

인젝터 플라즈마 저항의 실험적 연구

An experimental study on the resistivity of injector plasma

한 충 규*
Han, Choong-Kyu

ABSTRACT

A chamber enduring 3,000 bars and an electrical high voltage power system have been designed and installed for studying the characteristics of the plasma produced in electro-thermal chemical propulsion system. In order to test the structural characteristics, polyethylene injectors were used which have 4 or 6 mm inner diameter and several lengths from 15 to 70 mm. The capacitors were charged at the voltages of 5.2, 7.3 and 10.4 kV which correspond to 5.58, 11 and 22.3 kJ in charging energy. The observed resistivities of the plasma injector are close to those predicted by a theoretical model that describes the plasma resistivity according to high current density.

주요기술용어 : Electro-Thermal-Chemical Propulsion (전열화학추진), Plasma (플라즈마), Plasma Injector (플라즈마 인젝터), Local Thermodynamic Equilibrium (국소열평형)

1. 머리말

전열화학 추진은 전기 에너지로 플라즈마를 발생시키고 이로써 추진제를 점화한 후 약실 내 압력을 발생시켜 탄을 가속시킨다. 플라즈마 발생을 위하여 투입되는 전기 에너지의 양과 시간으로 약실 압력을 제어할 수 있으므로 전기적 부하특성 예측이 선행되어야 한다.

추진제에 플라즈마를 공급하는 방법에 따라, 약실 내부에 두 전극을 연결한 용발 세션을 설치하고 이를

통하여 대전류를 흘려 추진제와 같은 공간에서 플라즈마를 발생하는 방법이 있고, 모세관 형상의 방전관인 인젝터를 약실 뒤편에 설치하여 이곳에서 발생한 플라즈마를 약실로 분사하여 점화하는 방법이 있다. 약실 내에서 세션을 이용하여 플라즈마를 발생하는 방법은 약실 전 공간에서 플라즈마와 추진제가 상호작용 하는 장점이 있으나 약실 내부의 긴 전류의 경로를 통한 저항 특성이 매우 복잡하다. 반면, 인젝터를 이용하는 경우는 플라즈마 생성단계에서 추진제와의 상호작용을 배제할 수 있으므로 전기적인 특성이 상대적으로 안정적이다.

이 논문에서는 인젝터 형상의 저항 특성을 인젝터

* 국방과학연구소 연구원

의 길이, 내경과 충전전압을 변화시켜가며 실험적으로 계측하였다. 실험에 사용된 전원은 전압이 5~10 kV, 에너지로는 수십 kJ이며 방전이 수 ms 동안 일어난다. 이는 전열추진에 사용하는 경우와 유사한 범위이며 발생하는 플라즈마는 수만도, 수천기압의 저온, 고밀도의 상태에서 평형 상태이므로 LTE(Local Thermodynamic Equilibrium) 모델로 다룬 기존 논문에 발표된 이론과 비교하여 정리하였다.

