

Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})O₃ 강유전체 음극의 전극 모형에 따른 전자 방출 특성

Effect of Electrode Structures on Electron Emission of the Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})O₃ Ferroelectric Cathode

서민수^{*,**} 홍기민^{**}
Minsu Seo Kimin Hong

Abstract

Electric-field-induced electron emission from the three kinds of Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})O₃ ferroelectric cathodes with different electrode structure has been investigated. Regardless of the electrode structures, a threshold field of the each cathode was 2.5-2.6kV/mm, which is 3 times higher than the coercive field of Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})O₃ material. Although the waveform of the electron currents was affected by the structure of the electrode, no significant difference for the emission properties such as the peak current and the pulse width was observed from the three kinds of the cathodes. However, the current density of the cathode was dependent on the electrode structure. From the simulation of electric field distribution, the surface flashover, and the injury region of the cathode surface, it was proved that the prime electrons were initiated at the electrode-ceramic-vacuum triple point by field emission and the emission currents were strongly enhanced by the surface plasma.

Keywords : Electron Emission(전자 방출), Ferroelectric Cathode(강유전체 음극), Pb(Zr,Ti)O₃(지르코늄 티탄산 납), Electrode Structure(전극 구조), Triple Point(삼중점), Surface Plasma(표면 플라즈마)

1. 서론

강유전 물질에서 ~100A/cm²의 강한 전자 방출 현상이 보고된 후^[1], 전자방출소스로서의 강유전체 음극 연구가 활발하게 진행되고 있다. 다양한 종류의 강유

전 물질에서 전자 방출이 관측되었으며, Pb(Zr,Ti)O₃와 PbLa(Zr,Ti)O₃(lead lanthanum zirconium titanate) 강유전체는 전자 방출이 상당히 뛰어난 물질로 보고되고 있다^[2].

강유전체 음극은 상온, 저 진공 상태에서 작동이 가능하고, 고휘도, 고에너지, 고속 응답성을 보이며, 전자 방출시간의 제어가 용이하다. 특히, 강유전체 음극은 가속 전기장 없이 구동 전기장만으로도 전자 방출이 가능하고, 가속 전기장이 함께 인가될 경우 방출 전자의 전류밀도(J_e)는 ~10³A/cm² 까지^[3]도 가능한 것

† 2010년 4월 5일 접수~2010년 7월 12일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

책임저자 : 서민수(sms2370@add.re.kr)

으로 알려져 있다. 이러한 장점들 때문에 강유전체 음극은 기존의 열전자 방출 음극 및 전계전자 방출 음극의 대체 수단으로 고려되고 있으며^[3,4], 마이크로웨이브^[5] 및 X-ray 발생^[6], 저 진공 스파크 갭 스위칭^[7], 평판형 디스플레이^[8], 고주파 전자빔 변조^[9] 등을 위한 응용 연구가 수행되어지고 있다.

강유전체 음극에서의 강한 전자 방출 기구에 대해서는 분극 반전에 따른 강유전체 표면 차폐전하들이 쿨롱 반발력에 의한 방출^[10], 세라믹-전극-진공이 만나는 삼중점(triple point)에서 시작된 플라즈마 전자의 방출^[11] 등 상이한 모델들이 제시되어 있다. 하지만 전자 방출 현상이 분극 반전과 관련 없는 상태^[12] 뿐만 아니라 플라즈마를 미동반한 상태^[13]에서도 관측되므로, 강유전체 음극의 전자 방출을 명확하게 설명할 통합적 기구는 현재까지도 제시되지 못하고 있다.

강유전체 음극의 전자 방출은 강유전체 고유의 유전 특성, 구동전압과 가속전압 등의 외부 전기적 변수, 그리고 전극의 형상, 크기 및 두께 등의 구조적 변수에 영향을 받는다. 이 중에서 강유전 특성 및 전기적 변수들에 대한 전자 방출 특성 연구는 현재까지 많이 보고되었지만 전극의 구조 및 배열 상태에 따른 전자 방출 연구는 보고가 거의 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 전극 구조가 강유전체 음극의 전자 방출에 미치는 영향을 분석하기 위해 전면 전극의 구조를 달리한 3 종류의 음극을 제작하고 전기적 변수들(구동전압, 가속전압) 하에서 전자 방출 시험을 수행하였다. 강유전 물질은 압력 인가 시 전하 발생률이 우수한 $Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})O_3$ ^[14]에 Nb_2O_5 가 0.5mole% 치환한 조성을 사용하였으며, 전면 전극의 구조는 고리(ring) 모양과 줄무늬(strip) 모양이 혼합된 형태이다. 전기적 변수 하에서 강유전체 음극에 형성되는 전계 및 전위 분포를 스트립 전극의 폭과 전극 사이의 거리의 함수로 전산모사하였으며, 측정 결과와 비교함으로써 전자 방출 기구의 이해를 도모하였다.

