

## 스파크 점화 시스템의 방전 거동 및 특성에 관한 연구

이 명 준<sup>1)</sup> · Matt Hall<sup>1)</sup> · Ofodike A. Ezekoye<sup>1)</sup> · Ron Matthews<sup>1)</sup> · 정 성 식<sup>\*2)</sup>

텍사스주립대 기계공학과<sup>1)</sup> · 동아대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

### A Study on Behaviour and Characteristics of Spark Discharge in Spark Ignition Systems

Myung Jun Lee<sup>1)</sup> · Matt Hall<sup>1)</sup> · Ofodike A. Ezekoye<sup>1)</sup> · Ron Matthews<sup>1)</sup> · Sung Sik Chung<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin, 1 University Station C2200, Austin TX 78712, U.S.A.

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, DongA University, Busan 604-714, Korea

(Received 1 June 2005 / Accepted 6 October 2005)

**Abstract** : Time-resolved current and voltage measurements for an inductive automotive spark system were made. Also presented are measurements of the total energy delivered to the spark gap. The measurements were made in air for a range of pressures from 1-18atm, at ambient temperatures. The measured voltage and current characteristics were found to be a function of many ignition parameters; some of these include: spark gap distance, internal resistance of the spark plug and high tension wire, and pressure. The voltages presented were measured either at the top of the spark plug or at the spark gap. The measurements were made at different time resolutions to more accurately resolve the voltage and current behavior throughout the discharge process. This was necessary because the breakdown event occurs on a time scale much shorter than the arc and glow phases. The breakdown, arc, and glow voltages were found to be functions of spark plug resistance, gas density, and spark plug gap as expected from the literature. Spark duration was found to decrease as either pressure or gap was increased. The transition from the arc to glow phase is usually distinguished by a sudden rise in the voltage across the gap. At pressures above about 7atm this transition was not observed suggesting that a glow phase was not present. Energy delivered to the gap increased with increasing pressure. The effective resistance of the spark gap during discharge was about twice as large for the glow phase as the arc phase.

**Key words** : Voltage(전압), Current(전류), Spark plug(스파크 플러그), Breakdown(절연파괴), Arc(아크), Glow(글로우), Effective resistance(유효 저항), Arc-to-glow transition(아크-글로우 트랜지션)

### 1. 서 론

자동차엔진과 정지엔진(stationary engine)에 있어서 압축비와 부스트압력을 높이고자 하는 경향에 따라 엔진 점화 시스템 성능 향상의 필요성도 커지고 있다. 점화시에 스파크 플러그 주변의 가스밀도가 높아질수록 브레이크다운 전압이 더 높게 요구

되거나 스파크 플러그 전극의 갭크기가 작아져야 한다. 그러나 희박운전이나 EGR율이 높은 운전 조건에서 갭크기를 줄이는 것은 신뢰할만한 점화를 달성하기 위한 요구에 부합하지 않는다. 또 더 높은 에너지를 주는 것은 점화에 도움을 줄 수는 있지만, 스파크 플러그의 마모를 촉진시키게 되고 정비보수 비용이 매우 비싼 정지엔진에서 심각한 문제를 야기할 수 있다. 이러한 성능 트레이드오프를 최적화하기 위해서 스파크 점화시스템의 특성에 관한 명

\*To whom correspondence should be addressed.  
sschung@dau.ac.kr

확한 이해가 요구된다. 구체적으로, 가스의 밀도, 전극의 갭크기, 가스 조성과 점화시스템 사양 등에 따른 방전기간, 부가 에너지, 브레이크다운 전압, 그리고 플러그의 마모 등과 같은 중요한 현상들에 대하여 명확히 이해할 필요가 있다.

스파크 현상은 일반적으로 세 가지의 순차적인 방전단계(브레이크다운, 아크, 글로우)를 통해 일어난다. 브레이크다운은 전도성 통로가 만들어져 있는 전극의 갭에서 이온화된 가스를 통해 압축된 혼합기를 20-40kV 정도의 고전압으로써 전기적으로 절연 파괴하는 특성을 가진다. 1889년에 파센은 가스의 전기적 브레이크다운 특성을 설명하였다. 그는 브레이크다운 전압이 전극의 갭크기와 가스압력(밀도), 또는  $V = f(pd)$ , - 여기서  $p$ 는 압력,  $d$ 는 갭거리 - 의 결과라고 설명하고 있다. 이것은 파센의 법칙으로 알려져 있는데, 밀리미터 정도의 작은 갭을 가진 공기중 브레이크다운에서, 그 전압에 대한 근사값이 다음의 식으로 계산되어졌다.

$$V = 30pd + 1.35 \text{ kV} \quad (1)$$

$d$  : electrode gap size, cm  $p$  : pressure, atm.

브레이크다운 거동에 관한 수많은 연구가 수행되어 왔으며, Meek<sup>1)</sup>은 브레이크다운 전압이 전극의 형상과 거칠기, 먼지, 복사와 가스조성에 좌우될 수 있음을 밝혔다. Maly와 Vogel<sup>2)</sup>은 4atm 압력에서 점화의 세 가지 모드를 가지고 메탄/공기 혼합기의 점화성을 연구했으며, 아크와 글로우 단계보다 더욱 강하게 연소를 시킬 수 있는 브레이크다운을 발견했다. Reinmann 등<sup>3-5)</sup>은 스파크 점화시스템의 기본적인 거동과 엔진 실린더 내부 현상들을 감지하기 위한 스파크 플러그 이온 전류의 응용에 관하여 연구하였다. 이와 같은 자동차 스파크 점화시스템의 방전 특성에 대한 많은 연구들이 간단한 전압과 전류의 측정을 통해서 수행되어졌다. 따라서, 본 연구에서는 전압과 전류의 측정을 통하여 스파크 플러그의 내부 저항, 전극의 갭크기, 그리고 브레이크다운 전압과 전류, 에너지 부여, 스파크 기간, 아크 및 글로우기간, 갭의 유효저항에 영향을 미치는 압력의 특성을 고찰하였다. 이와 관련하여 Maly<sup>6)</sup>는 내연기관의 스파크 점화 과정들에 대한 가장 폭넓은 연구를 수행한 바 있으며 본 연구에서도 방전 물리

학과 점화에 관한 몇 가지 기본적인 연구들을 고찰하였다.

