



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.6.011>

## 점화 신호 종류에 따른 PDE 점화회로의 작동 안정성 연구

김정민<sup>a</sup> · 한형석<sup>a</sup> · 오세종<sup>a</sup> · 최정열<sup>a,\*</sup>

### Reviewing of Operating Stability about Pulse Detonation Engine's Ignition Circuit to the Type of Power Sources

Jungmin Kim<sup>a</sup> · Hyung-Seok Han<sup>a</sup> · Sejong Oh<sup>a</sup> · Jeong-Yeol Choi<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [aerochoi@pusan.ac.kr](mailto:aerochoi@pusan.ac.kr)

#### ABSTRACT

A pulse detonation engine (PDE) requires high operating frequency greater than 100 Hz to get meaning thrust as a propulsion devise. Thus a PDE needs an ignition circuit operating precisely at high operating frequencies. In this paper AC(alternating current) and DC(direct current) types of ignition circuits were designed and compared. Each circuit was tested at operating frequencies from 16.66 to 100.00 Hz by measuring the input signal of each circuit and the voltage change in the primary coil of the transformer. Results show that the DC power circuit can attain a maximum error rate of 5.15% at higher operating frequencies, whereas the AC power circuit displays a negligible agreement with the operating signal at frequencies greater than 33.33 Hz. Therefore it is confirmed that DC-powered ignition circuit is preferable for the PDE operating at high frequencies.

#### 초 록

펄스 데토네이션 엔진 (PDE)는 추진기관으로서 의미 있는 추력을 얻기 위해 100 Hz 이상의 높은 작동 주파수를 요구한다. 따라서 PDE는 높은 작동 주파수에서 정확하게 작동하는 점화 회로 필요로 한다. 이번 논문에서는 교류와 직류 전원을 이용하는 두 종류의 점화 회로를 설계하여 비교하였다. 두 회로는 16.66 에서 100.00 Hz 작동 주파수에서 입력 신호와 변압기의 1 차 코일에 인가되는 전압 변화를 측정하여 시험하였다. 실험 결과 직류 전원의 회로의 경우 증가된 작동 주파수에서 최대 5.15%의 작동 주파수 오차를 보였으나 교류 전원의 회로의 경우 33.33 Hz 이상부터는 거의 맞지 않는 결과를 보였다. 이를 통해 고주파 작동의 PDE에서는 직류 전원의 점화 회로가 선호됨을 확인하였다.

Key Words: Pulse Detonation Engine(펄스데토네이션엔진), Ignition Circuit(점화 회로), Fast Switching Circuit(고속 스위칭 회로), Astable Oscillation Circuit(비안정 발진회로)

Received 27 February 2018 / Revised 31 July 2018 / Accepted 5 August 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

## 1. 서 론

가스터빈 엔진에 브레이튼 사이클의 물리적 한계를 극복하기 위한 연구로 지난 수십 년간 정적 연소에 관한 연구가 진행되어 왔다[1,2]. 하지만 1900년대의 정적 연소 장치는 동시기의 가스 터빈에 비해 효율성이 떨어져 연구가 이어지지 않았지만 최근 데토네이션 파를 이용한 유체 역학적 정적연소를 통하여 연속적인 정적 연소가 가능해지며 다시금 활발히 연구가 진행되고 있다[3-5]. 그중 기초적인 Pulse Detonation Engine(이하 PDE)은 정적 연소에 Pressure Gain Combustion(이하 PGC) 특징을 가져서 연속적인 데토네이션 파 발생을 위하여 주기적으로 점화를 시켜 주어야하는 특징을 가진다. 이 때문에 추진 장치로써 유효한 성능을 위하여 연료의 공급과 점화의 한 주기를 100 Hz이상의 높은 작동 주파수가 중요한 연구 주제 중 하나이다[6].

본 연구팀도 초기에 데토네이션의 안정적이 발생을 위하여 검증된 산업용 장치를 사용하였지만 이후 높은 작동 주파수에서 불안정 작동 등 작동 안정성에서 문제가 발생하였다[13]. 하지만 과거 국내외의 데토네이션 초기연구는 현상과 안정적인 발생이 중요하여 단발 혹은 낮은 작동 주파수를 가져 점화 시스템의 중요도가 높지 않았고 이후 연구는 시스템 전반의 안정성과 장치의 성능 향상에 집중되어 점화 시스템에 관한 자세한 연구와 서술이 부족한 상태이다[6].

