

방전가공기용 액체 절연재료의 아크 방전 특성 연구

논문
8-5-4

A Study on the Arc Discharge Characteristics of Liquid Insulating Materials for Electrical Discharge Machine

김상현*, 김해종*, 마대영*, 신태민*
(Sang-Hyun Kim, Hae-Jong Kim, Dae-Young Ma, Tae-Min Shin)

Abstract

This paper deals with the arc discharge characteristics of kerosene oil as a basic study on electrical discharge machine. Using needle electrode the discharge voltage, discharge current, discharge energy and the shape of discharge crater are measured.

In consequence, it becomes clear that the discharge crater(depth, height, diameter) is depending on the discharge energy.

Rapid increase in depth, height and diameter of discharge crater was observed during initial discharge, where discharge energy is large. However, rather slow decrease of those values was found when discharge energy is low or N is more than 3.

As the ratio of I_p/T_{on} increase, the shape of discharge crater gets near circle. The protuberances of the discharge crater were not formed by the melted needle electrode but by the that of work piece.

Key Words (중요단어): Arc discharge characteristics(아크 방전 특성), Liquid insulating materials (액체 절연체), Discharge crater(방전흔적), Discharge energy(방전에너지).

1. 서 론

오늘날의 지속적인 경제 성장에 따라 산업현장은 노동 집약에서 지식 집약으로 대변혁을 일으키면서 기기의 전 자동화, 다양화, 고 정밀도화가 강하게 요구되고 있는 추세에 있다. 이러한 추세에 부합하여 선진 각국에서 본격적으로 연구하고 있는 것 중의 하나가 방전가공기(electrical discharge machine, EDM)¹⁾⁻³⁾이다.

방전가공기는 절연성 액체중에 전극과 피가공물을 넣고 지극히 짧은 전극 간격에서 발생하는 과도 아크방전의 수천 °C의 열 에너지를 이용하여

초경합금 등과같은 경질 금속의 구멍뚫기, 절단 등의 가공을 할수 있는 유일한 소모 가공기로서 형조 방전기와 와이어 컷 방전 가공기가 있다.

이와같은 방전가공기의 연구는 1970년대 이래 스위스,일본,독일을 중심으로 본격적인 연구⁴⁾가 진행 되었다. 현재는 독일의 Siemens사, 스위스의 Agie, Charmilles사, 일본의 미쯔비시, Sodick, 화학, Japax사 등이 본격적으로 연구 개발하고 있다.

최근에 개발된 방전가공기의 가공 속도는 300 [mm/min]⁵⁾으로 과거 15년 동안 10배이상 빨라졌고, 가공 정밀도 역시 $\pm 1-2$ [μm]⁶⁾ 정도의 혁신적인 향상을 이루고 있는 실정이다. 국내의 경우는 외국에서 도입한 댓수도 많지 않으며 국산화가 거의 불모지인 상태를 면치 못하고 있다. 따라서 고도의 정밀도 보장을 요구하는 방전가공 기술의 연구 개발과 급속한 발전이 없이는 이제 공업도 성숙 단계에 진입하는 것은 극히 어려운 실정이다.

* : 경상대학교 공대 전기공학과

** : 경상대학교 공대 전자공학과

접수일자 : 1995년 2월 10일

심사완료 : 1995년 7월 8일

한편, 방전가공기에 있어서는 정밀도 향상과 비용절감 더우기 가공 속도의 향상과 운전상의 안전성을 위하여는 방전가공기술의 핵심인 전기적인 방전(discharge), 특히 아크 방전기술의 확립 및 이것을 지지하는 재료의 개발이 요구되고 있다. 그러나 방전가공기는 1943년 러시아의 라자렌코 부부가 RC 회로를 이용한 아크 방전으로 연질의 전극으로 경질의 금속을 뚫는데 성공한 것을 발단으로 아크 방전과 급형 가공이 급속히 집진하기 시작 하였으므로 불과 50년에 불과하여 급후 연구 개발의 문제는 수없이 남아 있으며 방전현상이 액체중의 짧은 전극간격 [μm] 에서 발생하고 단시간 [μs] 방전의 반복을 동반하는 현상이기 때문에 측정이 곤란하며 더우기 물성분에 입각한 폭넓은 기초 연구의 부족으로 복잡하고 고도의 정밀성을 요구하는 기술에 응하기는 어려운 실정이다.

