

## 원전 비상디젤발전기 연료분사펌프 진단신호 분석

윤영철\*† · 이혁순\*

### Analysis of Fuel Injection Pump Diagnostic Signals for Emergency Diesel Generator in Nuclear Power Plant

Youngchul Yun\*, Hyuksoon Lee\*

Key Words : Emergency diesel generator(비상디젤발전기), Fuel injection pump(연료분사펌프), Engine signature analysis(엔진상태진단), Nuclear power plant(원자력발전소)

#### ABSTRACT

This study analyzes the characteristics of combustion and fuel injection components through the signals generated during engine operation. This information is used to reliably diagnose the engine conditions of emergency diesel generators at nuclear power plants. The characteristics of the combustion signal were analyzed using a medium-speed four-stroke diesel engine under different loads. The same fuel injection pump as that used during the engine operating conditions was installed in a fuel injection pump simulator. Further, the signal characteristics were analyzed according to the operation load and measurement points. This study confirmed that the injection signal of the fuel injection pump was divided into two signals (i.e., fuel injection start and end phase) according to an increase in the operation load. In a medium-speed diesel generator, it is possible to detect a reliable fuel injection end signal downstream of the fuel injection pump delivery valve. The phase difference at the beginning of combustion according to the operating load is ineffective for diagnosing the combustion conditions. The phase difference boundary of the injection signals is the delivery valve at the upper end of the fuel injection pump. The fuel injection phase estimated using the combustion pressure coincides with the phase of the diagnostic signal acquired downstream of the delivery valve.

#### 1. 서 론

원자력발전소의 비상디젤발전기는 안전모선에 비상전력을 신뢰성 있게 공급하기 위하여 항상 기동 가능한 상태를 유지하도록 하고 있다. 이를 위해 정비품질을 높이고 효과적인 정비를 달성하기 위하여 운전 상태에 기반 한 상태기반 정비의 필요성이 지속적으로 제기되어왔다.

엔진에 부착된 중속기기, 베어링 등 구동계통은 다년간의 엔진 운전경험을 바탕으로 주파수 분석을 통한 신뢰성 있는 진단이 가능하였으나 각 실린더의 연료분사 기기와 연소상태의 경우 여러 중속 기기들의 동작으로 발생된 주파수로 인해 고장의 원인과 고장개소의 발견에 한계가 있었다. 특히 대형 디젤발전기 엔진은 연료분사펌프를 이용하여 연료분사

시기와 연료공급량을 조정하여 출력과 연소압력을 결정하기 때문에 효과적으로 엔진 상태를 진단하기 위해서는 운전 중 연료분사 상태를 확인하고 연소상태를 분석하는 개선된 진단 방법이 필요하였다.

따라서 본 연구에서는 엔진의 운전 상태를 보다 효과적으로 진단하기 위해 운전 과정과 동일한 조건으로 연료계통을 재현하여 연료분사과정에서 발생하는 물리적 신호를 실제 운전 중 취득한 연소압력, 진동 및 초음파 신호와 비교·분석하고 연료분사펌프의 연료분사 신호와 실린더헤드 연소실의 연소 신호를 효과적으로 식별하여 운전 상태를 진단하는 방법을 연구하고자 하였다.

\* 한국수력원자력 중앙연구원(Korea Hydro & Nuclear Power, Central Research Institute)

† 교신저자, E-mail : youngchul.yun@khnp.co.kr

## 2. 연료분사 프로세스 및 분석기법

### 2.1 연료분사펌프 연료분사 프로세스

“Fig. 1”은 디젤엔진 연료분사 시스템의 한 종류로 일정 양의 연료를 플런저로 밀어내 분사밸브로 부터 연소실 내로 고속 분사하는 용적식(Jerk injection pump) 연료분사펌프의 토출밸브 구조를 묘사한 것이다.<sup>(1)</sup> 흡입구를 통해 플런저실로 유입된 연료유는 연료캠에 의해 상승된 플런저에 의해 흡입구와 제어구(토출구)가 차단되어 가압되기 시작한다. 플런저실의 압력은 플런저가 상승하는 동안 배럴의 제어구가 개방될 때 까지 지속적으로 증가하며, 플런저실 내 가압된 연료의 압력이 토출밸브 스프링 힘과 연료분사밸브 니들밸브 스프링 힘보다 크게 될 때 연료분사밸브의 노즐을 통해 고속으로 연료가 분사된다. 연료분사 말기에 플런저실의 압력이 감소하면 토출밸브는 스프링 장력에 의해 자동적으로 닫혀 분사를 종료한다. 이와 같은 발전용 대형 디젤엔진은 연소실로 공급되는 연료의 양으로 속도와 부하를 제어하며 엔진 제어시스템은 상하운동을 반복하는 플런저를 미소하게 회전시켜 플런저 헤드에 의해 차단되는 배럴 제어구의 개방 위상을 조절하여 연소실로 공급되는 연료유의 양을 조절하게 된다.