이와 같은 이유로 본 연구는 향후 높은 작동 주파수를 가지는 PDE 개발에서 전기 점화 장치의 안정성을 높이기 위하여 장치의 구성이 간편하고 안정적인 일반 가정용 단상 교류 전원의 시스템 구성과 상대적으로 장치 구성이 복잡하

지만 소형화가 가능한 반도체 장치로 구성된 직류 전원 점화 회로를 서로 실험을 통하여 장단점을 비교해 보는 연구로써 향후 시스템 구성의 안정성과 소형화와 관련된 기초 연구가 될 것으로 판단된다.

## 2. Pulse Detonation Engine

### 2.1 데토네이션

폭연과 데토네이션 파가 혼재된 복합적인 3차원 연소 유동인 데토네이션은 Fig. 1 과 같이 강한 수직 충격파에 의한 미연 가스의 자발 연소로 단순화 시킬 수 있다[5,7-9]. 폭연과 달리 수 km/sec의 매우 빠른 화염 전파 속도를 가진다. 이 때문에 충격파 이후의 상태량이 평형 상태로 돌아갈 시간이 부족하여 험프리 사이클과 유사한 정적 연소 특징인 PGC를 가진다.

데토네이션을 발생시키기 위해서는 연료와 산화제에 따라 다르지만 기본적으로 많은 점화 에너지를 필요로 한다. 일반적으로 화학양론비 조건의  $C_2H_4 - Air$ 가 점화를 위해 최소 0.07 mJ의 점화 에너지가 필요하지만 데토네이션을 직접 발생시키기 위해서는 100 kJ의 훨씬 많은 에너지를 필요로 한다. 물론,  $O_2$  산화제를 사용하게 되면 평균 1/1000로 줄일 수 있지만 산업에서 사용되기 위해서는 공기를 산화제로 이용하는 것이 일반적이다. 이런 이유로 데토네이션의 직접 발생보다는 deflagration to detonation transition (이하 DDT) 과정을 거쳐 데토네이션을 발생시키는 것이 보편적이다[10,11].

### 2.2 펄스 데토네이션 엔진

PDE는 데토네이션을 이용한 가장 기본적인 추진 장치로 앞서 설명한 PGC 특성으로 인하여 Fig. 2과 같이 연료의 공급과 차단이 주기적으로 반복하는 불연속적인 작동 형태를 가지며 DDT 과정을 통한 안정적인 데토네이션 발생을 위하여 연소실이 긴 관의 형태를 가지게 된다[12]. 그리고 PGC로 인한 불연속 작동은 Fig. 3과 같

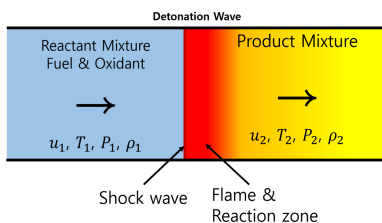


Fig. 1 Detonation schematic.

은 연소실 내부의 압력 변화를 발생시키게 된다. PDE의 장점은 정적 연소로 압력과 온도 상승이 동일 조건의 정압 연소와 비교해 열역학적 효율이 좋기 때문이다. 다시 말해  $t_{cyc}$ 의 한 주기에서 구간 I, II, III의 영역이 실제 데토네이션을 이용하여 얻는 장점이라고 말할 수 있다. PDE 성능 향상을 위해서는 이 영역을 늘려야 하지만 구간 I의 경우 공급 조건 및 사용 연료-산화제에 따라서 결정이 되며 구간 II, III의 경우 연소실의 형상에 어느 정도 결정이 되기에 한 번 설계되어 제작된 이후에 변경이 쉽지 않다. 이 때문에 작동 주파수를 증가시켜 상대적으로 압력이 낮은 III 이후부터 다음 주기가 시작되는 구간의 영역을 줄여 성능을 향상 시키는 방식이 일반적이다 [11]. 작동 주파수에 대한 고정된 기준은 없지만 보통 100 Hz를 기본적 단계의 목표로 본다. 본 연구팀 역시 100 Hz에서 작동하는 단일 시스템의 PDE 개발을 목표로 하고 있으며 이를 위하여 Fig. 4와 같은 장치를 설계 제작하였다. 전체 장치의 개별적 설명은 지난 논문에서 자세히 기술하였으므로 이번 논문에서는 생략한다[13].

