

CRDI 엔진 ECU 기반의 노킹 분석 시뮬레이터에 관한 연구

김화선*, 장성진*, 장종욱*

*동의대학교 컴퓨터공학과

e-mail:rainwood@dreamwiz.com

A Study on Knocking Analysis Simulator based on CRDI Engine ECU

Hwa-seon Kim*, Seong-jin Jang*, Jae-hyun Nam**, Jong-wook Jang*

*Dept of Computer Engineering, Dong-Eui University

요 약

CRDI 디젤엔진을 산업용 엔진에 적용하여 최근 강화된 국내외의 배출가스 규제 조건을 충족시키기 위해 사용자가 연료의 분사시기와 분사량을 조절할 수 있는 CRDI ECU 제어 알고리즘을 개발하였다. CRDI 엔진 제어 ECU의 입력 요소 중 CKP와 CMP 센서를 이용하여 디젤 노킹 및 톱투스를 판별하는 알고리즘을 개발하여 분사시기와 분사량의 조절 시점을 결정하고, 엔진의 이상 유무를 판별할 수 있는 알고리즘을 개발하여 엔진의 밸런스를 조절함으로써 연비 향상 및 유해가스 저감을 효율적으로 개선할 수 있도록 하였다.

1. 서론

지난 20여 년 동안 엔진기술 분야에서는 배출가스 규제 강화에 대응하기 위한 수많은 연구개발이 이루어졌으며, 중대형 차량 및 건설 중장비 등의 핵심 동력 장치로 사용되는 상용 디젤엔진은 환경 공해 및 에너지 소비 등에 미치는 영향도가 매우 크기 때문에, 공해 규제도 가장 엄격하며, 디젤 엔진의 기술을 견인하여 오고 있다. 따라서 현재 생산되고 있는 중소형 디젤 차량에서는 배출가스 규제를 만족하기 위해서 모두 전자제어디젤엔진 즉, CRDI 엔진을 채택하고 있다.

CRDI 시스템은 엔진제어장치(ECU), 고압펌프, 커먼레일(rail), 인젝터(injector)로 구성된다. 연료를 분사하기 전에 커먼레일에 저장한 후 연소효율이 가장 높은 시점에 고압으로 분사하고, 고압 분사되어 분무상태가 된 연료는 연소효율이 뛰어나 연비가 높고, 배기가스의 질소산화물이 크게 줄게 된다. 이러한 연료의 분사량과 시기를 CRDI ECU가 판단하고 조절한다. ECU는 센서에서 보내온 엔진 속도, 크랭크 각, 연료압력, 흡기온도 등 정보를 분석하여 분사시기와 분사량을 결정하여 최적의 조건으로 연료 분사가 이루어지게 하여 연비를 향상시키고, 유해배출가스의 발생을 최소화시키도록 커먼레일 시스템을 제어하는 것이다[1][2]. 이런 기능을 하는 ECU의 프로그램 부분과 데이터 부분은 제작사에서만 변경 할 수 있도록 되어 있어 사용자가 요구하는 대로 분사시기와 분사량을 제어할 수 없다. 특히 엔진 제어 알고리즘의 변경이 어려워 다른 용도로의 개조가 힘들 뿐만 아니라 엔진 성능향상과 배출가스

저감 등을 위한 테스트 및 검증이 어려운 현실이다.

본 연구에서는 사용자의 요구대로 분사시기와 분사량 제어 등이 가능한 CRDI 디젤엔진 전용 Emulator를 개발하고자 CRDI 엔진 제어 ECU의 입력 요소 중 시동시 분사시기를 결정하는 중요한 두 개의 센서 CPS와 CMP 센서의 작동원리를 이용하여 디젤 노킹 판별을 통해 분사시기와 분사량을 제어할 수 있게 하였다.