### 2.2 진단신호 분석 기법

연구에서 사용하고자 하는 엔진 신호분석 방법은 통상의 회전 기기에서 널리 적용하고 있는 주파수 영역의 신호분석 방법이 아닌 시간 영역의 분석 방법이다. 특정 크랭크샤프트의 위상을

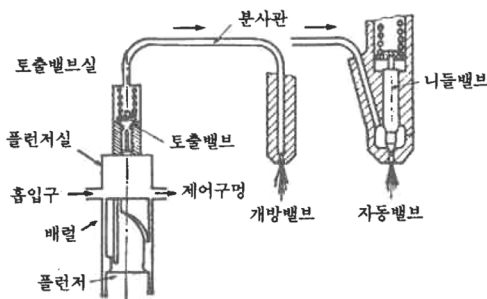


Fig. 1 Fuel injection pump

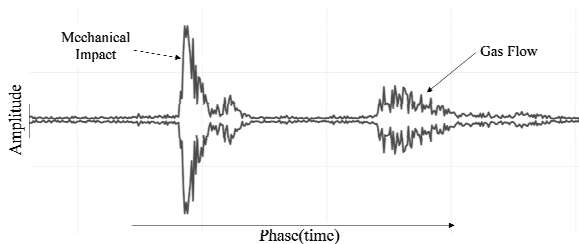


Fig. 2 Sources and shapes of engine vibration and noise

기준으로 운전 중 각 실린더헤드와 연료분사펌프에서 발생하는 연소압력과 진동 및 초음파 신호를 시간영역으로 나열하여 신호의 발생 위상과 형태를 분석한다. 진단을 위해 사용되는 모든 신호는 동일 위상을 사용하며 특정 주파수 대역을 선별 적으로 취득하고 일정 시간동안 발생하는 신호를 실린더별 위상을 기준으로 평균화 하여 평가의 신뢰성을 향상시키고 있다. 통상 연소압력의 정량적인 분석 방법과 진동 및 초음파의 정성적인 분석 방법을 복합적으로 사용하며 엔진에 부착된 필수종속기기를 제외한 실린더 계통과 연료분사 계통의 상태진단에 효과적이다. 상태진단 신호형태는 “Fig. 2”의 물리적인 충격 신호와 유체 유동에 의한 신호로 구분할 수 있으며 진단 신호를 취득하는 위치에 따라 신호의 형태와 위상이 변동되므로 측정에 많은 주의를 요한다. 통상 연소과정에서는 두가지 대표적 신호 형태가 복합적으로 발생하는 것으로 알려져 있으나<sup>(2)</sup> 실제 엔진의 형식과 부하상태에 따라 다양한 형태가 나타나므로 진동, 초음파의 정성적 신호형태 만으로 운전 상태를 진단하는데 한계가 따른다. 따라서 연소를 평가할 수 있는 연료분사와 시작과 종료를 진단하여 연소과정을 추적하고 실린더 간 밸런스를 비교하는 운전상태 진단이 필요하다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험장치의 구성

엔진 부하운전 중 연료분사와 연소과정에서 발생하는 가진 신호에서 연소와 연료분사 신호를 선별적으로 비교하고 분석하기 위하여 “Fig. 3”과 같이 동일 형식의 연료분사펌프를 실제 운전되는 엔진과 연료분사펌프 시뮬레이터에 각각 설치하여 동일한 장비로 데이터를 취득하였다.

