

과급에 의한 흡입공기 보상 시 저속 디젤-아트킨슨사이클에서 엔진성능에 대한 연구 장 태 익†

(원고접수일 : 2011년 8월 8일, 원고수정일 : 2011년 10월 7일, 심사완료일 : 2011년 11월 16일)

A Study on Engine Performance at the Intake Air Compensation by Supercharging in the Low Speed Diesel-Atkinson Cycle

Tae-Ik Jang†

요 약 : 본 연구에서는 고폽창사이클의 경우 가변밸브시스템을 구성하여 흡기밸브 닫힘시기를 늦추는 방식으로 실현하였고, 저압축에 따른 흡입공기의 감소는 과급압력으로 해결하였다. 이와 같이 디젤기관에 아트킨슨사이클을 실현하여 엔진의 열효율향상 가능성을 알아보았다. 그 결과 흡기밸브 닫힘시기 ABDC 40° 부터 ABDC 80° 까지 전 영역에 걸쳐 열효율 및 출력의 향상이 있었다. 다만, 흡기밸브 닫힘시기가 ABDC 70°이후로는 열효율 증가 폭이 둔화되는 경향을 보였다.

위와 같은 연구결과 저속 디젤-아트킨슨사이클화의 최적 연소조건은 흡기밸브 닫힘시기가 ABDC 70° 전후로 보이며, 고부하영역이 저부하영역보다 더 효과적으로 나타났고, 중부하영역에서 기관운전은 안정적이었다. 이때 정미열효율은 통상의 디젤기관보다 평균 약 12.5% 높게 나타났다.

주제어 : 디젤-아트킨슨사이클, 과급압력, 고폽창, 기관부하, 팽창-압축비, 유효압축비

Abstract: In this study, in the high expansion cycle was conducted by variable valve timing system composition to close intake valve late, and in the intake air reduction on the low compression was solved by supercharging pressure. In this wise, by constituting Diesel-Atkinson cycle, this study looked into a possibility of thermal efficiency improvement. As a result, there was improvement in thermal efficiency and output in a whole range of closing timing from ABDC 40° to ABDC 80°. However, after ABDC 70° of closing timing, the thermal efficiency increase was getting smaller.

As the result of the study, the optimum intake valve closing timing was about ABDC 70°, high loading territory of engine was more effective than low loading territory, and engine operation in middle loading territory was stable. At this time, brake thermal efficiency was 12.5% higher than ordinary engine on average.

Key words: Diesel-Atkinson cycle, Supercharging pressure, High expansion, Engine loading, Expansion-compression ratio, Effective compression ratio

1. 서 론

본 저자는 이 연구에 앞서 학술지에 저속 디젤-아트킨슨사이클 기관에서 흡입밸브 닫힘시기 변화와 유효압축비 보상에 대한 연구결과를 발표하였다[1-5]. 따라서 이 연구논문을 위해 추가

로, 압축비 및 흡입공기량을 동일하게 유지하면서 디젤-아트킨슨사이클을 실현 그 운전특성을 알아보았다.

기 발표된 흡기밸브 닫힘시기 지각에 의한 저속 디젤-아트킨슨사이클 기관에서는[1], 흡기밸브 닫힘

† 교신저자(한라대학교 기계자동차공학부 강사, E-mail: janghan0553@naver.com, Tel: 033-760-1228)

