

壓縮點火機關의 燃燒室 特性과 狀態變化(I)

金光洙

<大宇重工業(株) 엔진設計課>

1. 서 론

內燃機關의 性能은 실린더에서 燃料의 化學에 너지가 熱에너지로 얼마만큼 빠르고 完全하게 變化 하느냐에 左右된다.

이를 위해서는 실린더 內에서 뜨거운 압축공기와 燃料의 混合 및 증기화가 요구된다. 엔진의 出力은 매 사이클당 吸入·壓縮 할 수 있는 空氣量에 左右되므로 燃燒의 해석을 위해서는 실린더 內의 空氣流動, 燃料의 噴霧 및 燃燒과정을 이해 해야한다^(1,2). 排氣(NO_x)와 엔진 效率의 要求性 때문에 회박 混合氣 또는 EGR (exhaust gas recirculation)이 必要하게된다. 그러나 회박이 크면 낮은 연소온도, 낮은 應류흐름속도와 火焰前面의 낮은 亂流強度 때문에 燃燒期間이 증대하게된다. 實際로 회박의 증가는 失火 또는 긴 연소 지연기간, 사이클 마다의 연소맥동현상, HC 排氣의 증가등을 초래하게된다. 이러한 低溫 燃燒의 단점들은 燃燒狀態를 安定시키고 燃燒量을 증대시키는 空氣의 流動을 利用해서 해결 될 수 있다. 最近에는 旋回流과 亂流의 強度를 증가시켜서 빠른연소(fast burning)를 이루고있다. 旋回流과 亂流의 強度를 증대시키는 가장 重要한 2가지 方法은 吸入포트(port), 매니폴드(manifold)設計이다⁽³⁾.

2. 디젤 엔진의 燃燒特性^(3,6)

디젤 엔진은 실린더 內에 空氣를 流入시켜서

압축시킨 후, 空氣의 溫度가 상승되면 燃料를 噴射시켜서 着火시키며, 그 장점은 다음과 같다.

- (1) 熱效率이 높으므로 燃料消費率이 낮다.
 - (2) 운전경비가 절감된다.
 - (3) 디젤 엔진의 노킹(knocking)은 가솔린 엔진의 그것과는 다르기 때문에 실린더 徑의 制限을 받지 않는다.
 - (4) 가솔린 엔진에서 문제가 되는 전기 점화장치가 없기 때문에 고장율이 적다.
 - (5) 연료의 引火點이 높기 때문에 화재의 위험성이 적다.
 - (6) 과급에 의한 性能向上이 용이하다.
 - (7) 排氣가스가 가솔린에 비해 유해도가 낮다.
- 이러한 장점이 있는 디젤 엔진의 燃燒過程을 보면, 피스톤이 TDC에 도달하면 燃料噴射가 시작되고, 크랭크 軸의 回轉이 15~30° 될때까지 계속된다. 燃料供給은 燃燒하는 동안에 몇 단계의 과정을 거치는데 그 단계는 다음과 같다.

- (1) 初期噴射에서 燃料과 空氣의 實際의인 점화까지 걸리는 燃燒遲延期間.
 - (2) 지연된 期間동안 누적된 연료의 급작스러운 연소기간
 - (3) 燃料供給의 나머지 部分의 燃燒期間
 - (4) 未燃 燃料의 後燃燒 期間
- 등으로 區分되는데 이러한 燃燒의 具備條件은 다음과 같다.

2.1. 燃料의 噴霧(Atomization)^(11,14,15)

燃料의 噴霧가 燃燒에 크게 문제가 되어 왔으

☐ 解 說

나 아직까지 만족할 만한 理論的 근거는 없고 糊澤, 豊田의 實驗式 으로 부터 平均 燃料粒子 直徑을 求하는 式은 그림 1에서

$$\delta(\text{粒子直徑}) = k \cdot \frac{d}{W_N}$$

$$\left(\frac{s}{\gamma_b}\right)^{0.25} \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_a}\right)^{0.25}$$

$$\sqrt{g} \cdot \left[1 + 3.31 \frac{\nu \sqrt{g}}{\sqrt{s \cdot \gamma_b \cdot d}}\right]$$

여기서 k 는 常數로써 연속 분사時는 47, 간헐 분사時는 70.5 이고 W_N 는 噴出速度(m/s), d 는 노즐直徑(m), s 는 表面張力(kg/m), ν 는 粘度 ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$), γ_b 와 γ_a 는 燃料 및 空氣의 比重(kg/m^3)이다.

