渦室形状がディーゼル機関の燃焼に及ぼす影響*

権 純 翼** 権 俊 博*** 金 亨 変****

Effect of Swirl Chamber Shape on Combustion in Diesel Engine

By Soon-ik Kwon, Jun-bak Kwon and Hyug sup Kim

The effects of change of swirl chamber shape on engine performance are investigated for the design and development of a I.D.I. Diesel Engine. The changed factors are a wall angle of the swirl chamber, throat area and throat length in the indirect combustion chamber. The main effects of this work are that a gaseous emission, NOx reduced by decreasing the wall angle(Θ_1) of the swirl chamber, and that a smoke reduced by decreasing the wall angle(Θ_2). And, by the decrease of the throat area reduced a smoke and specific fuel consumption at the high speed range.

1. ま え が き

小型商用ディーゼル機関は数十年間、間接噴射式が主類を占めてきた。しかし、2回にかけたオイルショックで燃費のよい直接噴射式ディーゼル機関への転換がしたいに進行されてきたが、最近各国の循環規制の側面で排ガスの規制が強化されることによって排ガスの特性に有利である間接噴射式ディーゼルが新たに台頭しはじまった。

間接噴射式ディーゼル機関には渦室式と予燃焼室式があるが現在はいくつかの機種を除くとほとんどが渦室式である⁽¹⁾⁽²⁾。渦室式はイギリスのリカルドが発明したコメト燃焼室⁽³⁾が主種になってきたが現在全世界の機関製作社らがこれをベースとして燃焼室の形状を少しずつ変更させたりして使用している⁽⁴⁾。三菱自動車⁽⁵⁾は主室と副室の連絡孔を2段角度に変更して使用しているし、日産自動車⁽⁶⁾

は既存の連絡孔以外に別の小さい連絡孔を設置して排ガス、騒音、燃費面で改善を図ってきた。

このようにエンジンメカによって渦室式ディーゼル機関の開発が進行されてきたが、開発の領域が小型ディーゼル機関という局限されている分野なのでこの研究も微々たる実情である。またはディーゼル機関の燃焼系の改善による排ガスの低減対策は機関の燃費低減と相反する場合が多くて、このような効果の相反関係を考慮して適当な線で最適化する必要がある。

本研究は渦室式ディーゼル機関の再出現という側面で渦室の壁面角度、連絡孔の長さなどの渦室の形状を変更させてこれらが燃焼特性に及ぼす影響を調べ燃焼室設計および開発に役立てようとするものである。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置及び方法 実験に使用した機関は4気筒の間接噴射式ディーゼル機関であり、総行程体積は2.476 L、圧縮比は21である。詳細な機関諸元を表1に示す。

*原稿受付 平成7年1月 日
秋季学術講演(平成6年10月12日)

**正会員 斗源工業専門大学助教授
(韓国京畿道安城郡竹山面長院里)

***正会員 大林専門大学助教授
(韓国京畿道安養市飛山洞526-7)

****亞洲大学校教授(韓国水原市原泉洞)

表1 Specification of Test Engine

Item	Specification
Engine Type	4 Cylinder Swirl Chamber Type Diesel Engine
Bore × Stroke	91.1 × 95 mm
Total Displacement	2.476 L
Compression Ratio	21.0
Volume Ratio	57.2 %
Inj. Pump Type	VE (Distribution Type)
Nozzle Type	Pintle Type
Nozzle Opening Pressure	11.8 MPa

実験は冷却水及びオイル温度を $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、吸気圧 $-350\text{mmH}_2\text{O}/4200\text{rpm}$ 、排気圧 $150\text{mmHg}/4200\text{rpm}$ の条件で渦室の形状に関係ある因子を変更させて全負荷及び部分負荷時の機関出力、燃料消費率、排出ガスなどを測定した。

燃焼室内の圧力はピエゾタイプの圧力センサを使って渦室にはグロープラグの位置に、主燃焼室には燃焼室のふちに各々取りつけて測定した。これらの出力は燃焼解析装置で解析を行うし、データは80サイクルの平均値として表してある。燃料噴射時期はノズルのニードルバルブ上部に電磁式棒をつないで誘導電流の変化によって測定した。

