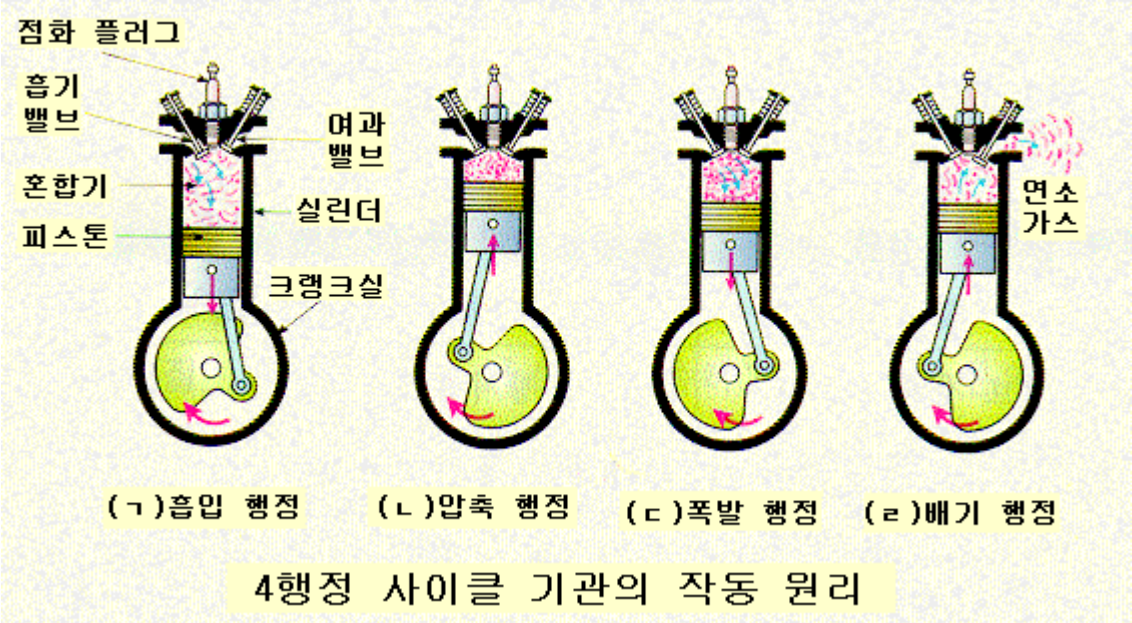
내부 연소 엔진

수증기 동력 엔진에서는 물을 매개체로 하여 동력을 얻습니다. 물이란 일종의 열을 전달하는 매개체이며 열은 물이 지나가는 관과 보일러의 접촉 면적을 통해 전달됩니다. 그러므로 수증기 동력 엔진에서는 열 교환기가 필요하며 열 교환기의 재질에 따라 운전 가능한 조건이 제약을 받습니다. 이러한 문제점을 해결하고자 하는 시도의 산물이 내부 연소 엔진입니다. 내부 연소 엔진은 말 그대로 엔진 내부에서 연료를 태워서 열을 얻고, 연소 생성물이 작동유체로 작용합니다. 그러므로 열 교환 면적이 필요 없습니다. 하지만 열역학적인 관점에서 볼 땐 수증기 동력 엔진과 같이 Cycle로 이루어져 있지 않습니다. 연료를 태우고 생성물을 밖으로 배출시키고, 다시 연료를 태우는 등 연속적인 Cycle이 아니기 때문에 해석하기는 어렵지만, 몇 가지 실제 과정들을 다소 변경시켜 Cycle로 해석할 수 있습니다.

The Otto Engine

내부 연소 기관중에서 주로 자동차의 엔진에 쓰이는 기관입니다. 이 오토 엔진은 4개의 stroke로 이루어져 있습니다. (그림. 5)



일정한 압력에서 연료/공기 혼합물을 흡입합니다.

↓

모든 밸브는 잠긴 상태에서 연료-공기 혼합물은 단열상태로 압축됩니다

↓

연료-공기 혼합물에 불이 붙여져서 점화됩니다. 이때 점화는 순간적으로 일어나므로 부피는 일정하고 압력은 증가합니다.

↓

고온, 고압의 연소 생생물인 기체는 단열 팽창하며 일을 합니다.

↓

exhaust valve가 열리면서 압력은 일정한 부피에서 급격히 떨어지게 됩니다.

↓

피스톤은 남아있는 연소기체를 실린더 밖으로 밀어냅니다.

