

내연기관의 연소실험을 위한 신형 급속 압축-팽창 장치의 개발

정남훈 · 배종욱
(한국박용기관학회)

Development of a New Rapid Compression-Expansion Machine for Combustion Test of Internal Combustion Engine

Namhoon, JEONG · Jonguk, BAE
(KOSME)

Key Ward : Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Rapid Compression-Expansion Machine, Compression Ratio, Compression Speed, Optimum Cushion Throttle Opening Area

Abstract

Investigators who study on combustion in the cylinders of reciprocating piston type internal combustion engines have been encountered embarrassments due to the difficulties of adjusting specific parameter without interfacing other parameters such as cylinder wall temperature, composition of gas in the cylinder, existence of cylinder lubricant etc. Rapid compression-expansion machine, the position and speed of piston of which are able to be controlled by means of a system controlled electrically, and actuated hydraulically could be utilized as one of the most preferable countermeasures against those difficulties. Several units of rapid compression-expansion machines were developed but the speed up of frequency of piston movement still is the problem to be improved to cope with actual speed of internal combustion engines.

Authors designed and manufactured a new rapid compression-expansion machine electrically controlled, hydraulically actuated, and computer programed and then examined the performance of one. Results of a set of experiments revealed acquirements of certain improvement on frequency of piston movement preserving the stability of system response and reproducing accurate compression ratio of cylinder, those are the key function for the in-cylinder combustion experiments on internal combustion engines.

1. 서론

최근 내연기관에 대하여, 연비 향상은 물론이고 당면한 오염배출량 저감에 의한 환경 개선을 목적으로 과급, EGR, 고압분사, 물분사 및 축압식 분사 등 다양한 연소 방식을

동원하여 실린더 내의 실험적 연소에 대한 연구가 진행되고 있다. 연소실내의 연소과정을 관찰하는 것이 엔진개발에 대단히 유용하나, 내연기관에서의 연소는 수 10 ms에서 진행하며 여러 가지의 연소 파라미터들이 상호 연관하여 변화하므로 다른 연소 조건들을 고정시켜 둔 상태로 특정 조건만을 조절하는 것은 불가능에 가깝다. 그렇기 때문에 단발 연소실험을 할 수 있는 급속 압축 장치와 급속 압축-팽창 장치를 이용한 실험이 이 문제에 대한 가장 바람직한 방법으로 취급되어 왔다¹⁾. 池上²⁾ 등은 고압질소구동방식, 小林³⁾ 등은 유압구동방식으로 급속 압축 장치를 개발하였다. 그 이후 전자제어 유압구동방식의 급속 압축-팽창 장치가 개발되었다⁴⁻⁶⁾. 최근에는 전자제어 유압구동방식이 소형, 고출력이며 압축비를 자유롭게 조절할 수 있기 때문에 이 방식이 채용되고 있다. 그리고 이전에 개발된 1,2호기의 시험을 통하여서 다음과 같은 특성이 확인되어 있다. 1) 전기 히터에 의해 연소실 각 부분 온도의 독립제어가 가능하고, 2) 무급유 피스톤의 사용으로 실린더 윤활유 영향이 없는 배기 특성의 실험이 가능하며, 3) 흡기 조성, 압력, 온도 등 압축 시 분위기 상태의 광범위한 조절이 가능하고, 4) 소량의 연료로 연소실험이 가능하며, 5) 대부분의 광학계측이 가능하다.

금 회의 연구에서는 2호기와 같은 방식을 채용하고 피스톤의 동작 빈도를 향상시키기 위하여 유압계통을 개선시켰으며, 피스톤의 행정을 대폭 증대하여 충분한 실린더 내 공간을 확보할 수 있도록 한 급속 압축 팽창 장치를 설계, 제작하여 그 성능과 특성을 조사하고 그 결과를 보고한다.

