

QFT 를 이용한 디젤엔진의 커먼레일 압력 제어알고리즘 설계 연구

신재욱* · 홍승우* · 박인석** · 선우명호**†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 자동차전자제어 연구소

Common Rail Pressure Control Algorithm for Passenger Car Diesel Engines Using Quantitative Feedback Theory

Jaewook Shin^{*}, Seungwoo Hong^{*}, Inseok Park^{**} and Myoungho Sunwoo^{***†}

^{**} Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.

^{**} Automotive Control and Electronics Laboratory, Hanyang Univ.

(Received February 13, 2013 ; Revised November 24, 2013 ; Accepted November 25, 2013)

Key Words: Common Rail Pressure Controller(커먼레일 압력 제어기), Quantitative Feedback Theory(정량적인 피드백 이론), Common Rail System(커먼레일 시스템), Passenger Car Diesel Engine(승용디젤엔진)

초록: 이 연구에서는 Quantitative Feedback Theory(QFT) 기법을 이용한 승용디젤엔진의 커먼레일 압력제어 알고리즘을 제안하였다. 커먼레일 압력모델의 입력과 출력은 각각 Pressure Control Valve(PCV) 구동전류와 커먼레일 압력으로 정의하였고, Metering Unit(MeUn)이 커먼레일 압력에 미치는 영향은 모델 파라미터 불확실성으로 정의하였다. QFT 기법은 이러한 모델의 불확실성에 대하여 강건하면서도 정량적 요구사항을 만족할 수 있는 제어알고리즘 설계방법을 제시한다. 제안된 커먼레일 압력제어기는 목표 레일압력 추종성능과 안정성능이 확보되었으며, 인젝터에 의한 연료분사가 커먼레일 압력에 미치는 영향을 줄이기 위하여 외란제거성능(Disturbance Rejection)이 고려되었다. 설계된 제어 알고리즘은 엔진 동력계 실험을 통하여 검증하였으며, MeUn 구동전류와 연료분사량의 급격한 변화에 따른 제어알고리즘의 강건성과 외란제거성능을 검증하였다.

Abstract: This paper proposes a common rail pressure control algorithm for passenger car diesel engines. For handling the parameter-varying characteristics of common rail systems, the quantitative feedback theory (QFT) is applied to the design of a robust rail pressure control algorithm. The driving current of the pressure control valve and the common rail pressure are used as the input/output variables for the common rail system model. The model parameter uncertainty ranges are identified through experiments. Rail pressure controller requirements in terms of tracking performance, robust stability, and disturbance rejection are defined on a Nichols chart, and these requirements are fulfilled by designing a compensator and a prefilter in the QFT framework. The proposed common rail pressure control algorithm is validated through engine experiments. The experimental results show that the proposed rail pressure controller has a good degree of consistency under various operating conditions, and it successfully satisfies the requirements for reference tracking and disturbance rejection.

1. 서론

디젤엔진은 커먼레일 시스템의 적용으로 고압의 분사압력을 형성할 수 있게 되었고, 연료 분사량과 분사시기의 정밀제어가 가능해졌다. 이러한 고압

연료분사 기술은 연료 미립화를 통한 연소효율 증가와, 다단 분사를 통한 연소 소음과 배기물질 감소를 가능하게 하기 때문에 승용 디젤엔진에 커먼레일 시스템은 필수적으로 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾

커먼레일 시스템의 이러한 장점들을 얻기 위해서는 운전조건에 관계 없이 정밀한 레일압력 제어가 선행되어야 한다. 레일압력이 정밀하게 제어되지 않는 경우 실린더에 들어가는 연료분사량에 편차가 발생하게 되고, 연료분사량의 편차는 엔진의

† Corresponding Author, msunwoo@hanyang.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

배기 및 출력성능 저하를 야기하게 된다. 따라서 커먼레일압력제어는 고압연료분사를 위한 핵심제어 기술 중 하나로 평가받고 있으며, 유로 6 (EURO6) 이후 배기규제 대응을 위하여 매우 필요한 기술이다.

그러나 크랭크 축에 동기화되어 동작하는 고압펌프와 인젝터는 커먼레일 내 불연속적인 연료흐름을 형성하기 때문에 레일압력제어에 어려움을 증가시킨다. 특히 인젝터에 의한 연료분사는 레일압력에 맥동을 발생시키기 때문에, 커먼레일 압력제어알고리즘 설계시 맥동에 의한 영향을 고려해야 한다.

또한, 승용디젤엔진 시스템에서 압력제어에 사용되는 metering unit(MeUn)과 pressure control valve(PCV)의 상호작용은 제어알고리즘 설계의 복잡성을 증가시킨다. 두 개의 밸브들은 각각 커먼레일의 연료 공급량과 배출량을 조절함으로써 레일압력에 영향을 미치게 되며, 각각의 밸브 제어 알고리즘을 설계할 때 다른 밸브 동작에 대한 영향은 필수적으로 고려되어야 한다.