본 연구는 이와같은 관점에서 방전가공기의 개발을 위한 기초 연구로서 방전가공기의 가공특성 및 제품품질의 향상을 꾀하기 위하여 방전횟수, 방전전압 및 방전전류 등을 변화하여 방전 가공면의 형상과 단발 방전의 특성 등을 연구 하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치의 주요 부분으로서 전원부, 구형파 제어부, 전극부로 나뉘어져 있다.

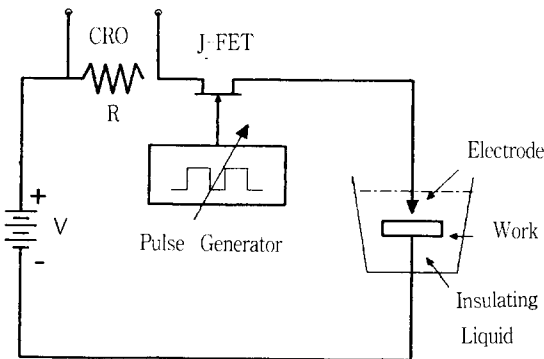


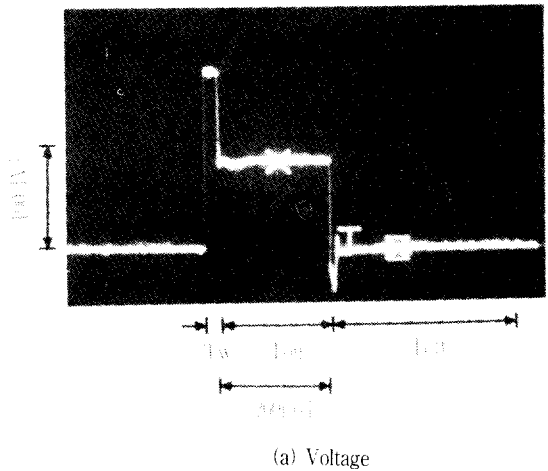
그림 1. 실험장치

Fig. 1. Experimental apparatus.

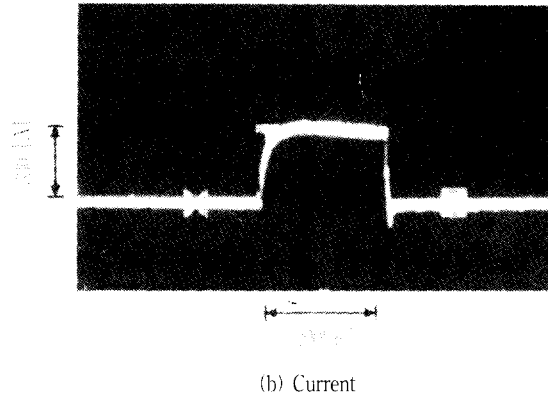
가공 전원은 직류전압을 대전력용 트랜지스터(IPFP 450: 내압 500[V], 통전저항 0.4 [Ω], 최대전류 14 [A])의 통전 시간을 펄스 발진기로 제어하여 스위칭하고 직류 전원을 단속하는 트랜-

지스터 방전회로이다. 또한 대전력용 트랜지스터 15개를 병렬연결 하고, 트랜지스터의 갯수를 조정하여 최대전류를 제한 하여 단발의 구형파 전류를 전극간에 공급하였다.

인가전압은 직류 170 [V]이며 방전전류(I_b)는 80-400 [A], 방전시간(T_{on})은 50-1000 [μs] 로 가변하여 실험 하였으며 이때의 방전전압 및 방전전류 파형은 그림 2와 같이 축적형 오실로스코프(Tektronix 2230, Tektronix 社)로 관측하였다.



(a) Voltage



(b) Current

그림 2. 방전전압(V)과 전류(I) 파형

Fig. 2. Discharge voltage(V) and current(I) wave.