연구에서 사용한 엔진은 육상 발전세트에 설치된 내경 320 mm, 행정 400 mm 엔진으로 엔진 전 출력의 약 85 % 수준 (De-rating)을 정격 출력으로 사용하고 있으며 운전부하에 의한 신호형태를 비교하기 위해 저부하와 정격부하 2개 구간에서 진단 신호를 비교하였다. 저부하와 정격부하의 Fuel index는 각각 20 mm, 40 mm 수준이었으며 모든 운전 데이터는 부하투

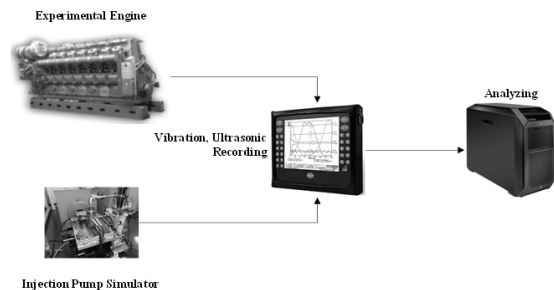


Fig. 3 Schematic of vibration, ultrasonic signal acquisition on engine and injection pump

입 후 고온냉각수 출구온도가 10 °C 이내의 열평형에 도달한 상태에서 취득하였다. 엔진의 상세제원 및 운전부하는 “Table 1”과 같다.

Table 1 Specifications of experimental engine and load condition

| Description           |             | Specification                               |
|-----------------------|-------------|---|
| Model                 |             | MAN B&W V32/40<br>(4-Stroke, Generator Set) |
| Gen. Power            |             | 5,500 kW                                    |
| Bore × Stroke × Speed |             | 320 mm × 400 mm × 720 rpm                   |
| Cylinder Arrange      |             | Vee-form 14 cylinder                        |
| Load                  | Rating Load | 5,225 ~ 6,500 kW<br>(≒40mm fuel index)      |
|                       | Low Load    | 2,300 ~ 3,000 kW<br>(≒20mm fuel index)      |

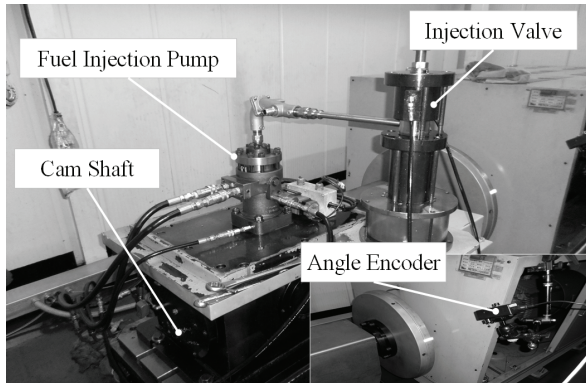


Fig. 4 The fuel injection pump installed on the pump simulator

Table 2 Specifications of fuel injection pump

| Description                                | Specification                     |
|--|-----------------------------------|
| Pump Type                                  | Jerk(individual) Pump             |
| Plunger Type                               | Single Left Hand Lower            |
| Plunger Diameter & Nozzle Opening Pressure | 32mm × 380 bar                    |
| Nozzle & Delivery Valve Type               | Closed nozzle, Mechanical Control |
| Injection Control                          | Spill Port                        |

Table 3 Specifications of fuel injection pump simulator

| Description        | Specification          |
|--------------------|------------------------|
| Operating Power    | Motor Driven           |
| Coupling Ratio     | Direct, Rigid Coupling |
| Operating Speed    | 360 rpm                |
| Test Fluid         | ISO DMX @ 30°C         |
| Operating Pressure | 5.4 ~ 5.8 barg         |

엔진과 연료분사펌프 시뮬레이터에서 사용한 연료분사펌프는 실린더 별 1기가 설치되어 있는 독립형 펌프로 “Single Left Hand Lower” 헬릭스(Helix) 형태의 플런저로 연료분사 시작점이 일정하며 엔진 제어시스템에 의해 연료분사 종료 위상이 가변적으로 변화되는 용적식 연료분사펌프의 한 형태이다. 실제 운전 중인 엔진과 동일한 연료분사 환경을 재현하기 위해 엔진과 동일한 연료 캠샤프트와 연료분사펌프 및 연료분사밸브를 이용하여 “Fig 4”와 같은 모터로 구동하는 시뮬레이터를 제작하였다. 운전조건의 편차를 최소화하기 위해 연료분사펌프로 공급되는 작동유의 유종과 연료분사펌프로 공급되는 압력을 실제 운전 조건과 일치하도록 하였다. 시뮬레이터 및 연료분사펌프 형식의 세부 사양은 “Table 2, 3”과 같다.