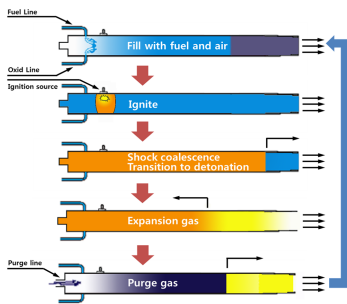


Fig. 2 PDE's operation sequence[6].

23 점화 시스템

PDE의 불연속 작동을 위하여 연료의 공급과 차단을 주기적으로 반복해야 한다. 일반적인 솔레노이드 밸브의 경우 매우 빠른 반복 작동 조건에서는 물리적 특성으로 적합하지 않다. 그래서 이번 PDE에는 Fig. 5와 같은 Matsuoka 등이 개발한 CRV(Coaxial Rotary Valve)[13]를 활용하였다. 작동 순서에 동기화되어 회전하는 CRV와 Fig. 6과 같은 부품이 있으며 근접센서를 통하여 점화 신호를 제어 장치로 전달하며 이를 다시 승압과 방전 플러그로 이루어진 점화 회로로 전달하여 점화 시킨다. 앞서 설명하였듯 데토네이션을 발생시키기 위해서는 순간적으로 많은 에너지를 필요로 한다. 목표로 하는 100 Hz의 경우 10 ms마다 점화 플러그를 방전 시켜야 하며 각 전기 장치의 자체적 시간 지연과 외부 노이즈를 생각한다면 안정적인 작동을 위해서는 1~0.1 ms의 응답성을 가지며 10,000 V로 승압이 가능해야 한다. 본 연구에서는 100 Hz 이상의 PDE 실험에서 위 조건을 만족시키기 위한 점화 회로를 산업용 장치를 이용한 가정용 단상 교류와 반도체 장치를 이용한 축전지 직류로 나누어

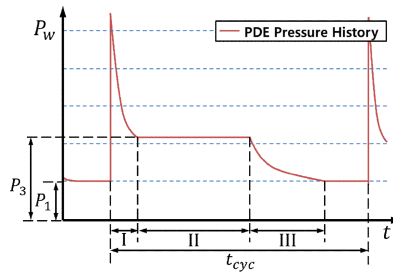


Fig. 3 PDE's pressure history[11].

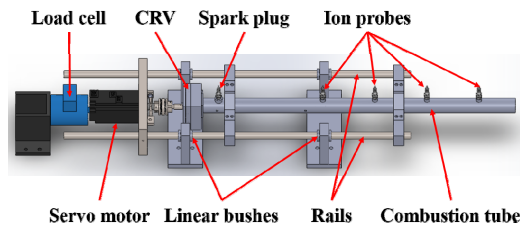


Fig. 4 3D CAD of PDE[13].

구성하고 실험을 통해 보다 적합한 구성을 확인한다. 회로 구성에 관한 자세한 내용은 다음 장에서 이어 진행하도록 하겠다.

### 3. 실험 장치 구성

#### 3.1 PDE 구성 및 점화 과정

본 연구의 PDE는 Fig. 4와 같이 데토네이션이 발생하는 긴 연소관, 연료의 공급과 차단을 담당하는 CRV, CRV를 구동 시킬 서보모터와 PDE의 추력 성능을 확인할 로드셀로 구성되어있다. 서보모터 회전에 CRV를 회전 시켜서 연료, 산화제 그리고 퍼지 가스의 공급과 차단을 반복하게 된다. 이때 점화는 작동 순서에 동기화되어 회전하는 trigger shaft를 근접센서를 통하여 확인하고 이 신호를 PLC와 점화 회로에 보내게 된다. 회로에서 발생한 전기 신호는 각 회로의 승압 장치를 통해 증폭되고, 증폭된 전압을 점화플러

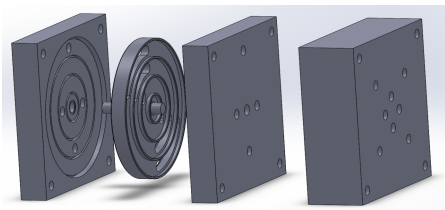


Fig. 5 The 3D modeling of Coaxial Rotary Valve[13].