## 2. 실험장치

실험은 실엔진에 사용되는 점화시스템을 사용하여 수행되었다. Fig. 1에 나와 있는 실험장치는 점화모듈(Napa Model TP45)에 의해 작동하는 점화코일(MSD blaster, PN 8207)로 구성되어 있다. 이 점화모듈은 함수발생기의 TTL 펄스로 작동되며 펄스 신호는 트랜지스터 회로에 의해 증폭된 후 점화모듈로 입력된다. 대부분의 실험에서 11kohm의 내부저항을 가진 고전압 케이블을 사용하였으며, 저항의 영향을 조사하기 위한 실험에서는 거의 저항이 없는 구리 케이블을 사용하여 고전압 케이블의 내부 저항까지도 고려하였다. 또 내부 저항이 0-25kohm의 범위에 있는 플러그를 사용하였으며 내부 저항은 실험전과 후에 측정하였다. 몇몇 새 플러그는 실험전의 저항이 실험 후보다 더 높은 저항을 가지고 있었던 점이 특이하였는데 이는 실험하는 동안 내부 저항이 감소된 것으로 판단된다.

스파크 플러그는 정적연소기에 설치하였으며 연소기의 내부 직경은 79mm이며, 18atm까지 가압할 수 있도록 되어있다. 자연흡인 엔진에서 스파크 점화시의 전형적인 온도와 압력이 350°C, 9atm의 범위에 있다고 볼 때<sup>7)</sup> 이와 유사한 조건은 본 연구의 정적연소기 실험온도인 22°C에서 연소기 내부 압력은 약 4atm이다. 본 연구의 관심은 하이 부스트(high-boost) 천연가스엔진의 점화이므로 4atm 이상

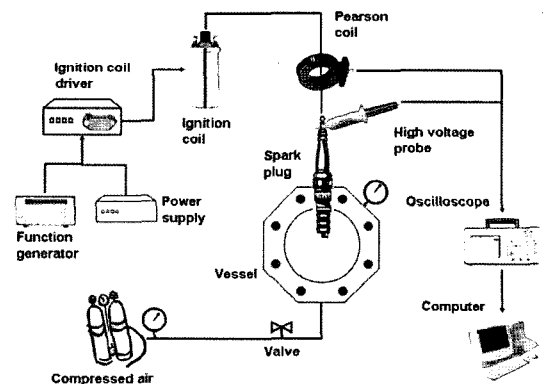


Fig. 1 Schematic of experimental setup

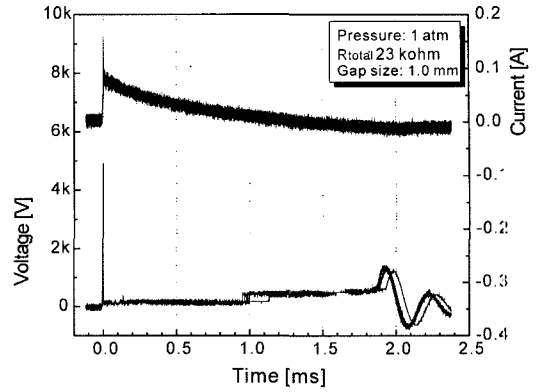
의 압력에서 실험하였다.

전압 파형은 고전압 프로브(Tektronix P6015A, rise time: ~4ns)로 측정하였으며 전류는 전류트랜스듀서(Pearson 410, sensitivity: 0.1V/amp, rise time: 20ns)를 이용하였다. 전류와 전압 파형들은 오실로스코프(Tektronix TDS1002)로 캡처후 PC로 전송하였다. 전압의 측정은 고전압 케이블과 플러그가 연결되는 단자인 탑(top) 부분과 스파크 플러그 중심 전극의 갭(gap) 부분에서 이루어졌다. 갭에서의 전압계측은 갭에서 전달되는 에너지를 예측하기 위해 수행하였으며 여기서 감소된 에너지 손실은 플러그의 내부저항에 의한 것으로 생각된다. 방출된 전체 에너지는 전압과 전류파형을 이용하여 계산하였다. 본 실험에서 기준으로 사용한 시료는 내부 저항이 11kohm인 고전압케이블과 내부 저항이 23kohm, 갭 크기는 1mm인 스파크 플러그이다. 모든 계측은 분위기온도 약 22°C에서 수행되었고 스파크는 1 Hz로 작동시켰다. 각 조건에서 10회 이상 계측한 것을 앙상블 평균하였다.

