〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.2.197 ISSN 1226-4881

급속 압축장치(RCM)의 압축 조건에 따른 최대 압력 변화에 관한 실험적 연구

김혜민* · 김학영* · 백승욱*†
* 한국과학기술원 항공우주공학전공

Experimental Study on Peak-Pressure Variation Due to Compression by Using RCM

Hye Min Kim*, Hak Young Kim* and Seung Wook Baek*†
* Dept. of Aerospace Engineering, KAIST

(Received October 13, 2010 ; Revised November 16, 2010 ; Accepted November 19, 2010)

Key Words: RCM(급속 압축장치), Compression Ratio(압축비), Peak Pressure(최대압력), Operation Time(구동시간)

초록: RCM(Rapid Compression Machine)은 엔진 내부의 복잡한 연소현상을 연구하는 데 적합한 장치이다. 엔진의 연구를 위해서는 내부의 최대압력을 측정하는 것이 중요하다. 그 이유는 최대압력이 내부 연료의 연소특성에 큰 영향을 끼치기 때문이며, 연소실 내부의 최대온도가 최대 압력에 의해 추정되기 때문이다. 그러나 최대압력은 실린더 벽면과의 열전달로 인해 정량적으로 계산하기 어려우며 보통 실험적인 방법을 통해 측정하고 있다. 본 연구를 통해 RCM의 구동시간에 따른 연소실의 최대압력과의 관계를 실험적으로 확인하고, 실험결과를 바탕으로 최대압력과 구동시간에 관한 일반적인 공식을 도출한다.

Abstract: RCM is used to clarify the complex phenomena of engine combustion. In order to describe engine combustion, several significant experimental studies are considered. Prediction of the peak pressure is very important since it has a significant influence on engine combustion. In addition, peak-temperature variation can be calculated from the measured peak pressure by using the fundamental thermodynamic relation. When the RCM is in operation, heat transfer occurs through the cylinder wall. Because of this phenomenon, it is difficult to determine the peak pressure without employing the case by case experimental method. The goal of this study is to evaluate the peak pressure analytically. We conduct an experiment to confirm the relationship between the peak pressure and some parameters. Using the results of the peak pressure variation experiment, we develop a general equation that be used to calculate the peak pressure as a function of operation time and compression ratio.

- 기호설명 -

CR : 압축비
CR_{act} : 실제 압축비
t : 구동시간(ms)
P_{Peak} : 최대압력(bar)
γ : 비열비

1. 서 론

내연 기관은 산업화 시대부터 현재에 이르기까지 가장 중요한 기술 중 하나로써, 크게 스파크 점화 방식의 가솔린(Spark ignition)엔진과 압축착화를 통한 디젤(Compression ignition)엔진으로 나누어진다.

내연 기관의 성능 향상 및 오염 물질 저감을 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 차세대 엔진으로 VCR(Variable Compression Rate) 엔진, HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) 엔진 등이 연구되고 있으며, 수소, GTL(Gas to Liquid Fuel) 및 바이오 에탄올, 식물성 유지 등 다양한 종류의 대체연료를 내연 기관에 적용시키는 연구가 진행 중이다.[1]

† Corresponding Author, swbaek@kaist.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

내연기관을 연구하는 실험 장치는 실제 엔진 이외에도 정적연소기, 급속압축장치(RCM : Rapid Compression Machine), 급속압축팽창장치(RCEM : Rapid Compression Expansion Machine) 등이 사용되고 있다. 그 중 RCM 장치는 연료의 자발화 연소(Auto ignition) 현상을 연구하기에 적절한 실험 장치로써 정적연소기에 비해 엔진의 연료 연소 특성을 잘 모사할 수 있으며, 다양한 측정 장치를 설치할 수 있고 내부 연소를 광학적으로 관측할 수 있다는 장점이 있다.[2]

RCM을 이용한 내연기관의 연구는 최근까지 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. Griffiths 등[3]은 LIF(Laser induced fluorescence)를 이용하여 RCM 압축 실험 시 연소실 내부의 온도장 형성과 코어(Core)유동의 온도변화에 관한 연구를 수행하였고 Mittal 등[4]은 RCM 작동 시 내부의 유동을 실험 및 수치적인 방법으로 해석하였다. 크레바스(Crevice) 피스톤을 이용하여 실린더 내부 벽면의 와류(Vortex)를 줄이고 압축 실험시 연소실 내부의 코어 유동의 온도를 균일화 시키는 연구를 진행하였다. Shiga 등[5]은 RCM을 이용한 천연가스 연소 실험에서 천연가스의 분사 시점을 조절하여 엔진의 성능을 최대화 할 수 있는 분사 시점을 확인하는 연구를 수행하였다.