실린더 內에 噴射되는 燃料 粒子의 크기는 實驗結果 2~50 μ 程度의 여러가지 크기의 것이 混合되어 있다.

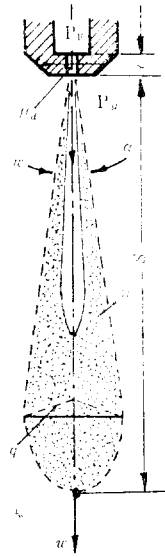


그림 1

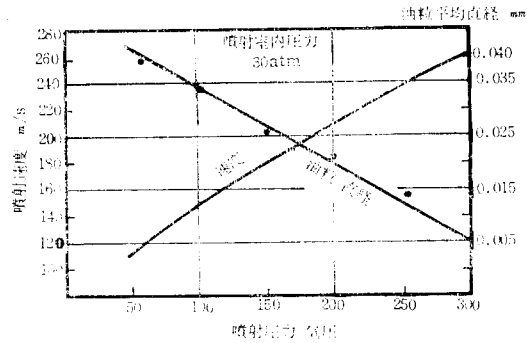


그림 3 噴射壓力과 油粒直徑

表面張力 等에 關係한다.

그림 3에서는 噴射壓力에 따른 噴射速度와 噴霧 粒子 徑의 關係를 보여준다. 噴霧 粒子의 徑은 噴射壓力에 反比例 한다.

一般的으로 燃料 粒子 크기는 25 μ 以下가 燃燒에 좋은 영향을 주며, 平均 燃料 粒子의 크기는 Sauter 平均直徑으로 表示한다.

Sauter 平均直徑(S.M.D)

$$= \frac{208d^{0.418}}{\delta p^{0.351}} (\text{micron})$$

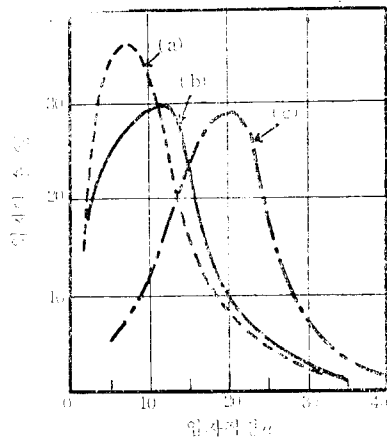
여기서는 d 는 mm, δp 는 bar 이다. 결국 燃燒 粒子가 작을수록 氣化, 燃燒가 깨끗하게 이루어 지므로 燃料 粒子를 可能한 작게 하는것이 바람 직하다.

2.2. 燃料 粒子의 分布(Distribution)^(11,14,15)

平均有效壓力을 증가시키기 위해서는 실린더 內의 空氣를 남기지 않고 全部 燃燒에 利用하는 것이 最上이다. 즉 공기과잉율을 작게하는것이 重要하다. 噴射式 機關에서는 燃料 粒子가 도달 하지않는 장소의 공기는 전부 燃소되지 않으나, 反對로 燃료입자가 密集되어 있는 곳에서는 공기가 부족하여 不完全 燃燒가 된다. 그러므로 粒子의 分布는 구석구석까지 확실하게 이루어져야 한다.

混合氣의 形式은 噴霧 만으로는 만족하지 못하므로 燃燒室의 形狀 또는 空氣流動 등이 적당히 組合되어야 한다.

또 분무확산각도가 클수록 포함되는 공기의 體積이 커지므로 混合은 양호 해진다. 그러나 분



- 噴射壓力 280at
- 背 壓 10at
- 펌프회전수 90rpm
- (a) 노즐直徑 0.40mm ϕ 4個
- (b) 노즐直徑 0.57mm ϕ 2個
- (c) 노즐直徑 0.80mm ϕ 1個

그림 2 燃料 粒子의 分布

그림 2는 燃料 粒子의 크기와 그 數와의 關係를 表示하며 最大多數를 나타내고 있는 燃料 粒子의 크기는 여러가지 條件에 따라 變한다.