시기 지각에 따라 디젤-아트킨슨 기관의 유효 압축-팽창비는 ABDC 40° 까지 미미한 감소를 보이다가 이후부터 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 ABDC 80° 에서는 유효 압축-팽창비가 기관의 기본 닫힘시기 ABDC 40° 보다 약 14% 더 큰 값을 나타내었다. 이어서 발표된 압축비 보상이 있는 저속 디젤-아트킨슨사이클 기관에서는[3], 흡기밸브 닫힘시기 80°까지 지각시킨 경우 팽창비 크기는 압축비를 보상하지 않은 경우보다 최대 팽창비가 10 이상 증가하여 압축비를 보상하지 않은 상태보다 52%의 팽창비 증가효과를 볼 수 있었다. 그러나 출력 값의 경우는 흡기밸브 닫힘시기 지연과 압축비 보상의 경우 모두에서 흡입공기량의 부족으로 인하여 감소하는 경향을 나타내었다. 즉 유효압축비 보상에 따른 디젤-아트킨슨사이클 기관에서 팽창효과 및 정미열효율 향상은 어느 정도 가능하였으나, 출력은 일부 흡입공기량의 역류로 인해 기존 디젤기관 대비 다소 감소하는 경향을 보였다[4-5]. 따라서 전 운전영역에서 기관의 성능을 극대화시키기 위해서는 과급에 의한 흡입공기량의 보상이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 다음과 같이 압축비 보상 장치와 과급압장치를 구성하여 압축비의 보상과 흡입공기의 보상을 동시에 실현, 고폽창 디젤-아트킨슨사이클 기관의 연소특성을 실험을 통해 분석하였다.

2. 사이클 구성과 과급압의 적용

2.1 디젤-아트킨슨사이클의 구성 및 열역학적 해석의 근거

통상의 디젤기관은 정압사이클이며, 이것을 대기압상태로 고폽창시킨 사이클이 아트킨슨사이클이다. 통상 디젤사이클은 Figure 1의 P-V선도와 및 Figure 2의 T-S선도와 같이 1-2-3-4의 밀폐사이클과정을 수행한다[6-7]. 이 사이클에 고폽창을 실현할 경우 아트킨슨사이클이 되고, 4-4'-1'-1-4의 면적만큼 일이 증가되어 열효율도 향상된다[1, 3]. 이때, 사이클의 열역학적 열효율 관계식으로부터 디젤-아트킨슨사이클의 열효율 식 (1)을 구할 수 있었다[1].

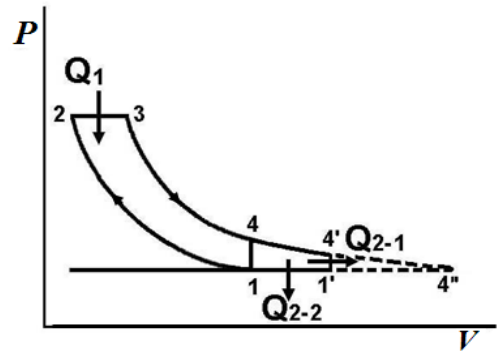


Figure 1: The P-V diagram of high expansion diesel-atkinson cycle.

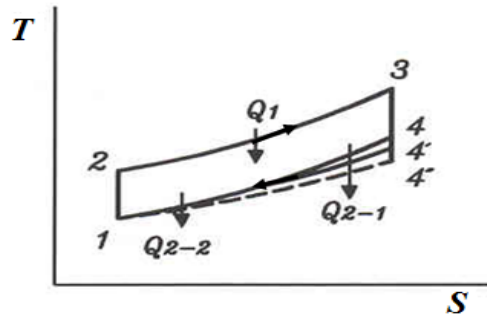


Figure 2: The T-S diagram of high expansion diesel-atkinson cycle.

$$\eta_{th(DA)} = 1 - \frac{Q_{2-1} + Q_{2-2}}{Q_1} = 1 - \epsilon_c^{1-\kappa} F_{DA} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } F_{DA} = \frac{\sigma(\alpha^{1-\kappa} - \alpha) + \kappa(\alpha\alpha - 1)}{\kappa(\sigma - 1)}$$

단, σ 는 연료차단비이고, $\alpha = \epsilon_c / \epsilon_c$ 는 압축비에 대한 팽창비의 비이며, $\epsilon_c = V_1 / V_2$ 은 압축비, 그리고 $\epsilon_c = V_4 / V_3$ 는 팽창비로 정의한다.