위와 같은 어려움을 극복하기 위해서 유체역학법칙에 기반한 모델을 이용하여 레일압력 제어알고리즘이 설계되었다.^(4,5) 이렇게 개발된 커먼레일 시스템 모델은 물리적인 현상을 잘 반영하지만, 복잡한 비선형 수식들로 이루어졌기 때문에 제어 알고리즘의 복잡성이 증가하고, on-line calibration 이 어려운 한계점이 존재한다.

유체역학법칙에 기반한 제어알고리즘의 한계점을 극복하기 위하여 물리적 법칙보다는 실험현상에 기반한 레일압력모델을 이용하여 레일압력 제어알고리즘 설계에 활용하였다.⁽⁶⁻⁹⁾ 이렇게 설계된 제어알고리즘은 목표 레일압력 추종성능을 확보할 뿐만 아니라, 구조가 단순하여 쉽게 구현될 수 있다. 그러나 제시된 알고리즘은 오직 PCV 밸브에 대한 레일압력 특성을 고려하였기 때문에, MeUn 밸브가 레일압력에 미치는 영향이 반영되지 않았다. 승용디젤엔진 시스템을 위한 커먼레일 압력제어 알고리즘은 MeUn 과 PCV 의 동작이 레일압력에 미치는 영향이 제어알고리즘 설계에 고려되어야 한다.

따라서 이번 연구에서는 커먼레일 압력제어 알고리즘 개발에 quantitative feedback theory(QFT) 기법을 적용하여 이러한 어려움을 해결하고자 한다. QFT 는 플랜트의 불확실성(Uncertainty)을 반영한 강인 제어알고리즘 설계기법 중 하나로, 고전제어 기법을 기반으로 하여 설계과정이 쉽고, 정량적 요구사항 충족여부를 제어알고리즘 설계단계에서 쉽게 평가할 수 있다. 이번 연구에서는 MeUn 이 커먼레일 압력에 미치는 영향을 플랜트의 불확실 성으로 정의하였고, 이러한 불확실성에 강건하 도록 PCV 를 사용한 레일압력 제어알고리즘이 설계되었다. 또한 연료분사에 의한 레일압력 맥동을

줄이기 위하여 외란제거성능을 정량적인 요구 사항으로 정의하였고, 이 요구사항에 기반하여 제 어알고리즘이 설계 되었다.

이 논문의 구조는 다음과 같다. 2 장에서는 디젤 엔진의 커먼레일 시스템에 대하여 설명하고 3 장에서는 플랜트 모델 정의와 QFT 기법을 이용하여 보상기(Compensator)와 필터(Prefilter)를 설계하는 방법에 대해서 소개한다. 4 장에서는 QFT 기법을 이용하여 설계한 제어기를 엔진동력 계 실험을 통하여 성능을 검증하고, 5 장에서는 요약 및 결론과 함께 끝을 맺는다.

2. 시스템 특성 분석

이 연구에서 사용할 엔진은 2.2L 커먼레일 직분식 승용 디젤엔진이며, 연료 시스템의 개략도는 Fig. 1 과 같이 나타낸다.

고압펌프는 엔진의 구동축과 연결되어 동작하고, 피스톤의 왕복운동을 통해서 연료를 커먼레일로 공급한다. 커먼레일 압력제어는 고압펌프 전단에 위치한 MeUn 과 커먼레일에 위치한 PCV 를 통하여 이루어진다. 이들 밸브는 각각 커먼레일의 연료 유입량과 배출량을 조절한다. 커먼레일 압력제어기는 압력센서를 통해 레일압력을 피드백 받고, PWM 신호로 두 밸브의 리프트를 조절하여 압력 제어를 수행한다.

3. QFT 기법을 이용한 커먼레일 압력 제어기 설계

3.1 QFT 설계 기법

QFT 제어 알고리즘의 구조는 Fig. 2와 같이 구성된다. 불확실성이 반영된 플랜트($G(s)$)는 선형모델의 집합으로 표현되고, 이러한 플랜트를

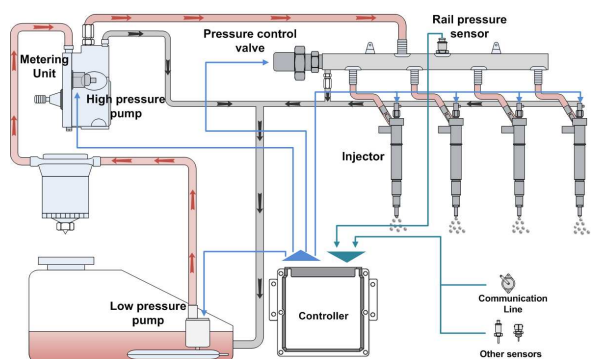


Fig. 1 Overview of common rail fuel injection system

제어하기 위하여 필터($F(s)$)와 보상기($C(s)$)가 설계된다. 필터는 페루프 응답성능 향상을 위하여 기준입력(reference value, $R(s)$)을 필터링하고, 보상기는 플랜트 앞에 위치하여 기준입력을 추종하기 위한 제어입력(control input, $U(s)$)을 계산한다.