2. 실험장치

급속 압축-팽창 장치는 순간적인 출력과 정확한 위치제어가 필요하기 때문에 1, 2호기와 같은 전자제어, 유압구동방식이 채택되었다. 컴퓨터에서 나온 신호는 서보밸브 제

table 1 Specification of spool and actuator

	Spool	Actuator
Max. stroke	11 mm	150 mm
Bore	60 mm	100 mm
Over lap	1.5 mm	-

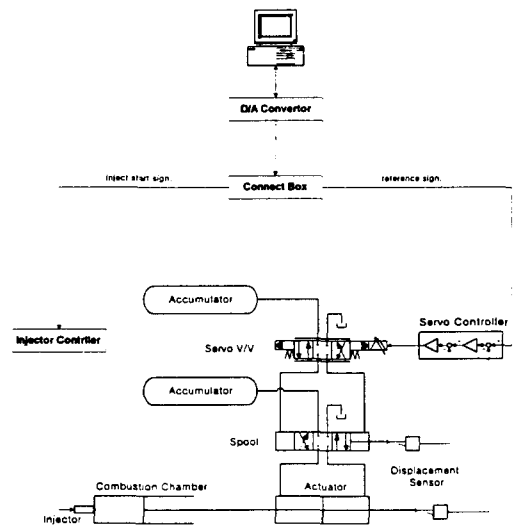


fig.1 Control system of a new RCEM

어를 거쳐 서보밸브를 구동하고, 서보밸브에 의해 스푼(Spool)이 구동되며 이 스푼이 액츄에이터(Actuator) 위치의 제어밸브가 된다. 스푼과 액츄에이터의 제원은 Table 1과 같다.

더욱 정확한 피스톤의 위치정밀도를 위해서 스푼 변위와 액츄에이터의 변위를 피드백하는 2중 루프제어방식을 사용하였다.

Fig.1에서 나타낸 것과 같이 실험장치의 구성요소는 PC, D/A 컨버터(DA12-4(PC), CONTAC), 서보 콘트롤러(SK1056-100-20, YUKEN), 서보밸브(SVD-F13, YUKEN), 레이저 변위계(LB-02, KEYENCE), 레이저 변위계 증폭기(LB-62, KEYENCE), 연결상자이다. 서보밸브 콘트롤러에서는 스푼과 액츄에이터의 변위가 피드백되어 서보밸브의 개폐량이 조절된다. 레이저 변위계와 서보밸브의 제원은 Table 2와 같다.

table 2 Specification of laser sensor and servo valve

	Laser sensor
Laser	Wave 780 nm
Measuring range	± 10 mm
Resolving power	$2 \mu\text{m}$ (at 60 ms)
Output	± 4 V

	Servo valve
Dynamic response	190Hz(at 60 ℓ /min)
Operating pressure	Max. 21.4 MPa
Leakage at 14.3 MPa	less than 2 ℓ /min

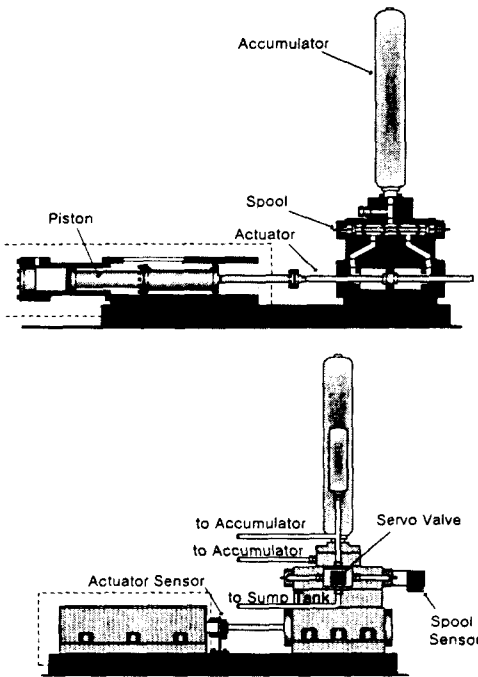


fig.2 Cross section and outlook of a new RCEM(the parts enclosed by dotted line are cylinder & piston to be manufactured later)

스풀 및 액츄에이터 구동용 축압기(Accumulator)의 압력은 공히 21.4 MPa이며, 액츄에이터 구동용 축압기의 용량은 60 ℓ 이다. 또 액츄에이터의 양단에는 행정 끝

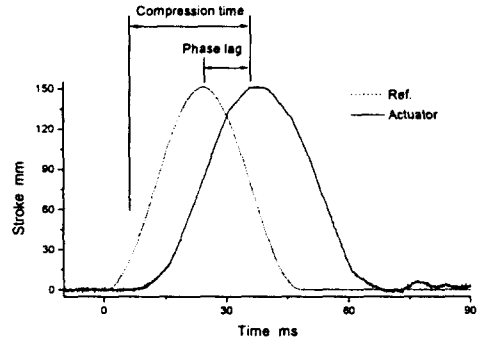


fig.3 A sample from curves of actuator displacement in accordance with reference signal at 21 Hz

에서의 충격을 완화시키기 위하여 유압 쿠션이 설치되어 있다.