이 팽창사이클의 특징은, 기존 디젤사이클의 팽창지점 4가 고폽창하여 최대 팽창지점 4'까지 일을 하는 것이다. 이때 식 (1)은 다음과 같이 된다. 즉,

$$\eta_{th(DA)} = 1 - \epsilon^{1-\kappa} \frac{\alpha\alpha^{1-\kappa} - 1}{\sigma - 1} \quad (2)$$

이다. 이 식에서 열효율이 최대가 되는 팽창비는 팽창후의 압력 P_4 가 초기압력 P_1 과 같게 될 때 이고, 이것을 완전팽창이라 부른다. 즉 팽창비와 압축비는 $\varepsilon_c = \varepsilon_e$ 으로 동일한 경우이다. 따라서 디젤-아트킨슨사이클의 열효율은 식 (3)과 같은 형태가 된다. 이러한 결과는 정압사이클의 열효율이 정적 사이클의 열효율과 같게 됨을 말해주는 것이다.

$$\eta_{th(DA)max} = 1 - \varepsilon_c^{1-k} \quad (3)$$

이상으로부터 디젤사이클이 고폭창화하여 아트킨슨사이클이 될 때 최대 팽창비 크기는 차단비에 의해 제한을 받게 되며, 그 팽창비 크기가 압축비와 같을 때 최대로 팽창하여 열효율도 최대가 됨을 알 수가 있다[4-5].

위와 같은 고폭창 디젤-아트킨슨사이클의 열역학적 해석으로부터 실제 제작된 시험기관에 다음과 같이 아트킨슨사이클을 구성하여 실험을 실시하였다. 특히 밀러(Miller)의 제안과 같이[6] 고폭창을 실현하는 방법으로 본 연구에서도 Figure 3의 1 점을 1'점으로 압축과정 단축방법을 적용하였다[8-10]. 즉, 압축과정의 단축을 위해 흡기밸브 닫힘시기를 늦게하는 방법을 선택하였다. 이 경우 흡입밸브 닫힘시기를 점차적으로 늦추다 보면 흡입공기의 역류로 인해 흡입공기량이 기본 사이클보다 부족하게 되고 이에 따라 발생 토크는 오히려 감소하게 된다. 이를 해결하는 방법으로 본 연구에서는 흡입공기를 과급시키는 방법을 제시하였으며, 이러한 방법으로 디젤기관을 고폭창하여 아트킨슨사이클을 실현하였다.

2.2 과급압력 크기의 결정 및 적용

위 이론해석 결과와 같이 저압축 고폭창비를 갖는 아트킨슨사이클 실현의 경우, 압축비 보상과 동시에 과급으로 공기량을 보상해줘야 기본 실험기관과 성능을 비교하여 그 상위정도를 검토할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 흡기밸브 닫힘시기를 늦추는 방식에 대응한 흡입공기량 감소와 이를 보상하기 위한 과급압력의 크기를 다음과 같이 산술적으로 검토하였다.

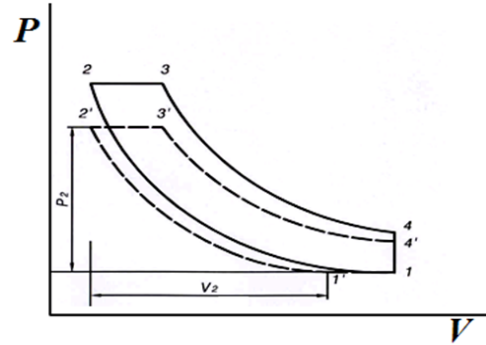


Figure 3: The P-V diagram of maximum pressure decrease at the LIVC.

