에서의 불량품 검사, 항공기나 선박 원전등과 같은 산업분야에서의 주기적으로 이루어지는 안전도 검사를 위한 수단으로도 쓰이며 의료분야 및 식품생산 안에서도 초음파는 널리 쓰이고 있다<sup>[6]</sup>. 본 연구에서는 초음파의 입자 가속도 효과를 이용하여 분산효과와 비접촉 세척이 가능한 특징을 사용하였다.

초음파 세척은 주로 초음파의 공동현상(cavitation)에 의해 이루어진다. 공동현상은 초음파가 용액 중으로 전파될 때 초음파의 큰 압력 변화에 의해 미세 기포군이 생성되고 소멸되는 현상으로 매우 큰 압력과 고온을 동반한다. 이 압력과 고온은 수백 분의 1초에서 수천 분의 1초 단위의 짧은 시간 동안 발생한다. 이러한 강력한 힘에 의해 오염물질을 분산시킬 수 있는 것이다. 한편 고주파의 경우에는 초음파의 특성상 이러한 종류의 공동현상은 일어나지 않고 액체 분자의 입자 가속도가 매우 커지게 된다<sup>[7]</sup>.

공동현상에서 기포의 생성과정은 다음과 같다.

- a. 용액 내에 강력한 초음파를 조사하면 압축력(정압)과 팽창력(부압)이 반복적으로 나타나게 된다.

- b. 부압 주기 때에 액 중의 미세한 이물질 혹은 기체 분자를 중심으로 기포가 발생된다.
- c. 이 기포는 다음의 압축 주기 때에 고압으로 압축된다. 압축력이 용액의 표면장력보다 작을 때 기포는 소멸되지 않는다.
- d. 기포는 다음의 부압 때 다시 팽창한다.
- e. 부압의 세기가 어느 수준 이상이면 기포의 입경은 커진다.
- f. 이 과정을 무수히 반복하면서 점점 입경이 커지게 된다.
- g. 어느 일정 압력(용액의 표면장력) 이상이 되면 이 기포는 단번에 수축 폭발하면서 매우 큰 충격파를 일으키게 된다.

이와는 별도로 고주파에서 미세음향 유동(acoustic micro-streaming)이 만들어지는데 이 유동은 고체면에서의 경계층 두께가 매우 작아서 초음파의 주파수가 1 MHz일 때 수 마이크로미터의 미세 입자도 표면에서 제거하는 능력을 가지게 된다. 저주파 초음파에서는 기포의 파열에 의한 충격파가, 고주파에서는 미세음향 유동이 입자 제거의 주된 메카니즘이다. 이러한 공동현상의 강도에 영향을 미치는 조건 중 본 연구에서 가장 중요하게 생각하는 요소는 주파수와 설치방법이다.

초음파 주파수의 경우, 공동현상 강도는 주파수가 낮아질수록 강해지며 100 kHz 이상에서는 공동현상이 거의 일어나지 않는다. 그러나 주파수가 높아질수록 기포의 크기가 미세해지므로 정밀세척에 유리하다. 설치 방법의 경우, 피세척물은 용액을 통하여 초음파와 접촉하며 초음파의 직진성 또한 영향을 주게 된다. 이에 대한 고려가 미흡함으로써 효과적인 세척이 이루어지지 않는 경우가 많다<sup>[8]</sup>.

### 2.3 Micro-EDM과 초음파

Micro-EDM은 비접촉 가공 방법이며 변형 없이 미세가공을 할 수 있다는 강점을 가지고 있다. 하지만 가공 중 부산물로 인해 가공 능률이 떨어진다. 본 연구에서의 목적은 이러한 문제점에 초음파를 부가함으로써 부산물의 산개를 통해 Micro-EDM의 채널(channel) 가공의 능률을 향상시키는 것이다.

미세방전 가공 중에 부산물이 발생하게 되면 가공에 방해 요소가 된다. 부산물은 공구 옆면에 불필요한 2차 방전을 일으켜 전극 소모 속도를 증가시키고, 불필요한 방전의 지속은 버(burr)가 생성되기에 충분한 조건이 된다. 버가 생성되면 전극 이동이 원활치 못하게 되고, 방전지속으로 인해 가공면 주위가 그을음이 생겨 미세한 가공이 어렵게 된다. 또한 일반적으로 Micro-EDM은 Z축 밀링 홀가공을 통해 부산물들을 어느 정도 배출해낸다. 하지만 가공깊이가 깊어질수록 홀 가공의 영향이 반감되어 부산물 배출에 도움을 주지 못한다<sup>[9]</sup>. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 초음파를 이용한다면 공동현상으로 인한 부산물의 산개가 원활해진다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 장비

본 실험에 사용된 Micro-EDM장비는 Fig. 3에서 보는바와 같이 (주) Hybird Precision에서 제작한 Hyper-15를 사용하였으며, 초음파 발생기(generator)는 UI-Tech의 See Sonic 시리즈의 중간 및 고주파 발생기를 사용하였다.