2. 실험 장치

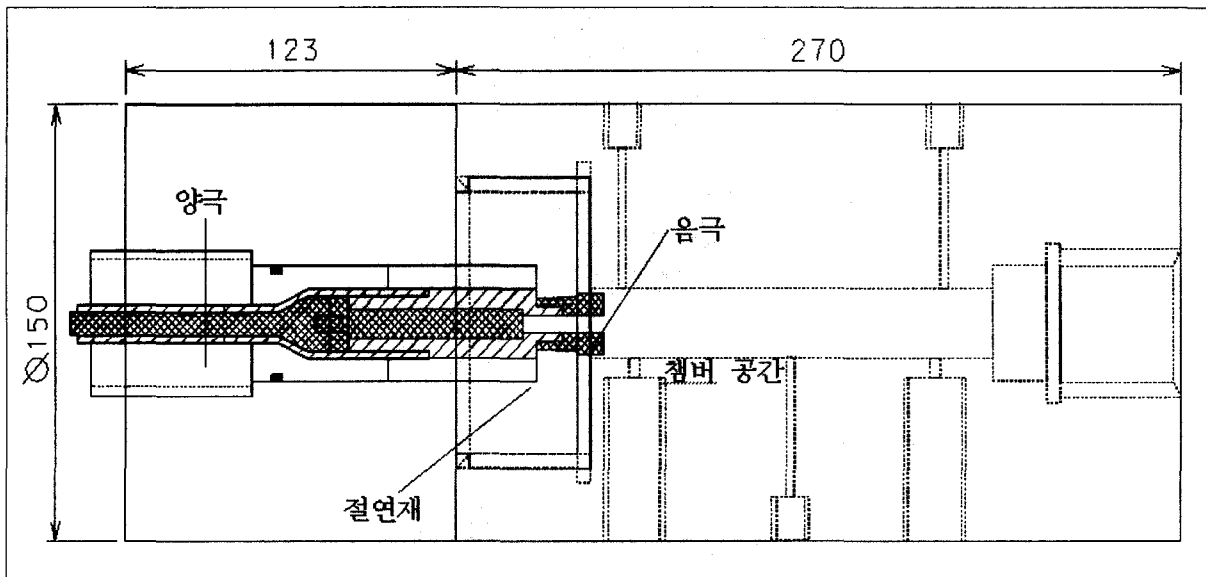
2.1 플라즈마 발생 챔버

전열 화학포의 인젝터 형상이고 플라즈마를 발생시키는 곳인 실험 챔버는 일반 스틸 재질로 설계하였다. 전열 플라즈마 발생시 챔버에 흐르는 전류와 챔버 전극 양단에 인가되는 전압을 측정함으로써 플라즈마의 저항을 실험적으로 측정한다. 그 외 광섬유를 통하여

플라즈마의 광학적 특성 및 챔버내 압력과 폴리에틸렌 시료 용발량 등의 상수들을 계측할 수 있도록 설계 되었다. 그림 1은 실험 챔버의 구조이다. 챔버 내부 공간은 지름 24 mm, 길이 150 mm이고 외부로 고압력 배기밸브, 광섬유, 압력계측용 구멍이 있다.

초기 격발을 위해 두 전극 사이에는 니켈 세션(Goodfellow NI005120 : $\phi 0.1$ mm)을 사용하여 세션의 폭발로 양극과 음극사이에 에너지가 공급되면 플라즈마 발생이 시작된다. 양극과 용기 사이를 절연시키는 절연재로는 강도가 우수한 수피 MC 나일론을 사용하였다. 전압이 10 kV 이상 높을 경우에는 음극인 텅스텐과 챔버 사이에서 아크가 생겨 용접되는 경향이 있어서 후에는 황동으로 교체하였다.

챔버는 그 외곽에 길이 방향으로 뚫린 지름 10 mm의 8 개의 냉각수 구멍들을 갖고 있지만 실제 실험에서는 챔버의 온도가 크게 오르지 않으므로 냉각수는 사용하지 않았다. 안전을 위해 챔버 양옆과 앞뒤를 바다에 고정시키며 전체 챔버 시스템은 두께 10

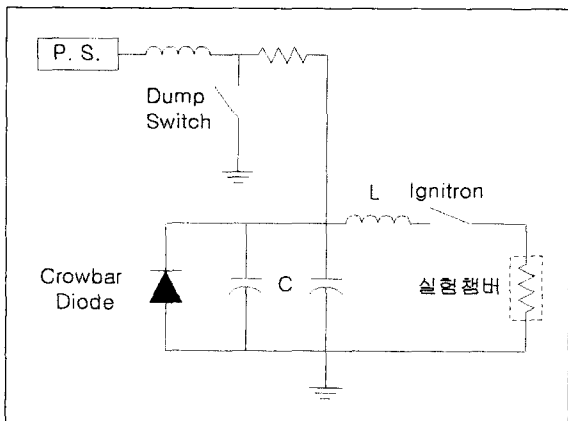


[그림 1] 실험챔버 개념도

mm, 크기 600×500×1000 mm의 철 상자 속에 놓인다. 챔버 내부는 지름 24 mm, 길이 150 mm 이므로 부피가 약 68 cm³ 이다. 챔버에는 1 개의 고압력 배기 밸브(Swedgelok SS-445-FPAR, 38°에서 3100 기압, ϕ1/4")와 두 개의 광섬유, 두 개의 압력 측정용 구멍이 있다.