RCM을 이용한 연구에서 실험 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나는 압축 후 연소실 내부 온도장의 변화이다. 연소실 내부의 온도는 연료의 점화 지연(Ignition delay) 및 연소 후 배출물질과도 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.[6] 하지만 빠른 시간 내에 연소실의 공기를 압축하는 실험 장치의 특성 상 내부 온도를 실험적으로 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 최대 압력을 측정, 열역학 공식을 이용하여 내부 온도를 추정하는 방식이 널리 사용되고 있다.[7]

본 연구의 목적은 RCM 의 구동 압력 및 압축비(CR: Compression Ratio)에 따른 최대 압력 변화를 측정 및 공식을 이용하여 최대 압력을 추정하는데 있다. RCM 내부의 압축 현상은 단열 압축 현상과 등온 압축 현상의 사이에 위치하고 있으며 장치의 구동 시간과 행정거리가 짧을수록 벽면을 통한 열 손실이 작기 때문에 단열 압축 현상에 가까워지고 구동시간과 행정거리가 길수록 벽면을 통한 열손실이 증가하기 때문에 등온 압축 상태에 가까워진다. 따라서 연소실의 최대 압력은 RCM 장치의 구동시간 및 행정 거리에 관한 공식으로 표현 가능하다. 이를 통하여 모든 조건에 대한 압축 실험을 수행하지 않고도 특정 조건의 최대 압력을 수치적으로 예측할 수 있다.

본 연구를 위하여 공압을 이용하여 구동되는 RCM을 제작하였다. RCM을 이용하여 구동 압력 및 압축비에 따른 최대 압력을 실험적으로 측정하고, 실험결과를 바탕으로 최대 압력을 작동 시간과 압축비에 관한 공식으로 표현한다. 도출한 공식은 다른 압축비에서의 실험 결과와 비교하여 공식의 유효성을 입증하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험조건

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 RCM 실험 장치의 모습은 Fig. 1과 같다. RCM 은 0.05m 직경의 피스톤이 공압으로 구동되어 연소실의 공기를 압축시키는 방법으로 작동한다. 실험 장치는 공기의 압축이 이루어지는 연소실(Reaction chamber), 장치를 작동시키는 구동 챔버(Driving chamber)로 구성되어 있다.

연소실의 위치는 Fig. 1에 표시되어 있으며 피스톤이 연소실 내부의 기체를 짧은 시간 내에 압축시키게 된다. 연소실에는 Fig. 2와 같이 연소실 내부를 관측할 수 있도록 지름 0.01m의 석영유리 관측창이 설치되어 있으며, 실험 결과를 얻기 위한 센서 및 각종 측정 장치를 설치 할 수 있는 공간을 확보하였다. 연소실 벽면에 측정 장치가 설치되지 않은 공간은 금속 부속품으로 공간을 메워 데드 볼륨(Dead volume)을 최소화 하였다.