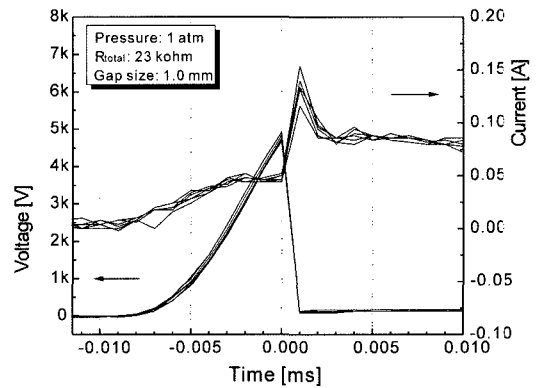
### 3. 결과 및 토론

방전이 일어나는 동안 전압과 전류의 일반적인 특성을 Fig. 2와 3에 나타내었다. Fig. 2는 1atm, Fig. 3은 11atm에서 측정된 것이며 사용된 모든 플러그에서 유사한 특성이 보였다. 측정된 전압과 전류를 전체 방전(Fig. 2(a))과 브레이크다운 단계(Fig. 2(b))로 각각 나타내었으며 5회의 파형을 동시에 나타낸 것이다. 브레이크다운 전압들은 1atm에서 4-6kV의 범위에 있었다. 브레이크다운에 앞서 약 10 $\mu$ s의 전압상승기간이 관찰되었으며 Maly<sup>6)</sup>는 브레이크다운시 전압의 강하가 10ns 정도에 걸쳐서 일어나는 것을 보고하였는데, 이것은 본 실험에서 사용한 전류 트랜스듀서의 시간분해능보다는 빠르나 고전압 프로브의 시간분해능으로 계측하기에는 충분한 시간이다. 브레이크다운 직후 최대값이 약 0.15A 정도 되는 짧은 전류펄스가 관찰되었다. 실제 브레이크다운 전류는 너무 짧기 때문에 계측을 할 수가 없었는데 보통 수백 amps 까지 상승한다.<sup>6)</sup>

전류파형은 참고문헌 1에 나타내어진 Townsend에 의해 처음 설명된 것과 같이 전통적인 거동을 보



(a) Time scale for entire discharge



(b) Time scale for breakdown event.

Fig. 2 Voltage and current traces at 1atm pressure

여준다. 이것은 Fig. 2(b)와 3(b)에서도 분명히 보여진다. 전압이 상승하기 시작함에 따라 전류도 캐소드로부터 전자들의 방출 때문에 상승한다. 전압이 계속 상승함에 따라 전류는 일정한 값을 유지하는데 이 현상은 Fig. 3(b)를 통하여 볼 때 브레이크다운의 약 30 $\mu$ s 전에서 일어나는 것을 알 수 있다. 이 때 전기장의 세기는 초기 전류를 유지하기에는 충분하지만, 이온화를 통해 급격하게 일어나는 전자 증배와 이들의 충돌 시에 전자들이 충분한 에너지가 되도록 가속시키기에는 부족하다. 결국 캐소드에서 나온 전자들은 전기장의 증가와 가스를 이온화시키는 다른 분자들과의 충돌, 그리고 초기 이온화시 전류의 기하급수적 증가에 의해 가속된다.

전압이 더 증가함에 따라 전류는 이차이온화에 의해 지수함수율보다 더 빨리 상승하기 시작한다. 이차이온화는 양이온에 의한 캐소드와의 충돌로 인

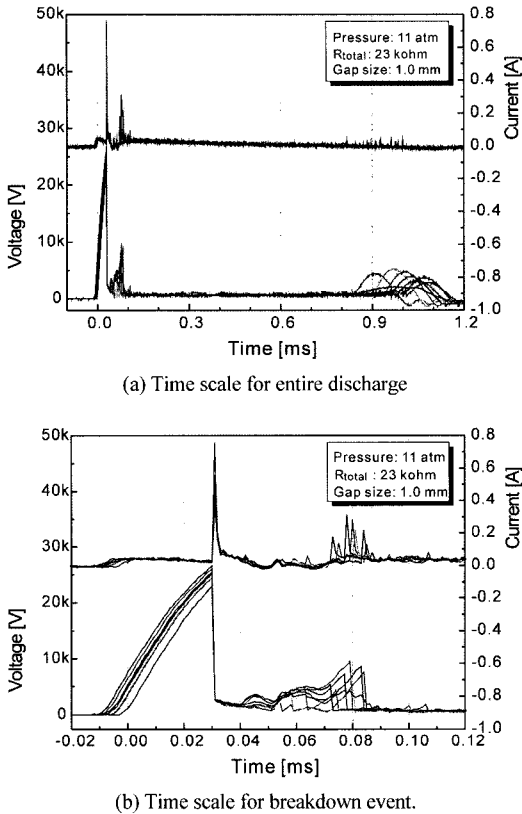


Fig. 3 Voltage and current traces at 11atm

한 결과이다. 최대 전류는 브레이크다운 시에 일어나고 그 후에 전류는 상대적으로 일정한 약 0.8 A의 낮은 레벨로 떨어진다. 브레이크다운 이후 방전의 아크 단계가 시작된다.

Fig. 2(a)에서 아크단계가 약 1ms 동안 약 100-150V의 낮은 범위로 떨어져서 진행되다가 전압이 갑자기 약 450V로 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 아크에서 글로우단계로의 트랜지션 현상이다. 측정된 글로우 전압은 약 500V이며 압력 1atm, 전극 갭 크기 1mm의 조건에서 Maly<sup>6)</sup>의 결과와 거의 일치하는 값이다. 그러나 아크전압은 유사한 조건에서 Maly가 보고한 50V보다는 큰 값을 나타내었다. 글로우 전류는 전자를 내어놓는 양이온과 캐소드와의 충돌에 의해 발생되어지는 반면, 아크 단계는 전극으로부터 나오는 전자들의 열이온 방출과 관련이 있다. 글로우단계의 끝에서 전압의 갑작스런 상승은 스파크의 종료이며 그 시점에서의 전류는 영(zero)으로 떨어진다. 이 그림들은 심지어 균질한 조

성의 정지 비활성 가스에서도 브레이크다운 전압, 아크-글로우 트랜지션, 그리고 스파크기간에서 샷(shot-to-shot) 변동이 있음을 설명한다.