2. 실험

가. 강유전체 시편 제작

강유전체 $Pb[(Zr_{0.56}Ti_{0.44})_{0.995}Nb_{0.005}]O_3$ (이하, PZT 56/44) 세라믹 시편은 일반적인 고상반응법으로 제조하였다. 고 순도의 PbO , ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 를 각 조성비에 맞게 칭량한 후 zirconia ball과 에칠알콜을 매체로하여

Table 1. Material properties for PZT 56/44

P_r ($\mu C/mm^2$)	E_c (kV/mm)	ρ (g/cm^3)	C at 1 kHz(pF)	k_p (%)
0.315	0.84	7.87	591	53
k_t (%)	Q_m	ϵ_r	$\tan \delta$ (%)	d_{33} ($10^{-12}C/N$)
29.7	81	570	2	223

24시간 습식 혼합 및 분쇄, 건조시킨 후 알루미늄 도가니에서 승온 속도 200°C/hr로 850°C에 도달 한 후 2시간 동안 하소하였다. 하소 분말을 재차 분쇄 및 건조하고 혼합 집착체와 섞어 sieve를 통과시킨 다음 원통형 금형에 넣고 1ton/cm²의 압력으로 일축 성형한 후 2ton/cm²의 압력으로 2분간 냉간 정수압(cold isostatic press) 성형을 하였다. 밀봉된 알루미늄 도가니 속에 성형시편 넣고 승온 속도 150°C/hr로 520°C에 도달 후 2시간 동안 탈지를 하고, 200°C/hr의 승온 속도로 1150°C에 도달 후 2시간 동안 소결(sintering)한 후 자연 냉각 시켰다. 소결 시 분위기 분말로는 $PbZrO_3+10wt\%$ ZrO_2 을 사용하였다. 동일 로트에서 소결된 샘플 시편을 이용하여 X-선 회절 분석을 실시한 결과 단일상이 형성되었음을 확인하였고, 주사전자현미경(SEM : Scanning Electron Microscope)으로 확인된 입경의 크기는 5 μm 이하였다. 소결된 세라믹 시편은 직경 25mm, 두께 1mm의 원반(disk)으로 연마하였으며, 측정된 세라믹의 전기/구조적 특성은 Table 1과 같다.

나. 전극 구조와 강유전체 음극

강유전체 음극의 후면 전극은 직경이 20mm인 원반형이며, 전면 전극은 모양지어진 형태로써 3 종류이다. 전면 전극의 구조는 고리형(외경 18mm, 내경 13mm) 내부 중심에 1mm 폭의 스트립이 한 개 배치 [이하, I형(type I) 전극]된 것과, 1mm 폭의 스트립이 1mm 간격으로 배치 [이하, II형(type II) 전극]된 것, 그리고 0.5mm 폭의 스트립이 0.5mm 간격으로 배치 [이하, III형(type III) 전극] 된 것이다. 전극 재질은 전, 후면 전극 모두 구리(Cu)를 사용했으며, 전극의 두께는 ~ 0.1mm이다. 상온 경화용 실버페이스트(LCA-9, Bacon Industries)를 사용하여 강유전체 원반의 한 쪽 면에는 후면 전극을, 반대 면에는 모양지어진 전면 전극을 부

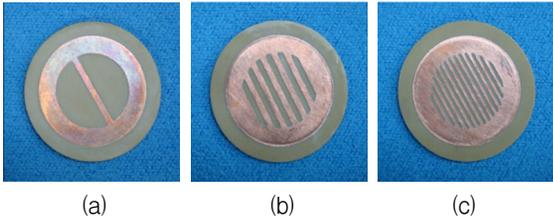


Fig. 1. The front surfaces of the PZT 56/44 ferroelectric cathodes. (a) type I, (b) type II, and (c) type III electrode, respectively, are attached

착하였다. 이 때 강유전체 원반의 중심과 전극들의 중심이 일치되도록 하였으며, 전극들이 강유전체 원반에 단단하게 접촉되도록 압착용 홀더 속에 넣고 24시간 유지시켰다. Fig. 1은 PZT 56/44 강유전체 원반에 모양지어진 3 종류의 전면 전극이 부착된 PZT 56/44 강유전체 음극들을 나타낸다.

다. 실험방법

Fig. 2는 강유전체 음극의 전자 방출 측정 장치도를 나타낸다. 강유전체 음극과 전자포획용 양극은 진공챔버 내부에, 전기적 에너지 구동 장치 및 데이터 수집 장치들은 진공챔버 외부에 설치하였다.

강유전체 음극은 전면 전극이 부착된 음극 표면(이하, 전자방출면)이 양극을 향하도록 절연체(MC-nylon)와 알루미늄 케이스 사이에 장착하였으며, 전면 전극은 접지선에, 후면 전극은 고전압 펄스발생기에 연결

하였다. 전자포획용 양극은 직경 40mm인 흑연(graphite) 원반을 사용하였으며 음극의 전자방출면으로부터 10mm 떨어져 있다. 챔버 내의 진공도는 로터리 펌프와 터보 분자 펌프(TMP : ATP 150)를 연동시켜 $\sim 1 \times 10^{-5}$ mbar 가 유지되도록 하였다.

음의 극성을 갖는 펄스형 고전압(V_{dr})을 강유전체 음극의 후면 전극에 구동시킴으로써 음극의 전자 방출을 활성화시켰으며, 음극에서 방출된 전자들을 가속하기 위해 직류전압(V_{acc})을 양극에 인가하였다. 이때 음극과 양극 사이의 직류전압은 양극과 접지 사이에 연결된 콘덴서(40 nF)에 의해 일정하게 유지되었다.