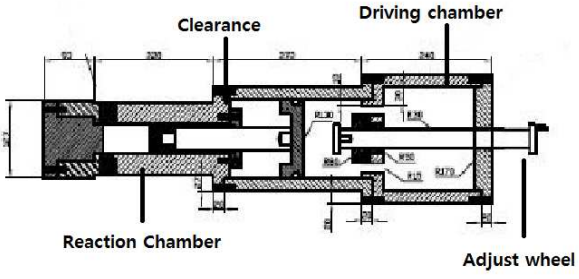

Fig. 1 Schematic description of RCM

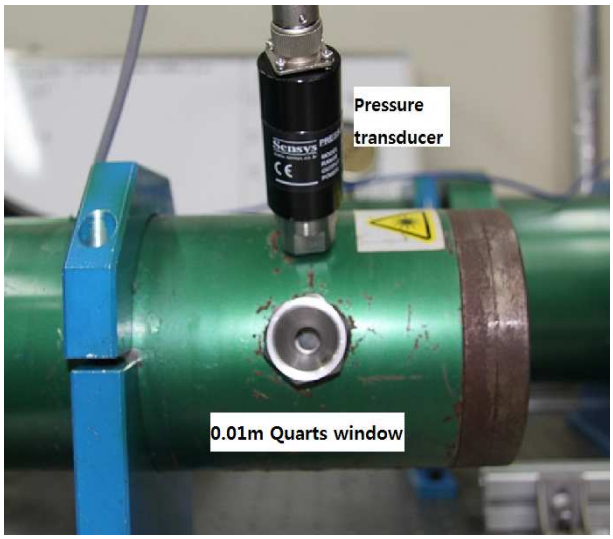

Fig. 2 Quartz window of reaction chamber

RCM은 구동 챔버의 고압 공기에 의해 피스톤이 움직여 연소실을 압축하게 된다. 구동 챔버는 RCM을 이용하여 다양한 실험을 수행하기 위해 1~40bar의 작동 범위를 가지고 있고, 휠(Adjust wheel)을 통해 연소실의 압축비를 11에서 19까지 조절할 수 있도록 하였다. 구동 챔버 내부의 압력은 공기 압축기를 이용하여 충전하였다.

RCM 장치는 일반적으로 구동시간이 수십 ms ~ 200ms 정도로 매우 짧다. 따라서 피스톤을 안전하게 정지시켜 피스톤에 파손되지 않도록 하는 것이 중요하다. 연구에 사용된 RCM 은 구동 챔버 피스톤의 전면에 더 큰 공압을 주입하여 실험을 수행하기 전 장치가 작동하지 않도록 피스톤을 고정 시켰다. 실험 수행 시 작동 피스톤의 전면에 주입되었던 공압을 솔레노이드 밸브를 통해 빠르게 토출시키면서 장치가 작동되게 하였다. 피스톤이 최대 이동거리에 도달하게 되면 Fig. 1에서 계단 모양의 틈(Clearance)에 작동 피스톤이 들어가게 된다. 이 때 피스톤과 벽면 사이의 틈에 공기가 갇혀 쿠션 역할을 하도록 제작하여 고속의 구동에서도 피스톤에 손상이 가지 않도록 하였다.

연소실에는 Fig. 2와 같이 전압 계측식 압력계(Sensys, PMS)가 설치되어 있으며 압력계를 통하여 얻어진 전압을 PDAQ(Iotech, PersonalDaq 3005)를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험 조건

본 연구를 위해 구동 압력 변화 및 압축비 변화 조건에서 최대 압력 변화의 경향성을 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

Table 1 Experimental conditions

	Experimental condition	Reaction gas	Remark
Case 1	CR : 13,15,17 Driving Pressure : 4~14bar	Air	γ = 1.400
Case 2		CO_2	γ = 1.289

RCM 장치는 실험 전 피스톤 전면의 공압이 피스톤을 움직이지 않게 고정시키게 되며 실험 수행시 공압이 외부로 토출되면서 작동하게 된다. 이 때 피스톤 전면의 공압을 항상 구동 챔버의 압력보다 2bar 더 높게 설정하여 피스톤 전면의 공압 차이로 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다. 연소실은 압축 후 내부의 잔존물을 제거하기 위해 공기를 이용하여 청소하였다. 실험 결과는 압력 센서를 이용하여 측정하였으며 PDAQ를 이용하여 1ms 간격으로 5000개의 데이터를 획득하였다. 압축비는 장치 작동 전 피스톤의 위치와 작동 후 피스톤의 위치를 이용하여 계산하였다.

실험은 두 가지 조건으로 진행되었다. 실험 조건은 Table 1과 같다.

Case 1 에서는 연소실에 공기를 주입하여 구동 압력에 따른 최대 압력 변화에 대한 실험을 진행하였다. 구동 압력은 4bar에서 14bar 까지 1bar 간격으로 늘려가는 방법으로 실험을 수행하였다. 압축비는 13, 15, 17로 변화시켜 실험하였다.

Case 2 에서는 연소실에 이산화탄소를 주입하여 Case 1 과 동일한 실험을 진행하였다. 기체 주입은 이산화탄소가 공기보다 무거운 성질을 이용하여 연소실 내부에 이산화탄소를 일정시간 주입하는 방법을 이용하였다. 구동 압력은 공기를 이용한 실험과 동일하게 4bar에서 14bar 까지 1bar 간격으로 늘려가는 방법으로 실험을 수행하였다. 압축비는 13, 15, 17로 변화시켜 실험하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 *Case 1*

