

적외선 레이저에 의한 방전 유도 기술의 방전 가공 장치에의 적용 연구

(A Study on the Discharge Guide Technology by Infrared Laser
Applied to Discharge Processing Devices)

조정수* · 이동훈** · 남경훈***

(Jung-Soo Cho · Dong-Hoon Lee · Gyung-Hoon Nahm)

요 약

최근 들어 레이저를 이용한 방전 제어 기술에 대한 관심이 여러 분야에서 고조되고 있다. 특히, 레이저의 우수한 특성 때문에 Electro-Discharge Machining(EDM)분야에서 각광을 받고 있다. 본 연구에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용해서 방전 가공 장치에 적용될 수 있는 방전 유도 기술에 관한 기초 데이터의 확보를 위한 실험이 수행되었다. 레이저에 의한 직류 방전 유도 실험의 동작 압력의 범위는 0.2~20 torr였다. 진공조 내의 압력 P와 전극간의 거리 d에 따른 최소 직류 레이저 방전 유도 전압 $V_{G,min}$ 을 측정하였으며, $V_{G,min}$ 이 자연 방전 전압 V_{ND} 보다 훨씬 낮고 P·d값에 따른 $V_{G,min}$ 이 V_{ND} 와 유사한 경향을 가짐을 확인하였다. 그리고 레이저 출력 에너지 E_{out} 은 플레쉬펄프의 전류 펄스폭 t_p 가 증가함에 따라 감소하고 t_p 값이 증가할수록 $V_{G,min}$ 은 방전 지속 시간 동안에 조사되는 광자량이 감소하기 때문에 더 높아짐을 알 수 있었다. 또한 레이저에 의한 방전 유도 가능 범위와 레이저 출력에 따른 방전 유도 특성을 조사하였다.

Abstract

In recent years, concern has been raised about the technique of controlling electrical breakdown by using laser in many fields. Especially, laser has attracted much attention in the Electro-Discharge Machining(EDM) because of its many merits. Therefore, this research has been performed to obtain fundamental data for the discharge guide technology by a pulsed Nd:YAG laser which can be applied to discharge processing machining. The experiments of laser-guided dc discharge have been carried out at low air pressure ranging from 0.2 to 20 torr. The minimum laser-guided dc discharge voltage $V_{G,min}$ at the given pressures P and distances d between an anode and a cathode was measured. It is found that $V_{G,min}$ is much lower than the natural discharge voltage V_{ND} , and the values of $V_{G,min}$ and V_{ND} as a function of P·d has a similar tendency. The laser output energy E_{out} decreases with input pulse duration t_p increasing, and the more the value of t_p increases, the higher that of $V_{G,min}$ is obtained because the number of photons N decreases with t_p increasing. In addition, the laser-guided dc discharge range and the discharge guide characteristics as laser output E_{out} was investigated.

* 정회원 : 부산대학교 전기공학과 교수

** 정회원 : 부산대학교 대학원 박사과정

***정회원 : 부산대학교 대학원 석사과정

접수일자 : 1998. 9. 18.

1. 서 론

레이저에 의한 방전 유도 기술은 재료 가공과 대전류 스위칭 등의 응용 분야에서 대단히 주목받고 있다[1~3]. 특히 재료 가공 분야에서 레이저에 의한 직접적인 물질 가공과 Wire EDM(Electro-Discharge Machining)과 같은 방전 가공에 비해 많은 장점을 가지고 있어 연구가 활발히 이루어지고 있다[4~6].

먼저, 단순한 레이저 가공과 비교하면 방전 유도에 사용되는 펄스형 레이저의 출력은 가공 재료를 용융시켜야 할 정도로 높지 않아도 되며, 레이저 가공에서처럼 전기 에너지가 광학 에너지의 형태를 거치지 않고 직접 열에너지로 변환되기 때문에 전기 효율이 지수함수적으로 증가한다.

그리고 종래에 수 백 V이하의 전압으로 절연유 중에서 방전을 일으켜 그 에너지를 이용해 정밀 가공을 수행하는 방전 가공에서는 필수적이던 피가공물의 형상에 대응하는 특수 전극의 제작이 요구되지 않는다.

또한 레이저 집광점의 위치를 조절하여 전극을 넓은 간격으로 고정해서 가공할 수 있으며, 가공하고자 하는 부품의 안쪽 구석과 같은 부분에도 전극의 방향에 관계없이 방전이 유도될 수 있다. 더불어 전극의 손상에 의한 가공 효율의 저하가 발생하지 않는 이점이 있다.