강유전체 음극을 구동하는 전압파형은 음극의 후면 전극과 고전압 펄스발생기 사이에 설치된 고전압 탐침기(Tek. P6015A)로 측정하였고, 음극의 변위전류(I_{dr} : displacement current) 파형과 음극으로부터 방출된 전자전류(I_e) 파형은 Pearson사의 전류 모니터(model 411)를 이용하여 측정하였다[전류 모니터 설치 위치 참조]. 진단장치를 통해 측정된 모든 전기적 신호들은 1GHz 주파수대역폭을 갖는 오실로스코프(Tek. DPO 7104)로 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

지속시간이 긴 고전압 펄스로 강유전체 음극을 구동하면 음극 전, 후면 전극 사이의 강유전체 표면을

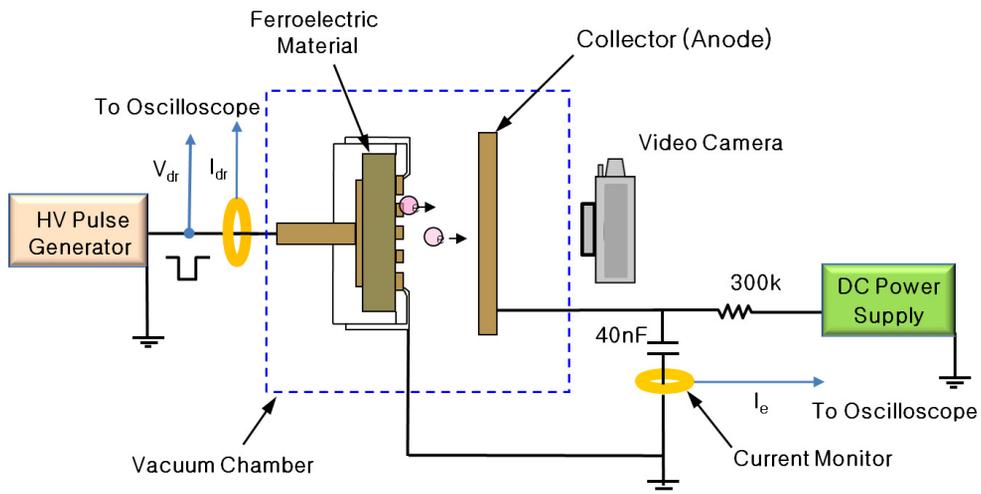


Fig. 2. A schematic diagram of the experimental setup

따라 연면방전(surface discharge)이 발생할 수 있다. 그래서 본 연구의 구동펄스의 반치폭(FWHM : full width at the half maximum) 시간은 μs 이하로 선택하고 구동전압의 세기는 음극의 전자 방출이 시작되는 임계구동전압에 맞추었다.

Fig. 3은 I 형 전극이 부착된 PZT 56/44 강유전체 음극을 구동시키는 임계구동파형 및 음극으로부터 방출된 전자의 전류파형을 나타낸다. 구동전압의 반치폭 시간이 $\sim 0.7\mu\text{s}$ 일 때 음극의 임계구동전압은 $\sim 2.6\text{kV}$ 로 나타났다[Fig. 3(a)]. 강유전체 원반의 두께가 1mm 이므로 임계전기장(E_{th})은 $\sim 2.6\text{kV/mm}$ 이며, 이는 PZT

56/44 세라믹의 분극 반전이 시작되는 항전계(E_c) 보다 세 배 이상 높은 값이다[Table 1 참조]. 구동전압의 기립시간(t_r)과 완화시간(t_f)은 $\sim 0.15\mu\text{s}$ 로 비슷하였으며, 이 시간 동안 음극의 변위전류는 각각 48A, 30A를 보였다.

Figs. 3(b)와 3(c)는 임계전압펄스 하에서 가속전압에 따른 음극의 전자 방출 파형을 나타낸 것이다. 가속전압 미인가 시[Fig. 3(b)], 전자는 구동전압의 전기장이 급격하게 변하는 기립시간 및 완화시간 두 곳에서 각각 분리된 채로 방출되었으며, 전자 방출 시 음극 표면에서는 항상 섬광이 동반되었다. 구동전압의 기립시간에 방출된 전자의 전류펄스(I_{e1})는 $\sim 0.05\text{A}$ 의 피크치와 $0.2\sim 0.25\mu\text{s}$ 의 반치폭 시간을 가졌으며, 구동펄스의 완화시간에 방출된 전자의 전류펄스(I_{e2})는 $\sim 0.1\text{A}$ 의 피크치와 $0.05\mu\text{s}$ 이하의 반치폭 시간을 가졌다. 두 방출 파형의 반치폭 시간에 의하면 구동펄스의 기립 전기장이 완화 전기장보다 더 많은 지점의 도메인들을 자극, 전자 방출에 기여했음을 알 수 있다. 전자 방출은 가속전압의 세기에 영향을 크게 받음을 Fig. 3(c)에서 볼 수 있다. 가속전압에 의해 I_{e2} 의 증가가 두드러지고, I_{e1} 과 I_{e2} 의 구분은 불명확하였다. 가속전압이 증가할수록 전자방출지점이 확대되어 방출 전자의 피크치가 증가하고 또한 피크 형성 시간이 지연되는 경향을 보였다. 전자들의 총 방출시간은 $3\mu\text{s}$ 정도이며 가속전압이 400V로 증가하면 강한 피크 형성과 함께 방출시간이 줄어들었다.