### 3.2 실험방법

엔진운전 중 발생하는 신호에서 연소와 연료분사 신호를 식별하고 각 상태를 진단하는 방법을 분석하기 위한 것으로 실제 엔진 운전 중 각 부하에서 측정된 연소압력을 바탕으로 엔진에서 취득한 실린더헤드와 연료분사펌프의 진동, 초음파 신호와 시뮬레이터에서 측정한 연료분사펌프 및 밸브의 진동, 초음파 신호를 비교 분석하는 것이다. 실제 운전 중 취득한 데이터와 시뮬레이터의 위상을 일치시키기 위해 연료분사펌프 내부의 연료분사위상 조절용 쉐기(Shim)의 두께를 일치(11.05 mm)시키고 연료캠 노브(knob)로부터 상사점까지 플런저 높이를 이용하여 대상 실린더의 연료가압시점을 일치시켜 측정 위상의 오차를 최소화 하였다. 또한 측정 데이터의 신뢰도를 높이기 위해 연소압력 신호는 과도상태가 없는 30사이클 동안의 신호를 평균화 하였으며 진동, 초음파 신호는 9사이클 동안의 신호를 평균화 하였다. 실제 운전 중 엔진과 시뮬레이터의 데이터 취득에 사용된 시험장비와 측

Table 4 Experimental measuring specification

| Description                      | Specification               |                   |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------|
|                                  | Vibration Accel.            | Ultrasonic        |
| Model                            | IMI EX603C01                | Windrock A6050-04 |
| Sensitivity [mV/g]               | 10                          | Adjustable gain   |
| Measuring Range [kHz]            | VH1: 4 ~ 15<br>VH2: 6 ~ 25  | 35 ~ 44           |
| No. of averaged cycles           | 9                           | 9                 |
| Combustion Pressure              |                             |                   |
| Pressure Transducer              | Piezoelectric with air-cool |                   |
| Model                            | IMES HTT-04 CA-50           |                   |
| Recording Range [psi]            | 0 ~ 5,000                   |                   |
| Frequency Range [kHz]            | Max. 2.0                    |                   |
| No. of averaged recording cycles | 30                          |                   |

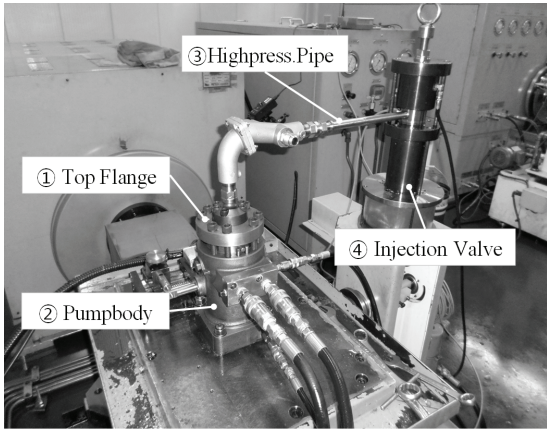


Fig. 5 Data acquisition point of the simulator

정데이터의 세부사항은 “Table 4”와 같다. 시뮬레이터에서 엔진 부하상태를 동일하게 구현하기 위하여 저부하 및 정격 부하 조건과 동일한 Fuel index를 적용하였으며 운전부하 변화에 따른 연료분사 신호 추이를 관찰하기 위해 연료 분사 펌프측정 지점을 “Fig. 5”와 같이 Pos.①~④로 세분화 하고 Fuel index를 10 mm부터 최대 40 mm 까지 단계적으로 측정 하였다.

#### 4. 실험결과

##### 4.1 운전 중 엔진 신호측정

“Table 5”, “Fig. 6”에 따르면 다른 부하 조건에서 크랭크 위상에 따른 압력변화를 도시한 결과 운전부하 증가와 함께 압축압력과 최대연소압력이 함께 증가하였으며 최대연소압력이 형성되는 위상이 상사점에서 멀어져 지각되는 경향을 나타내었다.