따라서 본 연구에서는 방전 위치를 레이저 빔으로 유도하여 제어하는 새로운 방전 유도 기술에 대한 기초 데이터를 축적하고자 하였다. 사용된 적외선 레이저는 우수한 열적, 기계적 특성을 가지고 있으며, 유지 및 보수가 용이하고 렌즈나 유리 등과 같이 취급이 간단한 통상의 광학계로 구성된 펄스형 Nd:YAG 레이저이다[7].

방전 환경은 저기압 공기 증으로 하여 침대 평판 전극간의 방전 위치를 레이저로 유도하면서 레이저 출력 E_{out} , 전극간 거리 d , 진공조 내의 압력 P 에 따른 방전 유도 여부와 전극간에 인가되는 자연 방전 전압 V_{ND} 와 최소 방전 유도 전압 $V_{G,min}$ 을 비교·검토하였다.

또한 거리와 압력에 따른 방전 유도 범위를 전극간 거리 및 레이저 조사 지점까지의 수직 거리를 변수로 하여 조사하였다.

2. 실험장치

그림 1은 본 연구에서 방전 유도용으로 사용된 펄스형 Nd:YAG 레이저와 진공조 등의 개략도이다. 레이저 공진기는 그림 1에서 보듯이 Nd:YAG rod 및 Xe 플래시램프(ILC 6F3)로 구성된 헤드부와 전반사경 및 부분반사경(반사율 40%)으로 구성되어 있다. 직류 전원은 용량 20[μ F]의 고압 콘덴서를 사용한 배압회로를 구성해 6.6[kV]까지 공급할 수 있도록 제작하였다. 진공조는 내경 17.5[cm], 높이 19[cm]인 유리로 제작되었다. 전극은 침대 평판전극(정극성)으로서 양극은 45°의 각을 가지며 직경 4[mm], 길이 2[cm]인 스텐레스를 사용하였고, 음극은 직경 약 7[cm], 두께 2[mm]인 황동판을 사용하였다. 그리고 부분 반사경 전방에 초점거리 30[cm]인 볼록 렌즈를 설치하여 평판 전극의 표면에 레이저 빔의 초점이 맺히도록 하여 방전유도를 용이하게 하였다.

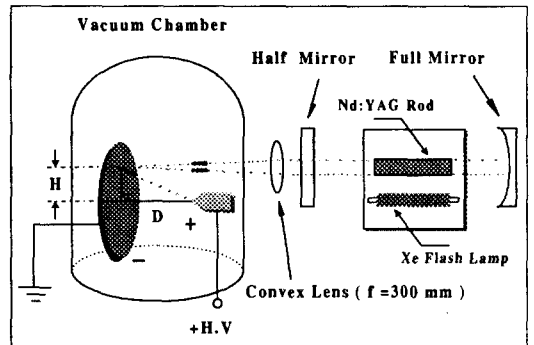


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic view of experimental setup

레이저 전원 장치는 그림 2에 나타난 것처럼 정류 부인 주회로와 충전부, 시머회로(simmer circuit), 시머스타터(simmer starter)의 네 부분으로 구성되어 있다. 시머스타터는 주방전을 일으키기 위해 전극 사이에 이온화된 스트리머 방전을 발생시킨다. 스트리머 방전이 유지된 상태에서 주회로에 있는 SCR의 게이트에 트리거신호를 보내어 충전 커패시터에 저장된 에너지를 플래시램프를 통하여 방전시킨다. 그림 3은 입력 전압을 1,000[V]로 했을 때의 레이저 출력 E_{out} 를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 본

실험에 사용된 펄스형 Nd:YAG 레이저는 측정 오차를 감안하더라도 5%내의 출력 안정도를 가짐을 알 수 있다.

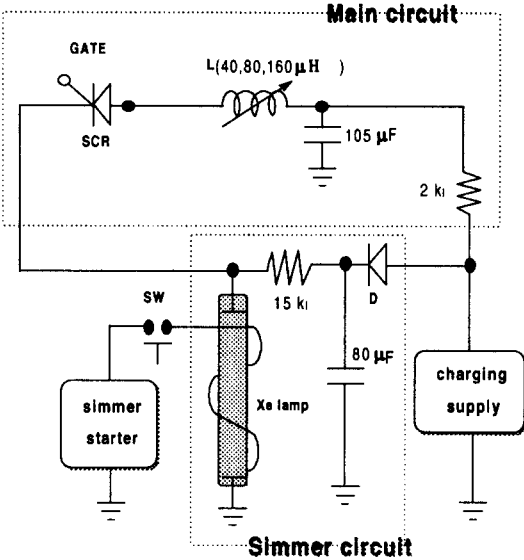


그림 2. 펄스형 Nd:YAG 레이저의 전원장치 회로도
Fig. 2. Power supply circuit of Pulsed Nd:YAG laser