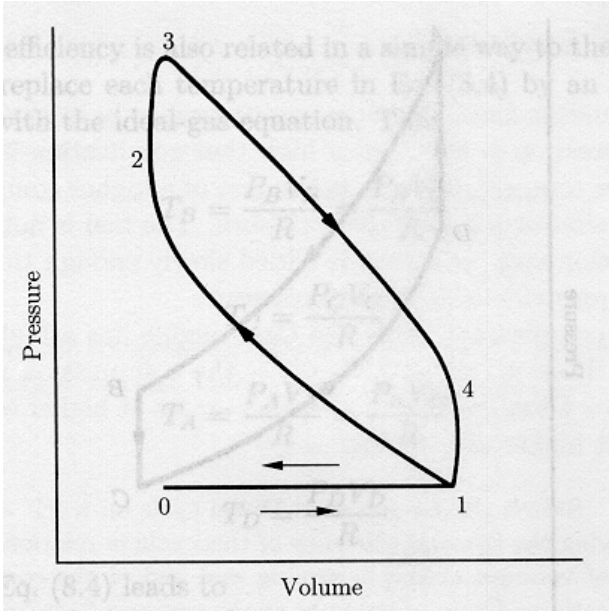


그림. 6 Otto internal-combustion-engine cycle

Otto engine의 특징은 압축비에 있습니다. 초기 부피 / 압축 후의 부피의 비를 압축비라 하는데 이 압축비로 인해 엔진의 효율은 증가하게 됩니다. 즉 주어진 연료당 할 수 있는 일이 증가하게 됩니다.

Otto Engine은 다음과 같이 이상적으로 모델화할 수 있습니다.(그림. 7)

C -D : 피스톤의 압축으로 단열압축하게 됨
D -A : 일정부피에서 점화, 열을 흡수함
A -B : 단열팽창, 일을 함
B -C : 일정부피에서 냉각.

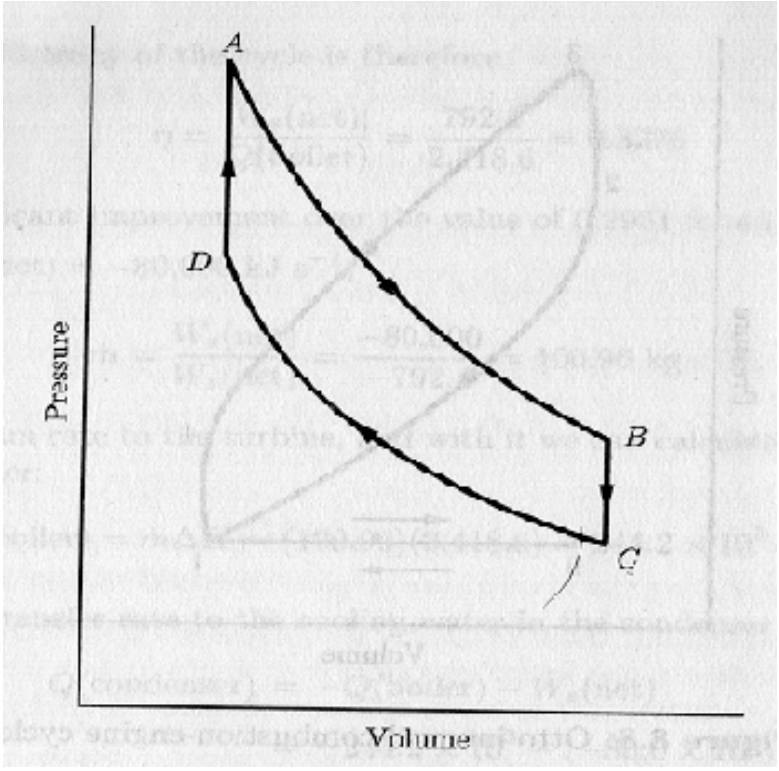


그림. 7 Air -standard Otto cycle.

그러므로 이 기관의 효율은

$$\eta = \frac{-W_s(net)}{Q_{DA}} = \frac{Q_{DA} + Q_{BC}}{Q_{DA}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

이고,

$$Q_{DA} = C_V(T_A - T_D)$$
$$Q_{BC} = C_V(T_C - T_B) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

이므로 이것을 (1)에 대입하면 효율은

$$\eta = 1 - \frac{T_B - T_C}{T_A - T_D} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

가 됩니다.