11atm의 고압에서도 많은 방전특성이 보여지고 있으며 브레이크다운 전압이 더욱 상승한 것과 아크-글로우 트랜지션이 사라진 것을 알 수 있다. 즉, 브레이크다운 후에 방전은 거의 전체가 아크방전 혹은 글로우방전임을 의미한다. 방전의 형태는 플러그의 마모와 관련해서 중요한 사항이 되는데, 일반적으로 글로우형태 방전보다 아크형태 방전과 연관된 열이온 방출이 훨씬 더 급격한 전극의 마모를 가져온다고 알려져 있다.<sup>6)</sup> Fig. 3(a)의 전압파형에서는 아크에서 글로우로 변화할 때 트랜지션이 일어나지 않았음을 알 수 있다. 또, 고압에서 초기브레이크다운 후에 70-90 $\mu$ s 사이에서 2차 브레이크다운이 일어남을 보여주지만 그 이유는 명확하지 않다.

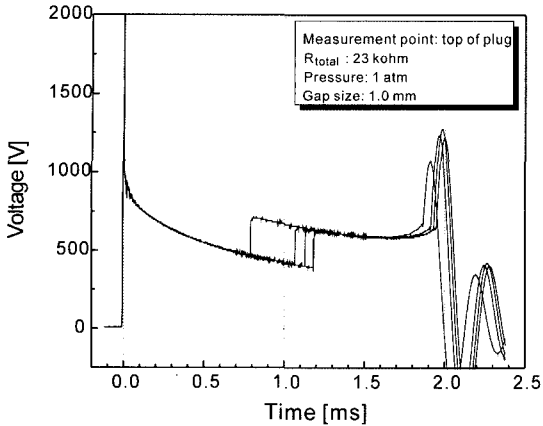
### 3.1 내부 저항의 영향

Fig. 4는 대기압에서 내부 저항이 23kohm인 스파크 플러그의 탐과 갭에서 측정된 전압을 비교하여 나타낸 것이다. 플러그의 탐에서 측정된 아크 전압은 아크 기간 동안 800V에서 400V으로 감소한 반면 갭에서는 150-200V 정도로 일정하게 유지되었다. 이러한 결과로부터 스파크 플러그의 내부 저항으로 인해 위의 플러그의 두 위치에서 측정된 전압 사이에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

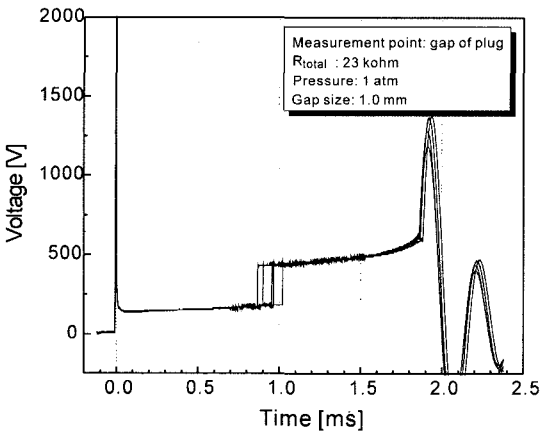
또 플러그의 내부 저항이 방전 기간을 감소시키는 함수가 되는 것을 발견하였다. Fig. 5는 1atm에서 서로 다른 저항을 가진 두 종류의 고전압케이블과 스파크 플러그와의 조합에 따른 일련의 저항 대 평균 방전기간의 측정을 나타낸 것이다. 이 그림에서 내부 저항이 증가함에 따라 평균 방전기간이 빨리 감소하는 것을 알 수 있다. 방전기간은 이후로 계속 감소하나 저항이 수 kohm 이상으로 증가하면서부터 천천히 감소하였다.

스파크 플러그로 전달된 누적 에너지는 탐에서 측정된 전압과 전류를 가지고 계산하였으며 1atm과 11atm의 압력에 대한 결과들을 Fig. 6에 나타내었다.

이 그림에서 에너지가 스파크플러그로 전달되는 비율이 내부저항의 증가에 따라 함께 증가하는 경



(a) Measured at top (1atm)



(b) Measured at gap (1atm)

Fig. 4 Voltage traces measured at the top of the spark plug and at the gap at 1atm