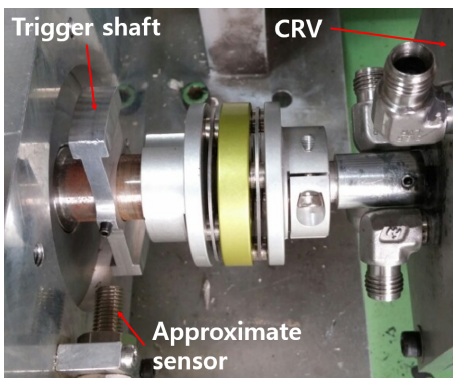


Fig. 6 The picture of the parts between the CRV, trigger shaft and servo motor.

그를 통하여 방전시켜서 미연 가스를 점화 시키게 된다. 본 연구에서는 PDE와 기타 구성품은 동일하며 점화 회로 구성만 교류와 직류 전원에 맞추어 다르게 구성하였다.

#### 3.2 점화 회로 구성

Fig. 7, 8처럼 교류와 직류 전원을 이용한 회로를 구성하였다. 전기 방전을 위한 승압 장치로 산업용 코일형 변압기인 KI-117로 교류 회로에서 1 차 220 V 전압을 10 kV로 승압 시키게 된다. 2 차 전류는 18 mA로 공급되는 에너지가 180 W로 점화시키기에 충분하다. 직류 전원은 주기적인 전원의 공급과 차단을 통하여 전압 변화를 유도하며 차량의 경우 단속기가 이 역할을 한다. 하지만 차량의 단속기를 PDE에 설치하기 위해서는 장치의 부피가 너무 커지고 무게가 무거워지기 때문에 본 연구에서는 NE555 불안정 발진회로를 통하여 반도체를 통한 강제적인 전압 변화를 발생시켰다. 발진 신호 이후 낮아진 전압은 MOSFET을 이용한 고속 스위칭 및 중간 승압 회로로 구성하여 부족한 전압을 12 VDC로

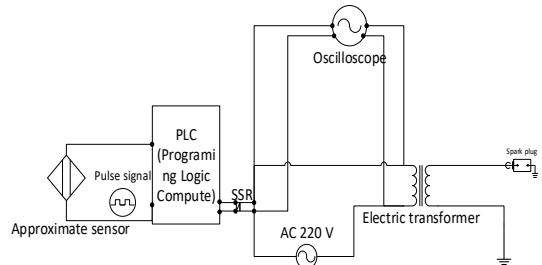


Fig. 7 PDE's ignition test circuit by using AC power supply.

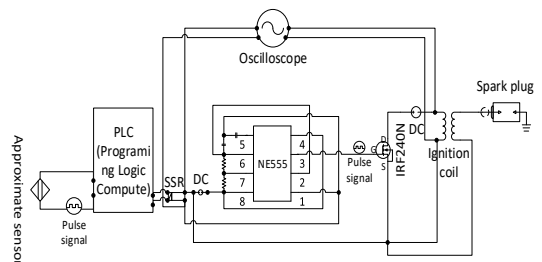


Fig. 8 PDE's ignition test circuit by using DC power supply.

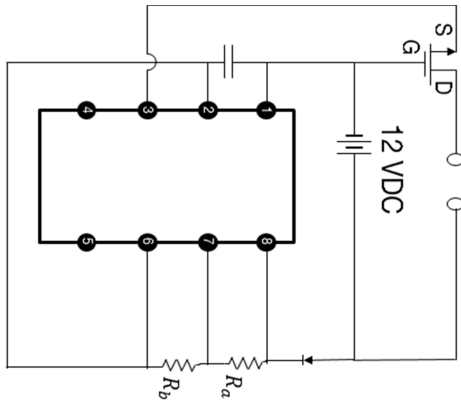


Fig. 9 NE555's astable resonance circuit using MOSFET amplification circuit[13].

올려서 차량용 점화 코일의 1 차 코일에 인가하여 10 kV로 승압 시키게 된다.