본 실험에서 사용하게 될 진동자는 볼트 조임 랑즈방형(langevin type) 진동자로서 하이파워 용도를 목적으로 개발한 PZT계 압전소자를 사용한다. PZT는 압전효과가 크므로 높은 효율과 안정된 출력을 얻을 수 있어 각종 초음파 발생기에 널리 사용되고 있다. 사용된 초음파 사양은 132 kHz와 1600 kHz로서 Table 1에서와 같이 공동현상과 분자 가속도의 영향이 추가되었다.

EDM의 가공방향은 X축 채널 가공으로 설정하고 초음파의 발생 방향도 가공방향과 평행하게 일치시킨다. 초음파 가진을 평행하

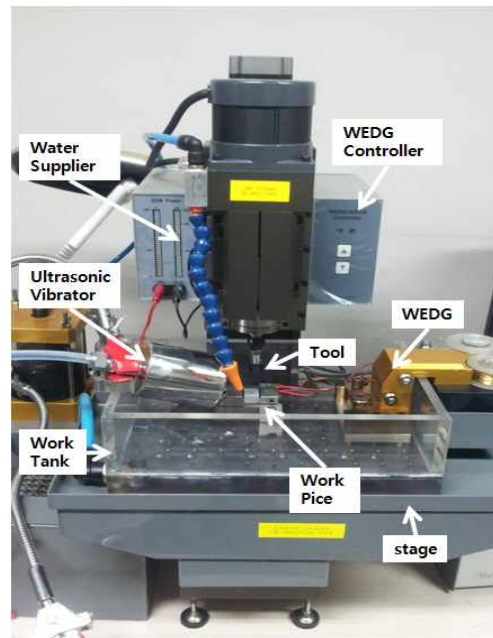


Fig. 3 Micro-EDM set-up

Table 1 Characteristics of vibrator

	40 kHz	Muti-Fq.	100 kHz	1 MHz
Cleaning effects	Cavitation	Cavitation	Cavitation	Acceleration
Particle acceleration	2500 g	2500~5000 g	5000 g<	10000 g<
Remov. particle size	2 μm<	1.5 μm<	1 μm<	0.1 μm<
Usage	General clean	Precision clean	Precision clean	Ultra-precision clean

게 적용한다면 같은 시간대 초음파 영향을 극대화시킬 수 있다. 본 실험에서 사용된 시편은 Fig. 4에서 보는 바와 같은 규격으로 각각 Al, Cu, SUS 재질로 실험을 하였으며, 각 시편당 3번씩 가공한 후 가공된 홈의 가공 깊이 및 표면거칠기를 측정하고 이들의 평균값을 도출하였다.

Micro-EDM 가공은 전기저항을 이용한 가공이므로 비전기저항에 따른 가공률 차이가 있으며, 전기적인 침식에 의해 재료를 제거하기 때문에 피가공물의 전기적인 저항이 중요하게 작용한다. 따라서, 시편의 전기저항이 높다면 가공률이 현저하게 떨어진다. 이것은 전기저항이 높아 한 번의 방전으로 인해 고압이 전도되는 영역이 좁아져서 용융되는 부분이 적어지기 때문이다.

### 3.2 실험 방법

Micro-EDM의 채널링 가공에서 초음파 가진 실험은 각각의 시험편을 이용하여 우선 초음파 가진을 하지 않은 상태로 3개의 시편들을 가공하였고, 이후 고주파(1.6 MHz), 저주파(132 kHz) 순서로 시편들을 5 W, 10 W의 에너지로 각각 가공하였다. 마이크로 채널 가공조건은 Table 2와 같다. 가공을 진행한 후 CLSM (confocal laser scanning micro-scope)을 통해  $\times 10$  배율에서 일정하게 표면거칠기를 측정하였다. 또한 CLSM 자체에서 측정 영역 설정에 따라서 값이 상이하게 나오므로 표면거칠기 측정 시 가공면에서 측정하고자 하는 위치를 동일하게 설정하여 측정하였다.