QFT 기법은 5 단계로 진행된다. 첫 번째 단계는 모델링 작업을 통해 모델의 구조와 파라미터 범위를 선정하는 과정이다. 두 번째 단계에서는 추종성능(Tracking), 안전성능(Stability)과 같은 제어 시스템의 요구사항을 정량적으로 선정한다. 이 단계에서 플랜트 모델과 선정된 제어시스템 요구사항을 Nichols 도표(Nichols chart)에 형상화 한다. 세 번째 단계는 보상기 설계 과정으로, Nichols 도표에 도시한 요구사항을 만족할 수 있도록 Loop shaping 과정을 통해 보상기를 설계한다. 마지막으로 페루프 응답이 요구사항에 만족할 수 있도록 필터를 추가하여 제어기 설계를 마무리하게 된다. 이번 연구에서는 MATLAB 기반의 QFT 설계 도구인 QFT control toolbox (QFCT)를 활용하여 제어기 설계를 진행하였다.^(10,11)

3.2 플랜트 모델 및 템플릿 설계

3.2.1 플랜트 동작 주파수 분석

커먼레일 압력제어시스템의 동작 주파수를 분석하여 제어알고리즘 설계를 위한 관심 주파수를 선정하였다. QFT 기법은 주파수 응답에 기반하여 제어를 설계하기 때문에 관심 주파수 영역을 선정하는 일은 매우 중요하다. 따라서 주파수 분석을 위해 양산 디젤엔진제어시스템을 사용하였고, 표준 주행 사이클(New European driving cycle, NEDC) 실험이 수행되었다. 실험결과 Fig. 3과 같이 커먼레일 압력의 에너지는 대부분 1Hz 이하의 주파수 영역에 집중되어 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 이 실험 결과를 토대로 식 (1)과 같이 관심주파수 영역 내에서 7 개의 주파수를 선정 하였다.

$$\omega = 2\pi[f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6 \ f_7] = 2\pi[0.01 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.5 \ 0.8 \ 1] \quad (1)$$

3.2.2 플랜트 모델 정의

이 논문의 플랜트 모델은 식 (2)에서 표현한 것과 같이 1 차 전달함수로 근사화하여 정의하였다. 입력과 출력은 각각 PCV 구동전류와 커먼레일 압력으로 정의하였고, 모델링을 위한 실험은 엔진회전속도 1000rpm, 연료 분사량 10mg/str 에서 수행되었다.

Table 1 Operating range of MeUn and PCV

Actuator	Operating range(mA)
MeUn	400~1200
PCV	550~850

Table 2 Parameter uncertainty specification

Parameter	Minimum	Maximum
K	1.762	1.884
τ	0.1076	0.1404

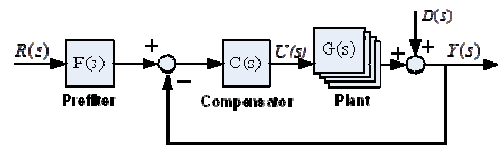


Fig. 2 Two DOF feedback structure of QFT

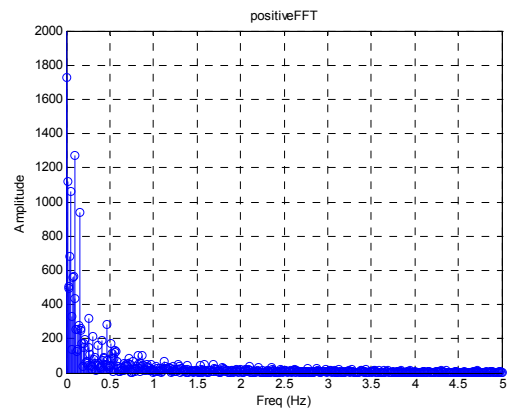


Fig. 3 Frequency spectrum of rail pressure over the NEDC

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2)$$

where, K : static gain, τ : time constant

식 (2)의 레일압력 모델은 PCV 구동전류에 따른 레일압력의 거동을 묘사하지만, MeUn 동작에 따른 레일압력의 영향이 포함되어 있지 않다. 이러한 영향을 포함하기 위하여 MeUn 의 영향은 모델의 파라미터 불확실성으로 정의하였고, MeUn 동작에 따른 각 파라미터의 변화 범위가 실험을 통하여 분석되었다. 이 실험에서 MeUn 과 PCV 는 Table 1과 같은 전류영역에서 구동되었고, 이 영역에서 모델 파라미터는 Table 2 와 같이 변화하였다.