Figure 3은 LIVC(late intake valve closing)시스템을 사용하였을 때 디젤기관의 최고압력 감소를 보여주는 P-V 사이클 선도이다. 이때 1-2-3-4-1과정은 기본 정압사이클이 되고, 1'-2'-3'-4'-1-1'과정은 흡기밸브 닫힘시기를 늦게 한 저압축사이클이 된다. 이와 같이 압축과정을 단축하다보면 도시평균유효압력(IMEP)의 감소가 있게 되고 이에 따라 압축온도의 저하도 있게 됨을 예측할 수 있다. 결국, 일반 디젤기관에서 아트킨슨사이클의 실현은 최대 압력 P_{max} 에 의하여 흡입 압력과 압축비 및 이에 따르는 IMEP가 제한적이 되므로, 그 값을 조정하여 크기를 맞추어야 한다. 이를 위하여 그림과 같이 압축 지연시간 1→1' 과정에서 흡입공기가 단열과정으로 압축된다고 가정할 경우 $PV^k = C$ 관계가 성립한다. 이 식으로부터 Figure 4에서는 과급압력 P_1 의 크기를 유효압축비 $\gamma'_c = V_1/V_2$ 와 절보기압축비 $\gamma_c = V_1/V_2$ 로 정의하여 유효압축비의 변화와 흡입공기량 역류에 대응한 과급압력 계산 결과를 보여준다. 그림에서 흡기밸브 닫힘시기가 지연될 때 유효행정체적의 감소로 인하여 유효압축비는 감소하고, 이에 따른 흡입공기량의 부족으로 과급압력이 커져야 됨을 알 수가 있다. 즉 제한된 범위에서 초기 공기압력을 1bar로 하였을 경우 최대 과급압력의 크기는 ABDC 80°에서 1.6bar를 나타내고 있다. 이때, 필요한 공기의 공급은 Figure 6과 같은 공기과급 발생장치로부터 공기압의 크기를 조정할 때 가능하며, 이러한 방식으로 시험엔진을 운전할 경우 디젤-아트킨슨사이클을 실현할 수 있게 된다.

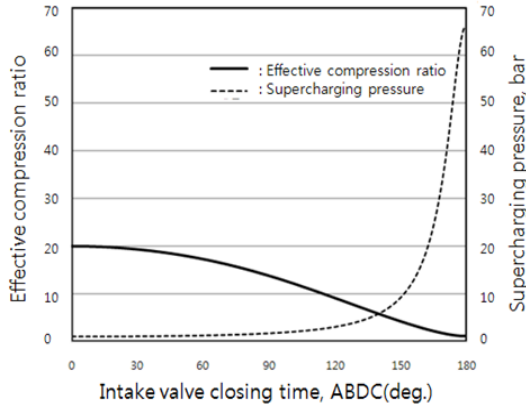


Figure 4: Effective compression ratio change and required supercharging pressure at the LIVC.

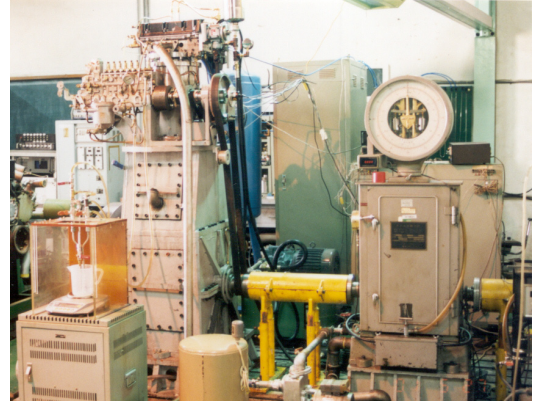


Figure 5: The photo of experimental setup with single diesel engine.

3. 실험장치 및 방법

3.1 시험엔진의 구성

본 연구를 위해 제작 완료된 기관은 단기통 직접분사식(DI) 저속 4행정 디젤기관이며, 주요제원은 Table 1과 같다[4]. 그리고 Figure 5는 실험을 위해 구성된 실험장치의 사진이다. 실험장치 주요 구성으로는 기관의 본체, 수동력계, 흡·배기를 위한 가변밸브 타이밍시스템(VVT), 가변압축비장치(VCR), 압력과 온도를 측정하기 위한 데이터 취득부, 엔진을 시동하기 위한 시동부로 나눌 수 있다. 기관의 출력측정은 수동력계로부터 산출하였으며, 특히 밸브구동 캠축에 연결된 엔코더로부터는 기관의 TDC위치와 크랭크 각을 판독하여 흡기밸브 닫힘시기를 제어하였다. 또 실린더 내에 설치한 압력센서로부터는 압력 데이터를 취득하여 컴퓨터 프로

그램에서 지정된 사이클 수와 함께 순간압력의 크기를 저장하였다. 이 데이터로부터 각종 분석을 위한 자료를 얻어낼 수 있었고, 흡입공기량은 오리피스 유량계로부터 측정하였다. 이때 사용된 연료의 소비량은 정밀전자저울을 이용한 질량 측정법으로 측정하였다[4-5].