즉 절연액체에 그림 2의 a)와 같은 직류전압을 인가하면 무부하전압 인가시간(T_w)후 절연이 파괴되어 전압이 급히 감소되고 이때 전극간에 그림2의 b)와 같은 대전류의 구형파 과도 아크 방전 전류가 방전시간(T_{on})동안 흐른다. 그러나 다시 절연액체가 정지시간(T_{off})동안 절연이 회복되고 재차

절연액체에 전압이 인가 되고 있다. 또한 방전에너지는 축적형 오실로스코프로 관측된 방전전류, 방전전압 및 방전 시간의 곱으로 구했다.

전극으로는 Fe-Ni 및 Cu의 침전막(약물반경:30, 직경:0.8 [mm])을 사용 하였으며 전극의 구성은 역극성(공작물에 -)으로 하였고, 전극계의 배치는 침전막이 상부, 공작물이 하부로 되는 수직 배치이며 전극 간격의 조정을 마이크로메타(오차: 1 [μm])에 의하여 영점을 구한후 전극 간격을 일정한 거리(5 [μm])로 유지시켰다. 절연 액체로서는 비저항이 2×10^6 [Ω·cm]인 캐로신유를 사용하였다.

공작물로서는 스테인레스강 평판전극을 사용 하였으며 공작물의 표면은 입자의 크기가 1.0, 0.3, 0.05 [μm]인 알루미늄 분말과 다이아몬드 페스트(3.1 [μm])연마액에 의해 차례로 연마기에서 연마를 한후 아세톤에 넣어서 5분간 초음파 세척하고 건조시켰다. 이때의 표면조도(表面粗度)는 $R_{max} = 0.094$ [μm] 이다.

단발 방전후의 공작물 표면의 방전흔적은 주사전자 현미경(SEM, JSM6400, Jeol社), 축침식 표면 조도계(Surfatest 402, Mitutoyo社) 및 비접촉식 표면 조도계(Nanosurf 488, S.A.S社)로 관측 하였다. 방전 흔적의 용융부의 성분 분석은 EDAX(Energy Dispersion Analysis X-ray, JSM6400, Jeol社)로 조사 하였다.

3. 실험결과

단발 방전후의 방전흔적을 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰하면 그림 3과 같이 중심부는 아크열에 의해 직경 D [mm], 깊이 h_1 [μm]으로 표면이 침식되고 주변은 높이 h_2 [μm]의 용융부가 발생한다.

이와 같은 방전흔적에 대한 방전에너지의 의존성은 이미 增尺⁷⁾, 木本⁸⁾에 의한 보고가 있지만 여기에는 실제의 방전흔적의 형상을 보다 정밀하게 관측하기 위하여 측정법에 따른 방전흔적을 조사 하였다.

그림 4, 그림 5,에 각각 방전흔적의 깊이 [h_1], 높이 [h_2]를 축침식 및 비접촉식 표면조도계를 사용하여 비교측정한 결과를 표시한다.

그림에서 알수 있는 바와 같이 어느 경우이나 방전에너지의 증가에 따라 방전흔적은 증가하나, 동일한 방전에너지에서는 비접촉식에 의한 방전흔적의 깊이가 약 1.5배, 높이가 약 1.3배 정도 축침식의 경우보다 큰 것을 알수 있다. 그러나 방전흔

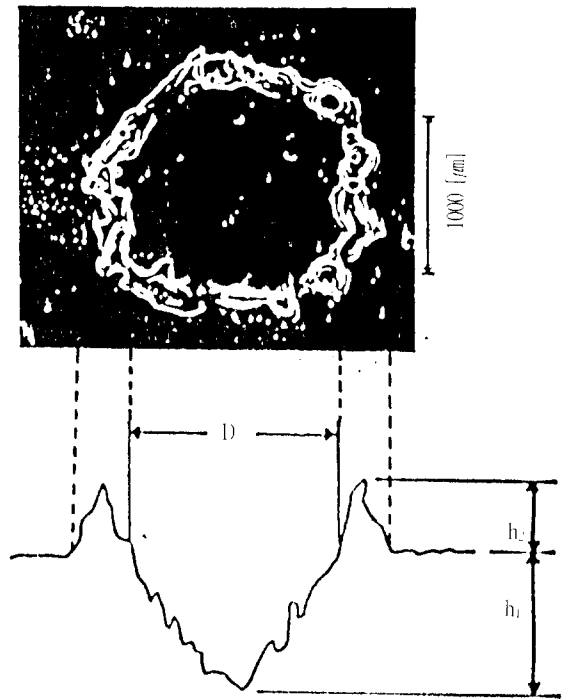


그림 3. 방전흔적의 단면도
Fig. 3. Section of crater.

