基礎研究のための電子・油圧式 ディーゼル噴射システムの試作*

神 本 武 征** 小 林 治 樹**
石 川 研 一***

AN ELECTRONIC-HYDRAULIC UNIT INJECTOR FOR A RAPID COMPRESSION MACHINE

Takeyuki KAMIMOTO, Haruki KOBAYASHI
and Kenichi ISHIKAWA

An electronic-hydraulic unit injector was developed for the study of diesel combustion with a rapid compression machine. The injection system is composed of three elements; a newly designed unit injector with a pressure intensifier, a fuel supply module and a hydraulic control module. Injection pressure can be easily varied from 30 to 120 MPa and injection duration is electronically controlled from 2 to 5 ms with two hydraulic servo-valves. This injector realizes a constant rate of injection during the injection process. The combination of this injection system and a rapid compression machine offers a basis for the systematic study of the effect of injection pressure.

Key Words: Diesel Spray, Fuel Injection System, High Pressure Injection
Image Processing

1. ま え が き

近年、車両用ディーゼル機関に対する排出ガス規制が次第に厳しくなっており、これに対処するために燃料の高圧噴射が一般化している。このため、噴射圧力の影響を系統的に調べることが必要となっている。広安ら⁽¹⁾は、噴射圧力90MPaまでの範囲において、噴射圧力と分裂長さ、噴霧角、平均粒径との関係を調べているが、対象としている噴霧は定常噴霧であるので、その結果を直接ディーゼル噴霧へ適用するには問題がある。Vardeら⁽²⁾は、高圧窒素による増圧機構を有した電子制御式噴射システムを用いて、140MPaまでの噴射圧力について噴霧先端到達距離と噴霧角を調べているが、噴射圧力の立ち上がりに十数msを要し、実機に用いられている噴射期間数msの噴霧にはほど遠い。和栗ら⁽³⁾は、3つの直流ソレノイドを連結してノズル・ニードルを引き上げるという電

磁式単発噴射システムにより、噴射圧力100MPa、噴射期間数msの噴射を実現し、急速圧縮装置を用いて噴射圧が着火遅れにおよぼす影響などを調べている。この装置が実機相当の高圧噴射を単発で実現した唯一のものと思われる。

著者らは、従来から大形急速圧縮装置を用いて、非定常噴霧・火炎の研究を行ってきたが⁽⁴⁾、今回この急速圧縮装置のための単発高圧噴射システムを試作した。これらの装置で実現した噴霧・火炎に著者らが従来から手掛けてきた画像計測法⁽⁵⁾を応用することによって、高圧噴射による微粒化特性や燃焼特性の変化を系統的に調べることができる。本論文では、試作した噴射システムの概要と性能および応用例について述べる。

2. 単発高圧噴射システム

2・1 基本設計 試作する噴射システムに対し次のような目標を設定した。

- 1) 30-120MPaの噴射圧力範囲で噴射が行えること。
- 2) 噴射期間は2-5msの範囲で自由に制御でき、

* 昭和61年10月7日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月24日。

** 正員、東京工業大学(〒152 目黒区大岡山2-12-1)。

*** ティジン株式会社。

図1 単発高圧噴射装置 システム図

噴射期間中噴射率がほぼ一定であること。

3) 噴射量は0.2 mm単噴口から0.25 mm 4噴口までのノズルに対応できること。

このような目標を達成するために、各種噴射方式について検討した。

まず、考えられるのは現用のボッシュ式噴射系であるが、この方式は高圧化に伴ってキャビテーション・エロージョンや二次噴射が顕著となるため、80 MPa以上の高圧を得るのはかなり困難のようである。より高圧の噴射を行うために電子油圧制御式のユニットインジェクタが小宮山ら⁽⁶⁾、N.J.Beckら⁽⁷⁾により試作されている。これらの噴射システムはどちらも油圧による増圧機構により、ピーク噴射圧力150 MPa、噴射期間1 msを実現しており、しかも従来のボッシュ式に比べて噴射時期、噴射量の制御性が極めて高いという利点を有している。しかし、両者とも噴射期間中に噴射率が大きく変化していて、上述の目標2を満足しない。和栗ら⁽³⁾の電磁噴射方式は電磁石によりニードルを引き上げる方式であるが、噴射圧が高いほど強力なスプリングを必要とし、120 MPaの噴射圧力を目指した場合に小宮山らの方式⁽⁶⁾⁽⁷⁾に比べて噴射ノズルが大形化する傾向がある。