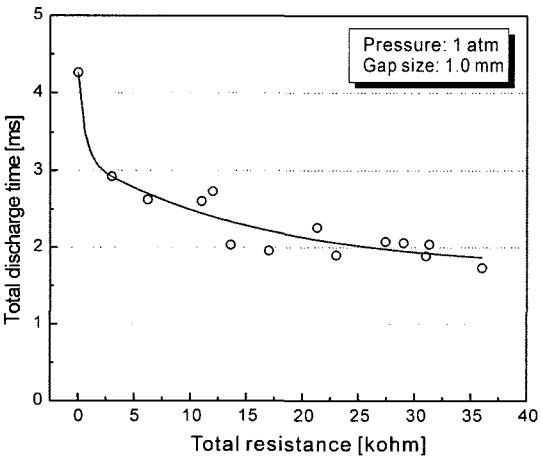
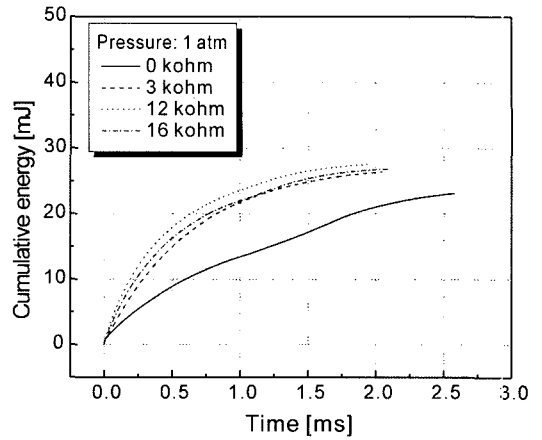
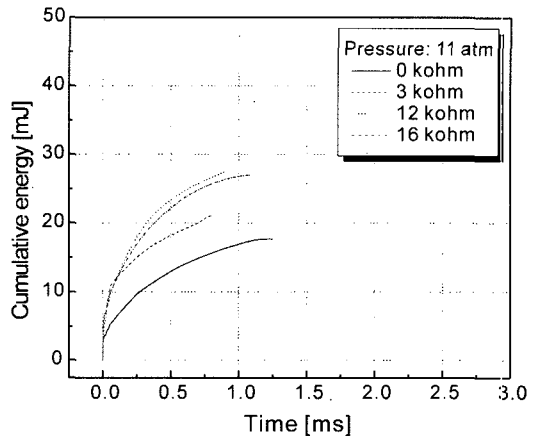


Fig. 5 Spark duration versus series resistance of high-tension wire and spark plug



(a) 1atm



(b) 11atm

Fig. 6 Cumulative energy to the spark plug versus time for difference series resistances of high-tension wire and spark plug

향을 보여준다. 에너지의 전달은 고압에서 더욱 빠른 것을 알 수 있었다. 그리고 전달된 전체 에너지는 내부 저항이 높을수록 더 컸으며 전달 과정에서 약간의 에너지의 소멸도 발견할 수 있었다.

### 3.2 갭크기의 영향

전극의 갭크기가 방전 특성에 미치는 영향을 알기 위하여 압력 1atm과 8atm에서 갭크기를 0.5-2mm 까지 변경하면서 조사하였다. 2mm의 갭크기에서 정상적인 스파크를 만들어 낼 수 있는 최대 압력은 본 실험 장치에서 8atm이었다. Fig. 7은 브레이크다운 시의 피크 전압과 피크 전류를 갭크기에 대해 나

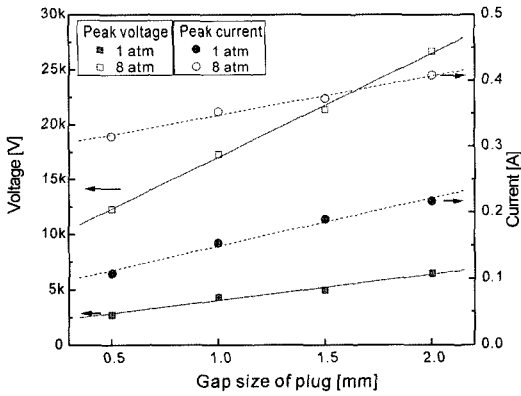
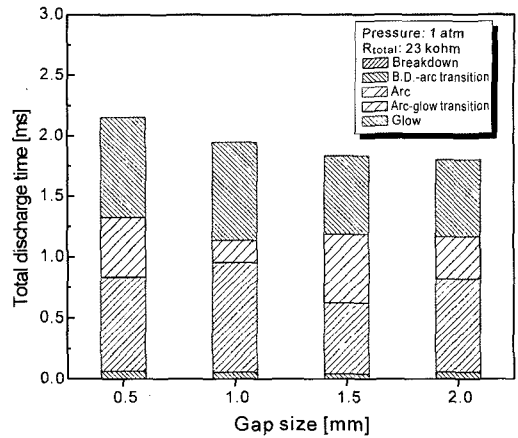


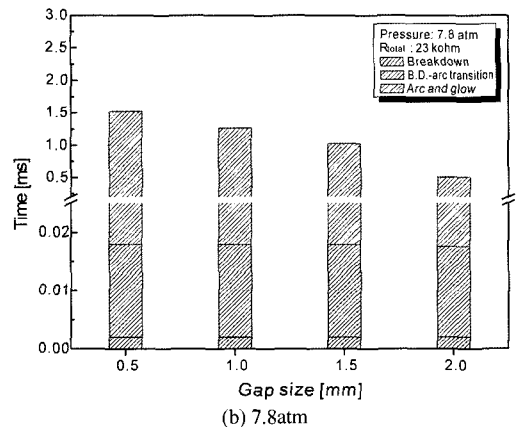
Fig. 7 Peak voltage and current during breakdown versus gap size

타낸 것이다. 양쪽 압력에서, 브레이크다운 시의 전류와 전압이 갭크기에 따라 거의 선형적으로 증가함을 보여준다. 갭크기가 4배로 커짐에 따라, 브레이크다운 피크 전압은 1atm에서 2.4배, 8atm에서 2.2배로 증가하였고, 피크 전류는 1atm과 8atm에서 각각 2.0배, 1.3배였다.