2.2 전원 장치

전원시스템의 회로도는 그림 2와 같다. 두 개의 208 μF 커패시터(maxwell 32820 : 22kV, 208μF)를 사용한 커패시터 뱅크의 용량은 416 μF 이고 인덕터(유원전기)의 인덕턴스 L 은 60 μH 이다. 직류 고전압을 공급하는 전원공급기(Spellman SA30P8, 30 kV, 266 mA)는 저항(Maxwell : 6 kΩ 2 개)과 인덕터(지름 100 mm 아크릴 통에 10 mm² 전선을 30회 감음)를 통해 커패시터에 직류전기를 공급하며 실험 후 잔류 전하 방전 및 기타 안전을 고려한 덤프 스위치를 이 사이에 설치하였다. 광 신호에 의해 작동되어 2 kV 출력전압을 내는 격발기(Driver; Resist-O-Weld IG-5-F)는 고전압스위치 Ignitron(Resist-O-Weld NL105N COAX, 25 kV, 300 kA)를 격발하여



[그림 2] 전원장치 회로도

커패시터의 전기에너지가 부하(실험 챔버)에 전달되게 한다. 커패시터 전극 사이에 부착된 다이오드 열(International Rectifier Corp. SD800C40L, 4000 kV, 10750 kA, pulse 10 ms; SD1700C36K, 3600 kV, 21150 kA, pulse 10 ms)의 크로우바(crowbar) 스위치는 역전류를 방지한다.

3. 이 론

고밀도의 전열 플라즈마와 같이 이온화도가 낮아서 이온들의 대부분이 1가로 이온화될 경우의 사하 방정식은 다음과 같다.

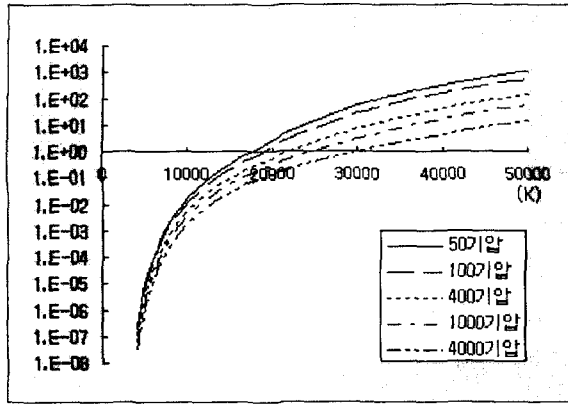
$$\frac{n_i}{n_0} = \frac{2}{n_e} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-E_i/kT) \quad (1)$$

n_i, n_0, n_e, E_i, h 는 각각 이온 밀도, 중성입자 밀도, 전자 밀도, 이온화 에너지, 플랑크 상수이며 압력은 다음과 같다.

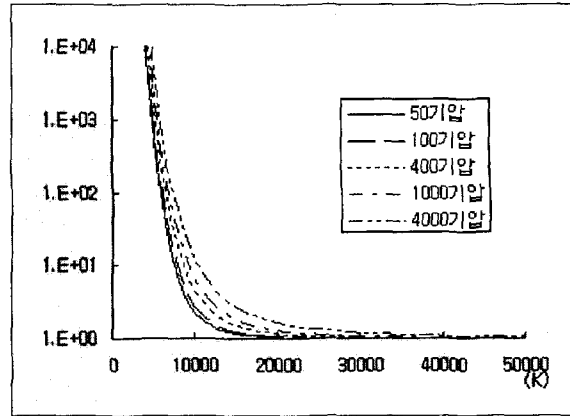
$$P = kT(n_e + n_i + n_0) \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용해서 계산된 n_e/n_0 가 그림 3이며 이때 이온화 에너지는 탄소 1가를 이용하였다. 압력이 1000 기압이면 온도가 20,000K 가 되어도 n_e/n_0 의 값은 0.2 정도이며 4000K일 때는 이온화도가 10⁻⁶ 이하로 떨어져 거의 중성 기체와 같은 성질을 갖는다.

모세관 내에서 발생하는 열은 모두 전기에 의한 저항가열에서 비롯된 것이고 이것이 플라즈마의 복사에너지로 변환된다고 볼 수 있다. 플라즈마가 모세관 내에서 균일하게 분포되어 있으며 온도 T인 흑체라고 가정하면 에너지 균형은 다음과 같이 나타내진다.