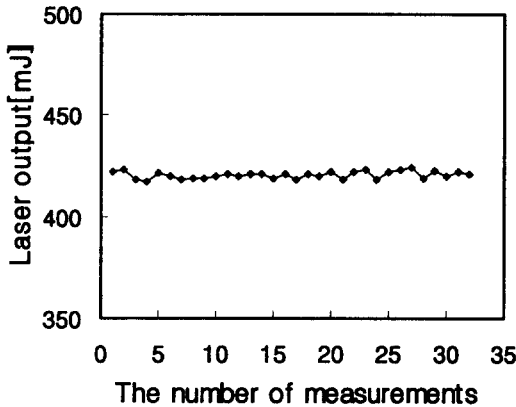


그림 3. 레이저출력 안정도
Fig. 3. Stability of laser output

3. 실험 방법 및 결과 고찰

본 연구에서는 실험에 들어가기 전에 FLUX2D란 시뮬레이션 프로그램을 이용해 전극사이의 전위 분포를 구했다. 한 예로 그림 4에서는 인가 전압 800 [V], 전극간 거리가 3[cm]일 때의 전위 분포를 나타 내었다.

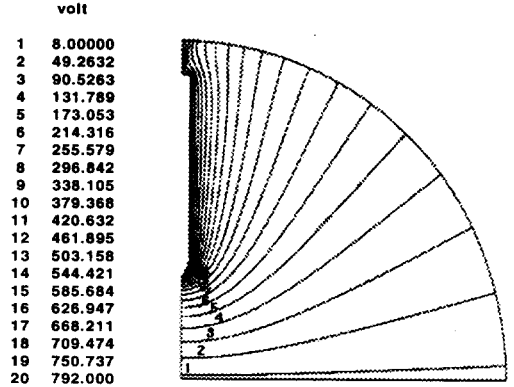


그림 4. 전극간 거리가 3[cm]일 때의 전위 분포도
Fig. 4. Electric potential distribution at the electrode gap of 3 [cm]

이것으로부터 전계는 음극의 중심에 집중됨을 알 수 있고 자연 방전이 이 지점에서 일어날것란 것도 예측할 수 있다. 그런데 자연 방전 지점이 아닌 임의의 지점으로 레이저를 이용해 유도 방전을 발생시키기 위해 그림 1에서 보듯이 부분 반사경 전방에 초점거리 30[cm]인 볼록 렌즈를 설치하여 평판 전극의 중심에서 수직 거리 H만큼 떨어진 지점에 레이저 빔을 집광시켰다. 레이저 방전 유도 실험의 압력 범위는 비교적 낮은 방전 유도 전압이 얻어진 0.2~20 [torr]로 하였고 전극간 거리는 6[cm]까지 가변되도록 하였다.

먼저 진공조 내의 압력 P와 전극간 거리 d를 조절 한 후 침대 평판 전극에 직류 전압을 인가하여 P와 d에 따른 자연 방전 전압 V_{ND} 를 구하였다. V_{ND} 보다 인가 전압을 감소시키면서 레이저 빔을 조사하여 유도 방전을 야기시키고 그 중에서 가장 낮은 최소 방전 유도 전압 $V_{C,min}$ 을 측정하였다. 또한 레이저 출력과 플래쉬램프에 인가되는 전류 펄스폭에 따른 방전 유도 특성과 P와 d에 따른 방전 유도 가능 범위를 평판 전극의 중심에서의 수직 거리 H를 가변시켜 조사하였다.

3.1 압력과 거리에 따른 방전유도 특성

그림 5는 레이저 출력 E_{out} 을 300[mJ], 전극간 거리 d 를 3[cm], 수직 거리를 1[cm]로 고정하고, 진공 조내 압력 P 를 0.5, 1, 3, 5, 10[torr]로 가변시켰을 때의 방전 유도 특성을 나타내고 있다. 0.5 및 1[torr] 영역에서는 $V_{G,min}$ 이 V_{ND} 의 30[%]가량 밖에 되지 않고, 5 및 10[torr] 영역에서는 $V_{G,min}$ 이 V_{ND} 의 약 60 [%]정도로 증가하나 전체 실험 압력 범위에서 보면 $V_{G,min}$ 과 V_{ND} 의 값이 약 400[V] 정도로 거의 일정한 차이를 보임을 확인하였다. 즉, 동일한 레이저 출력과 거리에서는 압력이 증가함에 따라 V_{ND} 에 비례적으로 $V_{G,min}$ 도 증가함을 알 수 있었다.