排ガスは機関の排気管から2.5m下流にサンプリングプロブを挿入し排ガスを抽出して分析した。NO_x分析には化学発光式NO_x計測器、CO分析には非分散形赤外分析式CO計測器、Smoke測定はBosch式Smoke Meterを用いた。

2.2 変更因子 渦室の詳細な形状は図1に示してある。各部の変更因子は次の通りである。

- (1) θ_1 : ノズルにより噴射された噴霧が衝突する壁面角度部 — $1^{\circ}, 3^{\circ}, 6^{\circ}$
- (2) θ_2 : 連絡孔により入る空気の渦流強度を変化させる壁面角度 — $1^{\circ}, 6^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}$
- (3) t : 渦室の底面の切削厚さ — 1, 2, 3, 4 mm
- (4) R_{th} : 主室と渦室をつなぐ連絡孔の噴口面積の比 $\{(\text{連絡孔断面面積} / \text{ピストン断面面積}) \times 100\}$ — 1.64, 1.4, 1.25, 1.06, 0.83

3. 実験結果及び検討

3.1 渦室の噴霧の衝突壁面角度 (θ_1) の影響 渦室の壁面の角度 (θ_2) を 6° に固定し、噴霧が衝突する壁面部の角度 (θ_1) を $1^{\circ}, 3^{\circ}, 6^{\circ}$ に変化させた時の全負荷状態での性能及び煤煙濃度を図2に示す。低速では 3° の煤煙濃度が低い、 1° と 6° は同等の水準であり、燃費は θ_1 が大きいほど良い傾向を示す。

中速では θ_1 が 1° の場合、燃費と煤煙濃度が少しくなるが高速では 1° と 6° の燃費は同等の水準である。煤煙は 1° が少し有利である。また6-Modeの排ガスの場合、 θ_1 が 3° の時NO_xの排出量が一番多く、 6° と 1° の順番で少なくなる。全体的に θ_2 を固定にして θ_1 の角度を小さい方に変化させると燃費と煤煙濃度に及ぼす影響は少ないがNO_xは低減する傾向を示している。

図1 Cross Section of Swirl Chamber

図2 Influence of Swirl Chamber Wall Angle θ_1 on SFC, Emission and Torque

3.2 渦室の壁面角度 (θ_2) の影響 図3は噴霧が衝突する壁面部の角度 (θ_1) を 6° に固定し、連絡孔のほうに位置した壁面の角度 (θ_2) を 1° , 6° , 10° , 20° , 30° として変化させるときの全負荷状態の性能及び煤煙濃度を示す。

図3 Influence of Swirl Chamber Wall Angle θ_2 on SFC, Emission and Torque

低速では θ_2 の角度を小さい方に移動させるほど煤煙は良くなるが燃費はほぼ同等の水準である。中速では θ_2 の角度が小さいほど煤煙濃度が急激に低減になり燃費は 6° のとき一番よくなるが全体的にはほぼ同等の水準である。高速での煤煙濃度は中速と同じように θ_2 の角度が小さいほど急激に低減になるが燃費は 6° のとき一番よくなることがわかる。

6-Modeの排ガスの場合、 1° の NO_x の排出量が一番少ないが全体的に同等の水準を示してある。従って、 θ_1 を固定する場合 θ_2 の角度を小さくするほど燃費とトルクはほぼ同等の水準であるが煤煙濃度は急激に低減になることがわかる。

3.3 連絡孔部の厚さ (t) の影響 連絡孔部 (Throat部) の厚さを現状 ($t = 0$ mm) から 1 mm ずつ減少させた時の全負荷状態の性能を図4に示す。連絡孔の厚さを減らすことによってのど部を通過する空気の流速が変化し、渦室の体積が増大することによって全体的な圧縮比も減少する。

図4 Influence of Thickness Reduction of Throat Area on SFC, Emission and Torque

厚さを 4 mm 減らすとき圧縮比は約 1.2 減少する。厚さの変化による性能特性は低、中、高速にかかわらず全領域で同等な傾向を示している。すなわち、連絡孔の厚さを 1 mm と 2 mm に低減させれば煤煙濃度