연소실 내부에 공기를 이용하여 구동압력과 압

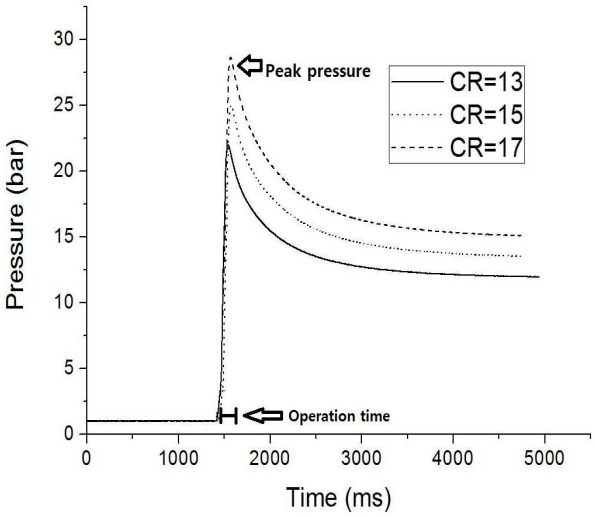

Fig. 3 pressure variation when driving pressure is 14bar

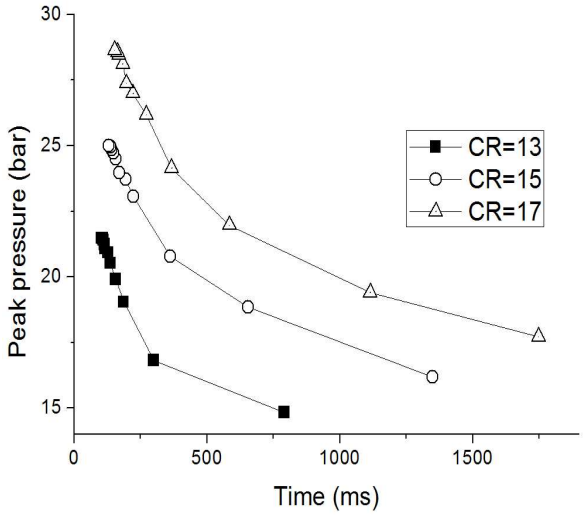

Fig. 4 Peak pressure variance according to time and CR at air experiment

축비를 변화시킬 때 연소실 내부의 최대 압력변화에 관한 실험을 수행하였다.

실험 데이터는 Fig. 3과 같이 시간에 따른 압력 변화로 얻어진다. 실험 결과에서 가장 압력이 높은 지점을 연소실 내부의 최대 압력으로 설정하였다. 작동 시간은 연소실 내부의 압력이 최초로 1.3bar가 되는 지점에서 최대압력을 나타내는 지점까지의 시간차로 계산하였다.

실험 결과는 Fig. 4와 같이 압축비와 작동 시간에 따른 결과로 나타내었다. 실험 결과를 통해 구동시간이 증가할수록 최대 압력이 작아지며 압축비가 클수록 최대압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 압축비에서 구동시간이 길수록

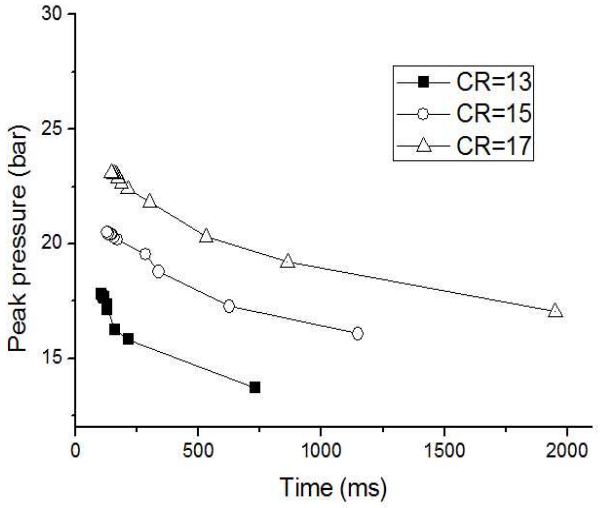

Fig. 5 Peak pressure variance according to time and CR at CO_2 experiment

일정한 등온 상태(Isothermal state)로 수렴하였다. 최대 압력은 압축비가 13에서 20.29bar, 15에서 25.00bar 그리고 압축비가 17일 때 28.64bar를 나타 내었다.

3.2 *Case 2*

Case 1 과 동일한 조건에서 연소실 내부에 이산화탄소를 주입하여 구동압력과 압축비의 변화에 따른 최대 압력 변화에 관한 실험을 수행하였다. 최대 압력 데이터 획득 방법 및 구동 시간 측정은 Case 1과 동일하게 진행하였다.