Fig.2는 급속 압축-팽창 장치의 단면도와 외형도를 나타낸 것이다.

3. 실험방법 및 결과

Kobori⁶⁾ 등에 의하면 무부하 동작 시와 연소실 최고압력 10 MPa의 부하 동작 시를 비교한 결과 위상 늦음에 대한 최고압력의 영향은 거의 없고 이득에는 근소한 차이가 나는 것으로 보고되고 있다. 선행 연구의 경우와 동일한 압력으로 구동시키며, 피스톤의 면적과 액츄에이터의 면적도 2호기와 동일하므로 본 연구에서는 피스톤이 제작되지 않은 상태에서 무부하 시험만을 시행하고, 액츄에이터의 위치를 측정하여 연구 조사하였다.

Fig.3은 입력 신호로서 21 Hz의 조화 함수를 가하였을 때의 출력으로서의 액츄에이터의 위치를 나타낸 예이다. 이 경우 하사점의 위치는 0의 위치로서 정적으로 임의 조절 가능하며 상사점의 위치는 시스템의 동적 위치 제어에 의하여 결정된다.

3.1. 압축비의 제현성

내연기관에서 압축비는 매우 중요한 요소이므로, 상사점에서의 정확한 정지위치가 요

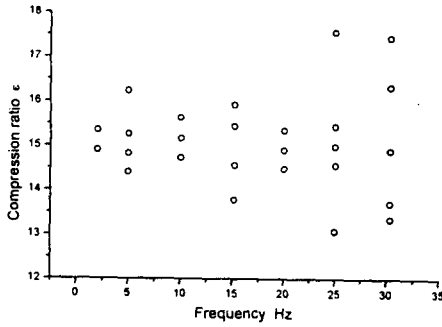


fig.4 Compression ratio 5 times result of assuming the stroke to be 140 mm, cylinder bore 100 mm and combustion chamber volume 785.8 cm³

구된다. 우선 상사점 위치에서 유압 쿠션의 범위에 들어가기 이전의 위치에서 동적 제어만에 의하여서 상사점 위치의 재현성을 조사하여 보았다. 이 경우 스트로크 140mm로 제어하였고, 미 제작 상태이지만 실린더 경 100mm, 압축시의 실린더 체적이 785.5mm³인 연소실(압축비 15에 상당)에 대하여 주파수의 변화에 따른 상사점의 위치를 5회씩 측정하는 것으로부터 계산한 압축비를 Fig.4에 나타내었다.

액츄에이터의 정지 위치의 변화 폭은 주파수에 따라 변화하고, 같은 주파수에서 최대 ±3mm에 불과하지만 이것을 압축비로 환산하면 13.08에서 17.57까지의 변화를 나타내는 것이 되기 때문에 액츄에이터의 동적 제어만에 의하여서 상사점의 위치를 결정하는 것은 곤란하다는 것을 알았다. 따라서 상사점의 위치는 액츄에이터의 실린더 끝단 벽면에 접촉시켜 정지하는 방법을 채택하기로 하였다.

하사점은 초기입력신호에 따라 임의 조절이 가능하기 때문에 다양한 압축비를 얻는 것이 가능하다. Fig.5는 실린더 직경 100 mm, 압축시의 실린더 체적 785.4 mm³인 연소실을 가정하여, 각각의 하사점 위치에서 15회씩 얻은 평균 압축비와 표준편차이다. 압축비로 나타낸 표준편차는 0.02~0.03으로서 매우 높은 정밀도와 정확도를 나타낸다.

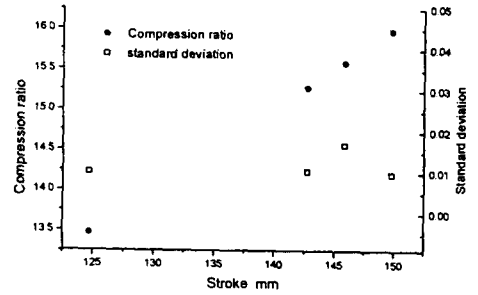


fig.5 Combustion ratio and standard deviation from 15 times data vs stroke by contact method

