

## 가스터빈 결합, 분리실린더, 등적·등압·등온 혼합사이클 엔진성능의 변수 분석

배종욱† · 김동호\*

(원고접수일 : 2004년 3월 3일, 심사완료일 : 2004년 9월 2일)

### A Parametric Analysis of Performance of Gas Turbine Combined, Split Cylinder, Constant Volume, Pressure, Temperature, Mixed Cycle Engine

Jong-Uk Bae† · Dong-Ho Kim\*

**Abstract** : Analyzed parametrically was an internal combustion engine combined with gas turbine, the cycle of which is splitted into compression side cylinder and expansion side one, and heat adding of which is during constant volume, pressure, temperature process. The advantages of each measures were analyzed by means of thermal cycle diagram. The thermal efficiency of partial load cutting off firstly isothermal heat adding and secondly isobaric heat adding also was analyzed. The authors suggested some potentials about the performance as for thermal efficiency, mean effective pressure and reducing emissions and noise supposed were the operating parameter of the engine set to some values and were some problems solved.

**Key words** : Gas turbine combined(터빈결합), Split cylinder engine(분리실린더 엔진), Constant volume, pressure, temperature mixed cycle engine(등적등압등온 혼합사이클), Performance(성능), Partial load performance(부분부하성능), Exhaust gas emission(배출가스 오염물질)

#### 1. 서 론

카르노사이클은 주어진 열원에서 얻을 수 있는 이상적 가역 열기관 사이클이며 여러 가지 열기관 사이클들은 가능한 한 이 사이클에 접근시키기 위한 실제기관의 사이클이라 할 수 있다. 그러나, 이상적 카르노사이클은 그 모든 과정이 무한소의

온도차와 무한대의 시간 진행 중의 수열 및 방열 과정을 포함하는 가역사이클이기 때문에, 실제기관으로는 실현 불가능하다. 유한 시간의 수열과 방열 과정을 포함하는 비가역적 에릭슨사이클 기관 및 스텔링사이클 기관은 실현가능하며 높은 열 효율을 실현하지만, 그 과정이 신속하게 수행할 수 없기 때문에 큰 출력을 발생하는 것이 곤란하

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : bae@mail.hhu.ac.kr, T : 051)410-4276

\* 국군수송사령부 항만운영단

다<sup>1), 2), 3)</sup>.

디젤기관은 그 원리상으로는 근사적 사바테사이클을 실현하면서 현재까지는 그 효율의 면에서 다른 열기관 사이클보다 우월한 지위를 점하고 있으며, 유효출력의 면에서도 최상의 열기관이라는 점에서 이의가 없다. 그러나, 디젤기관은 높은 열효율을 얻기 위하여 필연적으로 고온 하에서 연소를 진행하여야 하기 때문에 NO<sub>x</sub>(질소산화물)의 생성율이 높으며, 더구나, 팽창이 시작하면서 연소 온도가 신속히 강하게 되면, 생성된 NO<sub>x</sub>가 동결하게 되어 높은 배출량을 나타내게 된다. 또한, 확산연소 과정 중에 생성된 CO, HC(hydrocarbhone) 및 PM(particulate matter)도 완전 연소되기 전에 배출하게 되어, 도시 공해의 주범이 되고 있다.

최근에는 환경보전의 문제가 에너지 경제성의 문제성보다도 더 우선적으로 취급되도록 되었고, 도쿄의정서로서 국제협약으로 채택된 바와 같이 지구온난화의 국제적 방지 대책이 첨예한 논의 대상이 되고 있는 것이 주지의 사실이다.

그런 중에 IMO Marpol 협약에 의하여 선박에서의 디젤기관으로부터의 배출가스 중 질소산화물의 규제가 2000년부터 소급 적용되고 있으며, 현재 체약국의 수 및 선복량 조건이 만족된 상태에서, 다음 단계의 더욱 강화된 규제치에 대한 규정이 임박하고 있는 실정이다.

선박용 디젤기관의 제조자들은 연료유 분사계의 튜닝과 분사방식의 개선 등으로 현재의 규제치를 그런 대로 따라가고 있으나, 나아가서 차기의 강화된 규제치에 대하여서는 물분사 방식, 수유화 증유의 사용, 다단분사 등에 의한 균질급기 압축 착화기관(HCCI 기관; homogenized charge compression ignition engine)의 개발 등을 시도하고 있으나, 어느 방식이나 연료경제성의 회생을 수반하게 된다. 다만 HCCI기관은 혼합기의 균질화에 따른 최고 연소온도의 저하로서, NO<sub>x</sub> 생성의 저감과 동시에 열 효율의 향상을 지향하고 있기 때문에 현재로서는 그 잠재적 기대치를 가지고 있지만, 착화시기에 따른 착화실패와 노크발생 등 어려운 문제점이 아직 남아있다<sup>1)2)</sup>.

그러므로 궁극적으로는 SCR (selective catalytic reduction)을 탑재하는 후처리의 방식에 의하여 NO<sub>x</sub>를 제거하는 방향으로 갈 수밖에 없으며, 그러기 위하여서는 막대한 설치 운영 경비가 소요되는 경제적 문제를 해결하는 것이 관건으로 여겨지고 있다.