갭크기가 전체 방전기간과 각 방전단계에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 막대의 총 높이는 전체 방전기간을 의미하며 각 막대에서 구별된 영역은 각 방전단계의 시간을 의미한다. 압력에 상관없이 갭크기가 증가함에 따라 전체 방전기간이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8(a)는 1atm에서 갭크기가 방전기간에 상대적으로 약한 함수임을 보여주는 반면에 Fig. 8(b)는 갭크기가 4배로 증가함에 따라 전체 방전기간의 약 66% 정도로 크게 감소하는 것을 보여준다. 양쪽 압력에서 브레이크다운 시간은 1-2  $\mu$ s 보다 작았다. 브레이크다운 시간은 피크전압과 급격한 전압감소가 멈추고 아크전압으로 변하기 시작하는 지점사이의 시간으로 정의하였다. Fig. 8(a)에서 아크-글로우 트랜지션 영역은 브레이크다운 이후 다시 전압의 갑작스런 상승이 발생한 영역을 나타내며 전체 방전기간 동안 임의로 발생하였다. 갭크기에 따른 이 트랜지션 기간의 차이는 많은 실험 횟수에 의한 통계적인 것은 아니다. Fig. 8(a)를 통하여 특정한 조건에서 아크와 글로우단계가 거의 같은 기간을 가진다는 것을 나타내려 한 것이다. 7.8atm의 상대적으로 더 높은 압력에서 브레이크다운-아크 트랜지션의 범위는 브레이크다운



(a) 1atm



(b) 7.8atm

Fig. 8 Durations of spark discharge phases versus gap size

종료로부터 전류가 피크치의 8% 이하가 되는 지점 사이의 영역으로 정의되었다. 이 트랜지션 영역의 기간은 7.8atm에서 갭크기에 상관없이 약 16  $\mu$ s였으며, 아크-글로우 트랜지션은 발견할 수 없었다. 브레이크다운 이후의 방전은 전체적으로 아크단계에 있는 것으로 생각된다.

### 3.3 압력의 영향

Fig. 9(a)와 (b)는 브레이크다운 단계에서 압력에 따른 피크 전압과 피크 전류를 보여준다. 내부저항이 23kohm인 플러그를 사용하여 18atm까지 넓은 범위에서 압력의 영향을 보기 위해 갭크기를 0.63mm로 하였다. 압력이 증가함에 따라 피크 전압이 5kV (1atm)에서 25kV(18atm)까지 거의 선형적으로 증가하였다. 피크 전류도 압력증가에 따라 대체로 증가

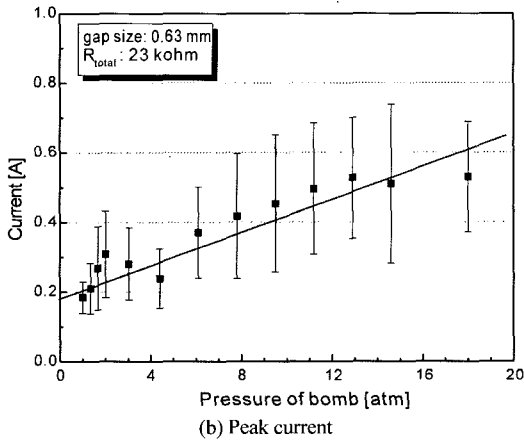
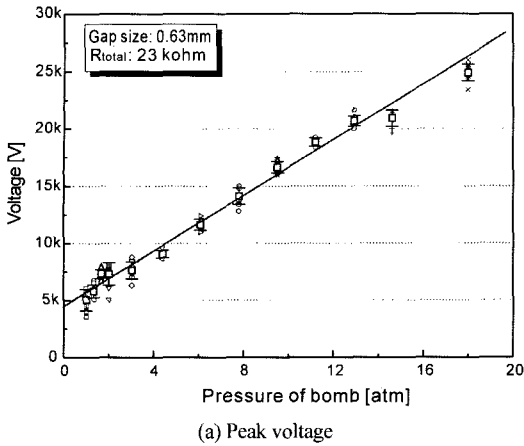


Fig. 9 Peak voltage and current during breakdown versus pressure

하는 경향을 가지지만 어떤 압력범위에서는 감소하다가 다시 증가하는 현상을 보이기도 하였다. Fig. 9에서 보이는 에러바는 표준편차를 나타낸 것인데 피크 전류가 피크 전압보다 더욱 많은 변동이 있다는 것을 의미한다. 이것은 전류 트랜스듀서의 시간 분해능 때문이라고 생각되어지며 평균 피크전류의 범위는 약 0.2A(1atm)부터 0.5A(18atm)까지였다.

Fig. 10은 압력에 따른 아크와 글로우 전압의 변화를 보여준다. 글로우 단계는 단지 7atm까지만 관찰되었다. 이 그림에서 아크와 글로우전압이 서로 선형적으로 증가하고 있으며 아크와 글로우전압 사이의 전압의 차이는 실험한 전압력 범위에 걸쳐 일정하다는 것을 알 수 있다.

압력에 따른 플러그 갭에 전달된 전체 에너지를 Fig. 11에 나타내었다. 압력이 증가함에 따라 전체

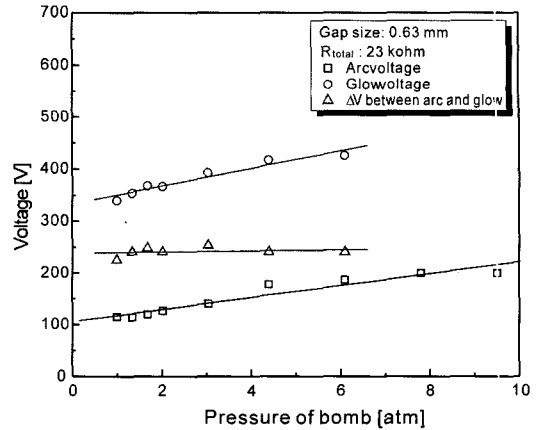


Fig. 10 Arc and glow voltages versus pressure

에너지도 증가하였으며 1atm에서 12.5mJ, 18atm에서 16mJ 정도였다. 압력이 증가함에 따라 아크단계가 차지하는 시간 분율은 증가하는 반면에 글로우 영역이 차지하는 시간 분율은 감소하였으며 이 결과를 Fig. 12에서 나타내었다. 1atm에서는 전체 방전 시간의 1/2정도가 글로우 단계였지만 압력이 증가함에 따라 글로우 단계가 점점 감소하였고 7atm 이상의 압력에서는 트랜지션이 발생하지 않았다.