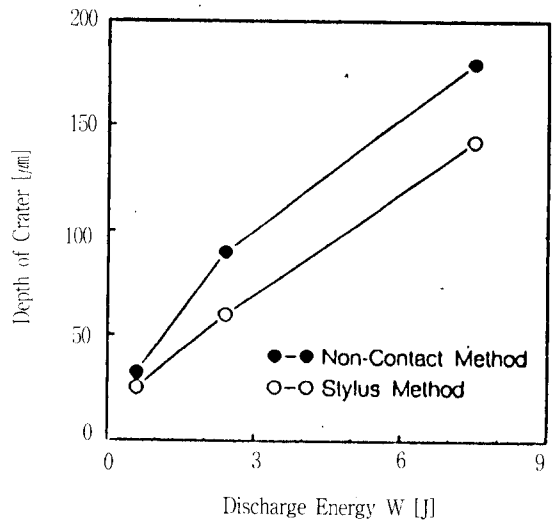


그림 4. 축침식 및 비접촉식에 의한 방전흔적 깊이
Fig. 4. Depth of crater by stylus and non-contact method.

적의 직경 D는 측정법에 관계없이 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과는 비접촉식 표면 조도계의 경우는 빛이 방전흔적의 중앙부를 통과하여 최

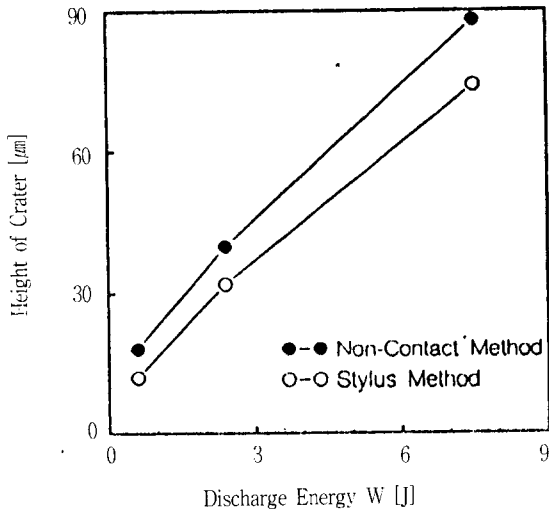


그림 5. 축침식 및 비접촉식에 의한 방전흔적 높이
 Fig. 5. Height of crater by stylus and non-contact method.

대치를 측정할 수 있는 것에 비해 축침식 표면 조도계의 경우는 축침(곡률반경: 10 [μm])의 통과 단면 형상에 따라 반드시 최대치를 측정하지 못하기 때문이라 생각된다. 따라서 본 연구는 측정 오차를 최소화하기 위하여 비접촉식 표면 조도계에 의한 측정치만을 채택했다.

일반적으로 절연 액체의 방전특성은 불순물 입

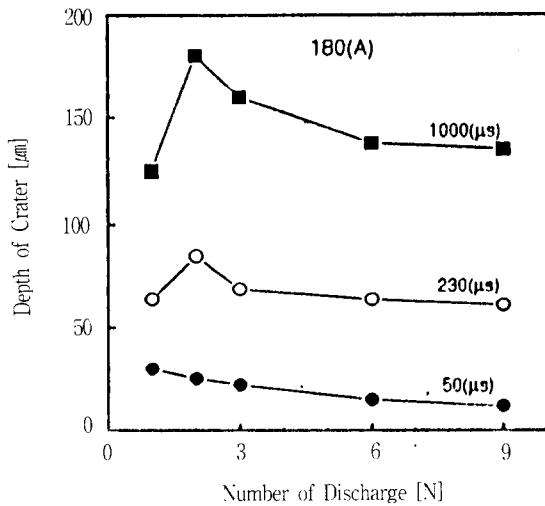


그림 6. 방전흔적 깊이의 방전횟수 의존성
 Fig. 6. The discharge numbers dependence of the depth of crater.

