

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.9.817>ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

연비를 고려한 차량 및 적응형 순항 제어 파라미터의 크리깅 대체모델 기반 최적설계[§]

김한수* · 송유호* · 이승하* · 허건수* · 이태희*†

* 한양대학교 미래자동차공학과

Kriging Surrogate Model-based Design Optimization of Vehicle and Adaptive Cruise Control Parameters Considering Fuel Efficiency

Hansu Kim^{*}, Yuhoo Song^{*}, Seungha Lee^{*}, Kunsoo Huh^{*} and Tae Hee Lee^{*†}^{*} Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.

(Received January 19, 2017 ; Revised March 23, 2017 ; Accepted April 24, 2017)

Key Words: Adaptive Cruise Control(적응형 순항 제어), Fuel Efficiency(연비), Kriging Surrogate Model(크리깅 대체모델), Design of Experiment(실험계획법), Analysis of Variance(분산분석)

초록: 기존에는 연비를 고려한 적응형 순항 제어 알고리즘 개발과 연비 등의 성능을 고려한 적응형 순항 제어 시스템 개발 연구가 수행되었지만, 제어 파라미터를 포함한 차량 파라미터의 적응형 순항 제어에 대한 최적설계 연구는 미흡한 편이다. 이에 본 논문에서는 연비, 추종성, 승차감, 안전거리를 고려한 차량 및 제어 파라미터 최적설계를 수행하고자 한다. 이를 위해 차량 거동의 성능 측정 방법을 제안하고 적응형 순항 제어 시스템을 구축하였다. 그리고 성능에 주요한 영향을 미치는 차량 파라미터를 선별하여 이를 토대로 순차적 실험계획을 통해 크리깅 대체모델을 구축하였고, 연비를 최대화하며 목표 성능을 만족하는 크리깅 대체모델 기반 최적설계를 수행하였다.

Abstract: In the past, research has been conducted on the development of an adaptive cruise control algorithm considering fuel efficiency, and an adaptive cruise control system considering fuel efficiency have been developed. However, research on optimizing vehicle and adaptive cruise control parameters in order to maximize performances is insufficient. In this study, the design optimization of vehicle and control parameters considering fuel efficiency, trackability, ride comfort and safe distance is performed. This paper proposes performance measures of vehicle behavior and develops an adaptive cruise control system. In addition, based on the screening of vehicle parameters that significantly influence performances, kriging surrogate models are constructed through a sequential design of experiment, and kriging surrogate model-based design optimization is performed to maximize fuel efficiency and satisfy target performances.

1. 서론

최근 자동차업계에서는 자율주행자동차에 대한 관심이 증가하고 있으며, 자율주행 이전 단계라고 할 수 있는 운전자보조시스템(advanced driver assist system, ADAS)에 대한 연구가 활발히 진행되

고 있다. 운전자보조시스템에는 적응형 순항 제어(adaptive cruise control, ACC), 조향 보조(lane keeping assist, LKA), 긴급 제동(autonomous emergency braking, AEB) 등이 있으며, 특히 적응형 순항 제어에 대한 연구와 실차 적용이 활발히 이루어져 왔다.

기존에는 연비를 고려한 적응형 순항 제어 알고리즘 개발⁽¹⁾과 연비, 승차감 등의 성능을 고려한 적응형 순항 제어 시스템 개발 연구⁽²⁾가 수행되었다. 그리고 적응형 순항 제어와 관련된 제어 파라미터에 대하여 연비, 승차감, 추종성, 안전거리를

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016.12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, thlee@hanyang.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

고려한 제어 파라미터 최적설계 연구⁽³⁾를 수행하였다. 하지만 제어 파라미터의 최적설계를 통해 성능을 향상시키기에는 한계가 있었기 때문에, 차량 파라미터를 포함하여 최적설계를 수행할 필요가 있었다.

이에 본 논문에서는 연비, 승차감, 추종성, 안전거리 등의 성능을 고려한 차량 및 제어 파라미터 최적설계를 수행하고자 한다. 2장에서는 차량 거동의 성능 측정 방법을 제안하고 적응형 순항 제어 시스템을 구축한 내용과 구축한 적응형 순항 제어 시스템을 테스트하기 위한 시뮬레이션 시나리오를 설명하고자 한다. 3장에서는 최적설계를 수행하기에 앞서 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 이용하여 성능에 주요한 영향을 미치는 차량 파라미터를 분석하였다. 그리고 최적화 과정에서 많은 횟수의 시뮬레이션 모델 해석이 필요하므로 크리깅 대체모델(kriging surrogate model)을 도입하여 해석시간을 줄였다. 또한 크리깅 대체모델의 정확성을 높이기 위해 순차적 실험계획을 수행하였고 구축한 크리깅 대체모델의 정확성을 평가하였다. 마지막으로 최적설계 문제 정식화를 토대로 크리깅 대체모델 기반 최적설계를 수행하였다.