[그림 3] 압력별 온도에 따른 이온화도(Carbon Singly)



[그림 4] 압력별 온도에 따른 β 값

$$\sigma T^4 \cdot 2\pi r l = I^2 R = I^2 \frac{\eta l}{\pi r^2} \quad (3)$$

$$R = 0.022 l \beta^{8/11} I^{-6/11} r^{-13/11} \quad (\Omega) \quad (7)$$

(l in mm, I in kA, r in mm)

σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이고 η 는 비저항이다.

$$\eta = \frac{m_e (v_{en} + v_{ei})}{n_e e^2} \quad (4)$$

m_e , n_e , e , v_{en} , v_{ei} 는 각각 전자 질량, 전자 밀도, 전자 전하량, 전자와 중성입자의 충돌빈도, 전자와 이온의 충돌빈도이다. 식 (3), (4)를 이용하여 온도를 모세관 반경과 전류의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$T = 0.11 \beta^{2/11} I^{4/11} r^{-6/11} \quad (\text{eV}) \quad (5)$$

$$\beta \equiv 1 + \frac{v_{en}}{v_{ei}} = 1 + 2.08 \cdot 10^{-10} T^2 \frac{n_0}{n_i} \quad (6)$$

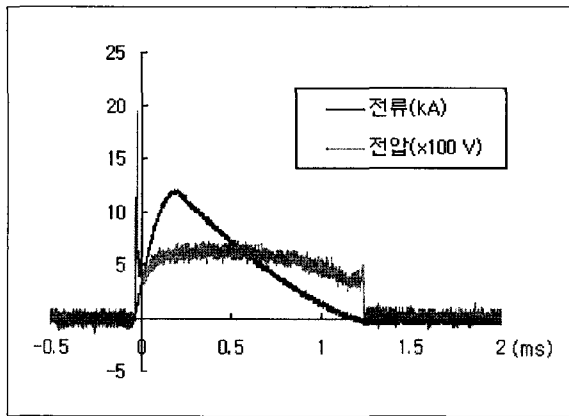
이 식에서 I 와 r 의 단위는 각각 A와 mm 이다. 온도가 높아서 중성입자가 거의 없을 경우에는 β 값은 1 이 되며 일반적인 값은 그림 4에 나타나있다. 식 (3)~(6)에서 저항을 얻는다^{[1]~[4]}.

4. 실험결과 및 고찰

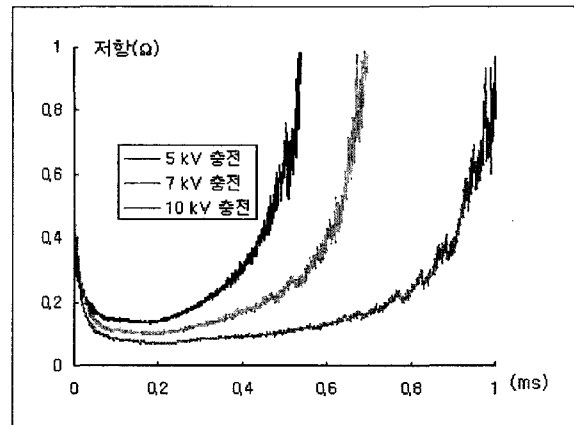
4.1 방전 특성

플라즈마 인젝터의 방전 특성을 파악하기 위하여 설정한 실험조건은 최대 22 kV, 100 kJ 사양으로 제작한 전원장치를 5.2, 7.3, 10.4 kV로 충전하여 플라즈마 발생을 하였고 이 때 충전에너지는 각각 5.58, 11, 22.3 kJ이다. 또한 인젝터의 형상에 따른 특성인자인 전극사이의 거리를 15, 25, 50, 70 mm로 잡았으며 인젝터의 내경은 4 mm와 6 mm인 폴리에틸렌 시료를 사용하여 방전시 발생하는 전류, 전극간 전압파형을 계측하여 전기 전도도를 계산한다. 그림 5는 전형적인 계측 파형이며 이는 전압 5.2 kV, 길이 15 mm 내경 4 mm의 조건에서의 방전 실험 결과이다.

폴리에틸렌 시료 내에서 두 전극 사이의 거리는 15 mm이상이므로 10 kV 미만의 전압으로는 양단에 아크가 발생되지 않는다. 따라서 초기 방전을 위해 전극



[그림 5] 방전실험의 전형적인 계측파형



[그림 6] 충전전압에 따른 저항 파형

양단에 수십 mΩ 정도의 저항 값을 갖는 니켈 세선을 연결하여두고 방전을 실시하면 트리거 신호 후 세선으로 전류가 경로가 형성되고 세선이 폭발하면서 주위 시료의 플라즈마를 발생시켜 방전이 지속된다.