전극 구조 II 형 및 III 형이 부착된 PZT 56/44 음극들의 전자 방출은 I 형 전극이 부착된 음극과 유사한 $-2.5\sim -2.6\text{kV}$ 의 구동전압에서 시작되었다. 전극의 구조적인 차이에도 불구하고 관측된 구동 파형은 Fig. 3(a)와 거의 차이가 없었다. Fig. 4와 Fig. 5는 전극 구조 II 형 및 III 형이 부착된 PZT 56/44 음극에 I 형 음극을 구동했을 때와 동일한 크기의 임계구동펄스를 인가하였을 때 각 음극들로부터 방출된 전자의 전류파형들이다. 가속전압 부재 시[Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)], 전자 방출은 구동전압의 기립시간 및 완화시간 동안에 시작되고, 방출 전류의 피크값은 0.1A 이하이다. 좁은 펄스폭($< 0.05\mu\text{s}$)을 갖는 다수의 전류파형이 측정되었으며, 이는 전자 방출 지점이 산발적이고 전자 방출 시간이 비동시적임을 의미한다. 즉, 전자의 발생 지점 및 발생 시간이 전극 구조에 의존적임을 나타낸다. II 형 전극을 갖는 음극의 경우는 음의 극성을 갖는 전류펄스를 뒤따라 양의 극성을 갖는 전류펄스가 강화

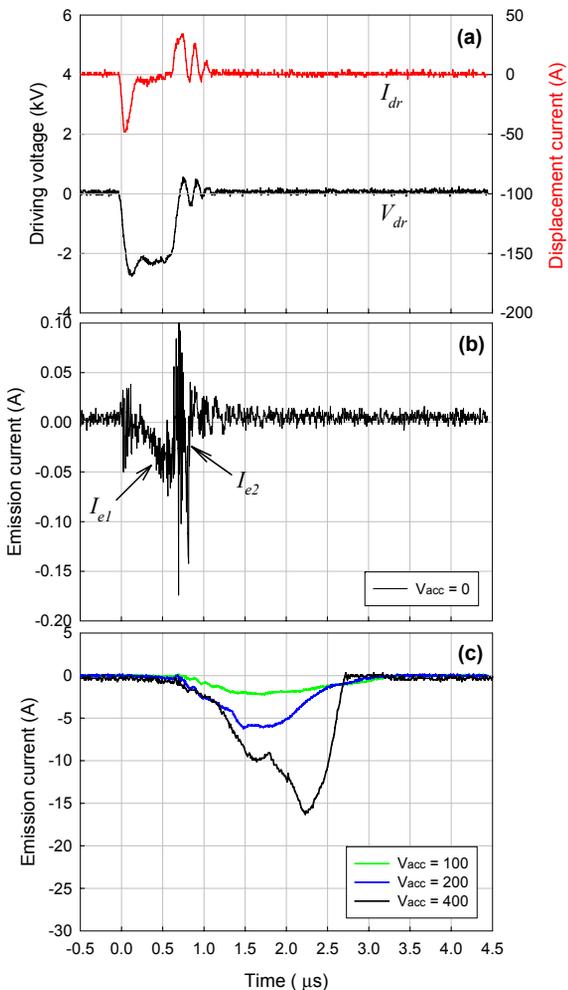


Fig. 3. Typical waveforms of the driving pulse and the emitted electron currents when a Type I electrode was attached on the PZT 56/44 ceramics

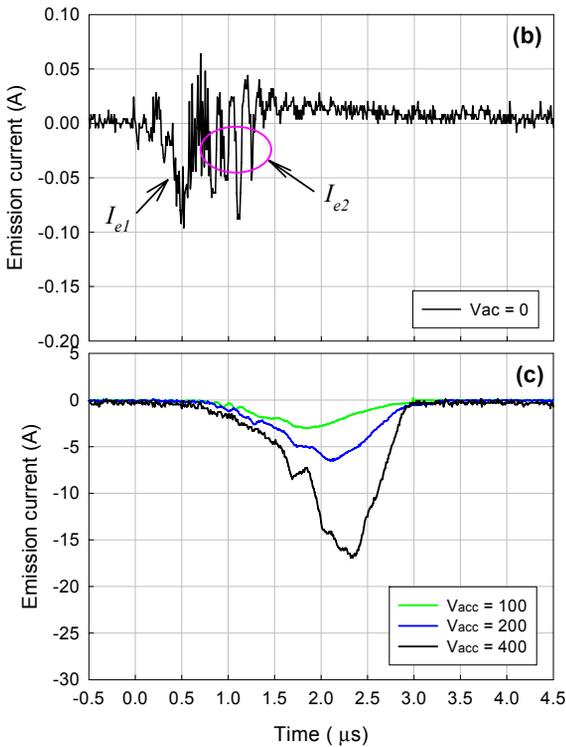


Fig. 4. Electron currents emitted from the PZT 56/44 ferroelectric cathode which has a type II electrode

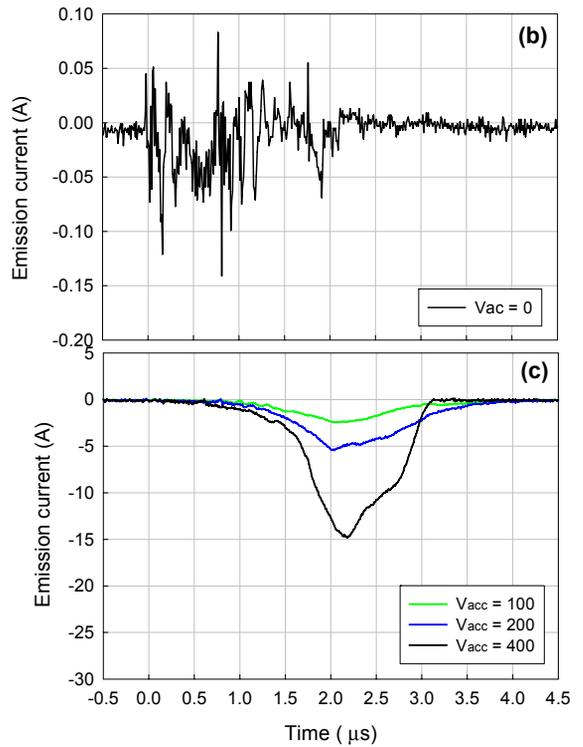


Fig. 5. Electron currents emitted from the PZT 56/44 ferroelectric cathode which has a type III electrode