효율이 온도의 함수로 주어졌는데 이것을 부피의 함수로 바꾸기 위해서 다음과 같은 식들을 도입합니다. 즉 온도를 다른 변수들로 나타냅니다.

$$T_B = \frac{T_B V_B}{R} = \frac{P_B V_C}{R}$$
$$T_C = \frac{P_C V_C}{R}$$
$$T_A = \frac{P_A V_A}{R} = \frac{P_A V_D}{R} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4)$$
$$T_D = \frac{P_D V_D}{R}$$

(4)의 식들을 (3)에 대입하면,

$\eta = 1 - \frac{V_C (P_B - P_C)}{V_D (P_A - P_D)}$ ..... (5)가 얻어집니다.

step BC와 step AD는 단열 과정이므로 작동유체를 이상기체라 가정하면,

$P_A V_D^{\gamma} = P_B V_D^{\gamma}$
$P_C V_C^{\gamma} = P_D V_D^{\gamma}$ (V_D=V_A, V_C=V_B이므로) ..... (6)

$\frac{P_B}{P_C} = \frac{P_A}{P_D}$이고 $r = \frac{V_C}{V_D}$라면 $\frac{P_C}{P_D} = (\frac{V_D}{V_C})^{\gamma} = (\frac{1}{r})^{\gamma}$가 됩니다.

그러므로 효율 (5)는 압축비와 압력의 함수로 표현되며

$\eta = 1 - r\frac{(P_B / P_C - 1)P_C}{(P_A / P_D - 1)P_D} = 1 - r\frac{P_C}{P_D}$ 이므로

$\eta = 1 - r(\frac{1}{r})^{\gamma} = 1 - (\frac{1}{r})^{\gamma - 1}$이 됩니다.

결국 효율은 압축비 r이 커질수록 커진다는 것을 알 수 있습니다.

Diesel Engine

내연기관으로서 Diesel엔진은 압축후의 온도가 매우 크기 때문에 **연소가 자발적으로 일어난다는 점**에서 Otto 엔진과 다릅니다. 같은 압축 비에서 Otto 엔진은 Diesel엔진보다 훨씬 큰 효율을 갖지만 Otto 엔진에서는 **선점화(preignition)**가 일어날 수 있어 압축비가 어느 선까지는 넘어가지 못하게 합니다. 그러므로 Diesel 엔진에서는 이러한 선점화 때문에 (preignition) **먼저 공기를 압축한 후 연료를 공기에 천천히 분사**시켜 연소가 대략 일정한 압력에서 일어나도록 만듭니다. 그림. 8에서 CD과정은 공기를 압축하는 과정이고 DA는 공기에 연료가 분사되어 연소하는 과정입니다.

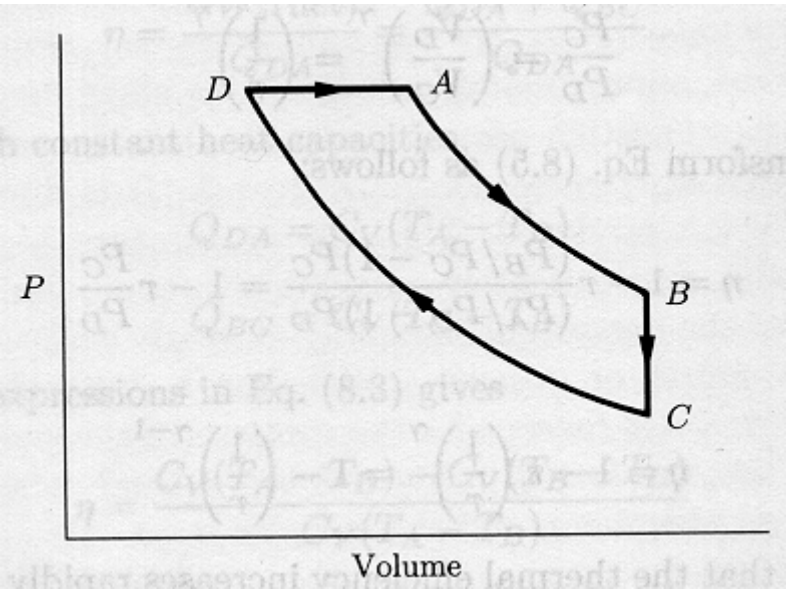


그림. 8 Air-standard Diesel cycle

그렇다면 Diesel기관의 효율을 유도해보도록 하겠습니다.