그림 5의 전압 파형을 자세히 살펴보면 전류 발생 시작 후 약 10 μs 시점에서 큰 전압 스파이크가 관측되는데 이는 수 십 mΩ의 세선이 끊어지는 순간 저항이 크게(약 3Ω 정도까지) 상승한다는 것을 보인다.

이때 전류파형의 상승은 계속 유지되고 내부에서 소모되는 전기 출력은

$$P = I^2 R \quad (8)$$

로 표현되므로 인젝터 내부에 에너지가 집중되게 되어 충분한 플라즈마가 발생된다. 그리고 전도성을 갖는 플라즈마의 발생은 저항을 감소시켜 에너지 소모가 감소된다. 따라서 방전이 지속되는 동안 플라즈마 생성에 의한 저항/소모에너지 감소, 이에 따른 플라즈마 감소 저항증가의 균형이 유지된다.

스파이크 전압의 크기는 10.4 kV 방전시 4~5 kV로 계측되며, 5.2 kV 방전의 경우는 1~2 kV이다. 충

분한 플라즈마가 발생되어 방전이 일어나는 동안 양단간의 전압은 거의 일정한 크기로 수 ms 지속되다가 전류가 0이되는 순간 급격하게 떨어진다.

전류는 0.2 ms의 시간동안 상승한 후 최대값에 이른 후 감소하는 방전 파형을 나타낸다.

그림 6은 인젝터 길이 50 mm 내경 6 mm인 경우 충전전압별 저항의 변화를 전압스파이크가 지난 후부터 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 플라즈마가 생성됨에 따라 작은 값을 유지하다가 전류가 소멸되면서 급격히 증가한다. 충전 전압이 증가함에 따라 흐르는 전류의 크기가 커져 식(7)과 같이 저항이 작아지는 경향이 관찰되며 이때 저항이 작은 값으로 지속되는 시간도 길어진다.

표 1~3은 충전 전압에 따라 인젝터의 길이 및 직경에 따라 측정된 주요 데이터 값이다. 충전 전압 5.2 kV, 인젝터 내경 6 mm로 일정할 경우 길이가 15 mm에서 70 mm로 4.7배 증가하면 인젝터 최대 저항은 47 mΩ에서 143 mΩ로 3.0배 증가하므로 정확히 선형적인 증가는 아니다. 이때 양단 전압은 0.7 kV에서 1.64 kV로 2.4배 증가하나 전압 지속시간은 1.88 ms에서 0.98 ms로 50 % 감소하며 최대 전류도 12.3

[표 1] 충전 전압 5.2 kV(5.58 kJ) 일 때의 특성 데이터

시료 길이 (mm)	6				4			
	15	25	50	70	15	25	50	70
시료 직경 (mm)								
최대전압 (kV)	0.70	0.95	1.44	1.64	0.72	1.36	1.70	2.38
최대전류 (kA)	12.3	11.9	10.6	10.2	12.4	11.1	10.0	8.7
에너지 소모(kJ)	4.04	4.26	4.58	4.53	4.00	4.58	4.62	4.81
전압펄스 길이(ms)	1.88	1.38	1.08	0.98	1.65	1.17	0.97	0.89
최소저항 (mΩ)	47	69	129	143	43	99	151	248

[표 3] 충전 전압 10.4 kV(22.3 kJ) 일 때의 특성 데이터

시료 길이 (mm)	6				4			
	15	25	50	70	15	25	50	70
시료 직경 (mm)								
최대전압 (kV)	0.74	1.06	1.78	1.92	1.12	1.60	1.96	3.28
최대전류 (kA)	26.0	25.4	24.1	23.2	25.3	24.4	23.2	21.8
에너지 소모(kJ)	15.4	16.7	19.3	18.7	16.8	17.8	18.6	19.1
전압펄스 길이(ms)	2.71	2.18	1.51	1.36	2.08	1.71	1.40	1.15
최소저항 (mΩ)	26	37	66	74	37	58	75	107