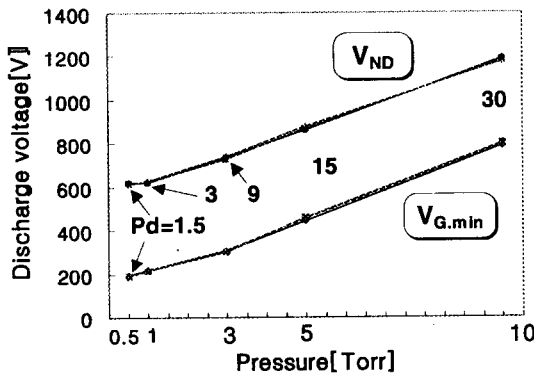
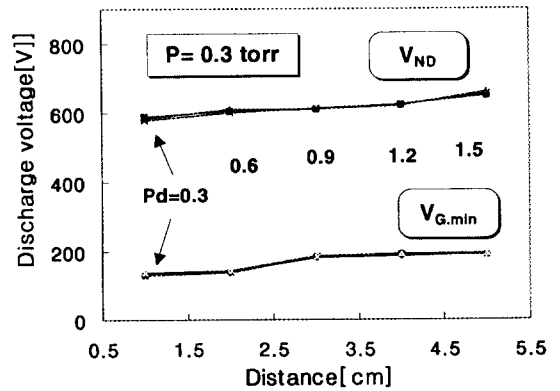


그림 5. 압력에 따른 방전유도특성
Fig. 5. Characteristics of the guided-discharge as pressure at $d=3$ cm

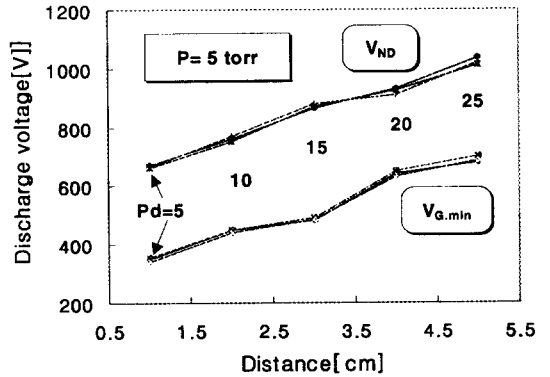
또한 전극간 거리에 따른 영향을 보기 위해 진공 조내의 기압을 0.3[torr]와 5[torr]로 고정하고 각 압력하에서 전극간 거리를 1, 3, 5[cm]로 가변했을 때의 방전 유도 특성을 조사하여 그림 6에 나타내었다. 그림에서 압력 $P=0.3$ [torr]일때 전극간 거리 $d=1$ [cm]에서는 $V_{G,min}$ 가 135[V], $d=5$ [cm]일 때는 190[V]로 별 차이가 없었으나, $P=5$ [torr]일 때 $d=1$ [cm]에서는 $V_{G,min}$ 가 350[V], $d=5$ [cm]일 때는 680[V]로 2배 가까운 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 따라서 $V_{G,min}$ 이 0.3[torr]일때가 5[torr]일때보다 거리에 의한 영향이 적다는 것을 확인하였다.

절연 파괴를 위해서는 전자사태 현상을 유기시킬 만큼 충분한 전극갭 사이의 거리와 전자 및 이온화된 중성 원자의 밀도가 필요하지만, 본 실험과 같이 레이저에 의한 방전 유도 현상은 레이저를 조사하는

것에 의해 음극 표면에 형성된 금속 플라즈마 중의 전자와 이온에 의해 일어난다고 추측된다. 즉, 스트리머 방전과 유사한 현상으로 레이저빔에 의해 생성된 금속 플라즈마가 인가되어 있는 전계에 의해 진전되어 방전을 일으키는 것으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 6. 전극간 거리에 따른 방전유도특성
Fig. 6. Characteristics of the guided-discharge as electrode gap

(a) at $P=0.3$ [torr], (b) $P=5$ [torr]

또한 그림 5와 6에서 알 수 있듯이 최소 방전 유도 전압 $V_{G,min}$ 곡선이 자연 방전 전압 V_{ND} 곡선과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 즉, $P \cdot d$ 값이 파셴 최소값(Paschen minimum)으로 알려진 0.5[torr · cm]부근인 그림 6(a)에서는 $P \cdot d$ 값의 증감에 대해 $V_{G,min}$ 의 변화가 적었지만, 그림 6(b)영역과 같이 $P \cdot d$ 값이 Paschen 최소점에 비하여 상대적으로 큰 영역에

서는 $V_{G,min}$ 의 값이 거리가 증가함에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다.