지구온난화 대책에 관하여서는 수소에너지나 핵 에너지를 사용하여 CO<sub>2</sub>의 발생을 근본적으로 제거하는 것이 가장 바람직하겠지만, 이 방식의 해상 수송기관에의 실용화는 아직 요원하다. 따라서, 화석연료를 사용하는 한, CO<sub>2</sub>의 발생을 피할 수 없기 때문에 가능한 한 열효율의 향상에 의한 단위 출력당 연료 소비량을 감소시키는 길 외에는 방법이 없다. 이점에서 디젤기관은 지금까지 단연 으뜸을 유지하고 있다.

스털링엔진(Stirling engine)과 에릭슨엔진(Ericsson engine)은 원리상 카르노사이클과 같은 이론열효율을 나타내며, 대기압 하의 비교적 낮은 온도의 연속연소로부터 수열이 이루어지기 때문에 NO<sub>x</sub>의 생성량이 적은 것으로 기대되는 대안 중의 하나이다. 그러나, 크랭크 기구의 복잡성이 야기되며, 그나마, 비가역적 과정에 필요한 정확한 피스톤의 동작을 얻기가 어렵기 때문에 열효율이 기대치보다 낮고, 실린더 벽면 또는 열교환기를 통하여 수열이 이루어지기 때문에 대출력의 기관을 실현하는 것이 곤란하다<sup>3)</sup>.

선박용을 목표로 스텔링 사이클을 기본으로 하는 가스터빈 결합 내연기관이 비록 계산에 의한 변수적 분석에 불과하지만 대출력 용으로 제안된 바 있다.<sup>4)</sup> 그러나, 이 방식의 기관이 실증된다 하더라도 스텔링 사이클의 등적 열 재생과정을 위하여서는 열교환기를 통한 열 수수가 필수적이므로 이의 표면은 실린더 벽면 냉각에서와 같이 비교적 낮은 온도를 유지할 수가 없고, 고온에서의 열부하에 따른 온도의 제한이 가하여 진다.

본 연구에서는 그 동작원리상 선박용 대출력 엔진을 지향하면서, 고온에서의 열교환기에 의한 열 수수 과정이 없으며, NO<sub>x</sub>의 생성율을 근본적으로 억제하고, 열효율의 향상에 있어서도 매우 큰 잠재력을 가진 열기관 사이클을 고안하여 제시한다.

그러기 위하여 제안되는 열기관은 최근 고도로 발달한 가스터빈의 기술과 고온 내열재료의 기술을 채용하는 것을 전제로 하며, 터빈의 재료의 한계를 고려하여, 허용되는 최고 실린더 배기 온도를 유지하는 것으로 한다.

또한, 가스터빈 결합 왕복동 피스톤식 내연기관을 채용하고, 결합된 가스터빈의 유효출력은 발전기와 전동기를 사용하여 전기적 방법으로 출력축으로 전달하는 방식을 채택하는 것으로 한다.

압축용 실린더와 팽창용 실린더를 별도로 갖는 스플릿 실린더엔진을 채용하여, 터빈 입구 압력을 가스터빈 압축기 출구 압력보다 높이는 것을 가능하게 함으로써 결합된 가스터빈의 유효출력을 증대시키어 이론 열효율을 향상시킨다. 수열과정은 기존의 등적 등압 혼합사이클인 사바데 사이클로부터 등적 등압 등은 혼합사이클로 변경시킨다. 이렇게 구성되는 가상의 기관의 열효율과 평균유효압력을 변수적으로 분석 평가한다.

## 2. 가상 엔진 사이클의 개념 정립

### 2.1 가스터빈 결합 디젤엔진

최근 상용되고 있는, 고도로 발달된 디젤기관은 터보 과급의 2행정사이클이며, 압축비보다 팽창비를 더욱 증대시킴으로써 효율의 증대를 기하기 위하여 앳킨슨사이클<sup>5)</sup> 또는 밀러사이클이 일부 채용되고 있다. 터보과급기는 넓은 의미의 가스터빈이라 할 수 있지만, 터빈의 출력에 의하여 블로워를 가동시키는 역할만 하고 있다.

그러므로, 설사 터빈과 블로워의 효율을 향상시키어 터빈 출력이 증대한다하더라도 이에 의하여 구동되는 블로워의 압력비가 상승하며, 이에 따라 터빈 출력은 더욱 증대하여 가게 되어 일정 한계를 넘어서게 되면 불균형상태에 빠지게 된다.

이를 방지하기 위하여서는 블로워 출구 공기의 일부를 방출하거나 터빈 입구 가스의 일부를 웨이스트 게이트로 바이패스 시키어 제어하여야 한다.<sup>6)</sup> 그러므로 터빈과 블로워의 요소효율도 단 단의 원심 블로워 및 단 단의 레이디얼 터빈만으로 충분하다.

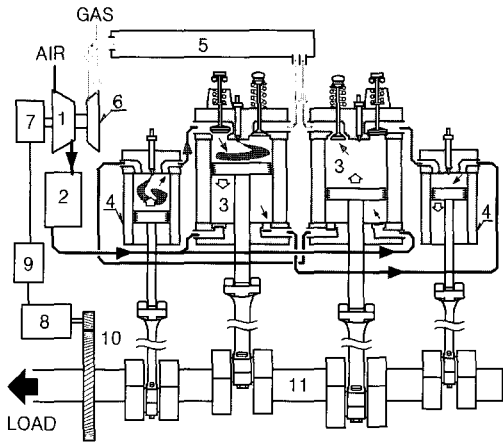
만약 최근 고도로 발달한 높은 요소효율을 갖는 다단 축류 가스터빈의 압축기와 터빈을 사용하여 유효출력을 증대시키고, 이것을 전기적인 방법 등으로 출력축에 연결한다면, 요소효율의 상승에 의한 가스터빈의 열효율 상승 분 만큼 디젤엔진의 이론 열효율과 평균유효압력을 상승시킬 수 있을 것이 기대된다.