자, 흡착가스 등의 2차적 인자¹¹⁾는 물론 전극 재질, 형상 등의 전극 효과의 영향을 크게 받기 때문에 이 점에 대하여 검토 하였다. 절연 액체인 케로신 유 중에서 전극 간격을 5 [μm], 방전전류(I_p)를 180 [A]로 일정히 하고 방전시간(T_{on})을 50, 230, 1000 [μs]로 가변 하였을 경우의 방전흔적인 h₁, h₂ 및 D의 방전횟수 의존성을 그림 6, 그림 7, 그림 8에 각각 표시한다.

그림에서 알 수 있는바와 같이 어느 경우이나

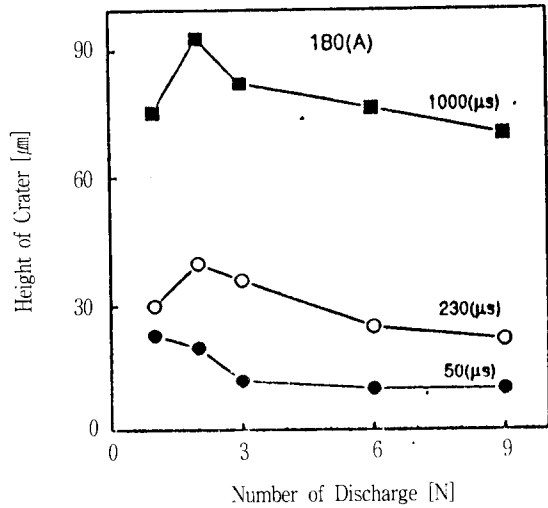


그림 7. 방전흔적 높이의 방전횟수 의존성
 Fig. 7. The discharge numbers dependence of the height of crater.

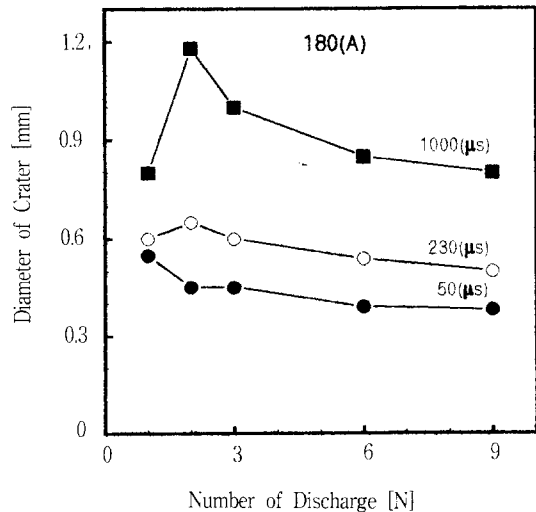


그림 8. 방전흔적 직경의 방전횟수 의존성
 Fig. 8. The discharge numbers dependence of the diameter of crater.

방전시간이 증가함에 따라 방전흔적인 h_1 , h_2 , D 는 증가하고 있으나 방전횟수의 증가에 대해서는 약간의 차이를 나타내고 있다. 즉 방전 시간이 긴 경우 초기 방전의 경우($N=2$)는 방전흔적이 급격히 커져 피크치가 존재하는 형이 되지만 그 이상에서는 방전횟수와 더불어 방전흔적 h_1 , h_2 , D 모두 완만히 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 방전시간이 짧은 $50 [\mu s]$ 의 경우는 방전흔적 h_1 , h_2 , D 모두 방전횟수와 더불어 약간 감소하는 경향만을 표시한다. 이와같은 현상은 그림 9와 같이 방전시간 $[T_{on}]$ 을 $230 [\mu s]$ 로 일정히 하고 방전전류 $[I_p]$ 를 90, 180, 400 [A]로 가변해도 유사한 경향을 표시한다. 한편 방전전류 $[I_p]$ 180 [A], 방전시간 $[T_{on}]$ 1000 [μs]인 경우 단발 방전횟수에 따른 침전극 선단의 형상을 전자현미경(SEM)으로 관찰하면 그림 10과 같다.