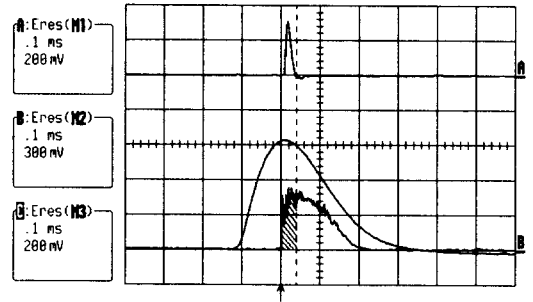
이것은 금속 플라즈마의 밀도는 진공조 내의 압력 및 전극간 거리에 영향을 받고 레이저에 의한 방전 유도 현상은 레이저 빔이 금속 표면에 조사되어 단 시간 내에 자연 방전 현상에서의 전자사태를 위한 초기 전자밀도를 증가시켜 공급함으로써 낮은 전압에서 절연 파괴를 일으킴과 동시에 방전을 유도한다고 생각된다.

레이저 추진 및 발생한 플라즈마의 분광 분석의 연구에 의하면 레이저 조사로 발생한 플라즈마에는 2단계이다. 최초의 플라즈마는 조사된 전극의 표면에 제한된 영역에 짧은 시간 동안만 나타난다. 두번째의 플라즈마는 최초의 플라즈마의 주위에 반구상으로 확대되어 blast wave에 의해 가열된다. blast wave는 에너지를 한점에 단시간중에 방출했을 때 발생하는 압력파이다[8]. 레이저에 의한 방전유도현상은 두 번째 플라즈마에 의하여 발생하는 압력파와 상관관계가 있을 것으로 예상된다.

3.2 인가 전류 펄스폭에 따른 방전유도 특성

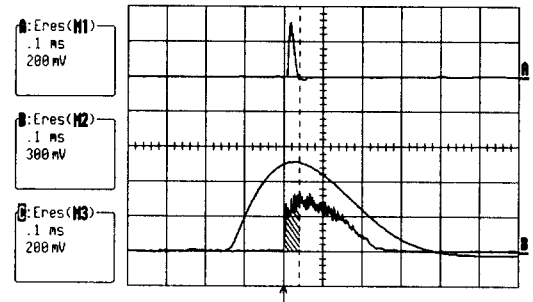
본 실험에서는 레이저 빔을 생성시키기 위해 플래쉬램프에 인가되는 전류의 펄스폭 t_p 의 변화에 대한 방전 유도 특성을 조사하였고, 이 t_p 를 가변시키기 위해 그림 2의 인덕턴스 L값을 조절하였다.

그림 7은 전극간 거리 $d=2[cm]$, 진공조내 압력 $P=0.3[torr]$, 레이저 출력 $E_{out}=185[mJ]$ 로 했을 때의 방전 지속 시간동안 전극을 통해 흐르는 방전 전류의 파형과 플래쉬램프에 인가되는 전류 파형, 레이저 광 프로파일을 보여주고 있다.



area(C) 10.3126 μVs

(b)



area(C) 8.55788 μVs

(c)

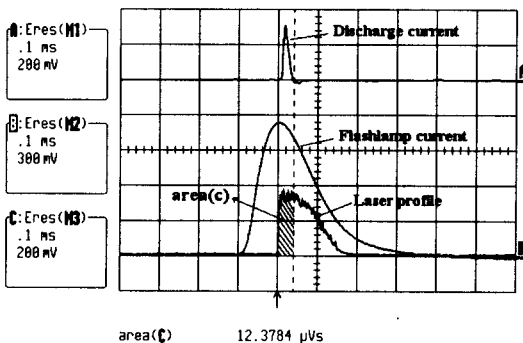
그림 7. 전류펄스폭에 따른 방전유도특성

Fig. 7. Characteristics of the guided-discharge as current pulse duration (a) at $L=40 \mu H$, (b) at $L=80 \mu H$, and (c) at $L=160 \mu H$ when laser output E_{out} is fixed at 185 [mJ]

여기서 전류 파형은 Pearson Electronics사의 펄스형 변류기와 Lecroy사의 9310AM(대역폭 400[MHz]) 오실로스코프를 사용해 측정하였다.

표 1. 인덕턴스에 따른 t_p , E_{out} , V_{ND} , $V_{G,min}$, N
Table. 1. The values of t_p , E_{out} , V_{ND} , $V_{G,min}$, and N corresponding to different L

	t_p (μs)	E_{out} (mJ)	V_{ND} (V)	$V_{G,min}$ (V)	N
$L=40 \mu H$	160	210~215	585 ~600	220 ~230	3.01 $\times 10^{17}$
$L=80 \mu H$	210	200~205	585 ~600	245 ~255	2.50 $\times 10^{17}$
$L=160 \mu H$	300	180~185	585 ~600	275 ~285	2.08 $\times 10^{17}$



area(C) 12.3784 μVs

(a)

표 1은 인덕턴스 40, 80, 160[μ H]에 대한 t_p , E_{out} , V_{ND} , $V_{G,min}$ 과 방전 지속 시간 약 40[μ s]동안 방출되는 광자수 N 을 나타내고 있다. 표에서 인덕턴스 L 이 증가함에 따라 레이저 출력이 감소함을 알 수 있다.