以上を考慮して、本研究では小宮山ら⁽⁶⁾、N.J.Beckら⁽⁷⁾のユニット・インジェクタを参考にして次のような設計方針を定めた。

1) 油圧による増圧機構：高圧を得るため、作動流体

図2 タイミングチャート

として燃料を用いた増圧機構を採用する。

2) 電子油圧制御：ノズル・ニードルの駆動は2つの油圧サーボ弁により行い、噴射時期および噴射期間を電氣的にコントロールする。

3) ユニット・インジェクタ：キャビテーション・エロージョンや二次噴射を防止するため、高圧部の管路をできる限り短くしてユニット化する。

2・2 作動原理と噴射特性 試作した単発高圧噴射システムは図1に示すように、噴射弁本体、燃料供給系、油圧制御系の3つから構成されている。噴射弁本体の上部には増圧機構が一体化されて組み込まれており、増圧プランジヤの高圧部と低圧部の面積比は1:6.25となっている。燃料供給系は、燃料供給用電磁切換弁①および増圧プランジヤ駆動用電磁切換弁②からなる。油圧制御系は2つの油圧サーボ弁(東京精密測器製3F-45L)③④からなり、作動圧力は21MPaである。噴射は図2に示したタイミングチャートに従って以下の手順で行われる。

- 1) まず、信号S3, S4によりサーボ弁③④を図1の状態にし、 $P_4 = 21\text{ MPa}$, $P_3 = \text{大気圧}$ とし、ノズル・ニードルを下方へ押し下げる。
 - 2) 信号S1により切換弁①を開き、チェック弁を通して燃料を増圧プランジヤ下部の高圧部に供給し $P_i = P_o$ とする。
 - 3) 信号S2により切換弁②を開き、増圧プランジヤ上部の低圧部に燃料を導くと $P_b = P_o$ となり、プランジヤが押し下げられ、高圧部の圧力すなわち噴射圧が P_o の6.25倍まで上昇する。
 - 4) 信号S3, S4によりサーボ弁③④を図1の状態から切り換えると約6msのサーボ弁の作動遅れのうち $P_3 = 21\text{ MPa}$, $P_4 = \text{大気圧}$ となって、ニードルが上昇し噴射が始まる。
 - 5) 信号S3, S4を元の状態に戻すと、サーボ弁③④は再び図1の状態に戻り、 $P_3 = \text{大気圧}$, $P_4 = 21\text{ MPa}$ となってニードルが下降し噴射が終わる。
 - 6) 信号S2により切換弁②を閉じると、 $P_b = \text{大気圧}$ となり、増圧プランジヤが上昇し P_i は P_o まで下がる。
 - 7) 信号S1により切換弁①を閉じ、燃料供給を断つ。
- 燃料供給系の圧力 P_o を変えることにより噴射圧力 $P_i = 6.25 \times P_o$ が変わり、信号S3, S4のバース幅を変化させることによって噴射期間を変えることができる。

図3は、噴射圧力を112.7MPa一定とし、単噴口0.2mmのノズルについて噴射期間を変化させた場合の噴射率の測定結果である。どの場合についても噴射率はほぼ一定となっている。図2に示した信号S3, S4のバース幅を5.25msから5.5msとわずかに変化させただけで噴射期間は図に示したように大きく変化する。バース幅が5.25msの場合はサーボ弁の応答性の限界のため、図に示す程度の噴射期間の変動があるが、バース幅5.3ms以上では、安定した噴射が得られた。また、バース幅5.25m

s以下では、サーボ弁が作動しないか、流量不足のためニードルは上昇せず、噴射は行われなかった。図4には、同じく噴口径0.2mmのノズルについて噴射期間一定で噴射圧力を変化させた場合の噴射率を示す。この場合もほぼ噴射率は一定となっている。

3. 応用例

試作した噴射装置を用いて噴霧の画像計測を行った。測定対象は図4に示す噴射圧力の異なる3つの噴霧とし、いずれの場合についても噴射量が10.5mgとなる時刻の噴霧を撮影した。図の噴射率は、実験時の

図3 噴射率(噴射期間を変えた場合)

図4 噴射率(噴射圧力を変えた場合)
ノズル: $\phi 0.2\text{ mm} \times 1$, $l/d = 3.0$

雰囲気圧力に等しい背圧をかけ、画像計測とは別に測定したものである。図5に画像計測の光学系およびデータ処理系を示す。図中の急速圧縮装置の燃焼室内に図4の下に示したような高圧・室温の窒素を充てんし、この中に0.2mm単口ホールノズルにより噴霧を形成した。光源には中心波長694.3nm、出力40MW、発光時間25nsのパルス・ルビー・レーザを用い、噴霧を透過した光をCCDカメラで受け、画像データをフレームメモリ上に保存した。データの取り込みの制御およびデータの処理はすべてマイクロコンピュータにより行った。