가정) 작동 유체는 이상기체로 존재한다.
작동 유체의 열용량은 일정하다.
DA 과정에서 연소가 일어나며 이것은 열을 흡수하는 공정으로 간주한다.

흡수한 열량은 step DA를 통해 이루어 지므로
$Q_{DA}=C_P(T_A-T_D)$ 이고
방출한 열량은 step BC를 통해 방출되므로
$Q_{BC}=C_V(T_C-T_B)$ 가 됩니다.
그러므로 한 일 $-W=Q_{DA}+Q_{BC}$이므로

효율 $\eta=\frac{C_V(T_B-T_C)}{C_P(T_A-T_D)}=1-\frac{1}{\gamma}(\frac{T_B-T_C}{T_A-T_D})$ ..... (1) 가 됩니다.

step DA와 BC는 가역 단열 과정이므로

$T_AV_A^{\gamma-1}=T_BV_B^{\gamma-1}$
$T_DV_D^{\gamma-1}=T_CV_C^{\gamma-1}$
가 성립합니다. 여기서 expansion ratio $r_e=V_B/V_A$라 정의하면

T_B, T_C는 각각 T_A와 T_D로 표현할 수 있습니다.

$$T_B = T_A(\frac{1}{r_e})^{\gamma-1}$$

$$T_C = T_D(\frac{1}{r_e})^{\gamma-1}$$

그러므로 효율 (1)은 다음과 같이 나타납니다.

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}(\frac{T_A(1/re)^{\gamma-1} - T_D(1/r)^{\gamma-1}}{T_A - T_D}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

위 식을 더 간단히 표현하기 위해서는 이상기체상태의 관계식을 이용합니다. $P_DV_D=RT_D$, $P_AV_A=RT_A$ 이고
$P_A=P_D$, $V_C=V_B$이므로

$$\frac{T_D}{T_A} = \frac{V_D}{V_A} = \frac{V_D/V_C}{V_A/V_B} = \frac{r_e}{r}$$

그러므로 (2)의 효율은 다음과 같이 expansion ratio와 compression ratio의 함수로 표현되어 집니다.

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}[\frac{(1/r_e)^{\gamma-1} - (r_e/r)(1/r)^{\gamma-1}}{1/r_e}]$$

The Gas-Turbine Power Plant

Otto 와 Diesel 엔진은 고온, 고압의 기체를 실린더 내 피스톤에 부딪히게 해서 일을 합니다. 그러므로 열전달 면적이 필요없는 장점을 가집니다. 하지만 터빈은 이런 왕복동식 엔진보단 더 효율적이기 때문에, 터빈을 사용하면서 내연기관의 잇점을 동시에 가지는 기관을 고안하게 되었는데 그것이 Gas-Turbine Power Plant입니다. 기본적인 단면도는 그림 ()과 같습니다.

연소실에서 나가는 고온, 고압의 기체는 터빈을 통과하여 일을 생성합니다.

이 터빈의 축과 압축기의 축이 연결되어 있어 터빈이 움직일 때 압축기도 움직이므로, 들어오는 공기를 수 바 정도의 압력으로 압축합니다.

압축된 공기는 연소실에서 연료와 만나 점화됩니다.

이러한 gas-turbine cycle는 이상기체를 사용하면 그림()과 같이 이상화시킬

수 있습니다.

AB step : 단열 압축 공정으로 압력이 PA에서 PB로 증가합니다. 압축기가 작동합니다.

BC step : 연소하는 공정으로 여기서는 QBC라는 열을 흡수하는 공정으로 대체됨. 일정한 압력에서 이루어짐

CD step : 단열 팽창하는 공정으로 터빈을 통과하여 일을 합니다.

그러므로 효율은 정의에 의해서 다음과 같이 표현됩니다.

$$\eta = \frac{-W_s(net)}{Q_{BC}} = \frac{-W_{CD} - W_{AB}}{Q_{BC}} = \frac{-C_P(T_D - T_C) - C_P(T_B - T_A)}{C_P(T_C - T_B)} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$

AB와 CD공정은 가역단열 공정이므로,

$$\frac{T_B}{T_A} = (\frac{P_B}{P_A})^{(\gamma-1)/\gamma}, \frac{T_D}{T_C} = (\frac{P_A}{P_B})^{(\gamma-1)/\gamma}$$

효율은 압력의 함수로 나타납니다.

$$\eta = 1 - (\frac{P_A}{P_B})^{(\gamma-1)}$$