이것은 참고 문헌[9]의 연구 결과, 전류 펄스폭이 길어지면 전체 입력에너지 중에서 레이저 출력에 기여하는 에너지가 감소하기 때문이었다[9]. 그래서 본 실험에서는 레이저 출력 E_{out} 의 변화에 따른 방전 유도 현상의 영향을 배제하고, 전류 펄스폭 t_p 에 의한 특성만을 조사하기 위해 Nd:YAG 레이저의 전원 장치에 인가하는 전압을 조절하여 레이저 출력 E_{out} 을 185[mJ]로 일정하게 유지하였다.

그림 7에서 빗금 친 영역을 시간 적분한 area (c) 값은 방전 지속 시간 동안 방출되는 광자수 N 을 나타낸다고 볼 수 있다. 그런데 방전 지속 시간 동안만 시간 적분한 이유는 이 시간 동안만 레이저 빔이 방전에 영향을 주기 때문이며, 이 광자수 N 은 다음 식에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$N = \frac{E_{out}}{h\nu} \times \alpha \quad (1)$$

여기서 h 는 Planck 상수이고 ν 는 Nd:YAG 레이저의 진동수이며 α 는 전체 광 프로파일의 시간 적분값인 40.8435(μ Vs)에 대한 방전 시간 동안의 시간 적분값의 비율이다. 그리고 L 값 40, 80, 160[μ H]에 대해 α 값은 각각 0.30, 0.25, 0.21로 나타났다. 실험 결과는 표 1에서 보듯이 전류 펄스폭 t_p 가 증가함에 따라 방출되는 광자수의 감소로 인해 레이저 출력 E_{out} 은 감소하고, 최소 방전 유도 전압 $V_{G,min}$ 은 증가함을 알 수 있다.

이런 방전 유도 현상에 대한 쇼트키효과(Schottky effect)에 의한 전자 방출 현상의 영향을 살펴보기 위해 실효 일함수 E_{eff} 를 부록에 나타낸 식 (4),(5)에 의해 구해보았다. 본 실험에서는 전극간 거리가 2[cm]이고 표 1에서 보듯이 최소 방전 유도 전압이 220~285[V]이기 때문에 전극간에 걸리는 전계는 약 143 V/cm가 최대이다.

즉, ΔE_w 값도 4.54×10^{-4} eV가 최대가 되어 실효 일함수 E_{eff} 는 금속의 일함수 E_w 와 별차이가 없기 때문에 방전유도에서 전자방출에 대한 전계의 영향은 거의 없다고 생각할 수 있다. 그리고 기존에 알려진 바와 같이 Nd:YAG 레이저의 파장은 1.064[μ m]

이기 때문에 $h\nu$ 값은 1.167 eV로 음극 전극 재료로 사용된 황동의 광전자방출(光電子放出)에서 구한 일함수인 약 4 eV보다 작아 광전자 방출현상으로 설명하기는 곤란하다.

다만 음극 표면 전자가 방전 지속 시간동안 다광자 흡수 이론과 같이 일시에 수 개의 광자를 흡수하여 얻은 열에너지에 의한 격자 진동을 통해 주위에 에너지를 전달함으로써 진공 중으로 튀어나온다고 생각된다[10].

3.3 레이저 출력에 따른 방전유도 특성

방전 유도에서 중요한 요인인 레이저 생성 플라즈마 밀도가 압력과 거리 뿐만 아니라 음극 표면에 조사되는 레이저 빔의 출력에 영향을 받는 지 조사하였다. 그림 8은 전극간 거리 d 를 1[cm], 수직 거리 H 를 1[cm]로 고정하고 Nd:YAG 레이저의 출력 E_{out} 을 100, 200, 300[mJ]로 변화시켰을 때, 기압에 따른 $V_{G,min}$ 의 특성을 나타내고 있다. 레이저 출력이 높아질수록 $V_{G,min}$ 이 낮아지며 동시에 기압의 증가에 따라 $V_{G,min}$ 과 V_{ND} 의 전압차가 조금씩 감소함을 확인하였다.