초기 방전의 경우는 침전극의 선단 반경이 처너 전극($N=1$)보다 급격히 커지나 $N=3$ 이상의 경우 방전횟수와 더불어 전극 주위에 용융부의 굴곡과

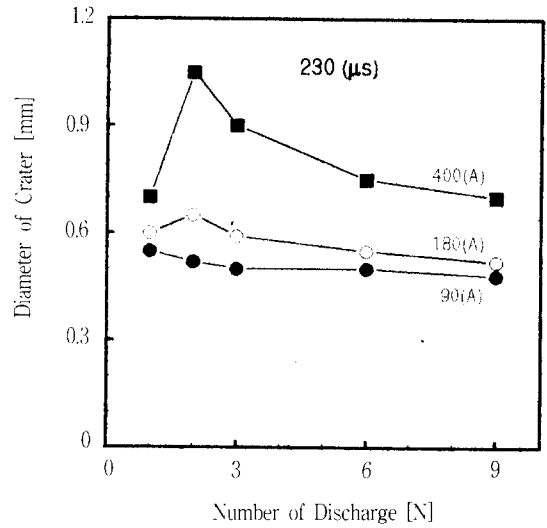


그림 9. 방전흔적 직경의 방전횟수 의존성
Fig. 9. The discharge numbers dependence of the diameter of crater.

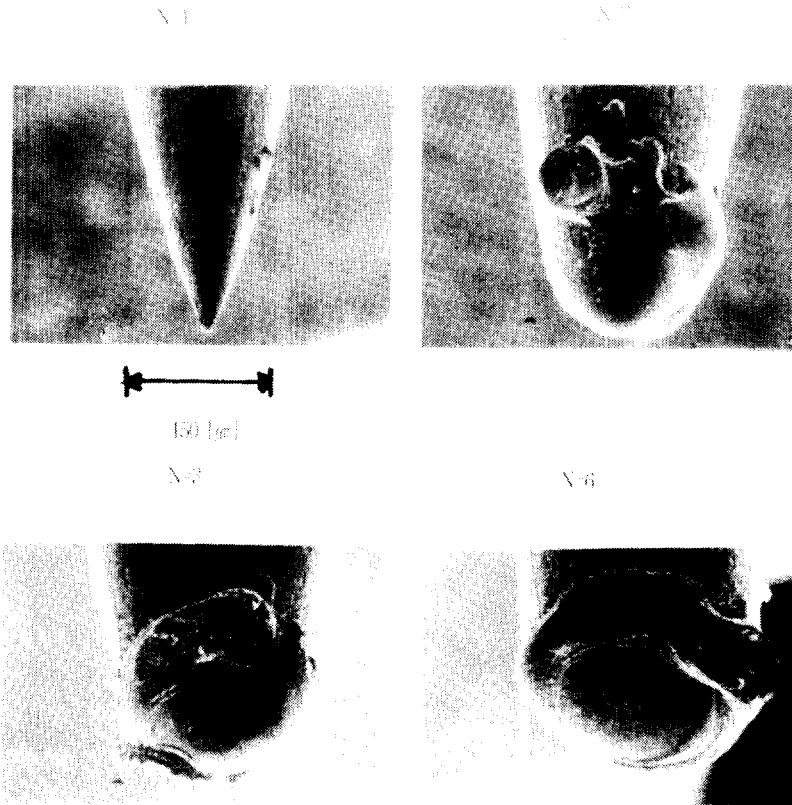


그림 10. 방전횟수와 침전극의 형상
Fig. 10. Number of discharge and shape of needle electrode.

돌출이 심해져 결함이 증가하고 있다. 이때 방전횟수와 더불어 절연과피 전압도 저하하고 있다. 이와 같은 결과는 모의로 침전단을 변화시켜 측정환 [1.5 μ m¹⁰⁰]의 결과와도 일치하고 있다.

이상의 사실로부터 방전시간이 긴경우나 방전전류가 큰 경우와 같이 방전에너지가 큰 경우의 초기방전 중에는 침전극의 곡률반경의 증가로 절연과피 전압이 높아져 방전에너지가 증가하고 이에 따라 방전흔적 h_1, h_2, D 는 커지나, $N \geq 3$ 인 경우와 방전시간이 짧은 경우와 같이 방전 에너지가 작은 경우는 침전극 주위의 결함이 방전횟수와 더불어 증가하여 절연과피 전압이 낮아져 방전흔적은 완만히 감소할 가능성이 있다. 그러나 방전시간이 긴 경우의 초기 방전에서는 정상방전 보다는 그림 11과 같은 이상방전이 발생하고 있어 방전흔적의 오차가 생길 가능성도 있어 현재 검토중이다.