と燃費及びトルクはよくなるが3 mm以上低減させると急激に悪化する。これは厚さ低減による圧縮比低減の効果と連絡孔の長さが短くなることによって主燃焼室により押し出された空気が十分に渦流を発達させることができなかったため、不完全燃焼による煤煙濃度が悪化し、 NO_x の排出量も少なくなったと考えられる。

また厚さ1 mmの減少のときの性能特性が一番よくなっているが、これは1 mmの減少にもかかわらず渦流の生成が十分であり、1 mm減少して渦室の容積が増大して空気量の増大による燃焼状態が改善されたと考えられる。そして現燃焼室の場合、連絡孔の渦室側の断面積が主燃焼室側より小さく設計されており、厚さを1 mm減らすことによって渦室側の断面積が増大されるとともに連絡孔の出口が相対的に渦室の中心に移動する効果をもたらす。このために膨張過程での流路抵抗が減少して渦室での燃焼と未燃焼の混合ガスが元状態(0 mm)よりよりやすく主燃焼室に噴出することができてこれが性能に影響を及ぼしていると考えられる。t = 1 mmのときの主燃焼室と渦室での燃焼特性曲線を図5に示す。渦室式ディーゼル機関の場合ノズルにより噴射された噴霧は連絡孔を通して渦室に入る高温の空気とあって壁面付近で蒸発、飛散、発火しながら燃焼が起きる。燃焼が

起きた部分は密度が小さくなるので火災は渦巻きを起きながら燃焼室の中心部に移動すると同時に中心部の空気は外側に押し出されて燃焼ガスと混合しながら燃焼が進行する。全体的に圧縮圧力は主燃焼室が高いが着火が渦室で起きるので燃焼初期からは渦室の圧力が高くなる。膨張過程中でも燃料が噴射されて燃焼を続けるので熱発生率も渦室が少し高いことがわかる。また燃焼圧力により計算された燃焼室内の平均ガス温度も渦室が高くなる。

3.4 連絡孔部の断面積 (Throat Area) の影響 主燃焼室と渦室の連絡孔の断面積の比を既存の1.64から0.83%まで変化されときの性能と排出ガス量及びノイズの値を図6に示す。断面積は連絡孔の横と縦の長さを変えて変化させた。低速では断面積比を減らすことによって煤煙は悪化し燃費はよくなるが、断面積比をさらに減らすと煤煙濃度は低減し燃費は少しずつ悪化している。中高速領域では断面積比を減らすことによって煤煙濃度が悪化する傾向が見られるが、燃費はよくなった後、悪化する。これは断面積比が減少することによって低速では空気の流速が相対的に低下して断面積比の変化による渦流の生成効果は小さいが高速になるほど空気の流速が増加し渦流の生成が増大されて煤煙濃度が低減し、燃費もよくなる。しかし断面積比をさ

図5 Comparison of Combustion Performance at Main and Swirl Chamber

図6 影響 of Throat Area Ratio on SFC, Emission and Noise

らに減らすと空気流速による渦流の生成は大きくなるが絞縮による摩擦損失及び流路抵抗がかえって大きくなって煤煙と燃費が悪化すると考えられる。

6-Modeの排ガス量は断面積比の減少とともに NO_x とCOは増加する。また機関の上端部の10cmで測定したノイズは少し増加した後、また減少していることがわかる。

4. 考 察

渦室の壁面角度の変更が性能及び排気排出物に及ぼす全体的な傾向を図7と図8に示す。図7は θ_2 の角度を固定し θ_1 の角度を変化させるときの傾向を示している。

θ_1 の角度が小さいほど煤煙の影響は少ないが NO_x は減少している。また燃費は少し増加した後、機関回転数によって減少あるいは同等の水準を示す。これは壁面角度(θ_1)が小さいほど燃焼室の底面に渦流が生成されて全体的な空気流動を少し妨げて急激燃焼を押さえると同時にすみ部分の空気がゆっくり燃焼に参加することによって空気の利用率がよくて NO_x の面で有利であるものと考えられる。