실험 결과는 Fig. 5와 같다. 결과에서 구동시간이 줄어들수록 최대압력이 증가하는 그래프 개형은 Case 1 실험과 동일하다. 그러나 이산화탄소의 경우 공기보다 비열비(Specific ratio)가 작기 때문에 같은 구동 시간에서 최대 압력이 공기보다 낮은 것을 확인 할 수 있다. 두 기체의 결과 그래프를 통해 구동시간이 충분히 길어져서(t > 1000ms) 등온상태에 근사하게 될수록 공기와의 최대 압력 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 최대 압력은 압축비가 13에서 17.81bar, 15에서 20.50bar 그리고 압축비가 17일 때 23.09bar를 나타내었다.

3.3 최대 압력 공식 구성

공기와 이산화탄소의 최대 압력 실험결과를 이용하여 최대 압력을 구동시간과 압축비에 관한 공식으로 나타내었다.

연소실 내부는 측정 장치 설치 공간 및 공차로 인한 데드 볼륨(Dead volume)이 존재한다. 데드 볼륨으로 인해 RCM 실험 전후 연소실의 압력비는 피스톤의 이동거리를 이용하여 구한 압축비에 비해서 작은 것으로 측정되었다. 공식의 정확한 계산을 위해 데드 볼륨을 고려한 실제 압축비를 공식의 변수로 사용하였다. 실제 압축비는 RCM을 구동시킨 뒤 5초 후 충분한 열전달이 발생한 후 연소실 내부의 압력으로 설정하였다. 실제 압축비는 피스톤의 위치를 측정하여 계산한 압축비(CR)과 달리 (CR_{act})로 나타내었다.

최대 압력 변화에 따른 공식 유도를 위해 실험 결과 외 두 가지 값을 가정하였다.

먼저 구동시간이 0ms 일 때는 피스톤이 매우 빠르게 작동하여 벽면을 통한 열손실이 일어나기 전 RCM을 이용한 압축 행정이 완료되었다고 생각할 수 있다.

이 상황은 벽면과의 열전달이 전혀 일어나지 않은 단열상태라고 가정할 수 있으므로 압축비를 이용, 단열상태에서의 열역학 압력 공식을 이용하여 최대 압력을 구할 수 있다. 단열상태에서의 최대 압력은 공식 (1)을 통해 계산할 수 있다. 이때 ɣ(Specific heat ratio)는 공기 또는 이산화탄소의 비열비이다.[8,9]

$$\left(\frac{P_{peak}}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (1)$$

RCM 의 구동시간이 충분히 길어 연소실 내부의 공기와 벽면의 열전달이 충분하게 일어날 때의 최대 압력을 가정하였다. 실험 결과 구동 후 5초 후가 등온상태에 거의 근접한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이번 실험에서는 구동 후 5초가 지났을 때 연소실 내부가 등온상태라고 가정하였으며 연소실 내부의 압력결과를 등온상태로 가정하여 계산하였다. 등온상태의 최대 압력은 공식 (2)을 통해 계산할 수 있다.

$$\left(\frac{P_{peak}}{P_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2)$$

RCM을 통해 수행한 실험 상태는 단열상태와 정온상태의 중간상태라고 생각할 수 있으며 이때 부피와 압력의 관계식은 공식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 지수 n 은 1과 ɣ 사이의 임의의 실수이다.

$$\left(\frac{P_{peak}}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(CR_{act}\right) \quad (3)$$

실험을 통해 얻어진 최대 압력을 대기압(1bar)으로 나눈 후 공식(3)에 대입하여 Fig. 6, Fig. 7과 같이 구동 시간에 따른 지수 n 값을 구하였다. Fig. 6, Fig. 7을 통해 지수 n은 모든 압축비에서 시간에 따른 열전달 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 구동 시간에 관한 함수로 표현 가능하다.