3.2 흡입공기량 보상장치

엔진운전 시 공기과급을 위해서는 실험엔진에 응답성이 양호하고 미소압력의 변화에도 대응할 수 있는 과급압력 공급장치가 필요하다. 따라서, 본 연구를 위해서 강제 구동식 과급장치를 Figure 6과 같이 구성하여 시험엔진에 적용하였다. 이 장치는 1,250[l/min]의 용량을 갖는 가압용 콤푸레셔와 압력조정용 레귤레이터가 설치되었고, 항상 일정압력의 공기 공급이 가능하도록 하였다. 가압된 공기는 유량측정용 오리피스를 걸쳐 써지탱크에 항상 저장되며, 써지탱크는 0.01bar정도의 압력변화 측정이 가능한 압력계를 설치하여 운전 중에도 차압 발생이 있을 경우 흡입 공기량이 동일하게 유지되도록 하였다.

Table 1: Specification of single cylinder engine

Item	Specifications
Cylinder Number	Single Cylinder(1)
Displacement Volume	2390(cc)
Bore ×Stroke	97.1 (mm)×323(mm)
S/B Ratio	3.326
CAM Type	DOHC(1)
Compression Ratio	15~40(Variable)
Injection Type	DI(VP37)
Low Idle Speed	100(rpm)
High Idle Speed	700(rpm)

3.3 실험방법

기 발표된 논문에서는[1], 흡기밸브 닫힘시기 지연에 따른 압축비 보상에 의한 사이클에서, 미미한 열효율 향상이 있었으나 흡기밸브 닫힘시기의 지연으로 인한 흡입공기량 감소대책은 실현되지 못

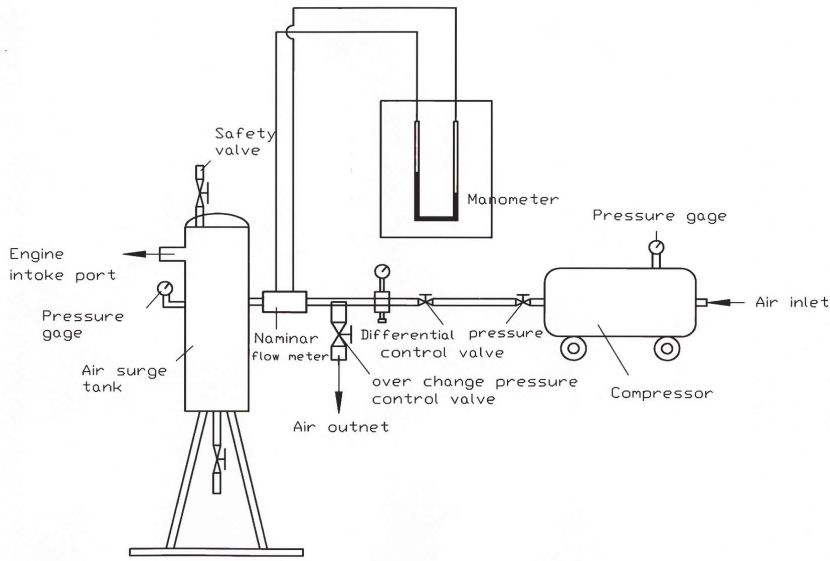


Figure 6: Schematic diagram apparatus for compensation of the intake air.