Micro-EDM 전극은 제작한 후 가공 준비를 할 때 클램핑 (clamping)이나 척킹(chucking) 오차로 인해 공구와 공작물 사이의 방전간극이 균일하지 않게 된다. 방전간극이 균일하지 않게 되면 가공 진행 중에 필요 이상의 방전이 발생하고 최종품의 형상 또한 원하지 않는 방향으로 될 가능성이 크다. 이러한 문제를 해결

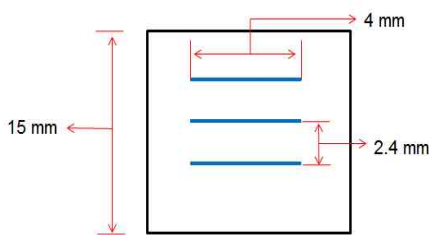


Fig. 4 Dimension of workpiece

Table 2 Experimental conditions

Voltage (V)	200
Resistance (K $\Omega$ )	1
Spindle speed (rpm)	500
Polarity	DCSP
Machining depth ( $\mu$ m)	200
Machining length ( $\mu$ m)	3500

하기 위해 WEDG(wire electro discharge grinding) 가공법이 제안되었다.

WEDG는 구리선으로 공구를 회전시키며 표면을 가공한다. 공구 한쪽 끝을 가공하게 되면 전극을 잡아주는 콜릿(collet)의 척킹 오차를 효과적으로 줄일 수 있으며 기존보다 정밀하고 미세한 가공을 진행할 수 있다. 본 실험에서 사용된 공구는 직경 500 mm의 공구의 앞부분을 직경 300 mm로 가공하여 실험을 진행하였다.

### 3.3 실험 결과

Table 3과 4는 가공된 시편의 가공깊이와 표면거칠기의 평균값들이다. 이를 도표로 표현한 Figs. 6과 7을 보면 알 수 있듯이 초음파를 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때, 고주파수의 초음파를 사용하였을 때와 저주파수의 초음파를 사용하였을 때의 차이는 확연히 보였다.

초음파를 사용하지 않았을 때와 비교해 초음파를 사용하였을 경우 가공깊이는 3종류의 시편들 모두 더욱 깊은 가공성을 보여주었고, 표면거칠기 면에서도 시편들과 마찬가지로 전체적으로 표면거칠기 수치가 일정하게 향상됨을 확인할 수 있었다.

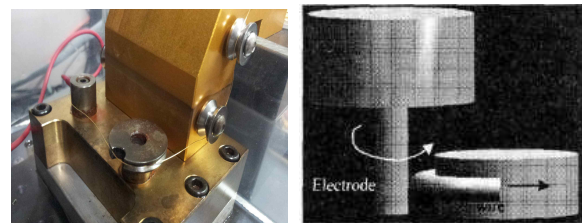


Fig. 5 Process of WEDG

Table 3 Average surface roughness of workpieces

	SUS Roughness (mm)	Cu Roughness (mm)	Al Roughness (mm)
No ultrasound	4.0063	1.8923	2.1033
High freq. (5W)	3.1857	1.6763	1.7943
High freq. (10W)	3.3167	1.3030	1.6960
Low freq. (5W)	2.9157	1.5477	1.6200
Low freq. (10W)	3.1693	1.5143	1.7227

Table 4 Average machining height of workpieces

	SUS Height (mm)	Cu Height (mm)	Al Height (mm)
No ultrasound	8.5740	28.8490	43.2000
High freq. (5W)	10.5183	35.3097	49.8837
High freq. (10W)	13.1533	34.5560	52.9537
Low freq. (5W)	12.8200	39.1443	61.2630
Low freq. (10W)	13.3628	41.4013	60.8873