플러그의 갭에서 측정된 전압과 전류를 가지고 플러그 갭에서의 유효 저항을 옴의 법칙을 이용하여 계산하였다. 이 갭 저항은 전압이 아크에서 글로우 단계로 상승하는 시점의 아크전압과 글로우전압, 그리고 전류를 가지고 계산한 것이다. 이 때 두 개의 전압과 대응하는 전류의 값은 동일하다. 즉 아크에

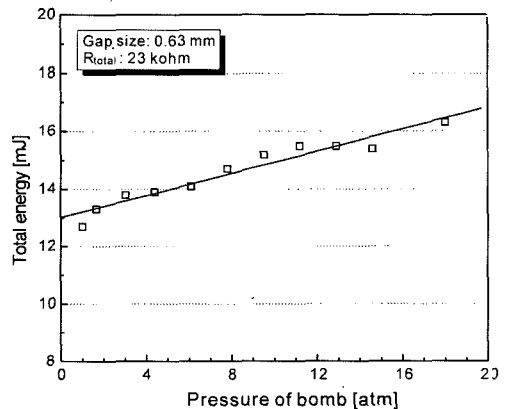


Fig. 11 Total energy deposition at the spark gap versus pressure

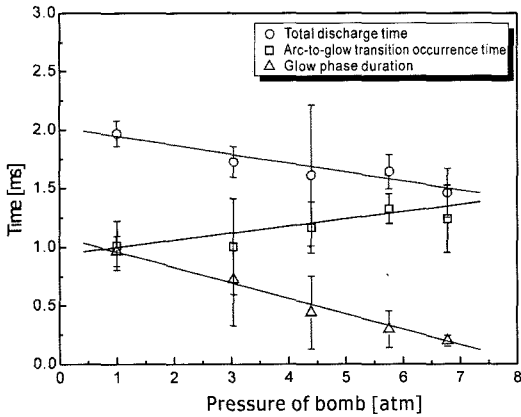


Fig. 12 Time spent in glow phase, arc-to-glow transition time, and total spark duration versus pressure

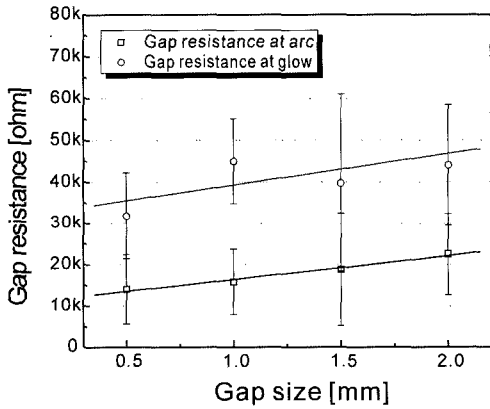
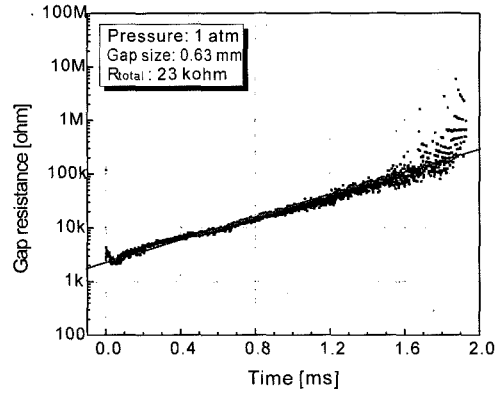


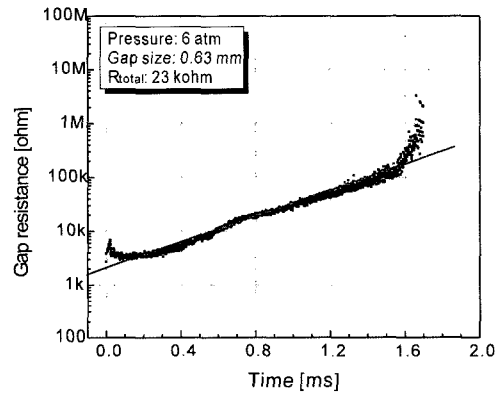
Fig. 13 Gap resistances of arc and glow phases versus gap size at a pressure of 1atm at the time of transition from arc to glow phase.

대한 유효 갭저항은 아크전압과 그 때의 전류를 가지고 구하였으며, 글로우에 대한 유효 갭저항은 글로우 전압과 아크갭 저항을 계산할 때 사용한 전류값을 가지고 계산하였다.