하였다[2-3]. 따라서 본 실험에서는 과급장치를 사용 흡기밸브 닫힘시기 변화에 대응한 과급압력의 공급으로 초기와 동일하게 흡입공기량을 유지시켰다. 이때, 과급압력의 크기에 따른 기관특성을 파악하기 위하여 흡입밸브 닫힘시기 구간을 ABDC 20° ~ 80° 까지 20°씩 단계적으로 지각시킴과 동시에 과급압력의 크기를 1.3bar로 유지하여 실험을 실시하였다. 실험변수로는 기관회전수 300rpm일 때 각 100%, 75%, 50%, 25% 부하이며, 겉보기 압축비는 $\epsilon_c = 19$ 로 일정하게 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Figure 7은 기관회전수 300rpm, 연료분사시기 BTDC 12°, 겉보기 압축비 19, 과급압력 1.3bar의 운전조건에서, 흡기밸브 닫힘시기 지연에 따른 압축비 보상과 흡입 공기량 보상 시 각 부하(100%, 75%, 50%, 25%)에 대한 토크변동을 나타낸 것이다. 그림에서 토크는 흡기밸브 닫힘시기가 지연될수록 100%와 75%의 고부하에서 선형적으로 증가하였고 50% 부하영역에서도 같은 경향을 보였다. 또한, 같은 부하조건에서 흡기밸브 닫힘시기 ABDC 70°이후는 증가하는 경향이 다소 둔화되어 나타났다. 이것은 과급압력 1.3bar의 흡입공기량 보

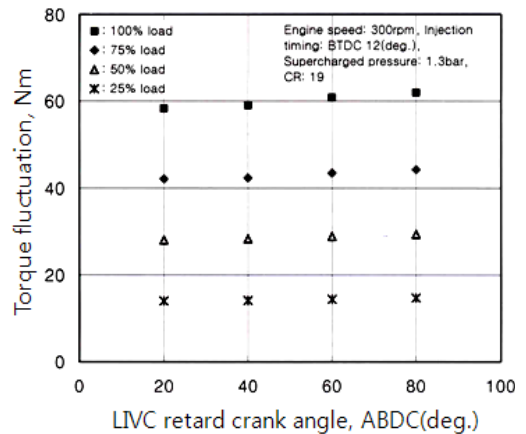


Figure 7: Brake torque fluctuation of the diesel-atkinson engine at load change.

충으로 저압축 고폭창 효과에 의한 아트킨슨사이클 실현이 가능함을 보여주는 것이며, 이때 흡기밸브 닫힘시기의 최적 한계는 ABDC 70°이내로 보인다. 그리고, 저부하 보다는 50% 이상의 고부하의 경우에서 토크의 향상이 크게 됨을 보이고 있다. 이것은 과급에 의한 흡입공기의 보상으로 공기연료 혼합비가 최적 상태로 유지되어 아트킨슨사이클 구성에서 보다 더 유리하게 되고 고폭창 효과로 인하여 토크가 향상된 것으로 판단된다. 또,

25%의 저부하영역에서는 토크 향상이 거의 없는 것으로 보아 출력이 낮은 저부하영역 보다 출력이 큰 고부하영역일수록 아트킨슨사이클 구성이 보다 효과적임을 알 수 있다.

Figure 8은 상기의 운전조건에서 흡기밸브 닫힘 지연에 따른 흡입공기 보상량을 단위 시간당 질량 변화로 나타낸 것이다. 이때 과급압력의 크기는 1.3bar상태이다. 이 과급압력의 크기는 과급효과에 의한 열효율 향상 가능성을 배제하고 단지 과급압의 변화로 공기량을 초기와 동일하게 유지시켜 고펡창 실현 가능여부를 밝히고자 하는 정도의 크기이다. 실험에서 흡기밸브 최대 지연기간 ABDC 80°의 경우 추가되어야할 흡입공기량은 통상 디젤기관 흡기밸브 닫힘시기 ABDC 40° 보다 약 1.1[g/sec] 정도 공급되어야 함을 보여주고 있다. 이것은 흡기밸브 닫힘시기가 지연될수록 흡입공기의 역류효과로 공기량이 부족하게 됨을 보여주는 것으로, 이에 대한 보상대책이 있어야 됨을 다시 확인할 수가 있다.