### 2.2 분리실린더엔진

최근 상용되고 있는 디젤기관은 과급기의 성능 향상에 따라 동압과급 방식으로부터 정압과급방식으로 전환되어, 디젤기관의 열효율을 극대화하고 있다. 이것은 정압과급방식은 실린더의 배출가스를 큰 배기 리시버에 모아서 일정한 압력으로 안정시킨 후 과급기의 터빈에서 대기압까지 팽창시키는 방법이다. 이 방식은 노즐링에 전주 급기를 할 수 있기 때문에 동압과급 방식에 비하여 터빈의 크기가 현저히 작아지며 한편, 가스압력이 일정하여 터빈 효율도 높은 것이 장점으로 되고 있다.

그런데, 상용의 2행정사이클 디젤엔진은 단일 실린더에 의하여 압축과 팽창을 하고 있으며, 정압과급을 하기 위하여서는 배기 리시버의 압력이 소기압력보다 최소한 같거나 낮아야 한다. 실린더에서 팽창이 끝난 후 배기밸브가 열릴 때, 0.3MPa 정도의 압력을 가진 실린더 내의 가스가 음속으로 분출하여, 실린더 내의 압력은 급속히 리시버의 압력과 같아진다. 이어서, 소기가 시작되면 소기와 배기 리시버의 근소한 압력차에 의하여 실린더 내의 가스교환을 하며, 이 때 신선한 소기의 일부가 배기 리시버로 바이패스 되기까지 한다. 한편, 배기 분출의 과정은 단열 교축과정의 무효팽창으로 해석되기 때문에 배기 리시버 내의 온도는 팽창 전의 실린더 내 온도와 거의 같다고 볼 수 있다.

분리실린더엔진(split cylinder engine)은 압축과 팽창을 별도의 실린더 내에서 수행하는 기관으로서 소기의 과정이 없으므로 배기 리시버 내의 압력을 실린더 내에서의 팽창 종말의 압력과 같게 유지하는 것이 가능하다.



- 1. compressor
- 2. inter cooler
- 3. large cylinder
- 4. small cylinder
- 5. gas receiver
- 6. turbine
- 7. electric generator
- 8. electric motor
- 9. load controller
- 10. reduction gear
- 11. crank shaft

**Fig. 1 System layout of turbo compound split cylinder engine**

Fig 1은 제안된 분리실린더 엔진의 시스템을 나타낸다. 이 기관에서는 2.1에서 제시한 바와 같이 정압 방식의 가스터빈 결합이며, 유효출력은 발전기와 전동기에 의하여서 출력축으로 보내어지고, 남은 출력으로써 압축기를 구동하므로 축에 보낸 출력의 제어에 의하여서 압력비가 제어된다.

본 연구에서 고안된 실린더들은 각각 2개의 대실린더와 소실린더로 구성되며, 대실린더는 상부 실린더와 하부 실린더로 이용된다. 하부 대실린더는 흡입 및 압축용이며, 상부 대실린더는 작동 및 배출용으로 사용된다.

소실린더는 상부만 이용하며, 압축 및 작동에 이용된다. 각 실린더들의 피스톤은 하측에 크랭크의 방향으로 알 수 있는 것과 같이 위상차 180도 또는 동위상으로 실린더에 표시된 화살표 방향으로 작동하고 반전시에는 모두 화살표의 반대방향으로 된다.

하부 대실린더에는 압력차에 의하여 자동으로 작동되는 흡입밸브와 토출밸브가 설치된다. 소실린더에는 밸브가 없으며, 상부 대실린더에는 크랭크의 각도에 따라 제어되는 밸브가 설치된다.

터보압축기에서 압축된 공기는 인터쿨러를 거쳐서 냉각되며, 하부 대실린더로 흡입된다. 행정이 바뀌면 하부 대실린더의 공기는 토출되어 소실린더로 보내어지며, 그 체적비에 해당하는 압축비로 단열 압축된다.

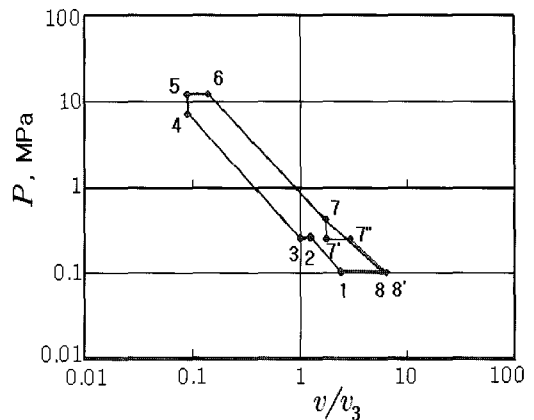
압축 말기에 하사점 전 적당한 시기에 소실린더 내에 분사된 연료는 그 착화 지연 시간에 따라 근사적으로 등적연소를 행하여, 실린더 내의 압력을 상승시킨다. 행정이 바뀌어 소실린더 피스톤이 상승하면 연소된 가스는 관을 따라서 상부 대실린더로 보내어지며, 상부 대실린더의 흡입밸브는 열리어 있다.