燃料 粒子의 分裂은 노즐內의 亂流, 공기마찰,

散을 양호하게 하기 위해서는貫通力(penetration)을 작게 해야한다. 그림 4는 원통형 노즐에 대한 噴射壓力 및 背壓과의 관계를 보여준다.

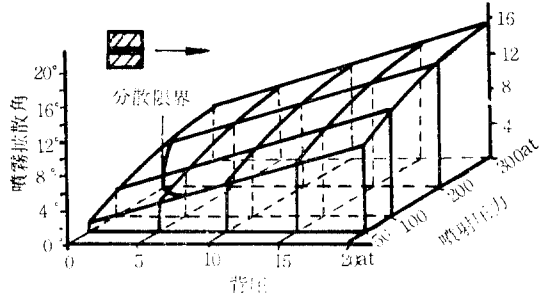


그림 4 噴霧擴散角度

2.3. 燃料粒子的 貫通力^(11, 14, 15)

貫通力은 噴霧到達距離 라고도 하며 그림 5에서 노즐 구멍의 크기와 噴射燃料의 貫通力의 관계를 보여준다. 그림 5에서 노즐 구멍의 直徑이 0.7mm 인 경우 8/1000 sec에서 噴射燃料의 到達距離는 30cm가 된다. Wakuri의 公式이 貫通力 計算에 많이 利用된다.

$$\text{즉 } \frac{s^2}{t} = 2676 \cdot d \cdot \sqrt{\delta p} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_c}}$$

여기서 s는 燃燒噴霧先端에서의 到達距離이고 t는 時間(ms), d는 노즐구멍의 直徑(mm),

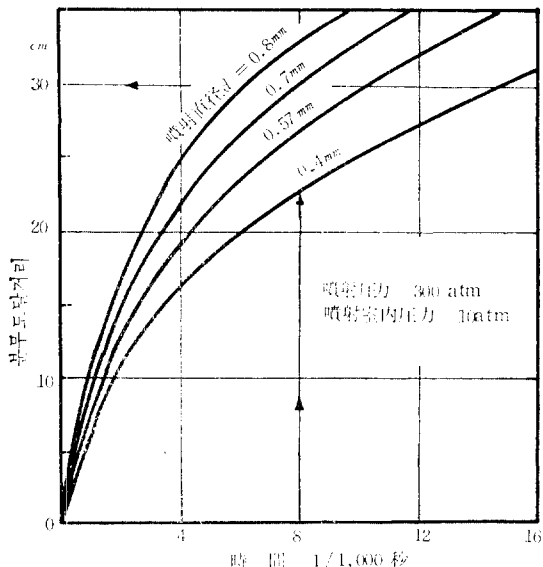


그림 5 噴射孔의 크기와 粒子的 통과거리

δp 는 노즐을 통한 壓力降下(bar), ρ_c 는 空氣의 壓縮密度(kg/m³)이다.

燃料의 粒子가 정지되면 燃燒가스가 포함되어 연소가 進行될 수 없기 때문에 流體粒子는 연소가 끝날때까지 공기속을 뚫고 進行할수 있는 힘이 必要하다.

이를 위해서는 粒子的 運動量이 커야하는데, 運動量은 燃料粒子的 直徑 δ 의 3승에 比例하고, 進行中の 空氣低抗은 대개 δ^2 에 比例한다. 貫通力을 위해서는 δ 를 크게 하는것이 必要하지만, 이것은 微粒化에 相反된다.

P.H. Schweitzer의 實驗 結果에 의하면,

$$\frac{s}{d} \left(1 + \frac{\gamma_a}{\gamma_c}\right) = f \left(\frac{t}{d} \cdot W_N \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma_c} \right)$$

단 여기서 s는 噴霧距離, t는 時間, γ_a 는 噴射室의 空氣比重, γ_c 는 大氣狀態의 空氣比重, W_N 는 噴霧의 初期速度(= $\mu \sqrt{2g \Delta P_E / \gamma_b}$), γ_b 는 燃料의 比重, P_E 는 噴射壓力이다.