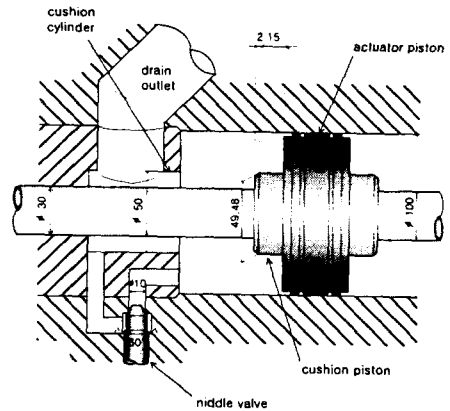


fig.6 Oil cushion at actuator

이를 통하여서 하사점 위치의 정적 제어에 의하여 주파수의 영향이 없으며 광범위하고 정밀한 압축비의 조정 성능을 확인하였다.

3.2. 니들밸브의 영향

액츄에이터가 액츄에이터 벽에 접촉할 때 충격을 감소시키기 위하여 유압 쿠션을 설치하였다. Fig.6은 유압 쿠션의 구조와 쿠션 조절용 니들밸브를 나타낸다. 쿠션 피스톤이 쿠션 실린더의 끝단에 삽입될 때로부터 유압 실린더 내의 작동유는 쿠션 실린더와 피스톤의 틈새를 통하여 스로틀 되면서 드레인 출구로 배출되며 니들밸브의 개도(開度)를 조절함으로써 쿠션 시의 스로틀 강도를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 쿠션피스톤의 끝단과 쿠션 실린더의 끝단의 틈새의 면적과 니

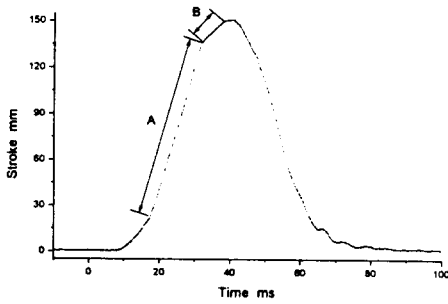


fig.7 Cushion speed ratio at 49 mm² opening

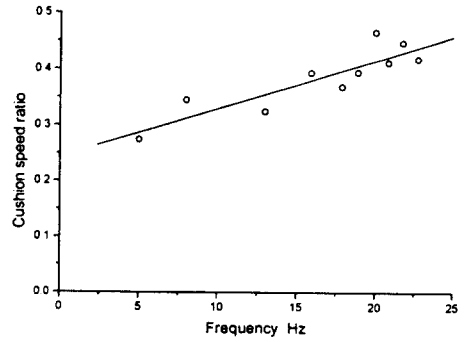


fig.9 Cushion speed ratio as frequency at throttle opening area 126.8 mm²

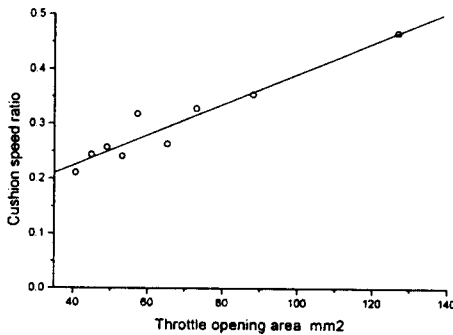


fig.8 Cushion speed ratio as throttle opening area at 20 Hz

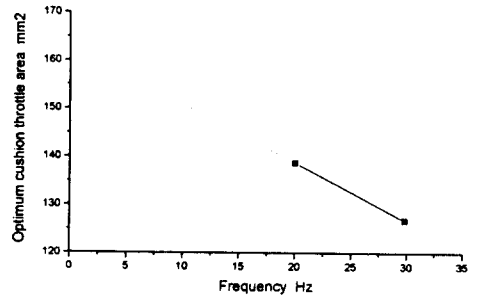


fig.10 Optimum throttle opening area as frequency

들밸브의 개도를 합하여 스로틀 개도 (throttle opening area)라 하고, Fig.7에서 A의 영역의 피스톤 속도에 대한 B의 영역의 피스톤 속도의 비를 쿠션 속도비(cushion speed ratio)라 칭하며, 이 값이 0.5가 되는 스로틀 개도를 최적 쿠션 스로틀 개도 (optimum cushion throttle opening area)라고 정의한다.