연소압력 변화를 보다 명확히 분석하기 위해 “Fig. 7”과 같이 각 부하별 압력 상승률을 1차 도함수로 도시하였다. 확인결과 “Table 6”와 같이 상사점 도달 전 연소압력 하강1(1')과 하강직후 급격한 압력 상승2(2')이 저부하 대비정격부하 조건에서 진각된 경향이 나타났으며 1차 도함수가 영점에 도달하는 최대연소압력의 경우 저부하 보다 정격부하 조건에서 더욱 지각된 형태로 나타났다.

운전 부하에 따라 실린더헤드와 연료분사펌프에서 발생된 진동 초음파 신호 형태를 비교하고 연료압력 선도에서 나타난 특이점 들을 비교 하였다. “Fig.8”은 폭발행정 전, 후의 운전 부하에 따른 실린더헤드와 연료분사펌프 진동 초음파 신호이다.

실린더헤드에서 취득한 신호에서는 부하에 의한 유의미한 경향이 발견되지 않으나 연료분사펌프의 경우 부하 증가에 따른 충격신호 발생이 약 9.2 ~ 10.4 CA 지각되었다. 실린더헤드에서 취득한 신호에서는 부하에 의한 유의미한 경향

이 발견되지 않으나 연료분사펌프의 경우 부하 증가에 따른 충격신호 발생이 약 9.2 ~ 10.4 CA 지각되었다.

“Fig.7”과 “Fig.8”의 신호발생 위상을 비교한 결과 실린더 헤드에서 발생된 진동 초음파 신호의 최초 발생위상 (A)는 약 BTDC 9.0 CA로 “Fig.7”의 1(1') 과 2(2') 사이에 나타났으며 연료분사펌프의 신호발생 위상 (B)는 약 BTDC 15.5 CA로 “Fig.7”의 1(1') 위상에 근접한 것을 확인할 수 있었다.

또한 연료분사펌프의 경우 신호발생시작 위상이 초음파 신호에서 더욱 명확히 확인할 수 있었다.

Table 5 Peak firing pressure and fuel index for rating and low load

| Load   | Peak Press. [barg] | Peak Press. Angle [degree, CA*] | Fuel index [mm] |
|--------|--------------------|---------------------------------|-----------------|
| Low    | 111.4              | 10.5                            | 21              |
| Rating | 167.9              | 12.4                            | 39              |

\* CA : Crankshaft angle

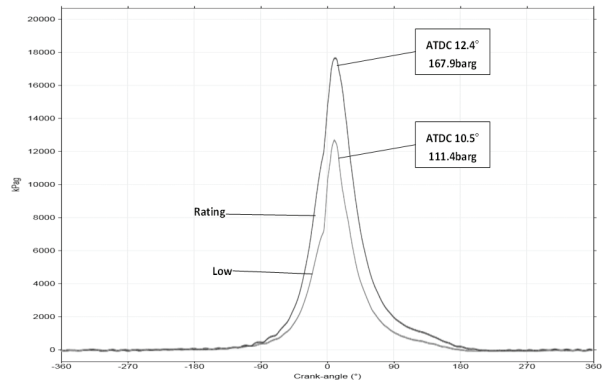


Fig. 6 Pressure vs. phase for rating and low load

Table 6 Comparison of pressure rise rate for rating and low load

|        | Crank Angle[degree] |       |       |       |
|--------|---------------------|-------|-------|-------|
|        | 1(1')               | 2(2') | 3(3') | 4(4') |
| Low    | -15.7               | -5.7  | 0.1   | 10.9  |
| Rating | -16.1               | -6.1  | -0.1  | 12.3  |