그림 6은 Schweitzer의 實驗結果를 보여준다.

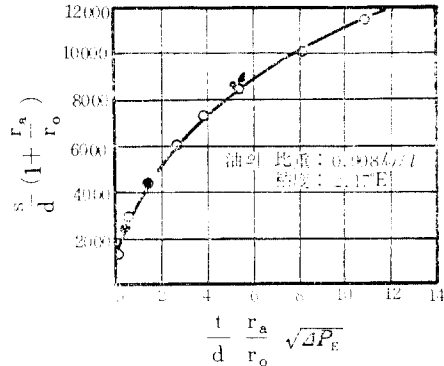


그림 6 噴霧길이에 관한 特性

3. 燃燒室의 具備條件^(4, 6, 11)

디젤 엔진에서는 相當히 높은 溫度의 壓縮 空氣속에 燃料을 분사시켜 着火燃燒시킨다. 따라서 디젤 엔진의 연소실은 분사된 연료와 공기가 잘 혼합되는 구조가 되어야 한다. 이를 위해서는 디젤 엔진의 연소실에서 압축행정 끝부분에 강한 旋回流를 發生 시키든가, 또는 着火初期에 생기는 高壓을 이용하여 混合을 돕게하는

☐ 解 說

등의 고려가 필요하다.

즉 연소실은 완전한 연소시스템을 위한 복합 구조이며, 연소실의 機何學的인 형태는 燃料噴射에 의해서 生成하는 燃料/空氣混合 영역과 空氣流動에 아주 큰 관계가 있다.

具備條件을 보면,

- (1) 空燃比의 制限
- (2) 熱效率
- (3) 作動의 容易
- (4) 燃燒 騒音
- (5) 排氣
- (6) 冷氣始動性
- (7) 燃料質에 對한 민감성
- (8) 엔진部品の 負荷
- (9) 使用年限
- (10) 設計 및 製作
- (11) 낮은 녹크現象
- (12) 높은 指示馬力
- (13) 높은 體積效率
- (14) 적당한 밸브냉각
- (15) 윤활
- (16) 짧은 燃燒時間

4. 燃燒室의 種類 및 特性^{(1, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 14,}

- 단실식(single chamber type)
 - 직접분사식(direct injection type, open combustion chamber type)
- 복실식(double chamber type)
 - 예연소실식(precombustion chamber type)
 - 와류실식(swirl chamber type, turbulence chamber type)
 - 공기실식(air chamber type, air cell, energy cell)

4.1. 직접분사식(Direct Injection Type)

그림 7 에서 보는것 처럼 이 方式은 主燃燒室로만 構成되어 있으므로 單室式 이라고도 하며 실린더 헤드와 피스톤 헤드에 설치된 요철에 의해서 形成되며 여기에 연료가 직접분사 된다. 여기서

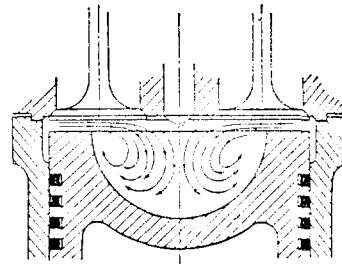


그림 7 開放燃燒室에 의한 壓縮空氣流動 狀況

는 주로 多重 噴孔노즐이 使用되고 噴霧角度는 90~170° 이고 연소실내의 噴霧壓力은 200~350 氣壓이다.

또 연소실의 容積을 $V_z(cc)$ 라고 하면 그림 8 에 의해

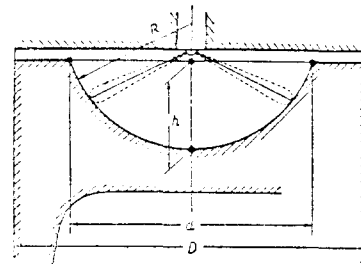


그림 8 開放燃燒室의 容積

$$V_z = \frac{1}{6} \pi h \cdot \left[3 \left(\frac{d}{2} \right)^2 + h^2 \right]$$

다음에는 직접분사식의 각 연소실 형태에 대해서 알아보자.