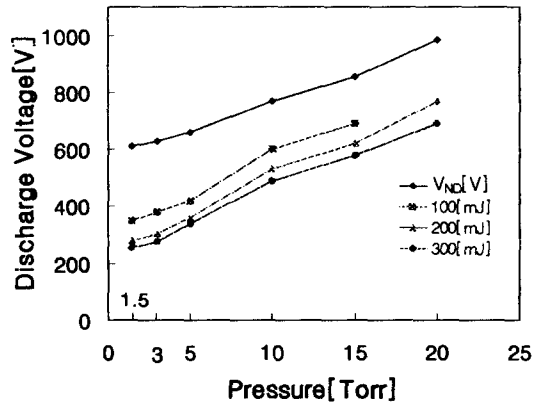


그림 8. 레이저출력에 따른 방전유도특성
Fig. 8. Characteristics of the guided-discharge as laser output

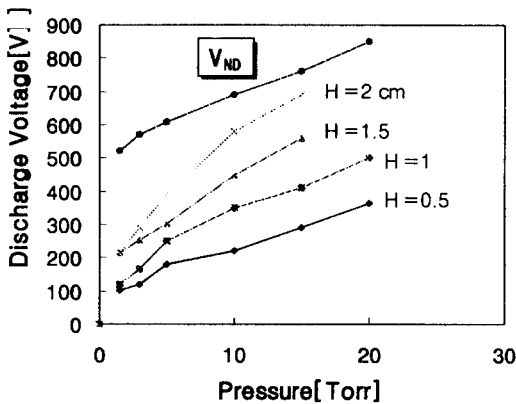
이것은 레이저 출력 E_{out} 이 증가함에 따라 식 (1)에 의해 레이저 방출 전자수도 증가하여 음극 표면 부근에 생성되는 금속 플라즈마의 밀도도 더불어 증가하기 때문이라고 생각된다.

즉, 레이저 조사에 의해 음극 표면으로부터 튀어나온 전자가 가지는 운동에너지와 전자수가 레이저

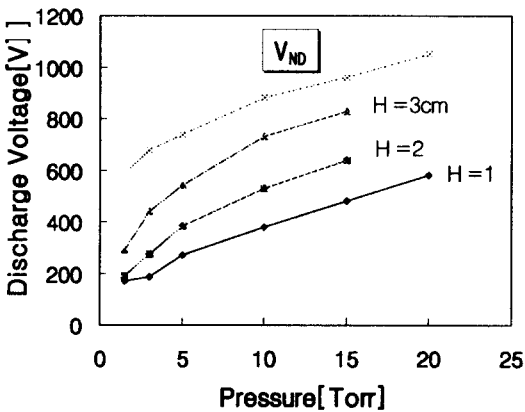
출력 E_{out} 이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 또한 100[mJ]일 때 20[torr]에서 방전 유도가 일어나지 않는 것은 압력에 따라 방전 유도가 가능한 E_{out} 의 최소값이 존재함을 나타낸다.

3.4 전극간 거리와 평판전극 수직거리에 따른 방전유도 특성

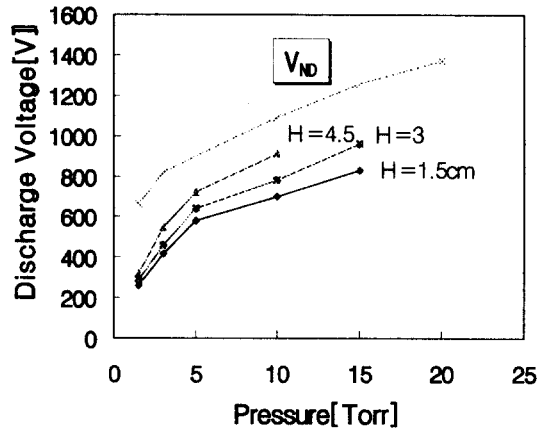
기존의 방전 가공 장치의 단점인 짧은 방전 거리를 레이저를 이용한 방전 유도에 의해 증가시킬 수 있는 범위를 확인하고자 하였다. 즉, 전극간 거리 d 에 대한 침전극 중심축과 평판 전극이 직교하는 지점으로부터 레이저 조사점까지의 수직거리 H 에 따른 방전 유도 여부와 최소 방전 유도 전압 $V_{G,min}$ 과 자연 방전 전압 V_{ND} 를 구해 비교, 검토하였다.



(a) $d = 0.5$ cm



(b) $d = 1$ cm



(c) $d = 1.5$ cm

그림 9. 전극간 거리와 수직거리에 따른 방전유도특성
Fig. 9. Characteristics of the guided-discharge as electrode gap and vertical distance

레이저 출력 E_{out} 를 350[mJ]로 고정하고, 전극간 거리를 0.5, 1, 1.5[cm]로 하여 진공조 내의 기압을 1.5[torr]에서 20[torr]까지 단계적으로 높여가며 각각의 압력에서 방전 유도 전압 특성을 조사하여 그림 9에 나타내었다.