※ 0° = Top Dead Center

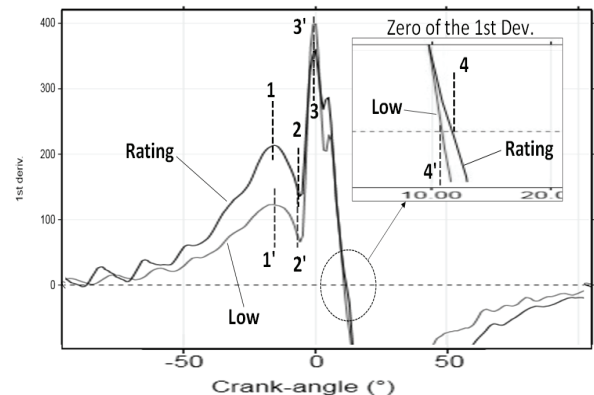


Fig. 7 1st Pressure Derivative curve for rating and low load



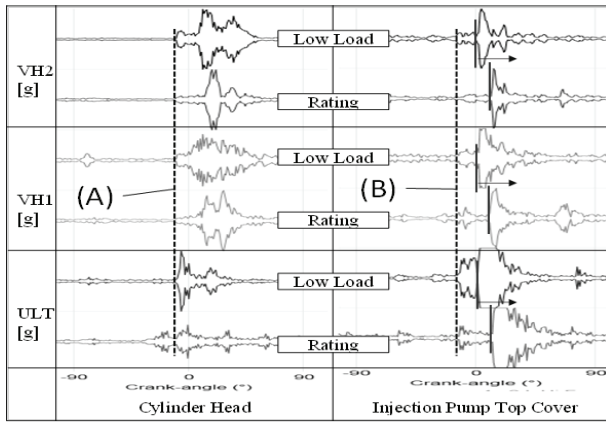


Fig. 8 Vibration and ultrasonic signals on cylinder head and fuel injection pump for rating and low load

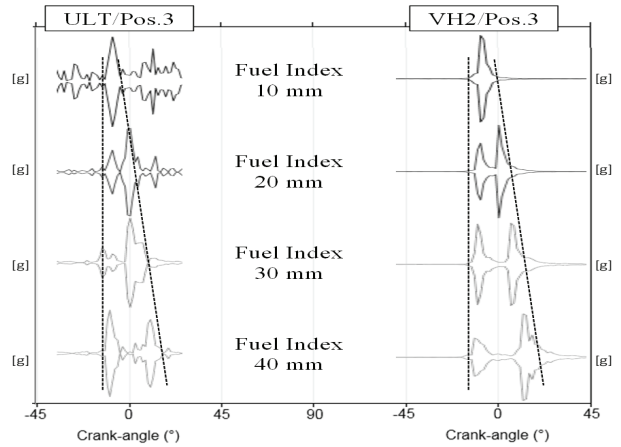


Fig. 9 Fuel injection signals of injection simulator by fuel index

#### 4.2 연료분사펌프 분사신호 특성

운전 부하에 따른 신호형태를 비교하기 위해 “Fig.5”의 Pos.①~④ 지점에서 분사 신호를 측정하였다. “Fig. 9”와 같이 Pos.③ 지점에서 취득 한 신호 비교결과 Fuel index가 10 mm 상태에서는 단일 신호가 발생 되었으며 20 mm 이상의 Fuel index에서 연속한 2중 신호로 분기되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 신호의 종류와 주파수에 관계없이 Fuel index가 증가할 경우 분기된 두 번째 신호의 위상이 점차 지연되는 경향이 일관되게 나타났으며 Fuel index가 약 40 mm에 도달할 경우 상사점을 지나친 약 12~13 CA에서 두 번째 신호가 발생함을 확인하였다.

“Fig. 10”은 Fuel index 40 mm 상태에서 취득한 진동, 초음파 신호로 상기에서 확인할 수 있듯이 동일 신호임에도 불구하고 신호취득 지점에 따라 상당히 다른 양상이 발견 되었다. 연료분사펌프에서 취득한 신호를 A'라 하고 고압연료 관과 연료분사밸브에서 취득한 신호를 B'라 할 때 A'의 첫 번째 신호발생은 약 14 CA 이며 B'의 첫 번째 신호발생위상은 약 12 CA 이다. 또한 각 신호군 내의 신호발생 위상은 동일 하였으며 두 신호군 간 신호발생 위상차는 약 2 CA로 B' 신호군의 신호발생이 지각됨을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 B' 신호 군에서는 분기된 2개의 신호가 명확히 확인 되었으나 A' 신호 군에서는 간헐적으로 첫 번째 신호발생이 불명확 하였다.