Fig.8은 액츄에이터 동작 주파수를 20Hz로 일정하고 스로틀 개도에 따른 쿠션 속도비를 조사한 것이다. 쿠션 속도비는 스로틀 개도의 증가에 따라 직선적으로 증가한다. 본 실험 범위에서 스로틀 개도가 126.8mm²로 될 때까지 실행하였으므로 계획한 최적 쿠션 스로틀 개도에는 미치지 못한다. 따라서 직선을 연장하여 외삽법에 의하여 20Hz

운전 시의 최적 쿠션 스로틀 개도를 구하여 보면 138.1mm²를 얻을 수 있다.

Fig.9에는 최대 스로틀 개도인 126.8mm²으로 일정하고 액츄에이터의 주파수의 변화에 따른 쿠션 속도비를 조사한 결과를 나타낸 것이다. 쿠션 속도비는 주파수의 증가에 따라 역시 직선적으로 증가한다. 이 경우에도 실험 범위는 최적 쿠션 스로틀 개도에는 미치지 못한다. 동일한 방법으로 스로틀 개도 126.8mm²일 때의 쿠션 속도비, 0.5를 얻게되는 주파수를 구하여보면 29.8Hz가 됨을 알았다.

Fig. 10에는 20Hz에서의 최적 쿠션 스로틀 개도 138.1mm²와 29.8Hz에서의 최적 쿠션 스로틀 개도 126.8mm²를 연결하여 각 주파

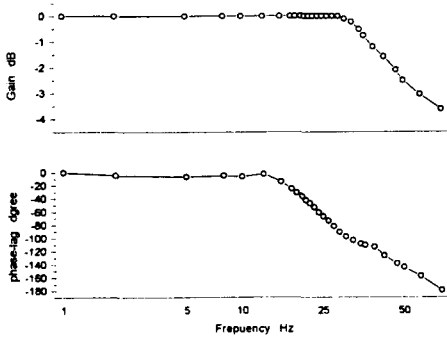


fig.11 Bode plot of a new RCEM

수에 대한 예측 최적 쿠션 스톱을 개도의 선을 나타낸 것이다. 20Hz보다 낮은 범위의 주파수에서는 실선을 연장하여 나타낸 것이다.

본 연구에서 제작된 니들밸브는 스톱을 개도를 더욱 증대시킬 수 있도록 조정할 필요가 있는 것을 알았다.

3.3. 주파수응답 특성

입력정현파에 의한 시스템의 응답특성을 조사하기 위하여 fig.3에 표시한 하사점의 위치를 1mm로 하고, 1Hz의 입력 정현파 신호를 가하여 출력 값인 액츄에이터 정지 위치가 실린더 끝단에 부딪히기 직전인 150mm에 도달하는 입력신호 진폭을 찾아내었다. 그리고 입력 신호의 진폭을 이 값으로 일정히 할 때 주파수 변화에 따른 액츄에이터의 게인(gain) 및 위상지연(phase lag)의 응답특성을 조사하였다. Fig.11은 액츄에이터의 주파수 응답특성을 보드 선도로서 나타낸 것이다.

주파수에 따라서는 오버슈트가 발생하는 범위도 있겠지만, 실제에는 실린더 끝단 벽면에 접촉하여 오버슈트가 일어날 수 없으므로 이러한 경우도 모두 게인 0.0 dB로 취급한다.

보드선도에서 29.4 Hz까지는 게인 0.0 dB을 유지하고 있으며, 15.8 Hz에서부터 위상지연이 크게 증가하기 시작하여 62.5 Hz에서

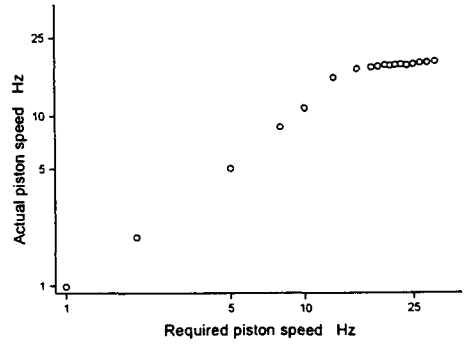


fig.12 Actual piston speed as required piston speed

는 179.4° 에 이르고 있는 것을 알 수 있다. 2호기에서, 게인 0.0 dB인 최대주파수는 16.7 Hz이었고 이때 위상지연은 약 40° 이었으나⁶⁾, 본 3호기는 스트로크가 150 %로 증가하였음에도 불구하고 게인 0.0 dB인 최대 주파수는 29.4 Hz이며, 2호기와 같은 위상지연 40° 되는 주파수는 20.8 Hz로써 2호기보다 높은 최고 운전주파수와 증대된 피스톤 속도를 얻을 수 있었다.