2. 관련 연구

배출가스 규제 강화에 대응하기 위해 디젤엔진의 경우 CRDI 시스템으로 대표되는 초고압 연료분사 및 전자제어 기술의 발달을 기반으로 고출력, 고효율 및 저배기 기술이 괄목할만한 성장을 이루었으나, 산업용 엔진의 경우 도로 주행용 차량에 비해 수요가 적은 이유로 고가의 CRDI 시스템을 적용하지 않고 있으며, 국내·외 기업에서도 산업용 CRDI 엔진 전용 ECU를 생산하지 않고 있다. 국내에 주로 보급되는 차량의 엔진용 ECU는 보쉬, 델파이, 지멘스, 도요타, 케피코 등에서 만든 제품들이며, 전량 수입에 의존하고 있다. H사에서 ECU에 대한 체계적이고 조직적인 연구개발이 진행되고 있기는 하지만 자체 개발된 ECU의 적용 사례 또한 없으며, 납품받은 ECU를 각 차량에 적용하기 위해서 간단한 보정정도만 국내 자동차 제작사에서 이루어지고 있는 수준이다. 현재 대체적으로 ECU의 프로그램 부분과 데이터 부분은 제작사에서만 변경 할 수 있도록 되어 있어 사용자가 분사시기와 분사량 제어 등과 같은 ECU 알고리즘 수정이 불가능하여 CRDI 엔진제어

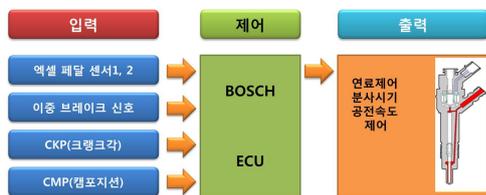
실무자 등에게는 연구 활동에 많은 어려움이 있다.

이러한 배경으로 인해 본 연구에서는 사용자가 요구하는 대로 분사시기와 분사량 제어 등이 가능한 CRDI 디젤 엔진 전용 Emulator를 개발하여 엔진성능 향상 및 배기가스저감을 위한 연구에 적용하고자 한다.

2.1 CRDI ECU의 입력과 출력 신호

CRDI ECU는 그림 1과 같이 엔진속도, 크랭크 각, 연료압력 등 정보를 분석하여 분사시기와 분사량을 결정하여 최적의 조건으로 연료 분사가 이루어지게 하여 연비를 향상시키고, 유해 배출가스 발생을 최소화시키도록 커먼레일 시스템을 제어한다[1][2].

본 연구에서는 ECU의 정보중 시동시 분사시기를 결정하는 중요한 두 개의 입력 센서값인 CKP와 CMP를 사용하여 CRDI ECU의 노킹을 판별하고 엔진 밸런스 보정 알고리즘을 제안한다.



(그림 1) 전자제어 시스템 입·출력 구성요소[3][4]

1) CKP Sensor(CPS: Crankshaft Position Sensor)

CKP는 엔진의 rpm과 크랭크 각도를 계산하여 기본 연료 분사량과 분사시기를 결정하는 가장 중요한 센서로 톤 휠의 위치를 검출 한다. 인덕티브타입의 크랭크각센서는 Hz를 통해 rpm을 계산한다. 1Hz란 1초 동안에 몇 개의 주기가 있는가를 의미한다. 1초에 1개의 주기가 발생되었다면 CKP는 1초에 6°회전할 결과이다. 톤 휠은 1회전에 60개의 투스(tooth)를 가지므로 1주기는 360°이므로 이를 투스의 개수(60)로 나누면 한 개의 투스는 6°가 된다. 따라서 톤 휠은 58개의 돌기와 2개의 참조점(missing tooth)으로 이루어져있으므로 크랭크축 1회전을 60등분하여 돌기 하나당 6° 크랭크 축의 위치를 검출한다. 이 참조점과 CMP 신호를 비교하여 1번 실린더의 압축 상사점을 찾는다[1][2][3].

2) CMP 센서(Camshaft Position Sensor : TDC)

캠샤프트는 캠축에 설치되어 캠축 1회전(크랭크축 2회전)당 1개의 펄스 신호를 발생시켜 컴퓨터로 입력시킨다. 즉 돌기의 회전수를 감지하여 ECU로 입력시킨다. ECU는 이 신호를 입력 받아 엔진의 기통 판별 및 크랭크 각을 연산하여, 인젝터 분사 순서와 분사시기를 결정한다[1][2][3].

초기 시동 시 특정 실린더의 행정 판별은 CKP 센서만으로는 연산이 어려워, 피스톤이 TDC 방향으로 움직일 때 캠샤프트 위치로써 특정 실린더의 행정이 압축단체인

지 배기단체인지를 알 수 있는 CMP 신호를 통해 1번 실린더 압축 상사점을 검출하여 연료 분사의 순서를 결정한다. CMP는 CKP 회전에 1회전 회전하므로 CKP의 참조점이 2번 발생할 때 CMP 신호는 1회 발생된다[4].