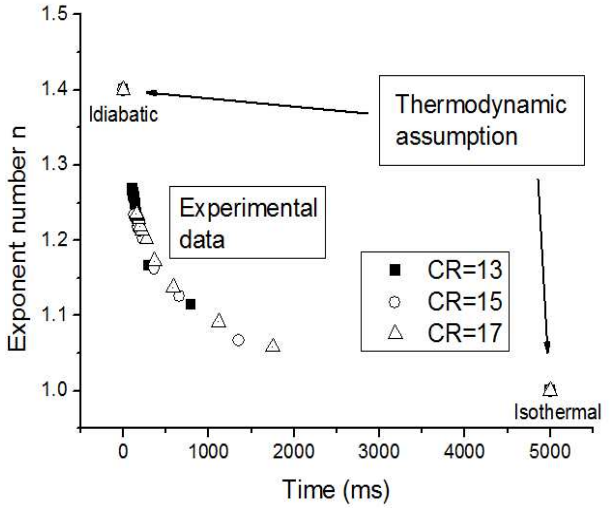

Fig. 6 Exponent number distribution according to time and CR at Air case

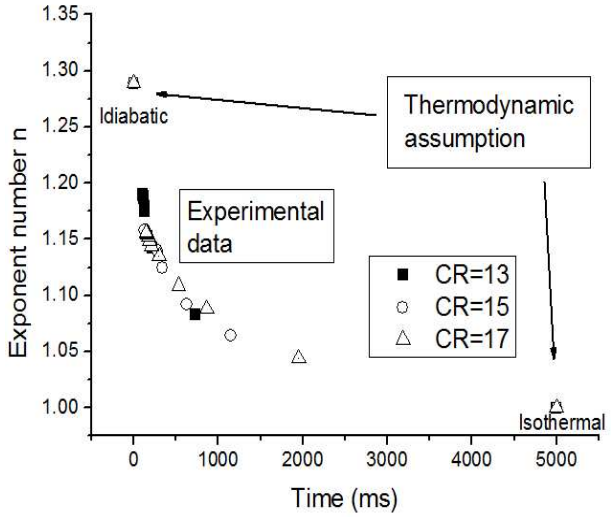

Fig. 7 Exponent number distribution according to time and CR at CO_2 case

구동시간이 짧을수록 벽면을 통한 열전달이 짧은 시간동안 발생하여 열손실이 작아지게 된다. 하지만 열손실은 단순한 공식을 통하여 정량화되기 힘들기 때문에 n을 시간에 관한 인수(Exponent number)로 나타내었다. 따라서 n은 f(t)형태의 함수로 나타낼 수 있다. P_1 은 대기압(1bar) 이므로 최대 압력은 공식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Peak} = CR_{act}^{f(t)} \tag{4}$$

f(t)를 구성하기 위해 Fig. 6, Fig. 7의 결과를 적정한 수학적 모델로 근사하였다. 다양한 수학적 모델을 이용하여 실험 결과를 근사하여 보았고 그 중 가장 잔차(Residual)가 작은 로그(Log) 모델을 선택하였다. 로그 모델의 공식은 (5)와 같다.

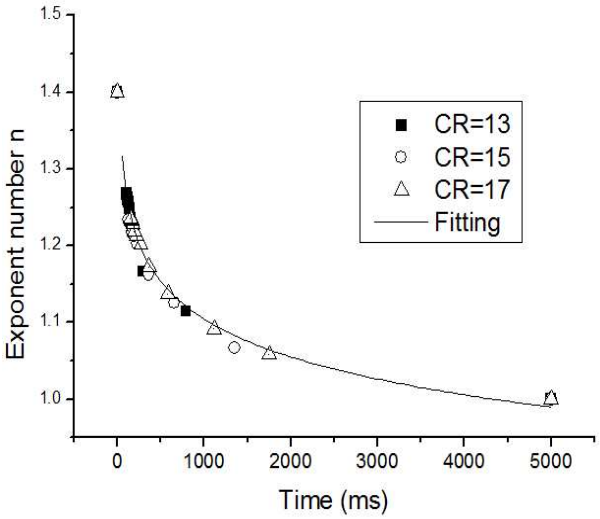

Fig. 8 Power model fitting for air case

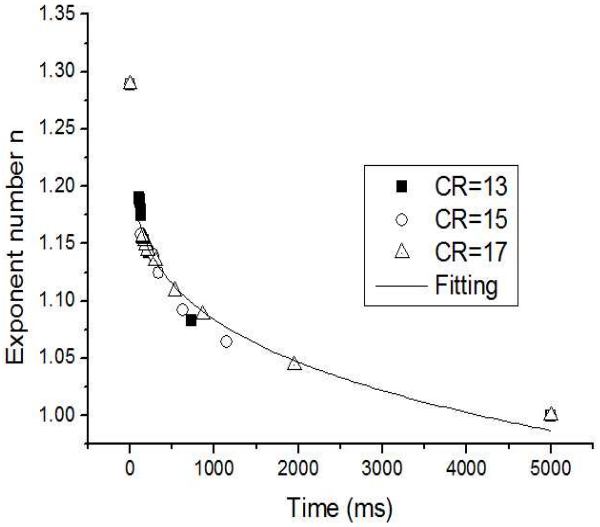

Fig. 9 Power model fitting for CO_2 case

$$f(t) = a - b \times \ln(t) \tag{5}$$

공기 및 이산화탄소 실험 결과에서 계수 *a*와 *b*를 구하기 위해 공기와 이산화탄소의 실험 결과를 각각 Fig. 8, Fig. 9와 같이 근사하여 각각의 계수를 구하였다. *a*와 *b*의 값은 근사를 통하여 획득하였으며 결과는 Table 2와 같다. *a*와 *b*의 결과를 확인해 볼 때 두 계수는 연소실 내부의 기체에 따른 차이가 발생하므로 공기와 이산화탄소의 특성 차이에 의해 결정되는 계수라는 것을 알 수 있으며 이는 추후 다양한 기체의 추가실험을 통해 결정하여야 할 것으로 생각된다.