### 3.2 NE555 발진회로

Fig. 9은 앞서 설명한 NE555와 MOSFET를 이용하여 제작한 발진 회로의 회로도이다. 기본적으로 NE555와 회로에 들어간 저항과 캐패시터에 따라 전하의 충전과 방전을 반복하게 되고 이러한 충전과 방전은 전압 차이를 발생시키게 된다. 그 결과 변압기의 코일 단면적의 자속 밀도를 변화 시켜 전압을 변화 시키게 되며 지금의 경우 상승시킨 전압을 이용하여 점화 플러그에서 전기 방전을 유도하게 된다. 이와 같은 회로를 구성하게 된 이유는 기본적으로 전압이 시간에 따라 변화하는 교류와 달리 직류의 경우 전압 변화가 없으므로 승압을 위해서는 강제적으로 변화 시켜줘야 한다. 이를 위하여 이번 실험에서는 NE555 IC 회로를 이용하여 불안정 발진회로를 구성하였다[14]. 앞서 설명한 바와 같이 회로의 저항과 캐패시터에 따라 충전과 방전 시간이 정해져 발진 주파수가 결정되므로 이번 실험의 위해서 이를 조절하여 발진 회로의 주파수는 1000 Hz로 구성하였다.

### 3.3 실험 순서 및 작동 영역

점화 신호는 CRV를 작동 시킬 서보모터의 회전축에 검사 시편과 근접센서를 설치하였다. 서

보모터의 회전에 따라 회전하는 검사 시편을 근접센서가 측정하여 PLC로 신호를 보내게 된다. PLC는 들어온 신호를 점화 회로에 신호를 전달하며, 이 신호가 점화 회로에 들어가기 전의 릴레이의 신호를 오실로 스코프를 이용하여 측정하며 이를 서보모터와 CRV를 통한 설정 작동 신호로 본다. 이 전기 신호가 승압기의 1 차 코일에 인가되어 2 차 코일에서 승압 되어 전기 방전을 발생시킨다. 실제 PDE의 점화 시점은 점화 플러그에 인가되는 승압기의 2 차 코일의 신호이지만 2 차 코일에 인가되는 전압은 기본 10 kV의 높은 전압이 인가되기 때문에 실험 장치와 실험자의 안전을 위하여 직접적으로 2 차 코일의 전압을 측정하는 대신 1 차 코일에 인가되는 전압의 변화를 측정하며 이를 실제 점화 장치의 작동으로 본다. 승압기에서 1 차 코일에서 2 차 코일로의 승압 시간 지연은 매우 작아 무시될 수 있기에 1 차 코일의 전압 변화가 2 차 코일의 신호로 봐도 무방하다. 회로의 정상 작동 여부는 인가한 작동 수에 따라 정상적으로 전압 변화가 발생하는지, 그리고 그에 따라 릴레이에 표시되는 LED의 점등 여부이다. 작동 주파수의 경우 서보모터의 회전수에 따라 결정되며 직류와 교류 전원 모두 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 RPM의 회전수로 작동 시키며 이를 작동 주파수로 환산하면 16.66, 33.33, 50.00, 66.66, 83.33, 100.00 Hz이다.

## 4. 실험 결과

서보모터를 이용하여 작동 주파수를 16.66 ~100.00 Hz까지 총 다섯 단계로 나누어 각각 3회의 실험을 직류와 교류 전원을 이용한 점화 회로 실험을 진행하였다. 직류와 교류의 각 실험 결과에서 측정된 2차 전압 파형의 최고점에서의 시간을 기준으로 각 결과의 주파수를 산출하여 Table. 1과 같이 나왔으며 표의 측정 결과를 평균하여 Fig. 10과 같이 그래프로 나타내었다.

직류 전원을 이용한 실험 결과를 Fig. 10에서 보게 되면 작동 주파수가 16.66~100.00 Hz 상승

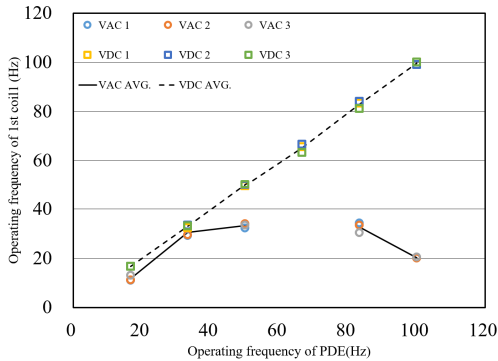


Fig. 10 Comparison experiment result in various operation frequency.