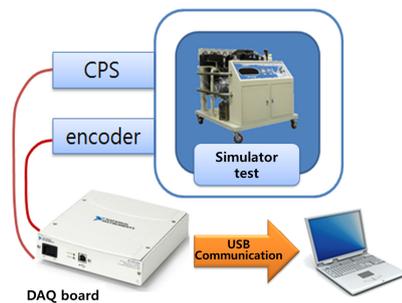
3) CKP와 CMP 센서의 파형 분석

4사이클 엔진에서 점화시기 및 연료분사시기를 계산하기 위해서는 각 행정의 구분, 특히 (압축)상사점이 언제 오는가를 정확히 알고 있어야 한다. BTDC(Before Top Dead Center : 상사점전) 및 도에서 점화를 시키는 것이 효율적인가를 미리 계산해야 상사점 전에 점화를 시킬 수 있는 것이다. 이렇게 상사점, 하사점 등의 정확한 계산을 위해 missing tooth를 두어 ECU가 알 수 있게 한다. CMP 신호가 발생 후 투스가 19개되는 지점이 1번 상사점으로, missing tooth를 기준으로 했을 때 이 지점이 114도 전이므로 missing tooth로부터 투스를 세면 상사점전 몇도인지를 계산하여 점화시기를 알 수 있다[1].

3. 시스템 설계 및 구현

3.1 시스템 구성

본 연구에서는 시뮬레이터에서 제어 센서 값을 수집하여 차량의 Knocking 판별 기준을 제공 할 수 있는 알고리즘을 구현한다. 그림 2는 시뮬레이터에서 제어 센서 값을 받기 위한 구성도이다. CRDI 엔진이 탑재 되어진 차량 또는 엔진 시뮬레이터에서 Encoder 또는 CPS(Crankshaft Position/angle Sensor)를 통해 노킹 센서 및 중요한 엔진 제어 센서 측정을 위해 DAQ 보드를 이용하여 센서 값들을 수집 하고, 노트북과 USB 통신을 통하여 데이터를 노트북으로 전송하여 값들을 분석한다. 이 값들을 이용하여 향상된 CRDI 엔진 제어 커스터마이징 맵핑을 위하여, 유용한 센서정보들을 분석 및 가공하여 최적의 Knocking 판별 기준을 제공 할 수 있는 Knocking 판별 및 보정 알고리즘을 구현한다.



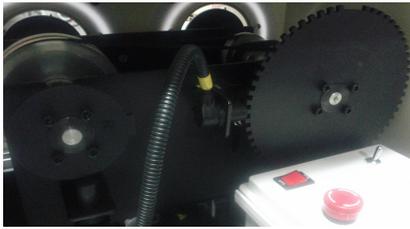
(그림 2) 시스템 구성도

그림 3과 같이 NI USB-6529와 BNC-2110 Controller 장치를 사용하여 데이터를 수집하고 수집된 데이터는 NI Labview 2010 소프트웨어를 기반으로 알고리즘을 개발한다. 크랭크 축과 캠 샤프트 장비에 모터를 장착한 자동차의 CPS와 CMP 신호를 생성하는 엔진 시뮬레이터 장비를

그림 4와 같이 구성한다. 노킹의 판단 기준을 분석하기 위해 크랭크 축의 톤 휠의 특정 부분 돌기를 각도 및 참조점(messing tooth)의 위치를 달리하여 여러 개의 톤 휠을 제작하였다.



(그림 3) 데이터 수집을 위한 NI DAQ 보드



(그림 4) 엔진 시뮬레이터 장비

3.2 알고리즘 개발

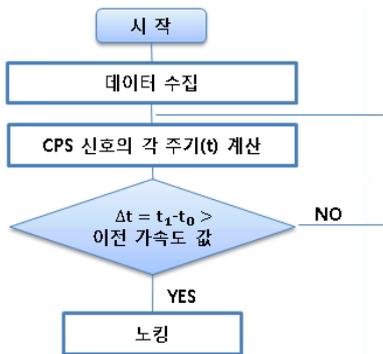
차량의 노킹은 착화지연기간이 길어지면 착화전에 기화된 연료가 많아져서 폭발적인 연소를 일으켜 디젤노크가 발생하게 되는데 이러한 디젤노크를 방지하는 방법 중의 하나가 분사시기를 제어하는 것이다. 따라서 연료분사시기와 분사량을 제어할 수 있는 knocking 판별 알고리즘을 구현하게 되면 노킹 판별을 통해 연료 분사시점을 제어할 수 있다.