이 결과로부터 전극간 거리 d 및 기압 P 의 증가와 더불어 H 값이 커짐에 따라 $V_{G,min}$ 이 비례적으로 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 방전 각도의 임계값 내에서는 $V_{G,min}$ 이 P 와 d 의 두 변수를 동시에 표현할 수 있는 레이저 조사점과 양극과의 직선거리에 비례한다고 할 수 있을 것이다. 또한 압력이 20[torr]인 경우, 방전 유도 자체가 이루어지지 않았는데 이것은 레이저 생성 플라즈마내의 전자가 압력이 증가함에 따른 평균자유행정의 감소로 인해 중성 기체를 전리시킬 만큼의 충분한 운동에너지를 얻지 못하기 때문이라고 생각된다. 즉 일정 인가 전압에서 방전유도 허용 압력 범위가 존재함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 적외선 레이저인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 방전 가공 장치에 적용될 수 있는 방전 유도 기술에 관한 기초 데이터를 얻기 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 진공조 내의 압력 P 와 전극간의 거리 d 에 따른 최소 방전 유도 전압 $V_{G,min}$ 을 측정하여 $V_{G,min}$ 이 자연 방전 전압 V_{ND} 보다 훨씬 낮고 $P \cdot d$ 값에 따른 $V_{G,min}$ 이 V_{ND} 와 유사한 경향을 가짐을 확인하였다.

2) 레이저 출력 E_{out} 은 플래쉬 램프에 인가되는 전류 펄스폭 t_p 가 증가함에 따라 감소하고 t_p 값이 증가하면 할수록 $V_{G,min}$ 은 방전 지속 시간 동안에 조사되는 광자수의 감소 때문에 더 높아짐을 알 수 있었다.

3) 레이저 출력 E_{out} 이 높아질수록 레이저 생성 플라즈마의 밀도가 증가하여 $V_{G,min}$ 이 낮아지며 동시에 기압의 증가에 따라 $V_{G,min}$ 과 V_{ND} 의 전압차가 조금씩 감소함을 알 수 있었다.

4) 레이저에 의한 방전 유도 가능 범위는 방전 각도의 임계값 내에서 레이저 조사점과 양극과의 직선 거리가 증가하면 감소하고 $V_{G,min}$ 은 높아짐을 알 수 있었다.

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] R. M. Gilgenbach, O. E. Ulrich, and L. D. Horton, "Localized metallic melting and hole boring by laser guided discharges", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 54, No. 1, pp.109~113, 1983.

[2] K. Hidaka, D. Sakai, and T. Kouno, "Laser trigger effect on induced electrical discharge", *T. IEE Japan*, Vol. 115-A, No. 7, pp. 622~629, 1995.

[3] W. K. Pendleton and A. H. Guenther, "Investigation of a Laser Triggered Spark Gap", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 36, No. 11, 1965.

[4] D. C. O'shea, et al., *Introduction to Laser and Their Application*, Addison-Wesley, pp. 256~261, 1977.

[5] G. Staufert, A. Dommann, and D. Läuger, "Behaviour of a silicon spring fabricated by wire electro-discharge machining", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 3, pp. 232~235, 1993.

[6] Yasutomo Fujimori, "Laser Material Processing in Electric Industries", *Proceeding of Lamp '92*, Nagaoka, pp. 981-986, 1992.

[7] W. Koedchner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer Verlag, New York, Heidelberg, 1995, pp. 118-124.

[8] H. Kurmiawan, et al., "Correlations between Front Speed and Initial Explosion Energy of the Blast Wave Induced by a TEA CO2 Laser", *J. Appl. Phys.*, Vol. 31, No. 4, 1992.

[9] 광병구, 김동현, 정종한, 광동주, 조정수, 김희재, "FFN 모의를 통한 펄스형 Nd:YAG 레이저 동작 특성의 최적

화", *대한전기학회지*, 제45권12호, pp. 1801~1807, 1996.

[10] J. M. Meek and J. D. Craggs, "Electrical Breakdown of Gases", Chapman and Hall, New York, 1977, pp. 717-752.

부 록

금속 표면으로부터 x 의 위치에 있는 전자의 합성 퍼텐셜에너지는 다음 식으로 주어진다.

$$E_f(x) = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x} - eEx \quad (2)$$

위 식을 x 에 관해서 미분하여 0으로 둘 때의 x 를 x_0 라 하면

$$x_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0 E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

이 식을 식 (2)에 대입하면 극대치는

$$\Delta E_w = -e \left(\frac{eE}{4\pi\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

으로 된다. 따라서 진공준위를 0으로 한 경우에 비하여 금속으로부터 전자가 방출되는데, 필요한 에너지는 ΔE_w 의 크기 만큼 낮아진다. 그러므로 실효 일함수는

$$E_{eff} = E_w - \Delta E_w \quad (5)$$

◇저자소개◇

조 정 수 (曹井守)
1935년 12월 21일생. 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1983년~1984년 미국 Oregon Univ. 교환교수. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.

이 동 훈 (李東勳)
1970년 1월 17일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

남 경 훈 (南京勳)
1974년 2월 2일생. 1997년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.