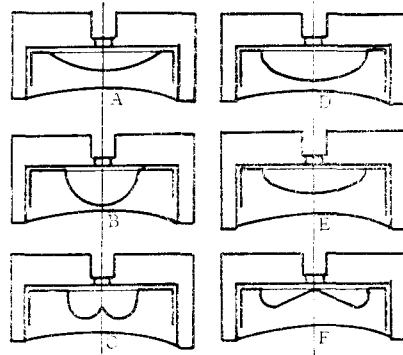


그림 9 燃燒室의 形態

그림 9에 의하면,

A 형태 : 연소실이 렌즈 形狀이고 실린더 벽에 燃燒生成物이 附着되는 단점이 있다. 그래서 피스톤과 실린더 헤드 커버 사이에 스퀴시(squish)

의 作用에 의해서 燃料粒子가 燃소영역으로 보내지는 D, E 형태가 사용된다.

B, C 형태 : 거의가 球形이며, 燃소과정은 스퀴시와 吸入밸브를 통한 空氣流動의 접선방향 成分에 의해서 形成되는 旅回流에 主로 關係된다.

D 형태 : 노즐구멍이 5개이고 그 噴射角度는 約 110°이다.

E 형태 : 140°角度로 6개 이상의 분사구멍이 있는 노즐이 사용된다.

F 형태 : 피스톤 정상 中央部分에 있는 凸(hump)에 의해서 中央噴射가 방지된다.

4.2. 예연소실 식(Precombustion Chamber Type)

그림 10에서 처럼 피스톤과 실린더헤드 사이에 形成되는 主燃燒室의 윗쪽에 예연소실을 둔 것이며, 이곳에 燃料이 분사된다.

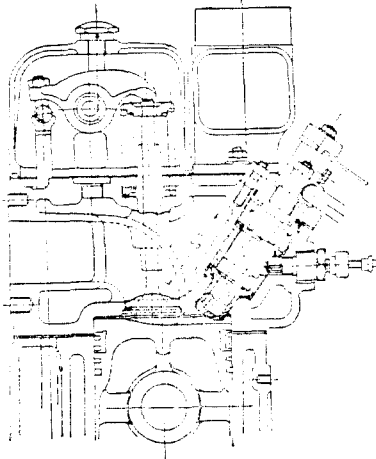


그림 10 예연소실 내부형태

분사된 燃料의 일부는 여기서 燃소 되어 高溫高壓 가스를 발생 시키며, 이것에 의해서 나머지 燃料이 주연소실에 분출되어 空氣와 혼합하여 完全燃소 한다. 이때 燃料은 이 분출구멍을 통하여 분출될 때 더욱 微粒化가 된다. 예연소실 내의 壓力變化에 비해 주연소실 內의 壓力變化가 그다지 크지 않으므로 다른 形式에 비해 運轉 상태가 穩定하고 노크(knock)도 적다.

V_2 는 예연소실의 용적으로써,

$$V_2 = \frac{\pi}{4} d_1^2 l_1 + \frac{\pi}{4} d_2^2 l_2$$

가 된다.

그림 11에서 예연소실의 壓力變化를 생각해 보면⁽⁸⁾, 壓縮行程때 실린더에서부터 燃소실에 유입되는 空氣량은,

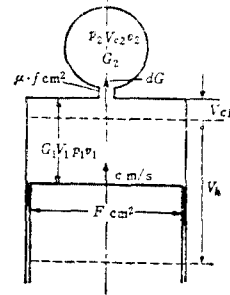


그림 11 기호설명

$$dG = \mu \cdot f \cdot \phi_{12} \sqrt{2g \cdot \frac{P_1}{V_1}} \cdot dt \quad (1)$$

dG 는 실린더 內의 空氣량의 감소와 예연소실의 空氣량의 증가와 같으므로

$$dG = -dG_1 = -d\left(\frac{V_1}{v_1}\right),$$

$$dG = dG_2 = d\left(\frac{V_{c2}}{v_2}\right) \quad (2)$$

실린더 및 예연소실의 空氣는 폴리트로픽(polytropic)과정 이라고 하고, 壓縮始作의 狀態를 p_0, V_0, T_0 라고 하면,

$$p_1 V_1^{m_1} = p_0 V_0^{m_1}, \quad p_2 V_2^{m_2} = p_0 V_0^{m_2}$$

이 關係를 式 (1), (2)에 應用해서 兩式을 같다고 하면,

$$\frac{d(p_1/p_0)}{dt} = -\frac{m_1 \mu f}{V_1} \sqrt{2g p_0 V_0} \cdot \phi_{12}$$