이 때 체적비에 해당하는 팽창비로 팽창이 이루어지며, 한편, 제어연소에 의하여 등압 연소가 되도록 소실린더 내와 상부 대실린더 내에서 분사 연소가 진행되고, 평균 연소최고온도에 이르면 차단된다.

상부 대실린더 피스톤이 상승하기 시작할 때 유입밸브는 닫히고, 배출밸브가 열리며, 연소가스는 배기 리시버로 유출된다. 실린더 내와 배기 리시버와의 사이에는 큰 압력차가 없기 때문에 고속의 배기 분출과정이 없다.

2.3 등적 등압 혼합 사이클엔진

Fig 2는 가스터빈 결합 분리실린더 등적·등



**Fig. 2 Comparison of thermodynamic cycles (GTSCVP: 1-2-3-4-5-6-7-8, GTUCVP: 1-2-3-4-5-6-7'-7''-8'-8'')**

압·혼합사이클 엔진(Gas turbine combined, split cylinder, constant volume, pressure, mixed cycle engine: 이하 GTSCVP라 명명함)의 열역학 사이클과 가스터빈 결합 단일 실린더 등적·등압 혼합사이클엔진(Gas turbine combined, unitary cylinder constant volume, pressure, mixed cycle engine: 이하 GTUCVP라 명명함)의 열역학 사이클을 비교하여 나타낸다.

최신 상용 기관의 운전 파라미터들을 기준으로 하여서 계산한 상태량들을 이용하여  $P-v$  선도로 나타내며, 계산에 사용된 중요 운전파라미터들은 Table 1과 같다.

**Table 1 Control parameters**

compression ratio	11	inter cooler out temperature	323K
expansion ratio	19.6	efficiency of turbine	0.86
pressure ratio of blower	2.5	efficiency of blower	0.83
max pressure	12MPa	$\chi$ of air	1.4
max temperature	2200K	$\chi$ of gas	1.33

각 상태변화과정에서 기초 열역학의 상태 방정식들이 사용되었고, 압축과정과 팽창과정의 기체는 각각의 비열비가 1.4 및 1.33의 이상기체로 가정하여 계산하였다.

분리실린더 엔진의 경우, 피스톤봉 때문에 하부 대실린더는 상부 대실린더 보다 체적이 작고, 이것을 고려하면 압축비보다 팽창비가 커지게 되며, 단일 실린더 엔진에서도 최근 밀러 사이클을 채용한 경우 압축비보다 팽창비가 커지게 되므로 압축비에 대한 팽창비의 비율을 서로 동일하게 하였다. 편의상, 하부 대실린더의 흡입공기의 비체적을 기준치 1로 하여, 다른 상태의 상대 비체적( $v/v_3$ )과 압력의 상태를  $P-v$ 선도로 나타낸 것이다.

GTSCVP는 수정 앳킨슨 사이클(Atkinson cycle)이라 할 수 있으며, 등압 수열과정이 혼합

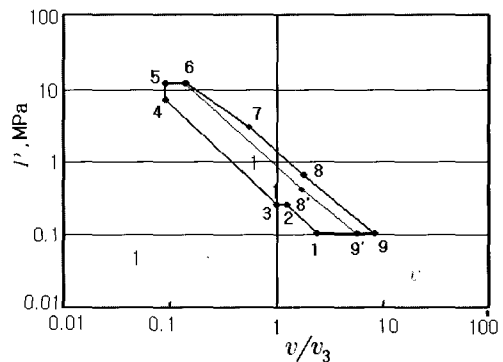
되어 있는 점에서 수정되어있다.

그런데, GTUCVP와 비교할 때에 상태 1-2-3-4-5-6-7까지는 동일하지만, 그 이후는 차이를 나타내며, GTUCVP에서는 실린더 내 압력이 배기 분출시에 상태 7로부터 7'로 되고, 분출된 가스는 분출전의 가스와 같은 온도의 배기 리시버 내 압력으로 되기 때문에 유효한 단열팽창선 보다는 체적이 많아지며, 상태 7"의 체적으로 터빈에 공급되어 상태 8'까지 팽창한다.

반면에 GTSCVP에서는 터빈에서 상태 7로부터 곧바로 대기압력까지 유효한 단열팽창을 한다. 따라서 상태 7에서부터 대기압까지 곧바로 유효 단열팽창하는 과정과 상태 7에서 상태 7"까지는 교축팽창의 무효 단열 과정의 후에 7"로부터 대기압까지 유효 단열팽창하는 과정의 차이만큼의 유효일의 차이가 나타난다.

2.4 등적 등압 등은 복합 사이클엔진

Fig. 3은 가스터빈 결합 분리실린더 등적·등압·등온 혼합 사이클 엔진(Gas turbine combined split cylinder constant volume, pressure, temperature, mixed cycle engine: 이하 GTSCVPT라 명명한다)과 GTSCVP의 경우를 비교하여 나타낸다. 상태 1-2-3-4-5-6-7까지는 GTSCVPT에서와 GTSCVP에서 서로 동일하다. GTSCVP에서는 상태 6-8'로 실린더 내에서



**Fig. 3 Comparison of thermodynamic cycles (GTSCVPT: 1-2-3-4-5-6-7-8-9, GTSCVP: 1-2-3-4-5-6-7-8'-9')**

단열팽창한 후 상태 8'-9'로 터빈에서 단열팽창하지만, GTSCVPT에서는 상태 6-7의 등온팽창과정을 가진 후에 상태 7-8의 실린더 내 단열팽창과 상태 8-9의 터빈에서의 단열 팽창으로 이루어진다.