3.2.3 Pseudo continuous time 기법

제어기 구현과정에서 발생하는 이산화에 의한

영향을 고려하기 위하여 pseudo continuous time(PCT) 기법이 사용되었다. 이 기법은 sampler 와 zero-order holder 와 같은 이산화에 의한 영향을 연속시간 도메인에서 근사화시키는 방법이다. 이번 연구에서 설계하는 레일압력 압력 제어기는 0.005 초의 sampling time 을 가지고 있으며, 이 기법을 적용함으로써 식 (3)과 같은 형태로 모델을 확장했다.⁽¹²⁾

$$G_{PCT}(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot \frac{2}{T_s s + 2} \quad (3)$$

$T_s = 5 \text{ msec (Sampling period)}$

3.2.4 Nichols 선도 템플릿

Table 2에서 선정한 파라미터 범위와 식 (3)에서 정의한 모델을 이용하여 Fig. 4와 같이 Nichols 도표에 도시하였다. 이 그림은 식 (1)에서 선정한 관심 주파수 영역에서, 파라미터 변화에 따른 플랜트의 응답 궤적을 나타내고 있다. 이러한 응답궤적을 템플릿 (Template)이라고 하며, 이 연구에서는 각 주파수에서 9 개의 응답궤적이 도시되었다. 보상기 설계에 사용하기 위한 공칭 플랜트는 9 개의 플랜트 응답 중에서 하나로 결정되고, 이번 연구에서 사용된 공칭 플랜트의 파라미터 값은 식 (4)와 같다.

$$K = 1.762, \tau = 0.1404 \quad (4)$$

3.3 제어 시스템 사양 선정

커먼레일압력 제어시스템은 목표 레일압력을 빠르게 추종할 수 있어야 하고, 모든 운전조건에서 안정적으로 동작할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라, 연료분사와 같은 외란이 레일압력에 미치는 영향을 최소화할 수 있어야 한다. 따라서 제어시스템의 사양으로 추종성, 안정성, 외란제거능이 선정되었다.

3.3.1 추종성(Reference tracking)

목표 값 추종 성능에 대한 사양은 식 (5)와 같이 계단응답의 상한(T_{RU})과 하한(T_{RL}) 경계조건으로 구성된다. 이 시스템의 상한경계조건은 0.14 초의 상승시간(Rise time)과 15%의 최대 오버슈트를 갖고, 하한조건은 0.3 초의 상승시간과 0.03 초의 지연시간(Delay time)을 가지도록 설계되었으며 식 (6), (7)과 같은 형태의 전달함수로 표현하였다.

$$T_{R,L} < \left| \frac{F(j\omega)C(j\omega)G(j\omega)}{1+C(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq T_{R,U} \quad (5)$$

$$T_{RU}(s) = \frac{s+144}{s^2+14.19s+144} \quad (6)$$

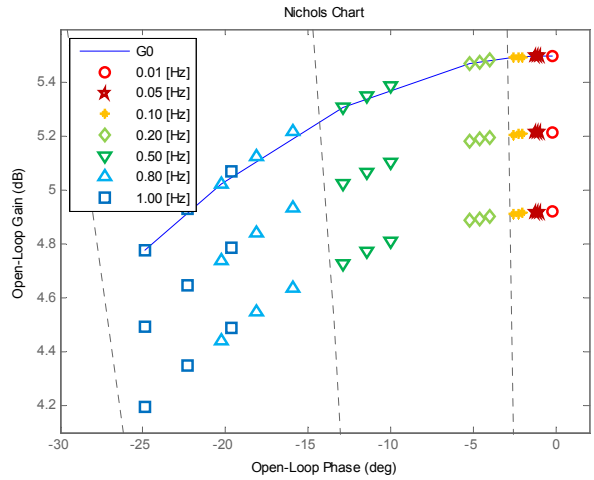


Fig. 4 Plant template on Nichols chart

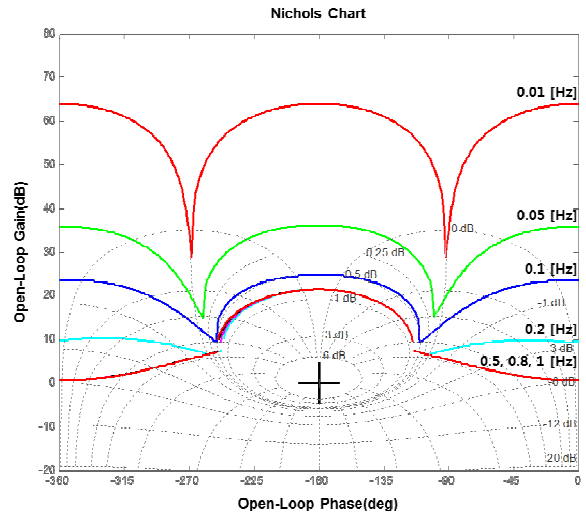


Fig. 5 Specification bounds on Nichols chart

$$T_{RL}(s) = \frac{5600}{s^3 + 64s^2 + 1100s + 5600} e^{-0.03} \quad (7)$$

3.3.2 안정성(Stability)