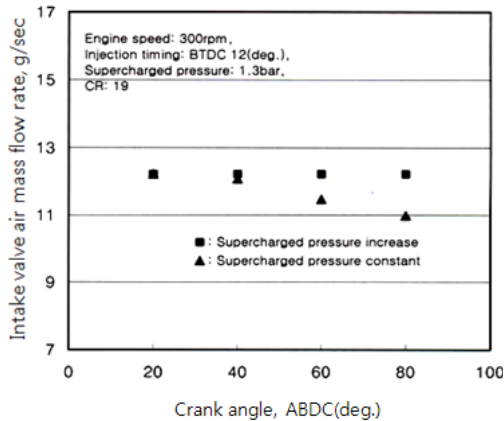


Figure 8: Required air mass in the case of intake air compensation.

Figure 9는 상기의 운전조건에서 VVT(variable valve timing)시스템과 공기과급 압력장치, 그리고 VCR(variable compression ratio)장치를 동시에 사용하여 디젤-아트킨슨사이클을 실현한 후, 측정된 데이터로부터 연소실 체적변화에 대한 연소압력의 크기를 로그스케일로 나타낸 것이다. 그림에서 실선의 A부분은 기본 기관의 순 일의 크기를 나타낸 것으로, 흡기밸브 닫힘시기 지연에 의해 아트킨슨

사이클을 실현할 경우 압축일 감소로 순일은 면적 B의 크기만큼 증가로 이어져 열효율향상을 기대할 수 있게 됨을 알 수 있다.

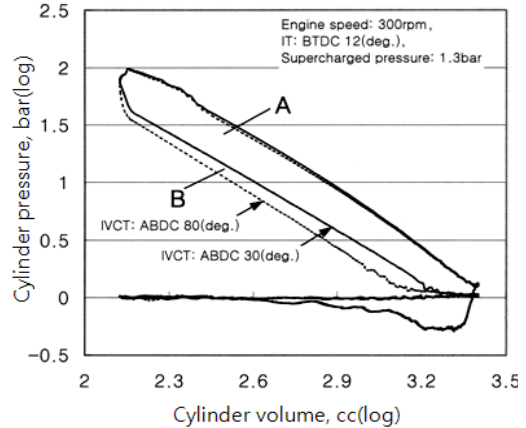


Figure 9: Log diagram of P-V in the case of intake air compensation.

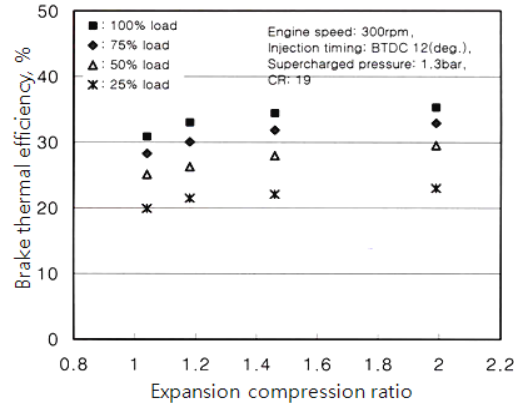


Figure 10: Brake thermal efficiency with engine load in the case of compensation the decreased intake air.

Figure 10은 팽창압축비에 대한 정미열효율을 각 부하별로 나타낸 것이다. 전 부하 영역에서 팽창압축비 1.46(LIVC 70°)까지는 정미열효율은 선형적으로 증가하였으나 1.45(LIVC 70°)~2.0(LIVC 80°)범위는 증가하는 경향이 차츰 둔화됨을 보이고 있다. 이러한 결과는 팽창압축비 1.45 부근에서는 아트킨슨사이클의 구현이 보다 유리한 반면, 2.0 이후로는 압축행정의 감소로 인하여 흡입공기량 보상에도 불구하고 압축압력 감소에 따른 불완전연소로 정미열효율의 향상은 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

흡기밸브 닫힘시기 변화와 흡입공기 과급압력장치를 동시에 사용한 아트킨슨사이클 실험연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기관의 운전 토크변동은 100% 고부하 영역의 경우 흡입밸브 닫힘시기 지각에 따라 증가하는 경향으로 나타났고, 50% 중부하 영역에서는 토크변동이 보다 안정적이면서 전 구간에 걸쳐 출력은 상승하였다. 이러한 결과로부터 중부하의 경우에서 고팽창 효과가 보다 더 기대되는 운전영역임을 알 수 있었다.