이를 위하여서는 소실린더 및 상부 대실린더에서 등온연소를 행하도록 제어연소가 이루어진다. GTSCVPT를 채용함으로써 GTSCVP에 비하여 면적 6-7-8-9-9'-8'-6에 상당하는 일의 증대 즉 평균유효압력의 증대를 얻을 수 있으며, 열효율에 있어서는 분리실린더 방식과 터빈에 의하여서 등온 연소 후의 압력과 온도로부터 대기압까지 유효하게 팽창하기 때문에 GTSCVP에 비슷한 값을 얻을 수 있다.

### 3. 등적·등압·등온 혼합사이클엔진의 성능 분석

#### 3.1 사이클의 성능비교

Fig. 4에는 GTSCVPT, GTSCVP, GTUCVP 및 정압 과급기 결합 단일실린더 등적·등압 혼합 사이클엔진(Turbo-charged, unitary cylinder, constant volume, pressure, mixed cycle engine:이하 약하여 TCUCVP라 명명함)의 계산에 의한 이론 열효율을 비교하여 나타낸다.

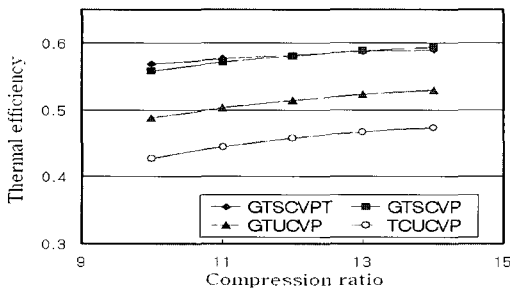


Fig. 4 Comparison of theoretical thermal efficiencies of various cycle engines

이론 열효율( $\eta_{th}$ )은 각 상태점들의 상태량들을 계산하고, 이로부터 각 수열량과 방열량들을 계산하여 다음의 식에 의하여 구한 것이다.

$$\eta = 1 - \frac{q_{exh} + q_{in}}{q_v + q_p + q_t}$$

단, 식 중의  $q_{exh}$ ,  $q_{in}$ ,  $q_v$ ,  $q_p$ ,  $q_t$ 는 각각 작동기체의 단위 질량당 배기 방열량, 인터쿨러 방열량, 등적 수열량, 등압 수열량 및 등온 수열량을 나타낸다.

TCUCVP는 재래의 터보과급 사바테사이클 엔진에 해당하며, 과급기 터빈의 출력과 블로워의 소요동력이 평형을 유지하여야 하기 때문에 정압 과급방식으로서, 임의로 터빈 열효율=0.7, 블로워 열효율=0.6으로 하여 계산함으로써 평형상태로 만든 경우이다.

계산결과에 의하면 압축비 10~14까지 변화시킬 때 모든 경우에서 이론열효율은 비슷한 경향을 가지며, TCUCVP에서는 0.428~0.478까지, GTUCVP에서는 0.488~0.529까지, GTSCVP에서는 0.558~0.594 그리고, GTSCVPT에서는 0.569~0.590까지 변화하고 있고, GTSCVPT에서는 GTSCVPT에서와 거의 동일한 수준을 나타내며, GTUCVP보다 약 9%정도, TCUCVP보다 약 14%정도 높게 나타난다.

그리고, GTSCVPT의 이론 열효율선은 다른 경우에 비하여 압축비의 의존성이 작기 때문에 GTSCVP의 이론 열효율선과 약간 교차하는 양상을 나타내고 있다.

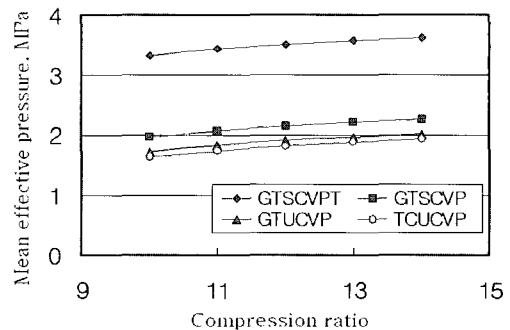


Fig. 5 Comparison of theoretical mean effective pressures of various cycle engines

Fig. 5에는 계산에 의한 이론평균유효압력을 비교하여 나타낸다. 이론평균유효압력( $P_{me}$ )은 기

관의 비출력의 개념을 갖는 것이기 때문에 여기서는 압축 행정체적과 팽창행정체적의 큰 쪽인 팽창 행정체적을 기준으로 한 이론 평균유효압력을 취하였고, 다음 식으로부터 구한 것이다.

$$P_{me} = \frac{q_v + q_p + q_t - q_{exh} - q_{in}}{v_{exh}}$$

단, 식 중의  $v_{exh}$ 는 상부 대실린더에서 배출 중 말 시 작동 기체의 비체적을 나타낸다.