안정성은 식 (8)과 같이 complementary sensitivity 전 달함수의 전체 주파수 영역에 대한 최대 응답 크기를 제한함으로써 달성됩니다. 이번 연구에서는 최대 15%의 오버슈트를 의미하는 1.15 를 최대 응답크기 (M_p)로 제한함으로써 달성될 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\left| \frac{C(j\omega)G(j\omega)}{1+C(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq M_p = 1.15, \forall \omega \in [0, \infty) \quad (8)$$

이와 같이 선정된 최대 오버슈트 크기(M_p)를

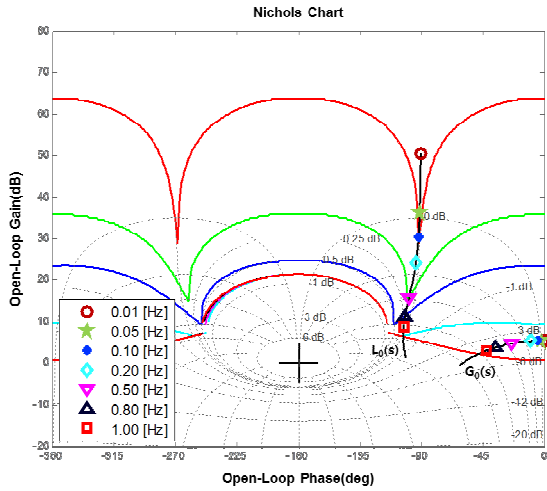


Fig. 6 Design of compensator on Nichols chart

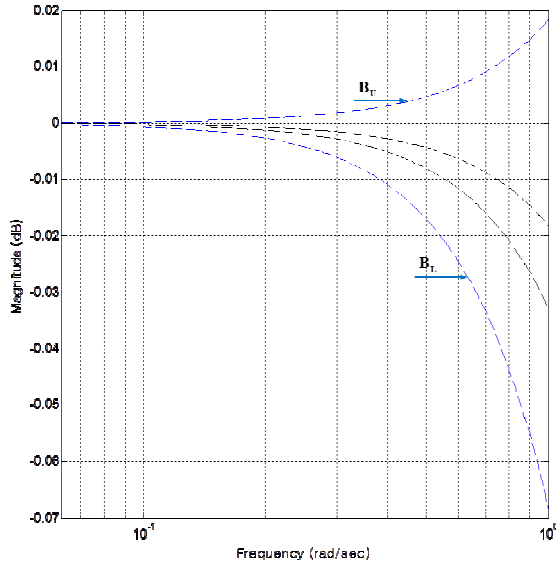


Fig. 7 Closed-loop response with the prefilter on Bode plot

maximum peak criteria^(10,13)에 적용함으로써, 이득여유(Gain margin, GM)와 위상여유(Phase margin, PM)를 식 (9)와 같이 계산할 수 있으며, 이렇게 계산된 이득여유와 위상여유는 식 (10)과 같다.

$$GM = 20 \log \left(1 + \frac{1}{M_p} \right), PM = 2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2 \cdot M_p} \right) \quad (9)$$

$$GM = 5.617 \text{ dB}, PM = 54.07^\circ \quad (10)$$

3.3.3 외란제거성능(Disturbance Rejection)

외란제거성능을 추가하기 위해 간단한 형태의 외란제거 모델을 이용하였다. 모델은 외란 입력에

대한 출력의 관계로 정의하였으며, 주파수 영역에서의 크기를 제한함으로써 요구사항을 선정하였다. 이러한 요구사항을 반영하여 보상기를 설계함으로써 관심주파수 영역 내에서의 외란 입력은 일정 크기 이하로 제한할 수 있었다. 이번 연구에서는 인젝터의 불연속적인 동작으로 발생하는 외부 외란(External Disturbance)을 제거하기 위해서 식 (11)과 같이 외란에 대한 출력의 크기(δ)를 설계하여 외란 제거성능의 사양을 결정하였다.

$$\frac{Y(j\omega)}{D(j\omega)} = \left| \frac{1}{1 + C(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta = 0.5, \forall \omega \in [0, \infty) \quad (11)$$