1) 노킹 판별 알고리즘

수식(1)과 같이 각 CPS의 가속도를 비교하여 이전 가속도 보다 측정된 가속도가 클 경우 노킹으로 판별하여 연료분사 시점을 제어한다. 그림 15는 노킹 판별 및 제어 알고리즘이다.

$$\Delta t = \text{나중시간} - \text{처음시간} = t_1 - t_0 \quad (1)$$

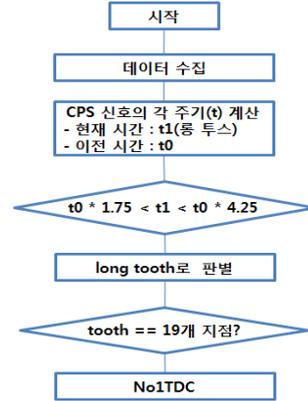
그림 5는 노킹 판별 알고리즘의 순서도이다.



(그림 5) 노킹 판별 알고리즘의 순서도

2) 롱 투스(Long Tooth) 판별 알고리즘

크랭크 각 센서의 신호가 입력되면 엔진의 동작으로 인식하므로 연료나 점화의 시기를 정확한 시기와 위치에 맞추기 위해 1번 실린더 상사점 센서(No1TDL = CMP)의 입력신호를 기준으로 정하게 된다. 이때 연료분사 및 점화시기를 결정하기 위해 입력된 값이 롱 투스인지 정확하게 판별할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 측정된 현재시간의 값이 이전 시간 값의 1.75~4.25배 내외이면 이때를 롱 투스로 판별하여 연료분사 시점을 결정하는 신호로 사용한다. 그림 6은 롱 투스 판별 알고리즘의 순서도이다.

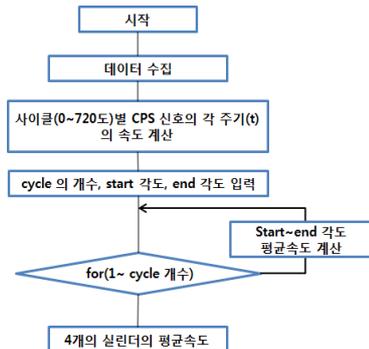


(그림 6) 롱 투스 판별 알고리즘 순서도

3) 엔진 밸런스 보정 알고리즘

크랭크 포지션 센서 신호를 이용해 실린더의 엔진회전수를 검출하고, 이때 연산되는 데이터로 인젝터의 분사량 편차 및 엔진 본체(압축압력, 흡배기밸브장치 등) 등 모든 부분의 종합적인 결과를 확인할 수 있으므로 엔진 구조의 원인을 진단하는데 아주 중요하다. 최근에 개발된 거의 모든 엔진은 크랭크샤프트포지션 센서가 설치되어 있으므로 스캔 툴로 크랭크시 속도 차이로 불량 실린더의 판별이 가능하다. 상사점 이후 0°~30°가 점화시기이므로 각 상사점 1번은 0°~30°, 3번은 180°~210°, 4번은 360°~390°, 2번은 540°~570°의 속도의 평균을 계산하여 실린더의 불량 여부를 판별할 수 있다. 그림 7은 엔진 밸런스 보정 알고리즘의 순서도이다.

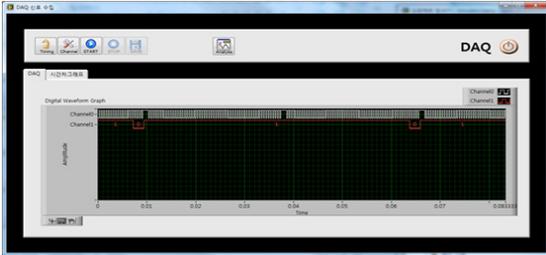
평균속도의 정밀한 측정을 위해 사이클과 상사점 시작 각도, 마지막 각도를 직접 입력하여 평균속도 값의 오차를 줄려 정확하게 실린더의 불량을 판별하도록 하였다.



(그림 7) 엔진 밸런스 보정 알고리즘 순서도

4. 실험 및 결과

본 절에서는 설계한 시뮬레이터에서 수집된 센서의 값을 이용하여 노킹 판별 및 엔진 밸런스 보정 알고리즘 개발하였다. 그림 8은 데이터 신호를 수집하기 위해 개발된 프로그램의 화면으로 시뮬레이터에서 실시간 수집된 CPS 및 TDC 신호의 파형을 확인 할 수 있다.