2) 정미열효율의 크기는 각 부하에 대하여 LIVC 70° 까지는 증가하는 경향이 뚜렷하였으나, 이후 LIVC 80° 에서는 둔화되는 모습을 보였다. 그리고 25% 저부하영역의 경우 열효율향상은 미미하였다. 따라서 50% 중부하 이상의 고부하에서 앳킨슨사이클의 기대효과가 크게 되고 열효율 향상을 도모하는데 보다 유리함을 알 수 있었다.

3) 단순한 흡기밸브 닫힘시기 지연으로부터는 열효율 상승 기대효과가 없고, 유효압축비 보상의 경우에도 약간의 열효율 상승은 있었으나 흡입공기량 부족으로 인하여 출력은 오히려 감소되었다. 또 과급에 의한 흡입공기량이 동일한 조건일 때는 한정된 실험조건에 대하여 열효율 상승이 있음을 확인하였다.

4) 동일기관 내에서 흡기밸브 닫힘시기를 늦게 하고 압축비 보상과 동시에 과급에 의한 흡입공기량을 보성한 저속디젤-아트킨슨사이클의 최적 연소조건을 살펴보면, 흡기밸브 닫힘시기는 ABDC 70° 전후이고, 기관 부하의 경우는 50% 중부하영역임을 찾을 수 있었다. 따라서 이러한 운전조건에서 저속 디젤기관을 아트킨슨사이클화하여 운전할 경우 열효율 향상과 토크의 증대가 기대된다.

참고문헌

- [1] T. I. Jang, "A Study on the cycle analyzing and intake valve control by the miller method with a high expansion into low-speed diesel engine", Journal of the Korean society of Marine Engineering, vol. 33, no. 8, pp. 26-32. 2009.
- [2] T. I. Jang, "A Study on the problem-solving method and thermal efficiency properties at the

time of high expansion realization in a 4-cycle diesel engine", Journal of the Korean society of Marine Engineering, vol. 33, no. 6, pp. 51-58. 2009.

- [3] T. I. Jang, "A study on the theory analysis and engine test performance by a high expansion diesel engine into intake-exhaust consideration", Journal of the Korean society of Marine Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 55-60. 2008.
- [4] 장태익, 정양주, 노기철, 이종태, "디젤-아트킨슨 사이클의 고폽창법 강구를 위한 연구(I)", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집II, pp. 500-506. 2002.
- [5] 장태익, 정양주, 이종태, "대형 롱스트로크 디젤 기관의 아트킨슨사이클화에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집II, pp. 225-231. 2001.
- [6] Naoharu Ueda, Hiroshi Sakai, Junso Sasaki, and Naohide Iso, "The Miller cycle gasoline engine for a light duty truck", Journal of the Japan Society of Automotive Engineering, vol. 33, 9633027.
- [7] C. M. Chung, J. T. Lee, J. W. Cho, "Trends in technical & development of miller cycle for gasoline engine", Journal of Korea Society of Automotive Engineers, vol. 17, no.1. 1995.
- [8] Ryo Shimizu, Masaki Fujii, Takasi Suzuki, Masao Inoue, "Miller cycle engine management system and its distinctive feature", Journal of the Japan Society of Automotive Engineers Review, pp. 305-308, 1994.
- [9] T. Goto, et al., "Development of V6 Miller Cycle Gasoline Engine", SAE 940198.
- [10] W.L.R. Gallo, "Thermodynamic Evaluation of Valve Timing", SAE 921479.

저 자 소 개



장태익(張太翼)

1959년 1월생, 1985년 국립금오공과대학교 기계공학과(입, 학사), 1989년 국립금오공과대학교 대학원 기계공학과(입, 석사), 1996년 성균관대학교 대학원 기계설계공학과(입, 박사), 2002.3~2009.2 세명대학교 건축설비공학, 2011.11. 현. 한라대학교 기계자동차공학부