3.4 보상기(Compensator) 설계

보상기를 설계하기 위해서는 제어시스템 사양을 Nichols 도표에 도시하는 작업을 진행해야 한다. Fig. 5는 식 (5), (8), (11)에서 결정된 요구사항을 주파수 영역에 도시한 그래프로서, 각 관심 주파수마다 요구사항을 실선으로 표현하고 있다. 도시된 실선의 위쪽영역에 개루프 응답($L_0(s) = C(s)G_0(s)$)이 위치할 때 요구사항을 만족하며, 이러한 경계조건 내에 들어올 수 있도록 보상기가 설계되어야 한다. 보상기의 구조는 구현의 편리함과 직관적인 이해도를 높이기 위하여 식 (12)와 같은 PID로 결정하였다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (12)$$

보상기가 포함되지 않은 공칭 플랜트의 응답($G_0(s)$)은 Fig. 6과 같이 경계조건(Bounds)을 벗어나 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Loop shaping 과정을 통하여 보상기를 설계함으로써 개루프 전달함수 응답($L_0(s) = C(s)G_0(s)$)이 Fig. 6과 같이 경계조건을 만족하도록 하였다.

$$C(s) = 0.2672 + \frac{8}{s} + 1.104 \times 10^{-3} s \quad (13)$$

3.5 필터(Prefilter) 설계

필터는 제어기의 페루프 응답이 식 (4)의 추종성능을 만족하도록 기준입력을 필터링 한다. Fig. 7은 설계결과를 도시하고 있는 bode 선도로써, 시스템 사양으로 결정한 추종성능(T_{RU}, T_{RL})을 바탕으로 경계조건(B_U, B_L)을 도시하게 된다. 설계한 필터 식 (14)를 추가함으로써 페루프 응답이 경계조건 내에 위치하게 된다.