図6に、噴射量がすべて10.5mgとなる時刻の噴霧画像を示す。図に示す画像は、生の画像データから噴射が行われない場合の背景の画像データを差し引いて背景ムラを除去した結果であり、各画像の右側に示したのは画像濃度の基準となるグレイ・スケールである。図からわかるように、噴霧内の燃料量が等しければ、噴射圧が異なっても噴霧の長さおよび噴霧広がり角はほぼ等しく、噴霧内の空気量もほぼ等しいと考えられる。一方、図6の状態に達するまでに要する時間は図に示すように噴射圧が高いほど短く、この時間の逆数の比は図4に示す平均噴射率の比に一致する。以上より、 $\text{空気導入率} = (\text{空気導入量}) / (\text{導入時間})$ は噴射率に比例することになり、準定常気体噴流の理論が予測するところと一致する。

4. まとめ

急速圧縮装置を用いたディーゼル噴霧・火炎の基礎研究のための電子油圧制御式単発高圧噴射システムを試作した。試作したシステムは、噴射圧力29.4～112.7MPaの範囲で噴射が可能であり、最短噴射期間は2msである。この噴射システムを用いた応用例として、噴射圧を変えた場合の噴霧の画像計測を行ったところ、空気導入率は噴射率にほぼ比例することがわかった。

本噴射装置が当初の目標をほぼ達成できたことは、チーセル機器の技術的援助によるところが大きい。特に同社の小川正修氏には大変お世話になった。ここに深く感謝致します。また、東京工業大学名誉教授松岡信先生に感謝致します。なお、本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究C、59550147）の援助による。

図5 画像計測システム
(光学系およびデータ処理系)

図6 噴射圧力が異なるが噴霧内燃料量が等しい時刻の噴霧画像
雰囲気条件: N2, 1.57 MPa, 271~280 K

文 献

- (1) 広安・ほか3名, 第4回内燃機関合同シンポジウム講演論文集(昭59), 73
- (2) Varde, K.S. and Popa, D.M., SAE Paper 830448 (1983)
- (3) Wakuri, Y.・ほか3名, Proceedings of International Symposium COMODIA, Tokyo (1985), 363
- (4) Chang, Y.J.・ほか3名, Proceedings of national Symposium COMODIA, Tokyo (1985), 149
- (5) Kamimoto, T.・ほか4名, SAE Paper 840276 (1984)
- (6) 小宮山・ほか3名, 第3回内燃機関合同シンポジウム講演論文集(昭57), 181
- (7) Beck, N.J.・ほか4名, SAE Paper 840273 (1984)

討 論

〔質問〕 室 木 巧〔千葉大学工学部〕

高压噴射系には種々のタイプがあるが、本試作噴射系は結局のところ、噴射圧力の回転数、負荷に対する特性および一サイクルの圧力パターンはどのように設定されているか。

特に噴射圧力パターンは、燃焼速度、燃焼騒音、排気エミッションなどと強い相関性があるようだ。

例えば理想的パターンの一例として、噴射始めは低圧力で時間とともに直線的に上昇し最高圧力を保持して噴射は終わりに急激に歯切れよくカットする特性などが考えられるがいかがか。

〔回答〕 本噴射系は、急速圧縮装置や定容容器を用いた基礎研究を目的としたものであり、基本的には、圧力パターンの影響を除去した条件で圧力だけの効果を調べることができるよう噴射中一定圧力を保てるような設計となっている。ただし、増圧プランジャとサーボ弁の駆動の相対的なタイミングを変化させることにより圧力パターンを変えることも可能と考える。ご指摘のように、圧力パターンと燃焼特性とは密接な関係にあると思われ、これについては今後検討したいと

思う。

〔質問〕 佐 藤 豪〔慶應義塾大学理工学部〕

噴霧の特性の研究に必要な、広い範囲で安定した噴霧を得られる噴射システムを開発されたことに敬意を表し、今後の研究を期待する。

(1) 動的噴射時期(噴射始めと S_3 との時間差)は安定しているか。

(2) 急速圧縮機および計測装置とこの噴射系とを同期するトリガは何をとるのか。

〔回答〕 (1) 本噴射系における噴射始めと信号 S_3 との時間差は約 6 ms であり、安定している。

(2) 燃焼室に取付けた指圧計からの出力をスライサ回路の入力とすることにより、圧縮によって指圧計出力が設定したスライスレベルに達した時にパルスが発生させ、このパルスに適当に遅延をかけたものをトリガとして噴射系制御回路をスタートさせている。制御回路は、パルス入力により $S_1 \sim S_4$ の一連の信号が発生する。計測装置のトリガとしては S_3 や S_4 などを用いている。