### 5. 고 찰

#### 5.1. 취득신호 특성 분석

연소압력 상승률의 1차 도함수에서 나타난 압력 하강 (1) 과 이후에 나타난 상승 (2)지점은 연소실 내 연료분사 과정에서 발생된 연료의 증발과 연이은 혼합기의 폭발에 의한 결

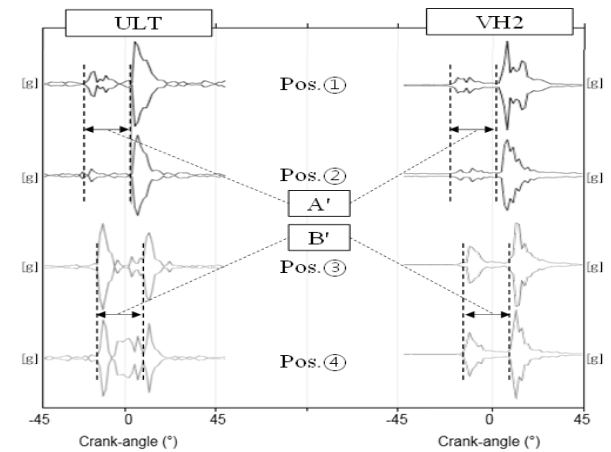


Fig. 10 Fuel injection signals of injection simulator by measurement position

과이다. 운전부하 증가는 연료공급량 증가를 의미하며 부하 증가에 따라 연료분사 시기와 혼합기의 폭발 위상이 지연되는 경향이 있으나 미소하였으며 최대연소압력이 형성되는 위상이 부하 증가에 따라 명확히 지각되었다. 운전부하 변화로 나타나는 연소압력 특성은 분사 종료위상이 가변적인 플런저 헬릭스 형상으로 나타나는 현상으로 추정된다. 부하 변화에 따라 발생하는 연소압력 특성을 진동 초음파 신호에서 확인할 결과 연료분사펌프에서는 신호지각을 확인할 수 있었으나 실린더헤드에서는 유의미한 신호 확인이 어려웠다. 이와 같은 현상은 실린더헤드에서 발생하는 연소에 의한 가스신호 때문에 신호가 중첩되어 부하변화의 특성을 구분할 수 없는 것으로 판단된다.

운전부하 증가에 따라 연료분사 신호는 연속된 2회의 충격 신호로 분기되며 이는 토출밸브를 통해 고압의 연료유가 이송되는 충격 신호와 제어구로 해압 되는 과정에서 발생하는 충격 신호이다. Fuel index가 낮은 저부하 단계에서는 신호분기 현상이 나타나지 않으나 실험결과 약 20 mm 이상의 Fuel index에서 신호분기가 발생됨을 확인 하였다. 하지만

실제 운전 중 신호에서는 해압 과정에서 발생하는 분사종료 신호가 연소신호에 혼재하여 분석이 어려우며 시뮬레이터 실험을 통해 토출밸브 후단에서 분사신호를 측정하는 경우 연료분사 시작과 종료 신호를 취득할 수 있음을 확인하였다. 다만 연료분사펌프의 토출밸브를 기준으로 신호발생 위상이 약 2 CA 차이가 발생되므로 연료분사펌프 케이싱에서 측정 한 신호의 경우 실제 연소실로 연료가 공급되는 위상의 차이가 있음을 인지할 필요가 있다.

### 5.2 엔진과 시뮬레이터의 측정신호 비교

실제 엔진의 정격부하운전 상태인 Fuel index 40 mm, Pos.4 위치의 시뮬레이터 신호와 운전 중 신호를 비교한 결과 “Fig. 11”과 같이 시뮬레이터의 연료분사 시작 위상과 연소압력 상승률 선도로 도출한 연료분사 위상이 1 CA 이내로 동일한 것을 확인하였다. 이러한 사실은 연료분사펌프 토출밸브 후단에서 정확한 연료분사 신호 취득이 가능함을 의미한다. 따라서 운전 중 취득한 연소압력을 바탕으로 “Fig. 8”의 운전 중 취득한 신호와 “Fig.10”시뮬레이터로 취득한 신호로 유추할 때 연료분사 시작 신호는 연료분사펌프 토출밸브 후단에서 운전부하와 관계없이 측정 가능하며 이때 위상은 연소압력 상승률 감소 위상과 일치한다. 이후 농후한 혼합기가 폭발하는 상태는 실린더헤드의 진동 초음파 신호로 확인가능한데 그 위상은 감소한 연소압력 상승률이 다시 급격히 상승하는 위상 이전에 발생된다. 운전 부하가 증가할수록 최대연소압력 위상이 지각되며 연소신호를 이용하여 연료분사 종료 위상을 진단할 수 없으며 실린더헤드에서 측정되는 진동 초음파를 통해서도 연료분사 종료 위상을 진단할 수 없음을 확인하였다. 따라서 신뢰성 있는 연료분사 신호를 취득하고자 할 때는 연소신호가 전도되지 않는 위치의 연료분사펌프 토출밸브 후단에서 측정해야 한다.