$$\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{3}{2} - \frac{1}{2m_1}} = \frac{m_1}{V_1} \cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right) \cdot \frac{dV_1}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d(p_2/p_0)}{dt} = \frac{m_2 \cdot \mu \cdot f}{V_{c2}} \sqrt{2g p_0 V_0} \cdot \phi_{12}$$

$$\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{3}{2} + \frac{1}{2m_1}} \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{1 - \frac{1}{m_2}} \quad (4)$$

피스톤 面積을 F , 每分 回轉數를 n , 平均 피스톤 速度를 C 라고하면,

$$V_1 = V_{c1} + V_h = F S (\epsilon_1 + h(\theta)),$$

$$V_{c2} = \epsilon_2 F S, \quad \theta = 6nt, \quad n_s = 30C$$

이 關係를 式 (3), (4)에 代入하면,

☐ 解 說

$$\frac{d(p_1/p_0)}{d\theta} = -K \cdot \frac{m_1 \sqrt{2g} \cdot R}{180} \cdot \frac{\phi_{12}}{\varepsilon_1 + h(\theta)}$$

$$\cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{3}{2} - \frac{1}{2m_1}} - \frac{\pi}{180} \cdot \frac{m_1}{\varepsilon_1 + h(\theta)}$$

$$\cdot \left(\frac{p_2}{p_0}\right) \cdot \frac{dh(\theta)}{d\theta} \quad (5)$$

$$\frac{d(p_2/p_0)}{d\theta} = K \cdot \frac{m_2 \sqrt{2g} \cdot R}{180} \cdot \frac{\phi_{12}}{\varepsilon_2}$$

$$\cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2m_1}} \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{1 - \frac{1}{m_2}} \quad (6)$$

여기서 $K = \frac{\mu f \sqrt{T_0}}{FC}$

式 (5), (6)의 연립방정식을 풀면 壓力變化가 구해지고, K 는 예연소실 뿐만 아니라 일반 副室式 機關의 특성을 표시하는 중요한 계수가 된다⁽¹⁴⁾.

4.3. 와류실 식(Swirl Chamber Type)

이 형식은 직접분사식과 예연소실 식의 중간성격을 띠고 있으며, 와류실내에 생기는 와류를 이용해서 와류실내에서 대부분의 연료를 완전연소시키는 것이 특징이며, 主燃燒室에 연결된 접선방향 오리피스에 의해 高速의 亂流를 수반하는 공기를 제공한다. 그림 12에서 V_2 는 와류실 용적(cc) 이므로,

$$V_2 = \frac{1}{6} \pi d_s^3$$

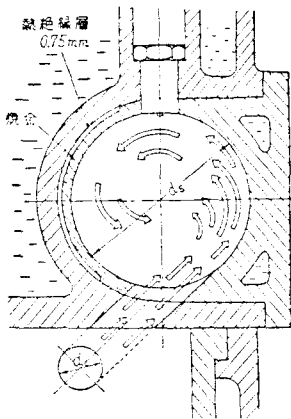


그림 12 渦流室內의 空氣流動

燃燒室이 작기 때문에 깊은 貫通力은 필요하지 않으며, 旋回流가 크기 때문에 單孔노즐이면 만족하다.

旋回燃燒室의 장점은

- (1) 높은 體績效率
- (2) 낮은 機械的 應力과 騒音
- (3) 정비의 容易
- (4) 광범위한 燃料의 使用
- (5) 조용하고 부드러운 空回轉
- (6) 낮은 대기오염

단점은 冷却水에 큰 손실이 있고, 冷氣始動에서는 豫熱 플러그가 필요하다.