GTSCVPT의 이론평균유효압력은 다른 사이클의 경우에 비교하여 현저히 높은 값을 나타내어, GTSCVP보다 약 1.35MPa정도 높으며, 상용 디젤기관인 TCUCVP와 비교할 때 거의 2배에 이른다. 이는 이론열효율의 증대와 더불어 등온연소에 의한 수열량 증가에 기인하는 것으로 해석된다.

가스터빈의 유효출력을 출력축에 전달하는 방식을 사용할 때, 유효출력의 증대 또한 이론열효율의 증대와 이론평균유효압력의 증대에 기여한다.

Fig. 6에는 가스터빈에서 발생한 일 중에서 압축일에 소비된 부분을 제한 나머지 유효일의, 기관의 총발생 일에 대한 비를 가스터빈의 분담율(load sharing ratio of gas turbine)이라 하고, 터빈에서 발생한 총일에 대한 비율을 가스터빈의 유효일비(effective work ratio of gas turbine)라고 할 때, 압축비 14의 경우, 각 사이클의 계산된 값들을 나타낸 것이다.

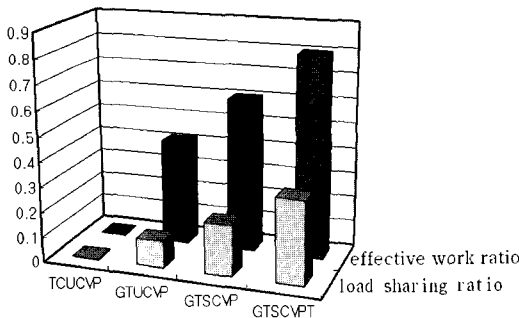


Fig. 6 Effective work ratios & load sharing ratios of gas turbine

TCUCVP에서는 발생일과 소비일이 평형되도록 압축기와 터빈의 열효율을 임의로 선택한 것이기 때문에, 당연히 가스터빈 분담율과 유효일비는 0이 된다.

GTUCVP에서는 가스터빈의 압축기와 터빈의 열효율 치를 최근의 고성능의 가스터빈 요소효율에 기준하여 선택하고 남은 유효출력을 축으로 보내기 때문에 이에 따른 가스터빈 열효율 상승분에 상당하는 향상이 나타나는 것으로 해석된다.

GTSCVP에서는 Fig. 2에 의하여 2.2절에서 설명한, 실린더 출구의 압력으로 터빈 입구에 곧바로 공급할 수 있는 점이 그 효과를 나타낸 것으로 해석되는 향상이 나타난다. 그리고 GTSCVPT에서는 Fig. 3의 상태 8과 상태 8'의 차에 해당하는, 등온팽창 과정에서의 수열량 증가에 따른 실린더 가스 유출시의 방열량 증가로 인하여 가스터빈의 일량이 증가하게 되고, 한편, 동일한 압축기의 압력비를 내는 조건에서는 압축기 소요일은 변화가 없기 때문에 분담율과 유효일비가 크게 증가하여, 각각 33% 및 80%에 이른다.

### 3.2 연소차단 방식에 따른 부분 부하 성능

서론에서 기술한 NOx 생성율의 저감을 위하여서는 연소최고온도를 2000K이하로 유지하는 것이 매우 유효할 것이다.<sup>7)</sup> 전절에서는 상용의 디젤기관사이클과 비교를 위하여 연소최고온도로서 평균온도 2200K를 사용하였으나, 이것을 1800K 수준으로 낮추어도 이론 열효율과 이론평균유효압력을 충분히 높게 유지할 수 있다면 바람직한 방안이 될 것이라 생각된다.

그런데, 연소최고온도를 낮추면 이론열효율에 있어서는 큰 저하가 나타나지 않으나, 이론평균유효압력에 있어서는 상당한 저하가 나타난다. 이를 보완하기 위하여, 압축기의 압력비를 상승시킬 필요가 있다.

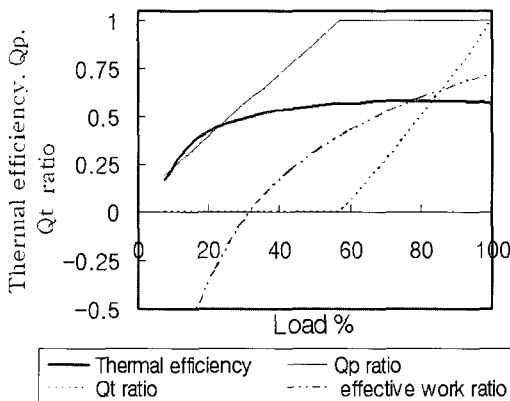
Table 2에는 다른 운전파라미터들을 Table 1에서와 동일하게 유지하고, 연소최고온도와 압력비를 변경시킬 때의 압축비 14로 한, 3 경우의 이론열효율과 이론평균유효압력을 나타낸다.

**Table 2 Comparison of thermal efficiency and mean effective pressure according to max. combustion temperature and ratio of compressor**

parameters \ cases	I	II	III
max. combustion temperature	2200	1800	1800
pressure ratio of compressor	2.5	2.5	3.0
theoretical thermal efficiency	0.590	0.565	0.569
theoretical mean effective pressure (MPa)	3.621	2.823	3.467

이에 의하면 경우 I에 비하여 경우 II의 이론 열효율은 근소한 저하를 나타내는 반면, 이론평균 유효압력에서는 현저한 저하를 나타낸다. 그러나, 경우 III에서는 이론열효율도 약간 만회하며 평균 유효압력에 있어서 경우 I과 거의 비슷한 수준까지 만회하고 있는 것을 알 수 있다.