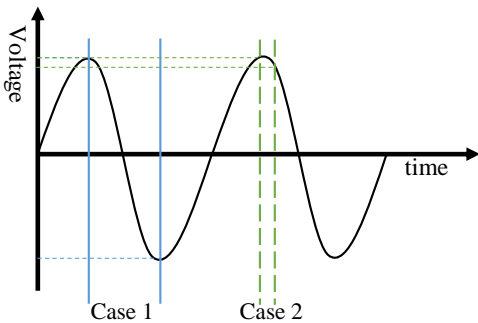


Fig. 11 The different voltage of various operating conditions in case of alternating current.

하는 동안 1차 코일의 출력 역시 비례하여 증가하였다. 각 측정 결과는 입력된 작동 주파수와와 점화 신호인 출력 주파수와 비교하여 보면 16.67~100.00 Hz까지 각각 0.01, 1.37, 0.29, 2.26, 0.59 그리고 0.34 Hz의 차이로 각 주파수에 따라 조그마의 차이는 발생하였지만 평균 0.97%, 최대 5%로 입력된 작동 주파수와 출력 주파수 간의 차이를 보였다. 전체적으로 입력 주파수와 비교하여 볼 때 출력 주파수는 감소하였으며 이와 같은 원인은 근접 센서, PLC, SSR (Solid State Relay) 등 각 전자 기기의 회로 부품들이 가지는 정정 시간 (settling time)에 의한 시간 지연으로 보고 있다. 각 결과를 다시 살펴보면 66.67 Hz에서 가장 큰 오차를 보였으며 16.67 Hz에서 가장 적은 오차를 보였다. 이러한 변화량을 작동 주파수의 증가에 따른 출력 주파수로 살펴보면 평균적으로 0.99의 변화량으로 거의 1.00에 근접함을

Table. 1. Experiment result in various operation frequency.

Type	Frequency	Test 1	Test 2	Test 3
VAC	16.66	11.00	11.10	13.00
	33.33	29.11	29.38	33.10
	50.00	32.25	34.00	33.31
	66.66	X	X	X
	83.33	34.22	33.33	30.33
	100.00	20.11	20.00	20.42
VDC	16.66	16.66	16.66	16.66
	33.33	32.29	33.33	33.01
	50.00	49.33	50.00	50.23
	66.66	65.63	66.61	63.23
	83.33	83.31	84.11	81.10
	100.00	99.99	98.97	100.01

\*Frequency unit Hz

보여 주어 직류 전원을 이용한 회로의 경우 약간의 오차가 발생하는 것 이외에는 인가된 작동 주파수에서 안정적인 출력 주파수를 보이고 있다. 지금 결과는 주파수와 백분율에 대한 비교로 실제 점화 시점에서 중요한 점은 ‘각 출력 주파수 조건에서 얼마큼 시간 지연이 발생 하는가’이다. 이를 위하여 가장 많은 차이를 보였던 66.67 Hz 입력 주파수 조건에서 계산된 주파수간의 오차를 시간 지연으로 환산하였을 때 최대 0.77 ms가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 목표로 하는 100 Hz의 시간이 10 ms 임을 고려하여도 충분한 오차 범위로 생각이 된다.

반면 교류 전원을 이용한 실험 결과는 16.66~33.33 Hz 까지는 작동 주파수 증가에 따라 출력 주파수가 비례하여 증가하였으며, 이때의 평균 작동 주파수는 11.70, 30.53 Hz로 실제 작동 주파수 대비 29.80, 8.40%의 하락을 보였다. 앞서의 직류 전원을 사용한 실험과 비교하여 보면 29.79, 7.13%의 차이를 보였다. 더욱이 이후 50 Hz까지 증가하면 할수록 실제 입력된 작동 주파수와 실제 출력되는 작동 주파수의 차이는 더욱 증가하여 50 Hz의 경우 평균 33.19 Hz로 작동 주파수 대비 출력 주파수가 49.86% 하락되었다. 그리고 직류 전원을 이용한 실험과 다르게 교류 전원을 사용한 회로의 경우 66.66 Hz의 입력 주파수에 대한 출력 주파수는 파형이 일정하

지 못하고 불규칙적으로 출력되었다. 이 때문에 출력 주파수 자체를 결정할 수 없었다.