게 관측되므로[Fig.4 (b)], 전자 방출 현상이 플라즈마 발생과 관련됨을 알 수 있다. 가속전압 인가 시[Fig.4(c)와 5(c)], 전자 방출은 완화시간 이후에 크게 증가하였다. 전자의 총 방출 시간은 가속전압의 세기 및 전극 구조의 차이에도 불구하고 $\sim 3\mu\text{s}$ 로 유사하게 나타났다으며 가속전압에 의해 I_{e2} 의 강한 증가가 확인된다. 가속전압이 음극의 전자 방출 증가에 미치는 영향은 두 가지로 해석할 수 있다. 첫 째는 강유전체 표면의 전계 및 전위 분포를 심하게 왜곡하여 차폐전하의 구속력을 약화시킴으로써 전자 방출 지점이 확대시켰고, 둘째는 방출된 전자들의 발산을 억제시켰기 때문이다.

Fig. 6은 3 종류의 PZT 56/44 강유전체 음극에서 방출된 전자전류의 피크치(I_e)와 반치폭 시간(τ_c)을 가속전압의 함수로 나타낸 것이다. 가속전압이 증가할수록 3 종류 음극들의 피크전류는 증가하고 피크전류 증가율 또한 향상됨을 알 수 있다. 전극의 구조적인 차이에도 불구하고 피크전류의 세기는 큰 차이를 보이지 않았다. 방출 전자들의 반치폭 시간은 가속전압의 인

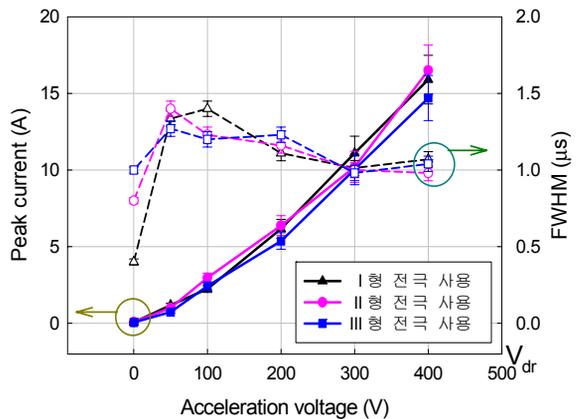


Fig. 6. Peak current and pulse duration vs. acceleration voltage for the three PZT 56/44 cathodes which have different electrode structure

가와 동시에 급격히 증가한 후 가속전압이 증가할수록 감소하였다. 가속전압 미인가시, 반치폭 시간은 전

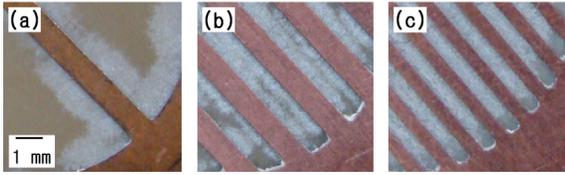


Fig. 7. Surfaces of the PZT 56/44 cathodes after the emission measurements. Electrode structure : (a) Type I, (b) Type II, and (c) Type III, respectively

극 구조에 따라 상당한 차이를 보였지만 가속전압이 증가할수록 이들 전극들 간의 상대적인 차이는 줄어들었다.

강유전체 음극의 전자방출 지점을 확인하기 위해 측정 완료 후 음극의 전자방출면을 조사하였다. Fig. 7(a)은 I 형 전극이 부착된 음극의 전자방출면 사진을 나타낸다. 전자 방출 과정에서 강유전체의 표면이 심하게 손상되었으나 전극의 경우 모서리에서 부분적인 손상이 확인되었다. 강유전체 표면의 손상 거리는 전극 모서리로부터 1mm 정도이다. 따라서 스트립 사이의 간격이 2mm 이하로 유지될 경우 노출된 강유전체 표면 전체가 전자 방출에 기여할 수 있음을 알 수 있다. 그 증거로써, 스트립 간격이 각각 1mm, 0.5mm로 유지된 II 형과 III 형 전극이 부착된 음극들 [Figs. 7(b)와 7(c)]의 경우 강유전체의 노출면 전체가 전자 방출에 기여하였다.

본 연구에 사용된 강유전체 음극의 전극 구조가 전자 방출에 미치는 영향을 분석하기 위해 정적인 상태에서 음극 주위의 전계 및 전위분포를 전산모사(QuickField v4.3, Tera Analysis, 사용)하였다. Fig. 8은 음극의 후면전극에 -2.5kV의 구동전압을 인가했을 때 미시갭(micro-gap)이 존재하는 삼중점 근처의 전기장 및 전위분포를 나타낸다. 전계는 삼중점 근처에서 강하게 형성되고, 세라믹 표면에 대해 수직성분과 수평성분을 가지며, 세라믹 표면 근처뿐만 아니라 진공영역까지 영향을 준다. 미시갭의 간격이 세라믹 두께에 비해 무시할 수 있을 경우 삼중점에서의 전기장의 세기^[11]는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$E_{t.p.} \approx \epsilon_r \frac{V_{dr}}{d} \quad (1)$$