디젤기관의 부분 부하에서는 이론열효율이 매우 저하하며, 가스터빈에서는 이런 현상이 더욱 현저한 것이 일반적으로 알려져 있다. 이런 현상의 주된 이유는 부분 부하에서의 배기 에너지의 감소에 따라 터빈에 의하여 구동되는 압축기 압력비의 저하가 발생하며, 이에 따라 실린더 내의 압력의 저하와 연소최고압력의 저하가 수반되기 때문이다.



**Fig. 7 Calculated thermal efficiency and effective work ratio of gas turbine according to load % controlled by cutting off fuel supply sequentially**

그러나, 이러한 문제는 상용의 과급 디젤기관에 국한되는 문제이므로 가스터빈 결합 디젤기관의 채용에 의하면 쉽게 해결된다. 물론 그러기 위하여서는 압력비를 일정히 유지하도록 부하의 변동에 따라 가스터빈에 부가되는 부하량을 유연하게 조절하는 것을 전제로 하여야 한다.

Fig. 7은 이러한 조건을 전제로 하여, GTSCVPT의 부분 부하에서의 이론열효율을 계산하여 나타낸 것이다. 여기에서 부하%란 연소최고온도 1800K의 등온연소를 적절한 시기에 차단하고 단열팽창하여, 실린더에서 유출 시에는 터빈의 내열 한계로서 상정한 1300K가 되도록 한 경우의 이론평균유효압력을 최대부하로 하고, 이에 대한 부분 부하에서 출력축의 이론평균유효압력의 백분율을 말한다. 그리고 부분 부하를 얻기 위하여서 1차로 등온연소의 차단비(Qt ratio)를 조절하여, 등온 수열량이 0으로 된 때로부터는 등압연소의 차단비(Qp ratio)를 조절하는 방법을 채용하였다.

Fig. 7에는 등온수열량 및 등압 수열량의 최대 등온 수열량 및 최대 등압 수열량에 대한 차단비율을 부하%에 따라서 나타내며, 또한 가스터빈의 유효일비를 함께 나타내고 있다. 부하%가 32 정도 이하에서는 유효일비가 0보다 작은 것을 알 수 있으며, 이는 낮은 부하 상태에서는 압력비를 일정히 유지하기 위하여서 압축기가 반대로 출력축에 의하여 구동되어 지는 것을 의미한다.

Fig. 7에 의하면 부하%가 80정도에서 최대의 이론열효율 0.58이 얻어지고, 20정도의 부분 부하에 이르러서 0.4정도가 되는 것을 나타내며, 그 중간에서는 비교적 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 그러나, 그 이하의 부분 부하에서는 가스터빈의 유효일비가 급격히 감소하여, 부(負)의 값이 되므로 이론열효율도 급격히 저하하게 된다.

**3.3 등적·등압·등온 복합사이클엔진의 문제점과 잠재적 기대치**

GTSCVPT의 사이클을 채용하고, Fig. 1에서 제시한 방식의 시스템을 구성한 내연기관이 실현되기 위하여서는 몇 가지의 전제조건이 갖추어져



야 한다.

그 첫째는 Fig. 1의 상부 대실린더 입구밸브 및 출구밸브에 대하여 12 MPa 이상의 고압과 1800K 이상의 고온상태에서 노출되어도 충분히 견딜 수 있는 냉각 방식과 이에 따른 재료의 문제가 해결되어야 한다는 것이다. 가동되고 있는 밸브면의 강도 유지와 부식의 방지를 위하여 수냉식의 구조를 채택하는 것이 바람직할 것이라 생각된다.

둘째는 하부 대실린더에서 소실린더, 소린더에서 상부 대실린더, 상부 대실린더에서 배기 리시버 및 배기 리시버에서 터빈에로의 연결관에 대하여 방열 방식과 이에 따른 재료가 해결되어야 한다. 관의 내측에 세라믹 내벽 시공을 하고, 관 자체에 대하여서는 수냉식의 자켓을 설계하는 방식이 바람직 할 것으로 생각된다.

세째는 실린더 열부하의 증가에 대한 냉각 방식과 강도의 설계가 해결되어야 하며, 실린더 내면의 윤활에 있어서도 새로운 대책이 필요하다.

그 외에도 등압연소, 등온연소를 위한 제어연소와 가스터빈 유효 출력을 출력축으로 전달하는 과정에서 전력 제어 방식 등 부가의 문제점을 안고 있는 것은 분명하다. 그러나, 시스템의 작동원리로부터 높은 이론열효율과 이론평균유효압력 외에도 다음과 같은 중요한 이점을 얻을 수 있는 점을 잠재력으로 제시할 수가 있다.