공식에 대입되는 계수는 이상적인 경우 압축비에 관계없이 동일하여야 하나 실험 결과에서는 실험 오차로 인해 값의 차이가 발생하였다. *a*와 *b*를 공식에 대입하기 위해 계수는 압축비에 따른 *a*와 *b*의 값을 각각 평균하였다. 평균값은 Table 2에 계산되어 있다. *a*, *b*의 평균값을 공식 (5)에 대입하여 최종적으로 시간과 압축비에 따른 최대 압력의 공식 (6)을 완성하였다.

$$P_{peak} = CR_{act}^{a-b\times\ln(t)} \tag{6}$$

이때 *a*와 *b*는 기체의 특성에 따른 계수로써 연소실 주입 기체에 따라 특정한 값을 가지게 된다.

이 공식은 로그의 특성 상 t 가 0에 매우 가까워지게 되면 f(t) 가 양의 무한대로 발산하게 되고 t 가 무한대로 발산하면 음의 무한대로 발산하게 된다. 따라서 공식의 사용범위는 보강 실험을 통해 확인하여야 하며, 현재의 공식 적용 가능 범위는 RCM의 최소 구동시간을 참고하여 105ms < t < 5000ms 라고 결론지을 수 있다.

Table 2 Empirical coefficient of *a, b* for different CR

CR	*a*		*b*	
	air	CO_2	air	CO_2
13	1.641	1.421	0.080	0.050
15	1.586	1.374	0.071	0.043
17	1.612	1.380	0.074	0.044
Mean	1.613	1.391	0.075	0.046

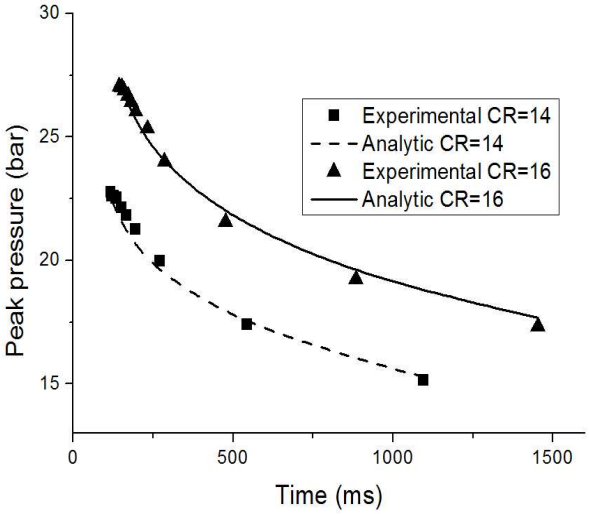

Fig. 10 Experiment and analytic result

3.4 공식 검증

실험을 통해 완성된 공식의 유효성 검증을 위해 연소실 내부에 공기를 주입한 후 이전 실험과 같은 실험조건에서 압축비를 14와 16으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험결과를 공식 (6)의 결과와 비교하여 보았다. 그래프는 Fig. 10과 같다. 공식 (6)의 결과와 실험 결과를 비교해 보면 두 경우 모드 구동시간이 짧아질수록 최대 압력이 급격하게 증가하는 경향성을 확인할 수 있다.

공식과 실험결과의 오차는 최대 2.7% 가 발생하였다.

오차의 원인은 근사에 사용한 수학 모델을 생각해 볼 수 있다. 로그 모델은 다양한 적용분야에서 일반적으로 사용되는 근사 모델로써 본 연구에서는 다양한 근사 모델 중 가장 잔차가 작은 모델로 로그 모델을 이용하여 실험결과를 근사하였다. 그러나 로그 모델의 증가 특성이 실험 결과와 다소 차이가 있을 가능성이 있다.