[표 2] 충전 전압 7.3 kV(11 kJ) 일 때의 특성 데이터

시료 길이 (mm)	6				4			
	15	25	50	70	15	25	50	70
시료 직경 (mm)								
최대전압 (kV)	0.67	1.01	1.82	1.60	0.84	1.38	1.88	2.60
최대전류 (kA)	17.8	17.2	15.8	15.4	17.7	16.4	15.4	14.0
에너지 소모(kJ)	7.80	8.47	9.34	8.96	7.86	8.93	9.26	9.58
전압펄스 길이(ms)	2.23	1.59	1.18	1.17	1.90	1.39	1.15	1.02
최소저항 (mΩ)	34	57	95	96	34	71	104	150

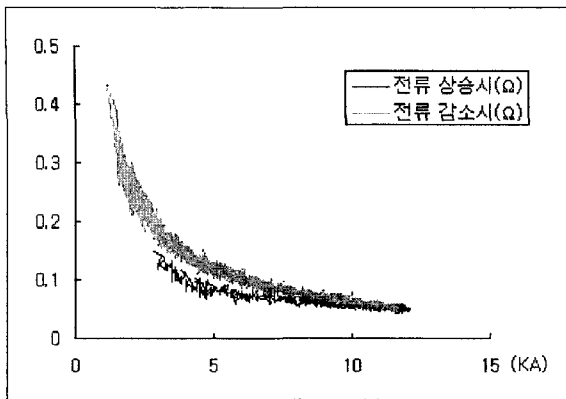
kA에서 10.2 kA로 17 % 감소하여 인젝터 내의 총 전기에너지 소모량은 4.04 kJ에서 4.53 kJ로 12 % 증

가한다. 또한 인젝터의 내경이 감소하면 저항이 증가 되므로 길이가 증가하는 경우와 같은 양상을 나타낸다. 최대 전압은 초기 스파이크가 지난 후 정상 방전 상태에서 갖는 최대값이다.

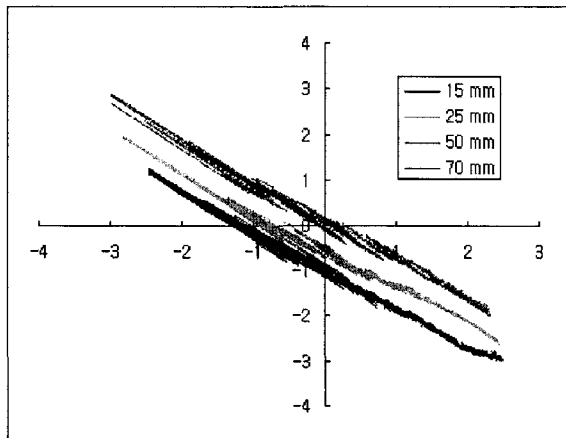
4.2 플라즈마 저항

저항 값의 특성을 파악하기 위하여 전류-저항 관계 그래프를 그리면 그림 7과 같이 나타난다. 저항 데이터는 전압그래프에서 스파이크가 지나고 안정된 후부터 방전이 끝나며 급격히 감소하기 직전 구간 값을 취하였다.

전류-저항 관계에서 그래프가 뚜렷이 둘로 나뉘어 보이는데 이는 전류가 상승할 때와 전류가 감소할 때로 구분된다. 전류 상승 시 초기 플라즈마가 충분히 생성되기 전에는 플라즈마가 충분히 생성된 후와 비교하여 인젝터 내의 압력이 작으므로 이온화도가 높아 상대적으로 작은 저항 값을 갖는다.



[그림 7] 전류에 따른 저항 변화



[그림 8] 길이에 따른 전류-저항관계(로그값)

그림 8은 각 길이별로 내경 6mm 인젝터를 5.2 kV로 충전하여 실시한 실험에서 얻은 데이터를 전류-저항의 각 값에 로그를 취하여 얻은 그래프인데 직선형태를 보인다.

이 그래프에서 기울기는 전류-저항 관계식에서 지수를 나타내는데 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 방법으로 구한 전류와 저항사이의 관계는

$$R = bI^{-a} \quad (9)$$

으로 표현되며 이 때 b 는 그림 8의 그래프 절편 값으로 구할 수 있다. 그림에서 절편은 길이가 증가하면 크게 나타나는 경향을 보이며 식 (7)과같이 b 값에는 인젝터 길이에 비례하는 인자가 포함되어있기 때문이다.

이 데이터에서 최소자승법을 이용하여 구한 지수 a 의 값이 표 4와 표 5이다.