1. 연소최고온도를 NO<sub>x</sub>의 생성이 급증하는 점 이하로 제한하면 이의 배출량을 근본적으로 억제할 수 있게 된다.
2. 충분한 과잉공기를 확보하고 있는 경우 실린더에서 유출한 가스는 배기 리시버 내에서 1300K의 높은 온도 상태로 상당시간 체류하게 되고, 이 때 CO, HC 및 PM의 재연소가 이루어져서, 청정한 배기를 얻을 수 있다.
3. 상 하부로 구성되는 대실린더는 압축력과 작동력이 피스톤에 대하여 동시에 반대 방향으로 작용하여 축 토크의 균일화를 향상시킨다.
4. 배기 분출에 의한 소음이 없어지고 그만큼 정숙운전이 가능하게 된다.
5. 수열량이 많아진 만큼 배기온도도 높아지므로 배기열 이용시스템을 결합 시키는 경우 플랜트

전체의 열효율은 더욱 높아진다.

6. 2개의 대실린더와 2개의 소실린더로서 1개 조를 형성하며, 관성력에 있어서 평형을 이룬다. 대실린더와 소실린더의 불균형력에 의한 모멘트를 서로 균형시킨다면 모멘트에 있어서도 평형 상태를 얻을 수 있다.
7. 배기가 흡기에 혼합되지 않기 때문에 원리상 압축과정의 공기에 잔류가스가 존재하지 않으며, 하부 대실린더의 공극용적이 매우 적으므로 압축시의 펌프효율이 높다.

#### 4. 결 론

가스터빈 결합 분리실린더 등적·등압·등온 혼합사이클을 실현할 수 있는 엔진의 시스템을 고안하여 그 성능을 평가하여 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 이론열효율은 가스터빈 결합 분리실린더 등적·등압 혼합사이클 엔진과 거의 같은 수준이며, 가스터빈 결합 단일실린더 등적·등압 혼합사이클 엔진보다 7~8%정도, 정압 과급기 결합 단일실린더 등적·등압 혼합사이클 엔진보다 11~14%정도 높게 계산된다.
2. 이론평균유효압력은 가스터빈 결합 분리실린더 등적·등압 혼합사이클 엔진보다 1.35MPa정도 높게, 가스터빈 결합 단일실린더 등적·등압 혼합사이클 엔진과 정압 과급기 결합 단일실린더 등적·등압 혼합 사이클엔진 보다는 1.7MPa정도 높게 계산된다.
3. 가스터빈의 분담율과 유효일비는 정압 과급기 결합 단일실린더 등적·등압 혼합 사이클엔진에서는 원리적으로 0%인데 비하여, 가스터빈 결합 분리실린더 등적·등압·등온 혼합사이클 엔진에서는 각각 33% 및 80%정도에 이르며, 이 유효출력을 전기적인 방법으로 출력축에 전달하는 것이 제안되었다.
4. 부하의 변동 중에 터보압축기의 압력비와 연소 최고압력을 일정히 유지하는 경우, 부하율 25%정도의 부분부하에 이르기까지의 비교적 일정하고 높은 이론열효율을 유지한다.

참고문헌

[1] L. Berrin Erbay, Hasbi Yavuz, "Analysis of an irreversible Ericsson engine with a realistic regenerator", Applied Energy, 62, pp. 155-167, 1999

[2] S.C. Kaushik, S.Kumar, "Finite time thermodynamic evaluation of irreversible Ericsson and Stirling heat engines", Energy Conversion and Management 42, pp. 295-312, 2001

[3] S.K Tyagi, S.C Kaushik and Salhotra, "Ecological optimization and performance study of irreversible Stirling and Ericsson heat engines", Journal of Physics D, Appl. Phs. 35, pp. 2668-2675, 2002

[4] Zhili Chen, Mitsuru Konno, Shinichi Goto, "Study on homogeneous premixed charge CI engine fueled with LPG", JSAE Review, 22, pp. 265-270, 2001

[5] Taichi Ando, Yusuke Isobe, Daisuke Sunohara, Yasuhiro Daisho, Jin Kusaka, "Homogeneous charge combustion ignition and combustion characteristics of natural gas mixtures: the visualization and analysis of combustion", JSAE Review, 24, pp. 33-40, 2003

[6] R. A. Proeschel, "Afterburning Ericsson Cycle Engine", S.A.E. transactions, Vol. 108, No. 3, pp. 187 2~1880, 1999

[7] 배중욱, "스털링 사이클을 기본으로 하는 과급 CI 엔진의 기초 성능분석", 한국박용기관학회지, 제24권 제5호, pp. 6124-624, 2000

[8] Lingen Chen, Junxing Lin, Fengrui Sun, and Chih Wu, "Efficiency of an Atkinson engine at maximum power density", Energy Conversion and management Vol. 39, NO. 3/4 pp. 337-341, 1998

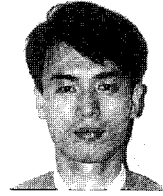
[9] Rowland S. Benson, N. D. White house, "Internal Combustion engines, Combined edition", Pergamon International Library, p. 402, 1979

[10] 日本バーナ研究会編, "燃焼装置 技術", 日刊工業新聞社, の p. 209. 圖7.4, 1996

저 자 소 개



**배중욱 (裵鍾旭)**  
 1948년 2월생, 19970년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 부산수산대학원 기관학과 졸업(석사), 1990년 부산수산대학원 기관학과 졸업(박사), 1976년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수, 당학회 회원



**김동호 (金東浩)**  
 1968년 6월생, 1991년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1998년 군산대학교 기관공학과 졸업(석사), 2000년~현재 한국해양대학교 기관공학과 박사과정중, 1999년~현재 국군수송사령부 함만운영단 재직중.