이와 같은 원인은 국내에 공급되는 가정용 전력은 220 V 전압에 60 Hz 단상으로 공급한다. 이런 특징으로 Fig. 11을 보게 되면 작동 주파수가 높아져 시간 간격이 좁아지면 case 1에서 case 2와 같이 바뀌어 회로가 닫혀 있는 시간 간격이 좁아지고 그 만큼 전압 강하의 폭이 좁아져 출력이 불안정해지게 된다. 그리고 만약 입력 주파수가 60 Hz이며 작동 시점의 위상이 공급 전력의 위상과 180° 차이가 발생할 수 있어 회로가 닫혀있는 시간 동안 출력 전압이 차이가 0 되는 현상이 예상된다. 이러한 결과로 그래프 상으로 60~66.66 Hz의 위상이 90°인 특이점을 경계로 각 전압의 위상은 점점 180°의 신호와 출력이 정반대의 형태에 가까워지기 때문에 이후 83.33, 100 Hz의 경우 앞선 결과와 달리 작동 주파수가 증가할수록 오히려 출력 주파수는 감소하는 경향을 보였다. 이때 각 결과는 작동 주파수 대비 60.85, 79.82%의 주파수 감소를 보였다.

이러한 경향을 보다 직관적으로 이해하기 위하여 '출력 주파수/작동 주파수'의 변화량을 기준으로 보면 직류 회로의 경우 평균 변화량 0.99, 최대 1.06, 최소 0.92로 비례하는 1.00에 근접한 모습을 보여 주었지만 교류를 이용한 실험에서는 불안정한 주파수의 66.66 Hz를 제외하고 16.66~33.33 Hz에서 1.13, 33.33~50.00 Hz에서 0.16, 83.33~100.00 Hz에서 -0.75 변화량을 보여 주었다. 본 실험에서는 PDE의 목표 작동 주파수인 100 Hz 기준으로 맞추어 실험이 설계되었기 때문에 입력 주파수가 최대 100 Hz로 진행하였지만 만약 120 Hz까지 실험을 진행하였다면 이때의 출력 주파수는 10~16.66 Hz의 입력 주파수에서의 출력 주파수와 비슷한 결과를 보였을 것으로 판단된다.

전체적으로 직류 전원의 실험과 비교하여 볼 때 단상 교류 전원의 실험에서 이와 같이 다른 현상이 나타나는 원인은 Fig. 11와 같이 교류의 전압 패턴에서 작동 주파수의 증가에 따라서 시간 폭이 좁아지면서 전압 강하의 폭 자체가 작아지게 된다. 점화 신호의 시점이 파형의 마루 상태

라면 전압 강하가 0 VAC와의 차이를 보이기에 전압 강하가 대략 110 VAC를 보이겠지만 시점이 0 VAC 근처라면 발생하는 전압 강하가 거의 발생하지 않게 된다. 이러한 차이의 발생은 단상 교류 전원이 사인파 형태로 전압의 변화가 연속적인 것에 기인한다. 파형 변화를 통하여 이 문제는 해결 가능하지만 8~12 VDC의 낮은 1 차 공급 전압에 비하여 단상 교류는 220 VAC의 높은 전압은 상대적으로 제어하기가 어렵고 위험하다. 또한 공급 되는 전류의 양 자체도 많기 때문에 코일을 통한 역기전력에 의한 회로 손상 가능성이 높아 전체적으로 파형 변환 회로, 역기전력을 제어하기 위한 회로 그리고 누전에 대비한 안전 접지 등이 필요해 단상 교류의 장점인 시스템의 단순성이 사라지게 된다. 반면 직류 전원의 경우 NE555과 연관된 커패시터-저항의 비의 조절을 통하여 쉽게 조절이 가능하며 초기 전압 자체도 낮기 때문에 상대적으로 안전하다.