실험적으로 구한 전류-저항의 지수 값은

$$a = 0.56 \pm 0.13 \quad (\text{전류 상승 시})$$

$$a = 0.89 \pm 0.07 \quad (\text{전류 하강 시})$$

[표 4] 전류 상승시 a 값

시료 길이 (mm)	6				4			
시료 직경 (mm)	15	25	50	70	15	25	50	70
충전전압 5.2 kV	0.60	0.38	0.41	0.56	0.58	0.52	0.40	0.29
충전전압 7.3 kV	0.65	0.39	0.38	0.72	0.57	0.57	0.59	0.61
충전전압 10.4 kV	0.70	0.55	0.55	0.74	0.53	0.50	0.83	0.69

[표 5] 전류 하강시 a 값

시료 길이 (mm)	6				4			
시료 직경 (mm)	15	25	50	70	15	25	50	70
충전전압 5.2 kV	0.82	0.78	0.85	0.83	0.83	0.88	0.98	0.93
충전전압 7.3 kV	0.83	0.85	0.97	0.94	0.87	0.88	1.00	1.03
충전전압 10.4 kV	0.79	0.86	0.90	0.95	0.86	0.85	0.92	1.04

와 같이 나타난다.

식 (7)에서 보인 이론적인 값은 6/11(≒0.55)인데 전류 상승 시 값과 잘 맞는다. 이는 방전 초기에는 용 발된 기체의 밀도가 낮아 인젝터 내부의 압력이 작을 것이다. 이때 식 (7)에 따라 저항이 β의 함수이나 그림 4에서와 같이 거의 1에 가까우므로 변량이 작아 전류에 의존하는 값이 비교적 이론값과 잘 맞는다.

전류 상승 시 측정된 값은 이론값보다는 크며 이 값이 1인 아크 방전의 경우와 비슷하게 나타난다^[5]. 그러나 그 편차는 8% 정도로 매우 작아 실험 조건이 바뀌어도 비교적 일정한 값을 유지한다. 인젝터의 길이가 길고 내경이 작아 저항이 크며 충전전압이 높은 경우 지수 값이 비교적 크게 나타나는 경향을 보인다.

각 실험에서 결정된 또 하나의 비례 상수 b에서 인젝터의 기하학적 요소를 제거하고 실험치를

$$R = b' l r^{-\frac{13}{11}} I^{-a} \quad (10)$$

(l in mm, I in kA, r in mm)

와 같이 가정하여 b'의 값을 구하였다.

$$b' = (7.46 \pm 3.04) \times 10^{-2} \quad (\text{전류 상승 시})$$

$$b' = (5.52 \pm 1.30) \times 10^{-2} \quad (\text{전류 하강 시})$$

이 값은 지수 a에 비해 상대오차가 크게 측정되었다.

5. 맺음말

본 논문에서는 전열추진 현상의 예측을 위해 플

라즈마 인젝터의 저항 특성을 실험적으로 연구하였다. 인젝터의 형상과 충전 전압의 변화에 따라 부하에 걸리는 전압과 흐르는 전류를 측정하였고 이로써 전류-저항 사이의 관계식을 curve fitting하여 구하였다.

플라즈마 상태의 특성은 인젝터 내의 온도, 압력 그리고 플라즈마의 밀도가 중요한 인자이므로 이를 측정하기 위해서는 분광학적인 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Kohel, L. K. Su, N. T. Clemens, and P. L. Varghese, "Emission spectroscopic measurements and analysis of a pulsed plasma jet", IEEE Transactions on magnetics 35 (1), 201, 1999.
- [2] A. Loeb and Z. Kaplan, "A theoretical model for the physical processes in the confined high pressure discharges of electrothermal launchers", IEEE Transactions on magnetics 25 (1), 342, 1989.
- [3] 김성호, 양경승, 이성우, "인젝터 형상 플라즈마의 저항특성", 제5차 전열추진기술 세미나, 4-1쪽, 2001. 11.
- [4] R. J. Zollweg and R. W. Liebermann, "Electrical conductivity of nonideal plasmas", J. Appl. Phys. 62 (9), 3621, 1987.
- [5] R. T. Robiscoe, "Overdamped Arc Discharge Data and an AWA Model", IEEE Transactions on magnetics 19 (3), 529, 1991.