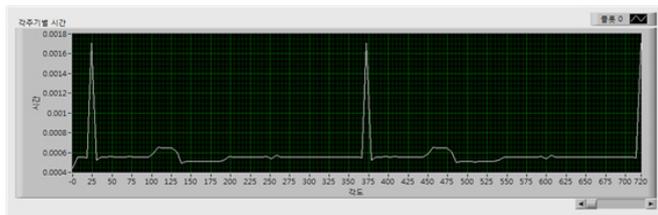
(그림 8) 데이터 신호 수집 프로그램 화면

그림 9는 현재 시간과 이전 시간의 가속도의 차를 계산한 노킹 판별 알고리즘을 적용한 결과이다. 긴 파형은 참조점(missing tooth)이며, 참조점과 참조점 사이에 짧은 파형이 노킹이 발생한 지점이 된다.



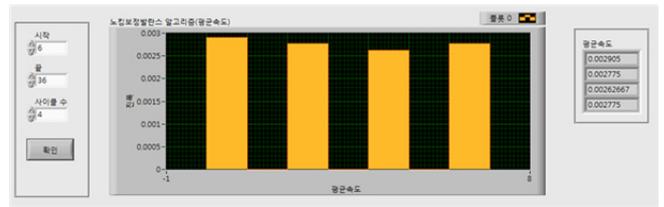
(그림 9) 노킹 판별 알고리즘 결과 화면

현재시간의 값이 이전 시간 값의 1.75~4.25배 내외이면 이때 롱-투스스로 판별하여 19번째 돌기를 1번 압축상사점으로 판단하고, 이를 기준점으로 30번째 돌기가 3번 상사점이 되고, 그 다음 30번째 돌기가 4번 상사점, 다음 30번째가 2번 상사점이 된다. 그림 10은 롱-투스스 판별 제어 알고리즘을 결과를 보여준다.



(그림 10) 롱 투스스 판별 알고리즘 결과 화면

그림 11은 엔진 밸런스 보정 알고리즘의 수행 결과이다. 각 상사점의 6~36°까지의 평균 속도를 나타낸 그래프이며, 평균속도의 정확한 계산을 위해 사이클과 상사점 시작 각도, 마지막 각도를 직접 입력하여 평균속도를 측정하여 실린더의 불량을 판별하도록 하였다. 확인 결과 3번과 4번 실린더에서 이상 현상이 발견됨을 알 수 있다.



(그림 11) 엔진 밸런스 알고리즘 결과 화면

5. 결론

본 연구에서는 시뮬레이터의 센서 값을 DAQ 보드를 통해 수집하여 노킹 판별 및 엔진 밸런스 보정 알고리즘을 개발하였다. knocking 판별 알고리즘 구현을 통하여 노킹을 판별 하고, 롱투스스 판별 알고리즘 구현으로 정확한 노킹이 발생한 지점 및 실린더를 알 수 있으므로 연료분사시기를 제어할 수 있게 되었고, 엔진 밸런스 보정 알고리즘의 구현으로 불량 실린더를 찾아 연료 분사량을 조절할 수 있도록 하였다.

향후, 본 연구에서 제안한 알고리즘을 산업용 CRDI 엔진에 직접 적용하여 커스터마이징 맵핑을 위한 최적의 엔진 제어 시스템을 개발하고자 한다. 또한 개발된 시스템을 산업용 CRDI 엔진 전반에 적용하여 엔진 성능 향상과 배출가스 저감 등을 위한 테스트 및 검증을 통해 연비 향상과 유해 배출가스의 저감을 실현 할 수 있도록 한다.

감사의 글

본 논문은 중소 기업청에서 지원하는 2012년도 산학연 협력 기업부설연구소 지원 사업(No. 2012XB032)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 정용근, 전기전자와 커먼레일엔진 차량진단, 내하출판사, p99~p220, 2008
- [2] 박재림·백태실·안영명·최두석, 자동차 기관, 골든벨, p307~p334, 2003
- [3] 윤준규, 천동준, 조일영, 하중석, 최두석, 자동차 디젤 기관, 미전사이언스, p246~p264, 2002
- [4] 이교승·류경희, 자동차 기관 일반, 미전사이언스, p339~352, 2008