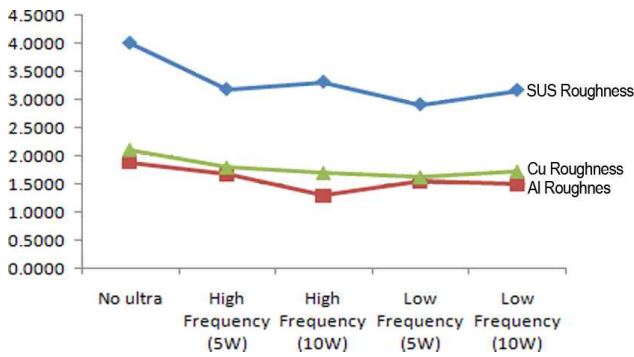


Fig. 6 Graph of average roughness of workpieces

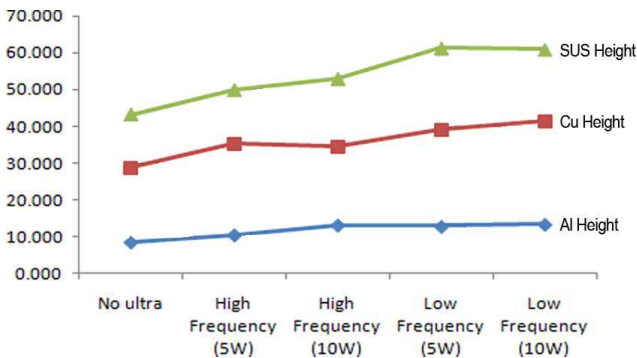


Fig. 7 Graph of machining height of workpieces

또한 고주파수의 초음파와 저주파수의 초음파를 비교해 보았을 때 전체적으로 고주파에서보다 저주파에서 가공성이 조금 더 향상됨을 볼 수 있는데 이는 저주파수에서만 나타나는 공동현상과 고주파수에서 나타나는 미세유동의 차이로 생각된다. 3가지 시편의 전기저항에 따라 SUS가 확연히 다른 시편들에 비해 가공성이 떨어짐을 알 수 있었고 Cu와 Al은 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 4. 결론

본 논문은 미세한 정밀 가공에 많이 사용되는 Micro-EDM을 이용하여 마이크로 채널의 가공성에 대하여 연구하였다. 가공 중에 발생하는 부산물이 공작물 주위에 쌓여 채널의 가공성에 미치는 악영향을 해결하기 위한 방법 중 하나로 초음파 가진을 통하여 가공성 향상을 꾀하였다. 본 연구에서는 두 가지 초음파 가진을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 초음파를 사용하지 않았을 때와 비교해 초음파를 사용하였을 경우 가공깊이는 3종류의 시편들 모두 더욱 깊은 가공성을 보여주

었고, 표면거칠기 면에서도 시편들과 마찬가지로 전체적으로 표면 거칠기 수치가 일정하게 향상됨을 확인할 수 있었다.

(2) Micro-EDM을 이용한 채널 가공 시 초음파를 이용하여 부산물을 제거하게 되면, 동일조건에서 가공깊이는 깊어지고, SUS는 최대 28%, Cu는 32%, Al은 23% 정도 표면거칠기가 좋아지는 것을 확인하였다.

(3) 3가지 시편의 전기저항에 따라 SUS가 확연히 다른 시편들에 비해 가공성이 떨어짐을 알 수 있었고, Cu와 Al은 큰 차이를 보이지 않았다.

#### References

- [1] Wuthrich, R., Fascio, V., 2005, Machining of Non-conducting Materials using Electrochemical Discharge Phenomenon-an overview, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, 45:9 1095-1108.
- [2] Zheng, Z.-P., Cheng, W.-H., Huang, F.-Y., 2007, 3D Microstructuring of Pyrex Glass using the Electrochemical Discharge Machining Process, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17:5 960-966.
- [3] Park, M., Seo, D., Lee, S., Chu, C., 2007, Machining Characteristics of Micro-EDMed Holes According to Dielectric Fluid, Capacitance and Ultrasonic Vibrations, *KSPE*, 24:7 42-49.
- [4] Takashi, E., Takyuki, T., Kimiyuki, M., 2008, Study of Vibration-assisted Micro-EDM - The Effect of Vibration on Machining Time and Stability of Discharge, *Prec. Eng.*, 32 269-277.
- [5] Park, M., Chung, D., Kee, K., Chu, C., 2011, Micro Hole Machining by EDM Using Insulated Tool Combined with Ultrasonic Vibration of Dielectric Fluid, *KSMTE*, 20:2 180-186.
- [6] Intelligent Sensing & Nondestructive Evaluation Laboratory 2016, 2016. 10. 01, *Ultrasonic Engineering* <<http://isnde.hanyang.ac.kr/>>.
- [7] Kim, H. S., Kim, J. M., 2001, Performance Improvement of Ultrasonic Washing Machine for LCD Manufacturing Process, *Korea Display Industry Association 6th Next-generation Flat Panel Display Technology Workshop*, 266-271.
- [8] Heatwell, 2008, 2016. 10. 01, *Ultrasonic Cleaner*, <<http://blog.daum.net/seggicentury0080/8929770>>.
- [9] Kim, J., Battseren, S., Hong, M., 2010, A Study on the Micro Channel Machining using Micro-EDM, *KSMTE Autumn Conf.*, 466-469.