그림 11. 이상 방전흔적
Fig. 11. Crater of abnormal.

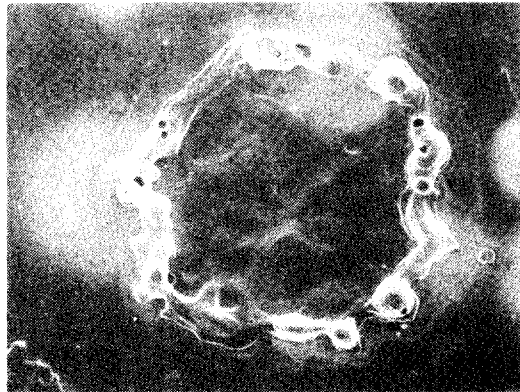
- a) Pulse(180 [A], 170 [V])
- b) D.C(20 [mA], 2000 [V])

방전흔적의 형상은 실험 조건에 따라 크게 다르나 일반적으로 방전전류와 방전시간에 크게 의존하고 있다. 즉 구형과 펄스 전압(180 [A], 170 [V]) 인 경우 I_p/T_{on} 값이 크면 그림 12의 a)와 같이 거의 원형에 접근하나 작을 경우는 찌그러진 형태를 나타낸다.

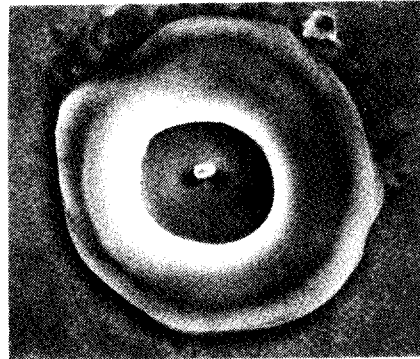
그러나 직류 고전압(20 [mA], 2 [kV])을 인가한 경우는 그림 12의 b)와 같이 방전흔적의 형상은 펄스 전압을 인가한 경우보다 더욱 원형에 접근하나 크기가 작고 방전흔적은 다수개가 산발적으로 발생하고 있어 실용상 응용에는 곤란한 것을 알수있다.

한편 방전흔적의 주변 용융부가 상부 침 전극의 성분인지, 하부 공작물인 스테인레스강(Fe-Cr-Ni-Si)의 성분인지를 파악하기 위하여 EDAX로 조사한 것을 그림 13에 표시한다.

지금 까지는 Fe-Ni의 침전극을 사용 하였으나 스테인레스강 공작물 성분과의 비교 검토를 위해 Cu 침전극을 사용 하였다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 Cu 성분은 없고 Fe, Cr, Ni, Si성분만이



1000 [μm]
(a) Pulse(180[A], 170 [V])



10 [μm]
(b) D.C (20[mA], 2 [kV])

그림 12. 방전흔적
Fig. 12. crater.

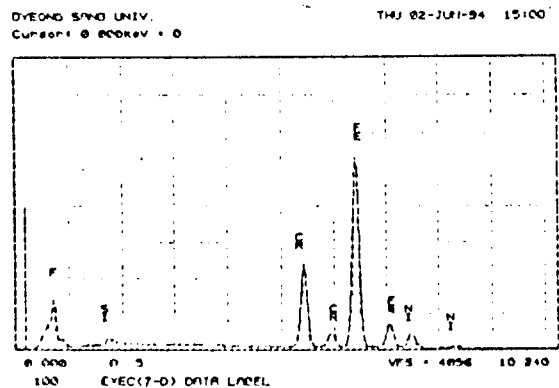


그림 13. 방전흔적 성분
Fig. 13. Element of crater.

검출된 사실로 부터 상부의 Cu 침전극이 용융 비산되어 하부의 스테인레스강 전극에 부착되어 용융된 것이 아니라 하부 공작물인 스테인레스강이 용융된 것임을 알 수 있다. 즉 액체중의 과도 아크 방전의 경우는 음극점의 온도가 높고, 음극표면의 전계가 강하기 때문에 T-F 방출기구¹¹⁾에 의해 전류밀도가 높은 방전주가 형성되어 고온의 전자와 이온은 각각 Cu전극과 공작물에 충돌하여 방전흔적을 형성하게 된다. 이때 상부의 Cu 침전극의 방전에 의해 용융된 찌꺼기는 하부의 공작물에 부착된 것이 아니라 열에 의한 고압의 기화로 팽창 비산하여 절연액체중에 혼입된다.