여기서, ϵ_r 은 세라믹의 유전율, d 는 세라믹 두께, 그

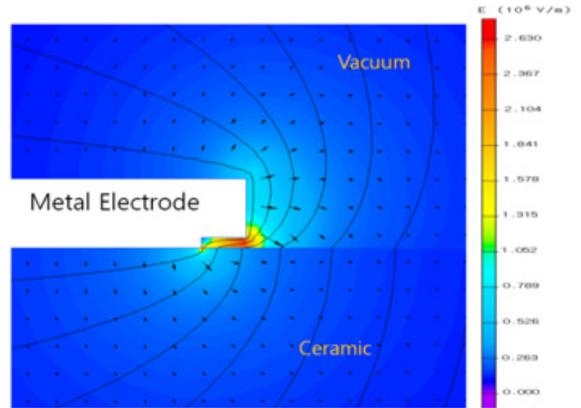


Fig. 8. Distribution of the electric field (arrows) and the equipotential curves (lines) near the triple point

리고 V_{dr} 는 구동전압을 나타낸다. PZT 56/44 음극의 경우 세라믹의 유전율이 570이고, 세라믹 두께가 0.1cm이므로 구동전압 -2.5kV가 후면전극에 인가될 경우 삼중점의 전기장 세기는 $\sim 1.4 \times 10^7 \text{V/cm}$ 이다. 고체 물질의 전계 방출이 $1.0 \times 10^6 \text{V/cm}$ 이상의 전기장에서 가능하므로 강유전체 음극의 삼중점에 형성된 전기장은 이론적으로 전계 전자 방출이 충분히 가능하다. 삼중점에서의 강한 전계 형성[Fig. 8]과 음극의 손상이 삼중점과 맞닿는 세라믹 표면에서 균일하게 일어나는 점[Fig. 7]을 고려할 때 강유전체 음극의 전자 방출은 삼중점에서 시작되었음을 알 수 있다. 또한 음극 표면의 섬광 발생, 강유전체의 표면 손상, 그리고 이온전류 발생 등을 고려할 때 강유전체 음극의 전자 방출은 플라즈마에 의해 강하게 증폭되었음을 알 수 있다. 강유전체 음극의 강한 전자 방출이 삼중점에서 시작되고, 불완전한 표면방전에 의해 생성된 플라즈마에 의한 현상이라는 결과^[7,9,11]들이 보고된 바 있으며, 본 연구의 전자 방출 현상도 이들 결과들과 유사하다.

Fig. 9는 구동전압 세기를 변화시키면서 스트립 전극 사이의 세라믹 표면에 형성되는 전기장의 수직성분을 계산한 것이다. 세라믹 두께는 1mm이고, 전면전극의 전극 폭(a)과 전극 사이의 간격(b)은 0.5mm이며, 세라믹의 유전상수가 570 인 경우이다. 전기장의 세기가 삼중점이 위치한 전극 모서리에서 가장 강하고, 삼중점으로부터 1~2 μm 만 벗어나도 급격히 감소한다. 이는 전계 방출이 전극 모서리 근처의 극히 제한적인 지점에서만 가능함을 의미한다. 세라믹 표면의 전계는 구동전압이 증가할수록 증가하며, 세라믹 표면

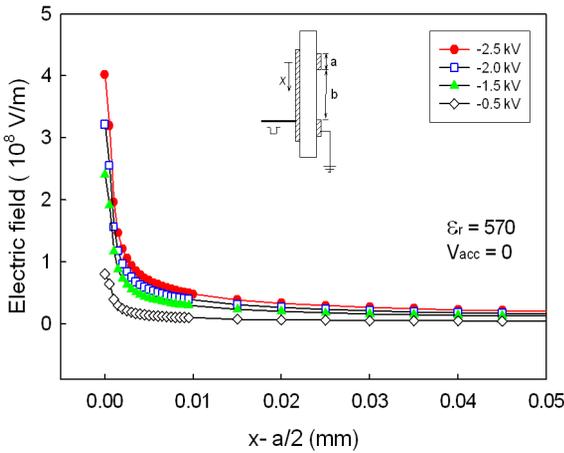


Fig. 9. Electric field intensity on the ceramic surface (a : width of the strip electrode, b : distance between the strip electrodes)

각 지점에서 계산된 전계 세기는 구동전압 세기에 비례하여 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 스트립 전극 폭, 스트립 전극 사이의 거리 그리고 구동전압의 세기를 변화시켰을 때 세라믹 표면에 형성되는 최소전위를 계산한 것이다. 음극의 후면 전극에 음의 구동전압이 인가된 경우로 최소전위는 “b/2” 지점에서 형성된다. 스트립 전극 사이의 거리가 증가할수록 접지 전위가 미치는 영향이 줄어들어 세라믹 표면의 최소전위는 후면 전극의 구동전압 세기에 비선형적으로 접근하였다. 구동전압 -1.5kV에서 최소전위의 기울기를 외삽할 때 “b/2” 지점의 전위가 후면 전극의 전위와 같아지는 전극 사이의 거리는 대략 4mm 정도이다. 세라믹 두께가 일정할 경우 세라믹 표면의 최소전위는 구동전압의 세기에 따른 축척 법칙(scaling law)^[2]이 적용되므로 -2.5kV의 구동전압에서 전자가 세라믹 표면에 형성된 전위차로 인해 가속될 거리는 대략 2mm 정도이다. 하지만 Fig. 7(a)에서 하전입자(이온 혹은 전자)의 이동 거리(손상 거리)가 ~1mm 인 점을 감안할 때, 강유전체 표면에서 입자들의 실질적인 이동에 상당한 제약이 있었음을 알 수 있다. Fig. 10에 의하면 전극폭의 변화가 세라믹 표면의 전위 분포에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 따라서 모양지어진 전극을 설계할 때 전극간의 간격에 유동성을 줄 수 있다.