$$F(s) = \frac{0.03086s + 1}{0.00182s^2 + 0.1107s + 1} \quad (14)$$

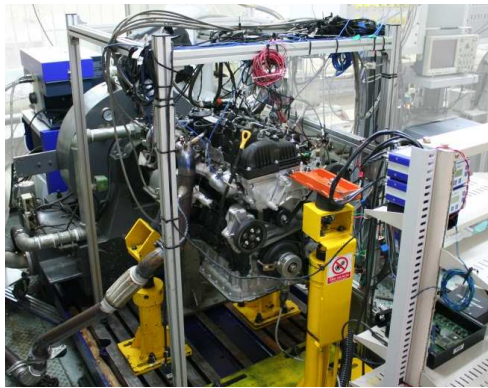


Fig. 8 CRDI diesel engine test bench

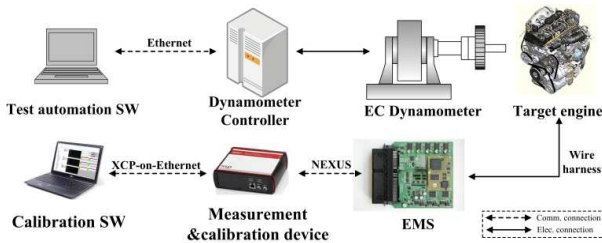


Fig. 9 Diagram of engine experiment environment

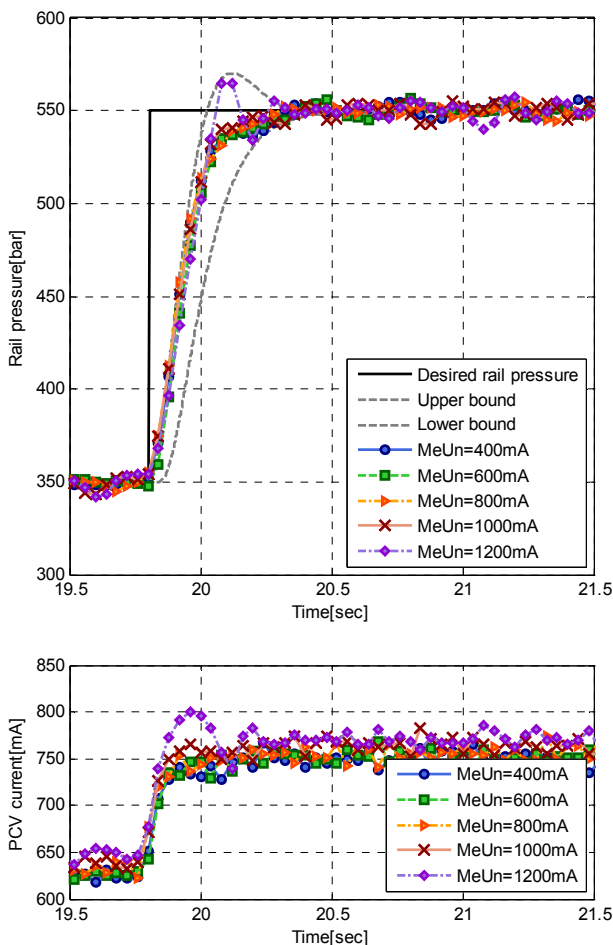


Fig. 10 The validation results of tracking performance

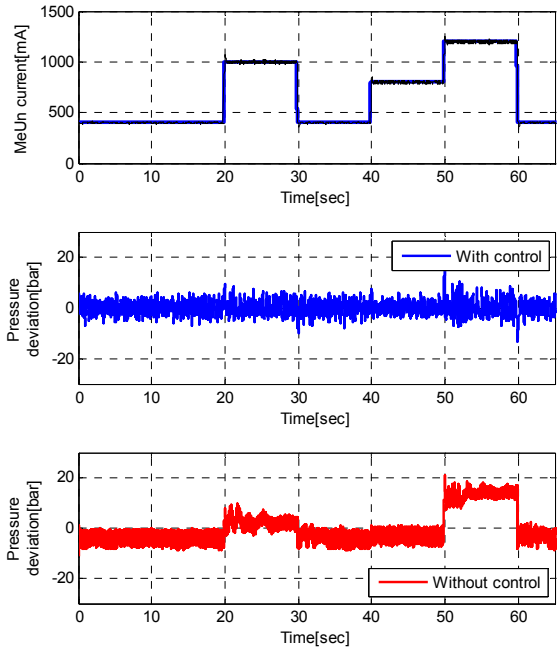


Fig. 11 The rail pressure control result when the MeUn current is abruptly changed

4. 실험 검증

4.1 실험 환경

QFT 기법을 이용하여 설계한 레일압력 제어 알와 같이 실험환경을 구성하였다. 대상엔진은 2.2L 직렬 4 기통 디젤 엔진이며, 동력제어시스템과 연결되어 원하는 회전속도와 부하조건에서 실험이 가능하다. 설계한 커먼레일압력 제어알고리즘은 자체적으로 개발한 32bit 프로세서 기반의 엔진제어시스템(engine management system, EMS)을 이용하여 구현하였으며, 실시간으로 연산결과를 측정하기 위해 XCP 기반의 calibration 환경이 구성되었다. (14, 15)

4.2 실험결과

제시한 제어기의 목표 추종 성능을 검증하기 위해서 엔진의 회전속도를 1000 rpm, 연료 분사량을 10 mg/str 으로 고정한 상태에서 목표 연료압력을 350 bar 에서 550 bar 로 변경하였다. 이때, Fig. 10와 같이 MeUn 의 동작 전류는 400, 600, 800, 1000, 1200 mA 로 고정한 상태에서 실험을 진행하였 으며, 상한(5), 하한(6) 경계조건을 함께 도시하여 요구사항 충족여부를 판단하였다. 측정된 레일압력은 목표값을 경계 조건 내에서 추종하였으며, 평균적으로 0.2 초의 상승시간과 5 %의 최대 오버슈트를 가지는 것으로 확인되었다.

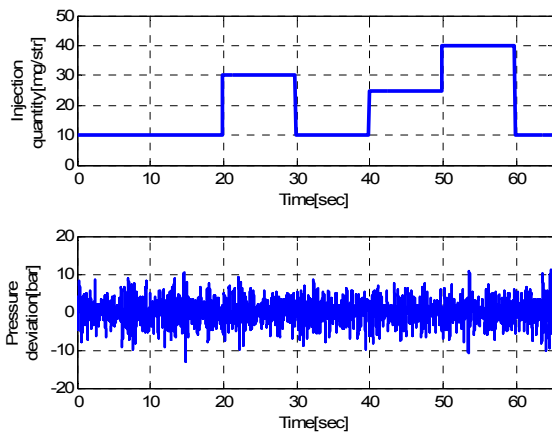


Fig. 12 The rail pressure control result for injection disturbance rejection

MeUn 전류가 급격하게 변화했을 때 레일압력 제어기의 성능을 검증하기 위해서 Fig. 10과 같이 정상상태(엔진회전속도 1000 rpm, 연료분사량 10 mg/str)에서 MeUn 의 구동 전류를 변화시켰다. 제안된 알고리즘이 적용되었을 때, 급격한 MeUn 전류변화에도 레일압력의 편차는 20 bar 이내를 유지하였다.