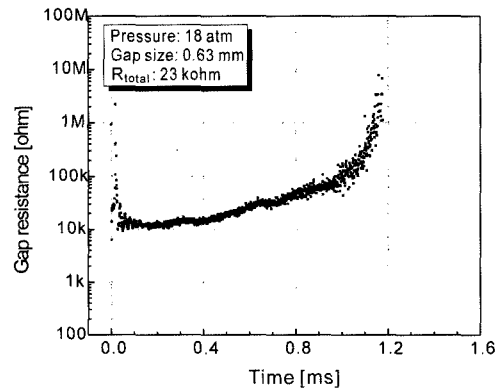
1atm의 압력에서, 아크에서 글로우단계로 변하는 시점의 플러그 갭에서의 유효 저항을 Fig. 13에 나타내었다. 글로우에 대한 유효 갭저항이 아크의 유효 갭저항보다 두 배 정도인 것을 알 수 있다. 그리고 갭크기가 증가함에 따라 양쪽의 유효 갭저항이 함께 증가함을 보여준다. 그림에서 나타낸 에러바는 표준편차이다. 이 편차가 큰 이유는 유효저항이 아크-글로우 트랜지션 발생시간에서 계산되었는데 이 트랜지션 발생시간이 상당히 크게 변화하



(a) 1atm



(b) 6atm



(c) 18atm

Fig. 14 Gap resistances of arc and glow phases over the duration of the discharge for different pressures

기 때문이다. 즉, 그 발생시간이 바뀌면 그에 따른 전류도 따라서 다르기 때문에 유효 저항 값에 영향을 크게 미치게 된다. 아크와 글로우의 전압 값은 크게 변하지 않았다. 하지만 만약 아크-글로우 트랜지



션이 일찍 발생하면 유효저항 이 계산된 곳의 전류는 상대적으로 높아지게 되고, 또 트랜지션이 늦게 발생하면 전류는 낮은 값이 되어 계산되는 갭저항의 편차가 크게 달라진다.

갭의 유효저항은 방전 전체 기간에 걸쳐 크게 변한다. 일반적으로 저항은 방전기간 동안 스파크경로가 냉각되기 때문에 시간에 따라 상승하게 된다.

Fig. 14는 1, 6, 18atm 세 개의 압력조건에서 이러한 거동을 보여준다. 이 그림에서 보이는 갭저항들은 10회 이상을 평균되어 전체 방전기간을 나타낸 것이며 아크-글로우 트랜지션이 각기 다른 시간에서 발생하였기 때문에 명확한 트랜지션이 관찰되진 않는다. 모든 압력 조건에서 유효 갭저항은 방전기간 동안 100-1000배 정도 증가하였으며, 저항이 시간에 따라 지수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 측정된 전류가 시간에 대해 지수적으로 감소하는 것과 일치한다. 전압을 일정하게 유지해주는 저항의 증가와 전류의 감소는 스파크 저항의 모델인 '네거티브 저항'과 일치한다. 갭저항은 1atm과 6atm에서 크게 다르지 않지만, 18atm에서의 갭저항은 아크단계 시작에서 부터 약 3배 이상의 차이를 보였다.

#### 4. 결론

- 1) 23kohm의 내부 저항과 1mm 갭크기를 가진 플러그에서, 압력이 증가함에 따라 스파크 기간은 2ms (1atm) 에서 1.5ms (6.8atm) 감소하였다.
- 2) 갭크기가 증가함에 따라 스파크기간은 감소하였다. 갭크기의 영향은 1atm에서는 약하나 7.8atm에서는 상당한 감소를 가져왔다. 7.8atm에서, 2mm 갭크기에 대한 방전기간은 갭크기 0.5mm에서의 기간보다 약 1/3 수준이었다.
- 3) 브레이크다운 전압은 갭크기와 압력에 대해 거의 선형적으로 증가하였다.
- 4) 아크와 글로우 단계의 전압은 압력이 증가함에 따라 약하지만 둘 다 증가하였다.
- 5) 갭에 전달된 에너지는 압력에 따라 변화가 있었으며 약 11mJ (1atm)에서 15mJ (18atm)까지 거의

선형적으로 증가하였다.

- 6) 방전하는 동안 스파크 갭의 유효저항은 아크단계에 비해 글로우 단계의 것이 약 2배정도 컸다. 그리고 1atm의 갭저항과 6atm에서의 값이 크게 다르지는 않았으며 18atm에서는 아크단계 시작시의 유효 갭저항은 약 3배 이상이었다.

#### 후 기

이 논문은 2004년도 전반기 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(M01-2004-000-10142-0).

#### References

- 1) N. F. Meeck, *Electrical Breakdown of Gases*, Oxford at the Clarendon Press, London, 1953.
- 2) R. Maly and M. Vogel, "Initiation and Propagation of Flame Fronts in Lean CH<sub>4</sub>-Air Mixtures by the Three Modes of the Ignition Spark," 17th Symposium on Combustion, the Combustion Institute, pp.821-831, 1978.
- 3) R. Rienmann and M. Akram, "Temporal Investigation of a Fast Spark Discharge in Chemically Inert Gases," *J. Phy. D: Appl. Phys.*, Vol.30, pp.1125-1134, 1997.
- 4) A. Saitzkoff, R. Reinmann, T. Berglind and M. Glavmo, "An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor," SAE 960337, 1996.
- 5) R. Reinmann, "Theoretical and Experimental Studies of the Formation of Ionized Gases in Spark Ignition Engines," Ph.D. Dissertation, Dept. of Combustion Physics, Lund Institute of Technology, 1998.
- 6) R. Maly, *Fuel Economy*, editors: Hilliard and Springer, Ch. 3, "Spark Ignition: Its Physics and Effect on the Internal Combustion Engine," Plenum Press, New York, 1984.
- 7) *Bosch Automotive Handbook*, 3rd Edn., Robert Bosch, GmbH, 1993.