## 5. 결 론

100 Hz 이상의 고주파로 작동하는 PDE에 적용하기 위한 점화 회로에 교류 혹은 직류 전원 중 타당한 점화 회로 전원에 대한 실험을 수행하였다. 16.66~100.00 Hz의 작동 주파수에서 점화 회로의 출력이 정확한지 작동 주파수와 1 차 신호와 비교를 수행하였다. 직류 전원의 경우 전 작동 구간에 대해 평균 0.97%의 오차로 작동 주파수 상승에 따른 시간 지연과 전압 변화가 일정하였다. 하지만 교류 전원의 경우 작동 주파수 33.33 Hz 이후 1 차 코일에 인가되는 신호가 맞지 않거나 불안정한 모습을 확인하였다. 이는 실제 PDE 작동에서 점화가 제대로 되지 않는 문제를 야기할 것이며 사인파 형태의 단상 교류 전원은 30 Hz 보다 높은 작동 조건에서는 부적절해 보인다. 이보다 높은 작동 조건에서는 직류 전원의 점화 회로가 상대적으로 적절해 보인다. 이러한 판단에 의하여 만약 기존의 교류 전원을 이용한 점화 회로 구성을 고려할 경우 본 실험에서 사용한 단상 교류 전압이 아닌 3 상 교류

를 활용할 경우 보다 높은 작동 주파수에서 작동 가능한 회로를 구성할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이 역시 교류 전원이 가지는 사인파형의 문제는 가지고 있으므로 보다 자유롭게 작동 주파수를 변화시키는 실험에서는 파형 변화가 쉬운 직류 전원을 통하여 이 문제를 해결하는 것이 적절해 보인다.

## 후 기

본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업(2013M1A3A3A02042430)과 (2017M1A3A3A03015993)의 지원으로 작성되었습니다.

## References

1. "First Holzwarth Experiment Gas Turbine." retrieved 10, Feb., 2016 from <http://www.deutsches-museum.de/en/collections/machines/power-engines/gas-turbines/holzwarth-gas-turbine-1908/>, 1908.
2. Global, F., "Napier Nomad-An Engine of Outstanding Efficiency," *Flight and Aircraft Engine*, Vol. 63, No. 2304, pp. 543-551, 1954.
3. Bussing, T., Bratkovich, T., and Hinkey, J. "Practical Implementation of Pulse Detonation Engines," 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, W.A., U.S.A., AIAA 1997-2748, Jul. 1997.
4. Kailasanath, K. "Review of Propulsion Applications of Detonation Waves," *AIAA*, Vol. 38, No. 9, pp. 1698-1708, 2000.
5. Lee, J. H., *The Detonation Phenomenon*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2008.
6. Kim, J.H., Kim, T.Y., Jin, W.S. and Choi, J.Y., "Research Activities on PGC Propulsion Systems Based on PDE," *KSAS*, Vol. 42, No. 10, pp. 858-869, 2014.
7. Zeldowicz, Y., "The Theory of The Propagation of Detonation in Gaseous Systems," *Theor. Phys. SSSR*, Vol. 10, pp. 542-568, 1940.
8. Von N. J., "Theory of Detonation Waves." National Defense Research Committee of The Office of Scientific Research And Development-ADB967734, 1942.
9. Döring, W. "Über Den Detonationsvorgang in Gasen," *Annalen der Physik*, Vol. 435, No. 6 7, pp. 421-436, 1943.
9. Benedick, W.B., Guirao, C.M., Knystautas, R. and Lee, J.H., "Critical Charge for The Direct Initiation of Detonation in Gaseous Fuel-air Mixtures," *Prog. in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 106, pp. 181-202, 1986.
10. Babrauskak, V., *Ignition Handbook*, Fire Science Publishers, San Diego, C.A., U.S.A., 2003.
11. Endo, T., Kasahara, J., Matsuo, A., Sato, S., Inaba, K., and Fujiwara, T. "Pressure History at The Thrust Wall of A Simplified Pulse Detonation Engine," *AIAA journal*, Vol. 42, No. 9, pp. 1921-1930, 2004.
12. Matsuoka, K., Esumi, M., Ikeguchi, K.B., Kasahara, J., Matsuo, A., and Funaki, I. "Optical And Thrust Measurement of A Pulse Detonation Combustor with A Coaxial Rotary Valve," *Combustion and flame*, Vol. 159, No. 3, pp. 1321-1338, 2012.
13. Kim, J.M., Jin, W.S., Oh, S.J., and Choi, J.Y., "Development And Test of Ignition System for Multi-Tube PDE using CRV," *KSPE fall conference*, Gyeon-ju, Korea, pp. 342-345, Nov. 2015.
14. Choi, G.H., *Design and Application of Operation Amplifier Circuit*, 1st ed., Cheong Moon Gak, Gyeonggi, Korea, 2004.