4. 결 론

본 연구는 방전 가공에 대한 기초적인 연구로서 방전 횟수에 따른 단발방전 흔적의 특성 변화를 여러가지 조건을 가변해 가면서 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방전 흔적의 깊이, 높이, 및 직경의 크기는 축침식 및 비접촉식 표면 조도계에 의한 측정법에 따라 약간의 오차는 있으나 방전 에너지에 따라 증가한다.
- (2) 방전 에너지가 큰 초기방전(N=2회)에서는 침전극 선단의 곡률반경의 증가로 방전 흔적의 깊이, 높이, 직경은 급격히 커지나 방전 에너지가 작은 경우와 N=3 이상인 경우는 전극 주위에 결함이 방전 횟수의 증가와 더불어 증가하며 방전 흔적은 완만히 감소한다.
- (3) 방전 흔적의 형상은 전압의 종류와 방전 전류와 방전 시간에 크게 의존하며, 직류 고전압의 경우는 단발 펄스전압의 경우보다 원형에 가까우나, 크기가 작고 산발적으로 발생한다.
- (4) T-F 방출기구에 의해 형성된 공작물의 방전흔적은 상부의 침전극 성분이 아니라 공작물이 용융 용기된 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 齊藤長男: "最近の電氣 加工技術(I)", 日本機械の研究, Vol. 29, pp. 689-697, 1977.
- 2) J. D. Cobine and E. E. Burger: "Analysis of Electrode Phenomena in the High Current Arc", J. Appl. Phys., Vol. 26, pp. 895-900, 1955.
- 3) 井上潔: "방전가공의 실제와 응용", 技多利, pp. 231-265, 1987
- 4) 齊藤長男: "ワイヤカット放電加工技術", 日刊工業新聞社, 1989
- 5) 木本保夫: "放電加工の加工速度について", 日本電氣學會誌, Vol. 79, No. 845, pp. 32-37, 1959.
- 6) 向山芳世: "放電加工の進展", 電氣加工學會誌, Vol. 17, pp. 1-17, 1983.
- 7) 増尺隆久: "水を加工液とする放電加工の研究(第2報)", 電氣加工學會誌, Vol. 15, pp. 21-28, 1981
- 8) 木本, 田官, 平田: "液中過度アーク放電による電極消耗の研究", 日本電氣學會雜誌, Vol. 89, pp. 133-141, 1969
- 9) 日本電氣學會編: "放電ハンドブック", 日本電氣學會, pp. 564-568, 1982
- 10) 上屋八郎, 後藤英和, 官崎 眞: "單發放電による放電加工の基礎的研究", 電氣加工學會誌, Vol. 22, pp. 1-6, 1988
- 11) T. H. Lee : "T-F Theory of Electron Emission in High-Current Arcs", J. Appl. Phys, Vol.30, pp. 166-171, 1959

※ 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

저자소개



김상현
1950년 2월 7일생. 1974년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 2월 인하대 전기공학과 석사. 1986년 3월 일본 오오사카대학 전기공학과(공학). 1989년 2월 한국전기연구소 국적응용기술장. 1995년 현재 경상대 전기공학과 부교수.



마대영
1956년 12월 2일생. 1980년 2월 경북대 전자공학과 졸업. 1982년 2월 경북대 전자공학과 석사. 1985년 8월 경북대 전자공학과(공학). 1987년 3월 한국전자통신연구소 선임연구원. 1990년 9월 Carnegie Mellon대학 방문연구. 1995년 현재 경상대 전기공학과 부교수.



김해중
1965년 11월 25일생. 1993년 2월 경상대 전기공학과 졸업. 1995년 현재 경상대 전기공학과 석사과정.



신태민
1959년 12월 15일생. 1981년 2월 연세대 전자공학과 졸업. 1983년 2월 연세대 전자공학과 석사. 1989년 2월 연세대 전자공학과(공학). 1995년 현재 경상대 전자공학과 조교수.