본 연구에서 강유전체 음극의 강한 전자 방출 과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 음의 구동전압이 음

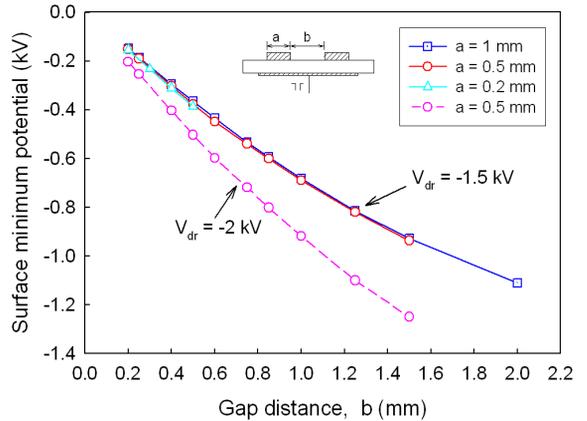


Fig. 10. Minimum surface potential as a function of the distance between the strip electrodes for various electrode width

극 후면 전극에 인가되면 강유전체 도메인들의 분극 변화에 의해 삼중점에서는 전계 방출 이상의 강한 전기장이 형성되고 세라믹 표면에서는 전위차가 형성된다. 삼중점 근처의 세라믹 표면에서 국부적으로 전계 방출이 일어나고 방출 전자들은 전극 쪽으로 가속, 전극과 충돌하면서 방전을 일으킨다. 그 결과 삼중점에서 근처에서 국부적으로 플라즈마가 발생되고 플라즈마 이온들은 강유전체 표면의 전위차에 의해 가속을 받게 된다. 플라즈마 이온들은 가속되는 동안 강유전체 표면의 구성 물질 혹은 흡착된 불순물과 상호작용하여 추가적인 플라즈마를 다량 생성하고, 이 때 대부분의 플라즈마 이온들은 세라믹 표면의 차폐전자들과 결합하여 중성화되고, 플라즈마 전자들과 중화되지 않은 플라즈마 이온들이 진공 속으로 방출된다.

강유전체 음극의 강한 전자 방출은 플라즈마 영향으로 확인되며, 방출 전자의 전류밀도는 플라즈마가 형성되어지는 강유전체 표면적에 영향을 받는다. Fig. 11은 3 종의 PZT 56/44 강유전체 음극에서 방출된 전자들의 전류밀도(J)를 가속전압의 함수로 나타낸 것이다. 전류밀도의 세기는 II 형 전극이 부착된 음극에서 가장 크게 나타났으며, III 형 전극, I 형 전극이 부착된 음극의 순으로 나타났다. II 형 전극이 부착된 음극은 전극폭과 전극 간의 거리가 III 형 전극이 부착된 음극보다 2 배 정도 크지만 노출된 강유전체 표면적이 유사하고 또한 전극 사이의 간격이 2mm로 유지되었기에 방출된 전자의 전류밀도는 유사한 결과를 보였다. 하지만 I형 전극 부착 음극의 경우 노출된 세

Table 2. Experimental results of electron emission from the three types of PZT 56/44 cathodes

V_{acc} (V)	I 형 전극 사용			II 형 전극 사용			III 형 전극 사용		
	I_e (A)	J_e (A/cm ²)	τ_e (μ s)	I_e (A)	J_e (A/cm ²)	τ_e (μ s)	I_e (A)	J_e (A/cm ²)	τ_e (μ s)
0	0.05	0.04	0.40	0.08	0.12	0.80	0.05	0.07	1.00
50	1.18	0.99	1.33	1.00	1.54	1.40	0.73	1.07	1.27
100	2.24	1.88	1.40	2.97	4.57	1.23	2.43	3.57	1.20
200	6.16	5.18	1.11	6.38	9.82	1.16	5.37	7.90	1.23
300	11.10	9.33	1.01	10.20	15.69	1.00	10.04	14.76	0.98
400	15.90	13.36	1.07	16.50	25.38	0.98	14.70	21.62	1.04

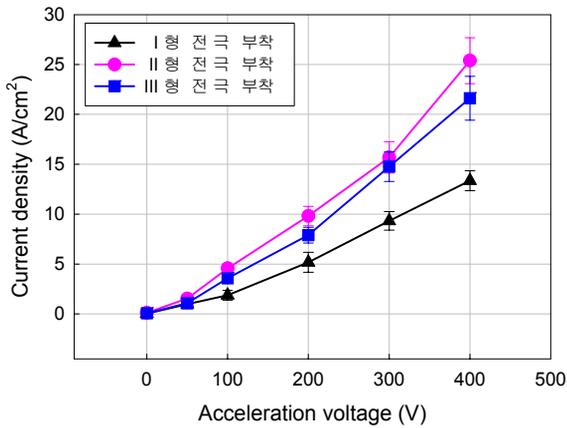


Fig. 11. Current density vs. acceleration voltage at ~ 2.6kV/mm driving electric field

라믹 표면적이 넓고 또한 전극 사이의 거리가 2mm 이상 유지되었기에 전류밀도는 II, III 형의 전극구조들을 사용했을 때 보다 낮게 나타났다. 400V의 가속 전압에서 방출 전자의 전류밀도는 I 형 전극이 부착된 음극에서 14A/cm², II 형 및 III 형 전극이 부착된 음극에서 각각 22, 25A/cm²가 획득되었다. 본 연구에서 측정된 각 음극들의 피크전류와 반치폭 시간 그리고 전류밀도는 Table 2와 같다.