그림 13을 이용해서 旋回流의 速度를 求해보면,

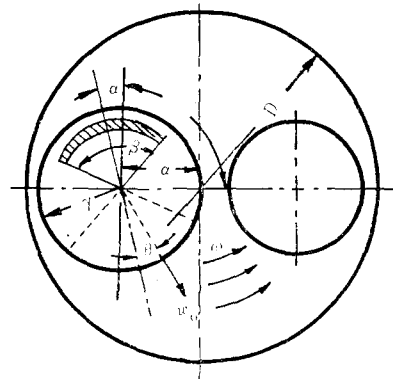


그림 13 旋回流의 計算

吸氣는 밸브 座面으로부터 반경방향에 속도 W_0 로써 유입된다. 유입공기의 실린더 軸에 대한 운동량 모우멘트는, 시라우드(shroud)의 반대쪽을 생각해보면,

$$2 \int_0^{\beta/2} a \cdot \cos \alpha \cdot w_0 \cos \theta \rho h \cdot w_0 \cdot r \cdot d\theta = 2w_0^2 \rho \cdot a \cdot h$$

$$\cdot r \cos \alpha \cdot \sin \frac{\beta}{2}$$

h 는 밸브 陽程, ρ 는 공기 밀도이다.

실린더에 유입된 후 실린더 軸의 주위를 一定角速度 w 로 旋回운동을 한다고 하면 운동량 모우멘트는

$$\int_0^{D/2} R \cdot R \omega \cdot \rho \cdot \omega \cdot R H dR = \omega^2 \rho H \left(\frac{D}{2}\right)^4 \cdot \frac{1}{4}$$

$$= \frac{1}{64} \omega^2 \cdot \rho \cdot H \cdot b^4$$

H 는 실린더높이, R 는 임의의 반경이고 양쪽 방향의 운동량 모우멘트를 같게하면,

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{128a \cdot h \cdot r}{HD^4}} \cdot \sqrt{\cos \alpha \cdot \sin \frac{\beta}{2}}$$

이렇게 해서 형성된 선회운동은 壓縮行程期間에 감소되어 30%가 남게되고, 실린더축을 中心으로 자유롭게 되고, 噴霧의 側面으로 부터 충돌하여 연소가스를 따라 가면서 새로운 공기를 공급한다.

최적회전수 n_b 는 실험에 의해서 결정되지만 噴射期間 θ_s 에 분무의 간격만큼 回轉하는것이 적당하다.

$$\text{즉 旋回流回轉比 } \frac{n_b}{n} = \frac{360}{Z} \cdot \frac{1}{\theta_s}$$

단 Z 는 노즐數이다.

4.4. 공기실식(Air Chamber Type)

그림 14에서 처럼 主燃燒室과 연결된 空氣室을 실린더 헤드나 피스톤 헤드에 설치하고 있으며, 연료를 주연소실에 분사하게 되어있다. 이때 연료가 공기실을 향해 분사되면 주연소실에서 연소가 일어나고 또 일부 연료는 공기실 내에

돌입, 착화되어 공기실內의 壓力을 상승시킨다. 이때 피스톤이 下降運動을 하면, 이에따라 공기실內의 공기가 주연소실내로 분출되어 주연소실內의 연소를 돕는다. 에너지 셀의 목적은 주연소실에서의 높은 亂流를 만들어 내는 것이다. 이것

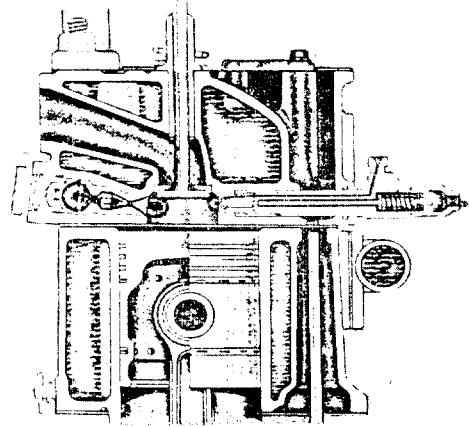


그림 14 라노바(Lanova) 에너지 셀

은 피스톤이 팽창과정에서 하강할때 에너지 셀로부터의 급격한 돌풍에 의한 것이다. 이 공기와 연료의 높은 속도에서의 혼합은 대단히 빠르게 연소의 완료를 증진시켜주는 경향이 있고, 좋은 연료절감의 기회가 된다.

(다음호에 계속)