위상지연이 -180° 일 때 게인이 0 dB이하이거나, 또는 게인이 0 dB일 때 위상각이 -180° 이내에 있으면 안정⁷⁾하기 때문에 본 시스템은 안정하고, 이때 게인여유(gain margin)는 3.61dB이며 위상여유(phase margin)는 81.6° 이다.

3.4. 압축속도

피스톤 왕복식 내연기관의 연소 시험에 급속 압축-팽창 장치를 활용하는데 있어서 요체는 압축 속도라고 할 수 있다. Fig.12는 입력신호의 주파수를 요구되는 피스톤 속도(required piston speed)로 간주하고 액츄에이터의 주파수를 실제의 피스톤 속도(actual piston speed)라고 볼 때의 요구되는 피스톤 속도에 대한 실제의 피스톤 속도의 실현 상태를 나타낸다. 보드선도에서 31.3 Hz에서 게인 -0.102 dB이기 때문에, 29.4 Hz까지 입

력 정현파에 대한 액츄에이터의 속도를 나타내었다. 신호가 입력되어 액츄에이터가 움직이기 시작하는 시간은 8.3 ms로 일정하기 때문에 이 지연시간을 뺀 액츄에이터의 압축 속도를 측정한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

입력신호의 주파수가 15.9 Hz까지는 주파수가 커짐에 따라 액츄에이터의 속도도 빨라지나, 그 이상의 주파수에서는 액츄에이터의 속도증가가 급격히 감소된다. 입력 신호의 낮은 주파수 영역에서는 실제의 피스톤 속도가 요구되는 피스톤 속도보다 약간 빠르게 되지만 주파수의 증가에 따라 점점 늦어져서 18.1 Hz에서는 서로 일치하게 된다. 이러한 현상은 Kobori⁶⁾ 등이 제시한 바 스프링의 오버랩 가공에 따른 영향으로 생각된다. 시험의 범위에서 최고의 실제 피스톤 속도는 19.38Hz를 얻을 수 있으며 이는 크랭크 회전수 1162rpm에 상당한다.

4. 결 론

내연기관의 연소실험을 위한 소형 급속 압축-팽창 장치를 설계 제작하고 그 성능시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 다양한 압축비로 조정이 가능하고, 표준편차 0.01~0.02정도의 정밀도를 갖는 성능의 RCEM이 실현되었다.
2. 유압 쿠션장치의 니들밸브로써 쿠션의 강도를 조정하여 주파수에 따른 최적의 쿠션스스로를 개도를 결정할 수 있다.
3. 보드선도에 의한 이득여유 3.61 dB, 위상여유 81.6° 인 응답 안정성을 갖는 RCEM이 실현되었다.
4. 무부하 운전시험으로서 최고의 실제 피스톤 속도가 19.38Hz(1162rpm 상당)의 RCEM이 실현되었다.

참고문헌,

1. 河野 通方, 角田 敏一, 勝本 元, 氏家 康成, “最新内燃機関”, 朝倉書店, 53-71, 1995

2. 池上 詢, 三輪 恵, 稲田 漢, “急速圧縮装置によるディーゼル噴霧の着火および燃焼の研究”, 日本機械学会, 47권 413호, 1981
3. 小林 治樹, 神本 武征, 松岡 信, “ディーゼル機関の燃焼および熱伝達の基本的研究のための大形急速圧縮装置の試作”, 日本機械学会, 48권 425호, 1982
4. Tasakuni Hayashi, Masahiro Taki, Shinji Kojima and Teruaki Kondo, “Photographic Observation of Knock with Rapid Compression and Expansion Machine”, SAE, 841336, 1984
5. 神本 武征, 神藤 英彦, 小堀 繁治, 小林 治樹, 土屋 一雄, “ディーゼル機関の燃焼のための急速圧縮膨脹装置の試作に関する研究”, 日本機械学会, 55권 512호, 1989
6. Shigeharu Kobori and Takeyuki Kamimoto, “Development of a Rapid Compression-Expansion Machine Simulating Diesel Combustion”, SAE, 952514, 1995
- 7) 林 真作, 吉田 裕一, “電気電子工学大百科事典”, 2권, 135 - 150, 1984