4. 결론

강유전체 음극의 전자 방출에 전극 구조가 미치는

영향을 분석하기 위해 전자 방출면의 전극 구조를 달리한 3 종의 PZT 56/44 강유전체 음극을 제작하고 전자 방출 시험을 실시하였다. 임계 구동전기장은 전극 구조에 관계없이 3 종의 음극에서 동일한 2.5-2.6kV/cm 를 보였으며, 이는 분극 반전이 가능한 PZT 56/44의 항전계보다 3 배 이상 높은 값이다. 가속전압 미인가 시, 음극의 전자 방출이 구동전압의 급격한 변화에 의해 일어나고, 방출되는 전자의 펄스 형태와 펄스폭은 전극 구조의 영향을 크게 받았다. 가속전압이 인가 시, 전극의 구조적인 차이로 인해 방출 전자의 전류파형은 각각 다른 형태를 보였지만 동일 세기의 가속전압에서 전자방출 특성인 피크전류와 펄스폭은 전극 구조에 관계없이 유사한 크기를 가졌다. 즉, 가속전압이 인가되면 음극의 전자 방출 특성에 전극 구조가 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

음극 표면의 손상 위치 및 전계 및 전위분포를 고려할 때 강유전체 음극의 전자 방출은 삼중점에서 시작되었고, 음극 표면의 섬광 발생, 표면 손상 그리고 이온과형 계측 등을 종합해 볼 때 강유전체 음극의 강한 전자 방출은 음극 표면에서 형성된 플라즈마 전자들에 의해 강하게 증폭되었다. 강유전체 표면에서 플라즈마가 형성된 거리는 1mm 내외였고, 스트립 전극 사이의 간격이 방출 전자의 전류밀도에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있었다.

References

[1] H. Gundel, H. Riege, E. Wilson, J. Handerek, and

- K. Zioutas, Bull. Am. Phys. Soc. Vol. 34, p. 193, 1989.
- [2] G. Rosenman, D. Shur, Ya. E. Krasik, and A. Dunaevsky, "Electron Emission from Ferroelectrics", J. Appl. Phys. Vol. 88, No. 11, pp. 6109~6160, 2000.
- [3] A. Sh. Airapetov, I. I. Ivabchik, A. N. Lebedev, I. V. Levshin, and N. A. Tikhomirova, "Pulsed Exo-emission of Electron During Incomplete Polarization Reversal of Ferroelectric Materials", Sov. Phys. Dokl. 35(3), pp. 267~269, 1990.
- [4] B. Jiang, G. Kirkman, and N. Rhinehardt, "High Brightness Electron Beam Produced by a Ferroelectric Cathode", Appl. Phys. Lett., Vol. 66, pp. 1196~1198, 1995.
- [5] Y. Hayashi and E. Hotta, "Characteristics of Microwave Application using an Electron Beam Generated from Ferroelectric Cathode", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 42, Part 2, No. 7B, pp. L869~L872, July 2003.
- [6] Y. Bar-Cohen, S. S. Lih, X. Bao, and S. Sherrit, "Ferroelectric-based Single Source of Multiple Types of Radiation Enabling Multifunctional NDE and Analytical Instruments", ASNT Journal, Materials Evaluation, Vol. 64, No. 4, pp. 407~411, 2006.
- [7] Y. E. Krasik, K. Chirko, J. Z. Gleizer, A. Krokhmal, A. Dunaevsky, and J. Felsteiner, "Application of a Ferroelectric Plasma Cathode as a High-current Switch", Eur. Phys. J. D 19, pp. 89~95, 2002.
- [8] G. Rosenman, D. Shur, and A. Skliar, "Ferroelectric Electron Emission Flat Panel Display", J. Appl. Phys. Vol. 79, No. 8, pp. 7401~7403, 1996.
- [9] K. Chirko, V. Ts. Curovich, Ya. E. Krasik, O. Peleg, and J. Felsteiner, "High-frequency Electron Beam Modulation by a Ferroelectric Cathode with Anomalous Plasma Resistance", Phys. Plasma, Vol. 11, No. 8, pp. 3865~3876, 2004.
- [10] H. Gundel, H. Riege, E. J. N. Wilson, J. Handerek, and K. Zioutas, "Fast Polarization Changes in Ferroelectrics and Their Application in Accelerators", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 280, pp. 1~6, 1989.
- [11] G. A. Mesyatz, "Electron Emission from a Ferroelectric Ceramic", Tech. Phys. Lett., Vol. 20, pp. 8~9, 1994.
- [12] D. Shur, G. Rosenman, Ya. E. Krasik, and V. D. Kugel, "Plasma-assisted Electron Emission from (Pb,La)(Zr,Ti)O₃ Ceramic Cathodes", J. Appl. Phys., Vol. 79, No. 7, pp. 3669~3674, 1995.
- [13] D. N. J. Shannon, P. W. Smith, P. J. Dobson, and M. J. Shaw, "Dual Mode Electron Emission from Ferroelectric Ceramics", Appl. Phys. Lett., Vol. 70, No. 12, pp. 1625~1627, 1997.
- [14] B. Jaffe, W. R. Cook, Jr. and H. J. Jaffe, Piezoelectric Ceramics, Academic Press, London and New York, p. 147, 1971.