다른 원인으로는 RCM 의 불규칙한 구동에 있다고 생각된다. 공식의 정확한 구성을 위해서는 긴 구동시간(t > 500ms)의 실험 결과가 필요하다. 긴 구동시간을 얻기 위해서는 낮은 구동압력(4~6bar)이 사용되며 이 경우 피스톤과 실린더 벽면의 마찰로 인하여 피스톤이 불규칙한 속도로 구동하여 연소실 내부의 압력이 부정확하게 측정될 가능성이 있다.

실험 오차를 줄이기 위해서는 낮은 구동압력에서 피스톤의 구동이 일정하도록 장치를 개선하여야 할 것이다. 또한 추후 보강 실험을 통해 현재 장비로는 측정하기 힘든 0~100ms의 실험결과 및 2000ms 이상의 실험 결과를 근사에 반영한다면 더 정확한 공식을 얻을 수 있을 것이다. 특히 통상적인 RCM의 구동속도(수십ms ~ 200ms)에서 공식의 유효성을 획득하기 위해서 RCM 이 100ms 이내의 구동시간을 가질 때 공식과의 오차를 확인하여 공식을 최종적으로 검증하는 과정이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 압축비, 구동시간 및 비열비에 따른 RCM 연소실 내부 최대 압력 변화를 확인하였다. 최대 압력을 실험 압축비, 구동 시간 및 비열비에 따른 공식으로 표현하기 위해 공기와 이산화탄소를 연소실에 주입한 후 압축비와 구동시간에 따른 최대 압력의 변화 실험을 진행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 급속 압축장치의 최대 압력은 구동시간이 빠를수록 증가하였으며 이때 최대 압력은 단열상태에서의 최대 압력에 수렴하였다.

(2) 비열비가 다른 공기와 이산화탄소의 최대 압력 변화를 비교하여 볼 때 같은 구동시간에서 비열비가 높은 공기의 최대압력이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

(3) 단열상태와 정온상태의 중간조건에서 실험결과를 이용하여 지수 n을 구하였다. 실험 결과 n은 압축비에 관계없이 구동시간에 따라 변화하는 경향성을 보였다.

(4) 지수 n을 시간에 관한 함수로 근사하여 압축비와 압력 사이의 관계식을 얻었다. 관계식은 (6)과 같이 나타낼 수 있었다. 연소실에 공기를 주입하고 압축비가 14, 16 일 때의 실험을 수행하여 . 실험결과와 공식 (6)의 결과를 비교하여 구동시간 105ms < t < 5000ms 조건에서 오차가 최대 2.7% 발생함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 “에너지 자원 인력 양성사업”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

(1) Jung, Y. I. and Yoon, J. G., 2000, "Automobile

and Environment," *Han-sung Univ press*, Korea, pp. 113~198.

(2) Lee, D. Y., 1997, "Auto Ignition Measurements and Modeling in a Rapid Compression Machine," *MIT*, Ph.D thesis.

(3) Griffiths, J. F., Clarkson, J., Macnamara, J. P. and Whitaker, B. J., 2001, "Temperature Fields During the Development of Combustion in a Rapid Compression Machine," *Combustion and Flame*, Vol. 125, No. 3, pp. 1162~1175.

(4) Mittal, G. and Sung, C., 2006, "Aerodynamics Inside a Rapid Compression Machine," *Combustion and Flame*, Vol. 145, No. 1-2, pp. 160~180.

(5) Shiga, S., Ozone, S., Machacon, H. T. C., Karasawa, T., Nakamura, H., Ueda, T., Jingu, N., Huang, Z., Tsue, M. and Kono, M., 2002, "A Study of the Combustion and Emission Characteristics of Compressed-Natural-Gas Direct-Injection Stratified Combustion Using a Rapid-Compression-Machine," *Combustion and Flame*, Vol. 129, No. 1-2, pp. 1~10.

(6) Gallagher, S. M., Curran, H. J., Metcalfe, W. K., Healy, D., Simmie, J. M. and Bourque, G., 2008, "A Rapid Compression Machine Study of the Oxidation of Propane in the Negative Temperature Coefficient Regime," *Combustion and Flame*, Vol. 153, No. 1-2, pp. 316~333.

(7) Gaurav, M., 2006, "A Rapid Compression Machine-Design, Characterization, and Auto Ignition Investigations," *Case Western Reserve University*, Ph.D thesis

(8) Gurrie, I. G., 1993, "Fundamental Mechanics of Fluids," *MarcelDekker,Inc*, thirdedition

(9) Richard, E. S., Claus, B. and Gordon, J. V. W., 2003, "Fundamentals of Thermodynamics," *Wiley*, Sixthedition.