또한, 연료 분사량 변화가 레일 압력에 미치는 영향을 확인하기 위해서 동일한 운전조건에서 Fig. 12 와 같이 연료 분사량을 변화시켰다. 이 실험결과로부터 레일압력의 편차는 20 bar 이내있음을 확인할 수 있었으며, 연료분사가 레일압력에 미치는 영향이 상쇄 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 승용디젤엔진을 위한 커먼레일압력 제어알고리즘을 설계하였다. 강건한 제어알고리즘 설계를 위해서 MeUn 이 레일압력에 미치는 영향을 플랜트의 불확실성으로 모델링 하였고, QFT 기법을 적용하여 이러한 불확실성에도 요구사항을 충족할 수 있는 제어알고리즘을 설계하였다. 제안된 제어기의 요구사항으로 목표레일압력 추종성능, 안정성능이 정량적으로 정의되었고, 연료분사에 의한 레일압력 맥동을 줄이기 위하여 외란제거성능을 정의하였다. 설계된 제어알고리즘은 엔진동력계 실험을 통하여 제어성능이 검증되었고, MeUn 구동전류 조건에 상관없이 상승시간(Rise Time)은 0.2 초 이내였고, 오버슈트는(Overshoot)는 5 % 이내였다. 따라서 QFT 기법을 이용한 레일압력 제어알고리즘은 구현의 편리함과 직관적인 이해도를 높일 수 있는 PID 구조를 사용하면서도, 강인한 제어성능을 확보하였다. 또한, QFT 기법을 실제 산업 현장에 적용할 경우 모델 설계 외에는 추가적인 실험 없이

제어기의 초기 설계가 이루어질 수 있기 때문에 개발 비용 및 시간을 크게 단축시킬 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 지식경제부 산업원천기술개발 사업(No. 10039673, No. 10042633)과 에너지자원기술개발사업(2006ETR11P091C)의 일환으로 수행된 연구 결과 이며, 2011 년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었고(No. 2011-0017495), 교육부의 BK21 플러스 사업(22A2013000 0045)의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Gerhard Stumpp, M. R., 1996, "Common Rail - An Attractive Fuel Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines," *International Congress & Exposition*, Detroit, Michigan, United States.
- (2) Joachim Schommers, F. D., Stotz, M., Peters, A., Ellwanger, S., Koyanagi, K. and Gildein, H., 2000, "Potential of Common Rail Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines," *SAE 2000 World Congress*, Detroit, Michigan, United States
- (3) Liu, Y., Zhang, Y. T., Tian, H. and Qin, J., 2008, "Research and Applications for Control Strategy of High-Pressure Common Rail Injection System in Diesel Engine," Harbin.
- (4) Balluchi, A., Bicchi, A., Mazzi, E., Vincentelli, A. and Serra, G., 2006, "Hybrid Modelling and Control of the Common Rail Injection System," Vol. 3927, pp. 79~92.
- (5) Lino, P., Maione, B. and Rizzo, A., 2007, "Nonlinear Modelling and Control of a Common Rail Injection System for Diesel Engines," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31, pp. 1770-1784.
- (6) Hong, S., Shin, J. and Sunwoo, M. 2012, "Common Rail Pressure Controller for Diesel Engines using an Empirical Model," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, Korea.
- (7) di Gaeta, A., Fiengo, G., Palladino, A. and Giglio, V., 2009, "A Control Oriented Model of a Common-Rail System for Gasoline Direct Injection Engine," in *Decision and Control, 2009 Held Jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, pp. 6614-6619.
- (8) di Gaeta, A., Fiengo, G., Palladino, A. and Giglio, V., 2011, "Design and Experimental Validation of a Model-Based Injection Pressure Controller in a Common Rail System for GDI Engine," in *American Control Conference (ACC)*, pp. 5273~5278.
- (9) di Gaeta, A., Montanaro, U., Fiengo, G., Palladino, A. and Giglio, V., 2012, "A model-Based Gain Scheduling Approach for Controlling the Common-Rail System for GDI Engines," *International Journal of Control*, Vol. 85, pp. 419~436.

- (10) Garcia-Sanz, M. and Houpis, C. H., 2012, *Wind Energy Systems* vol. 1: CRC press, pp. 471~480.
- (11) Ogata, K., 2010, *Modern Control Engineering*: PEARSON, 455~463.
- (12) Houpis, C. H., Rasmussen, S. J. and Garcia-Sanz, M., 2006, *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications* Vol. 20: CRC Press, pp. 33~346.
- (13) Sigurd, S. and Ian, P., 1996, *Multivariable Feedback Control*, 1st ed.: JohnWiley&Sons Inc, pp. 33~35.
- (14) Park, I., Lee, W. and Sunwoo, M., 2012, "Application Software Modeling and Integration Methodology using AUTOSAR-ready Light Software Architecture," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 20, pp. 117~125.
- (15) Lee, K., Park, I., Sunwoo, M. and Lee, W., 2013, "AUTOSAR-ready Light Software Architecture for Automotive Embedded Control Systems," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 21, pp. 68~77.