また壁面角 θ_1 を固定して θ_2 の角度を変化させるときの傾向を図8に示す。 θ_2 の角度を減少させることによって NO_x と燃費の変化は小さいが煤煙は

図7 Tendency of SFC and Emission by change of Swirl Chamber Wall Angle θ_1

図8 Tendency of SFC and Emission by change of Swirl Chamber Wall Angle θ_2

急激によくなることがわかる。これは θ_2 の角度が小さいほど燃焼室底面のすみ部分に残留空気が存在して渦室で燃料と空気が燃焼しながら膨張過程に主燃焼室へ排出されるとき未燃焼ガスとともに混合、排出しながら主燃焼室で燃焼が促進されたと判断される。

(a) Partial load performance

(b) Emission and SFC

図9 Comparison of Swirl Chamber Wall Angle $6^\circ, 6^\circ$ and $1^\circ, 1^\circ$

したがって図7と図8に示すように θ_1 の角度を減らすほどNOxに有利になり、 θ_2 の角度を減らすほど煤煙が低減することがわかる。この2つの燃焼室の長所を利用して θ_1 、 θ_2 の角度を同時に小さい方に選定して試験した結果を図9に示す。

回転数2500rpmで θ_1 、 θ_2 の角度を同一にして各々 1° 、 1° と 6° 、 6° に変更させたときの性能を調べてみると、燃料消費率は中負荷領域で 6° 、 6° が少しよくなる。煤煙とNOxの面では 1° 、 1° が少し有利であることを示している。また3-Modeの煤煙濃度と6-ModeのNOx値を調べてみると燃焼室 1° 、 1° が最低燃料消費率で約3%多いが煤煙濃度は中、高速領域で10~30%、NOxは17%低減される。

以上のように渦室の壁面角度 θ_1 と θ_2 を各々変化させて煤煙濃度とNOxの面で優秀な仕様を選定し、組み合わせた結果最適の燃焼室の選定が可能であることがわかる。

5. 結 論

渦室式ディーゼル機関において渦室の形状、特に壁面角度の変更が機関性能に及ぼす影響を調べてみた結果、次のような結論を得た。

- 1) 噴霧が衝突する部分の壁面角度 θ_1 を小さくするほど煤煙濃度への影響は少ないがNOxの低減には有利である。
- 2) 流入空気が衝突する壁面角度 θ_2 を小さくするほど煤煙濃度は低減する。
- 3) 1)、2)の結果により壁面角度 θ_1 、 θ_2 をとともに 1° にする場合、 6° の場合より燃費は少し悪化するが煤煙濃度及びNOxは低減する。
- 4) 連絡孔部の厚さを減少させるほど連絡孔の流路抵抗の減少と渦室の容積の増加で性能はよくなるが、減少しすぎると渦流の発達を抑えるため燃費と煤煙は悪化する。
- 5) 連絡孔の断面積を減少させると高速領域で渦流の生成がよくて燃費が良くなる。しかし減少しすぎると摩擦損失と流路抵抗が大きくなってかえって性能が悪化する。

参考文献

- (1) W. M. Scott, "Diesel Engine Combustion Chamber Design", Ricardo Consulting Engineers, DP. 20896.
- (2) 沼田豊外, "自動車用ディーゼル機関", 内燃機関, Vol. 31, No.394, 1992.
- (3) H. R. Ricardo, "The High Speed Internal Combustion Engine", Blakie & Son, London, 1951.
- (4) 住江新, "うず室機関の燃焼", 内燃機関の燃焼, 山海堂, 1973.
- (5) T. Nakajima et al, "New Systems of IDI Diesel Engine for Passenger Car Application", SAE Paper. 861184.
- (6) T. Tanaka et al, "Improvement of IDI Diesel Engine Combustion through Dual-Throat Zet Swirl Chamber", SAE paper. 861184, 1984.
- (7) J. T. Russel et al, "The Diesel Passenger Car in the Age of Severe Emission Regulation", EAEC. N. 91045, pp. 359-367, 1991.