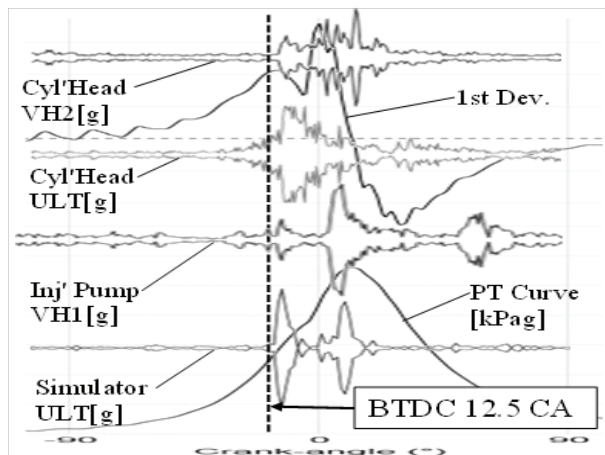


Fig. 11 Signal comparison between the actual engine and the simulator

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 엔진의 부하운전 과정과 동일한 조건으로 재현한 시뮬레이터를 이용하여 운전 중 발생 되는 연소와 연료분사 신호를 식별하고 각 신호상태를 진단하는 방법을 연구하였으며 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 플런저 헬릭스의 형상으로 인해 운전부하가 증가할수록 최대연소압력 위상이 지각되는 특성이 나타났으며 이러한 신호 지각 현상은 연료분사펌프에서 효과적으로 진단 가능하다.
- 2) 운전 부하에 따른 연소시작 시점의 위상 차이는 1 CA 이내의 경미한 수준으로 연소상태 진단 변수로 활용하기에 효과적이지 못하다.
- 3) Fuel index가 약 20 mm 이상 증가할 경우 연료분사와 종료 시 각각 물리적 신호가 2회로 분기되기 시작하며 연료분사펌프의 토출밸브 후단에서 분사 시작과 종료의 명확한 신호취득이 가능하다.
- 4) 연료분사펌프의 진단신호 취득 시 신호취득 위치에 따라 분사신호의 위상차가 발생하며 그 경계가 되는 것은 연료분사펌프 상단의 토출밸브이다.
- 5) 연소압력으로 추정된 연료분사 위상은 토출밸브 후단에서 취득한 진단신호의 위상과 일치하며 실제 연소실에 연료가 분사된 위상으로 간주할 수 있다.

## Reference

- (1) J.R. Ha, Y.T.Oh and J.I. Ryu, 2014, “Internal Combustion Engineering”, Dongmyongsa, pp. 368-369, 511-521.
- (2) C. Haller, M. O'Connell, 1997, “Diesel Engine Analysis Guide”, EPRI.
- (3) L. Barelli, G. Bidini, C. Buratti and R. Mariani, 2009, “Diagnosis of Internal Combustion Engine through Vibration and Acoustic Pressure Non-intrusive Measurements”, ELSEVIER.
- (4) R. K. Suraj and D. S. Supekar, 2015, “Vibration Analysis of Four Stroke diesel Engine using FFT Analyzer”, International Journal of Engineering Research & Technology(IJERT), Vol. 4.
- (5) A Chen and X. Dai, 2010, “Internal Combustion Engine Vibration Analysis with Short-term Fourier-transform”, International Congress on Image and Signal Processing.
- (6) S.G. Kim and K.D. Min, 2007 “CAI Combustion Detecting by Wavelet Analysis”, KSAE, pp. 56-61.
- (7) C. Strasser and R. Teichmann, 2012, “Condition Based Monitoring for Industrial Engines”, AVL AUTOKUT Engineering.
- (8) Bryan R. L. and Schuh N. Schuh, 2003, “Fault Detection and Diagnosis in Reciprocating Machinery”, Fault Detection and Diagnosis in Reciprocating Equipment pp. 303-322.