2. 적응형 순항 제어 시스템

2.1 차량 거동의 성능 측정

적응형 순항 제어 시스템을 평가하기 위해 차량 거동의 성능을 측정하였다. 첫 번째, 자동차 산업에서 중요한 성능인 연비(fuel efficiency, η_{fuel})에 대하여 식 (1)과 같이 구성하였다. 여기서 d_{total} 은 전체 주행거리, c_{fuel} 은 연료 소모량으로 연비는 연료 소모량 대비 이동거리를 의미한다.

두 번째, 추종성(trackability, TR)은 식 (2)와 같이 구성하였다. 여기서 d_{rel} 은 전방차량과의 상대거리, T 는 전체 시뮬레이션 시간이다. 추종성은 전체 시뮬레이션 시간 동안 전방차량과의 상대거리 평균에 역수를 취하였는데, 상대거리가 작아질수록 추종성이 좋아지는 것을 의미한다. 추종성을 측정한 이유는 전방차량과의 거리가 사람이 직접 운전하는 것보다 적응형 순항 제어가 장착된 차량이 먼 특징이 있기 때문에 전방차량을 어느 정도로 추종하고 있는지 측정하기 위함이다.

세 번째, 승차감(ride comfort, RC)은 식 (3)과 같이 구성하였다. 여기서 $\ddot{\theta}_{pitch}$ 는 피치 각 가속도이다. 승차감은 전체 시뮬레이션 시간 동안 피치 각 가속도 분산의 역수를 취하였는데, 피치 각가속도

의 분산이 작아질수록 승차감이 좋아지는 것을 의미한다. 승차감 성능으로 피치 각가속도의 분산을 측정한 이유는 적응형 순항 제어가 장착된 차량이 급가감속을 할 때 차량의 피치(pitch)거동이 급격히 발생하여 운전자에게 불쾌감을 줄 수 있기 때문에 피치 거동의 급격한 변화를 측정하기 위함이다.

네 번째, 안전거리(safe distance, d_{safe})는 식 (4)와 같이 구성하였다. 안전거리는 전체 시뮬레이션 시간 동안 전방차량과 상대거리의 최소값을 취하였는데, 안전거리가 커질수록 안전하다는 것을 의미한다. 안전거리는 적응형 순항 제어가 장착된 차량의 위험성을 측정하기 위함이다.

$$\eta_{fuel} = \frac{d_{total}}{\sum_{t=0}^T c_{fuel}(t)} \quad (1)$$

$$TR = \frac{1}{\text{mean}(d_{rel}(t))}, t \in [0, T] \quad (2)$$

$$RC = \frac{1}{\text{var}(\ddot{\theta}_{pitch}(t))}, t \in [0, T] \quad (3)$$

$$d_{safe} = \min(d_{rel}(t)), t \in [0, T] \quad (4)$$

2.2 적응형 순항 제어 시스템 구축

적응형 순항 제어 정책으로는 일정 공간 정책(constant spacing policy)과 일정 시간 간격 정책(constant time-gap policy, CTG policy) 등이 존재한다. 일정 공간 정책은 Fig. 1에서 목표길이 L_{des} 를 일정하게 유지하는 전통적인 방법으로써 시스템을 간단하게 구현할 수 있다. 하지만 적응형 순항 제어가 적용된 추종차량(subject vehicle)이 여러 대가 주행 중일 때 안정성(string stability)이 보장되지 않는 단점이 존재한다. 일정 시간 간격 정책의 경우 L_{des} 는 식 (5)와 같이 추종차량 속도에 따라 변한다.

$$L_{des} = l_{i-1} + h\dot{x}_i \quad (5)$$

여기서 l 은 차량길이, h 는 상수이다. 즉, 추종차량의 속도가 증가할수록 목표 길이가 증가하며 추종차량의 속도가 감소할수록 목표 길이는 감소한다.

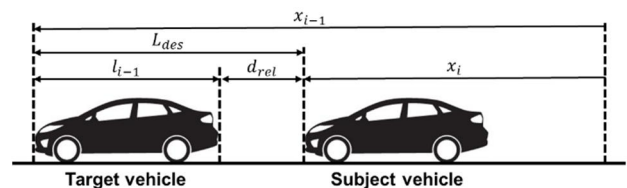


Fig. 1 Schematic of ACC

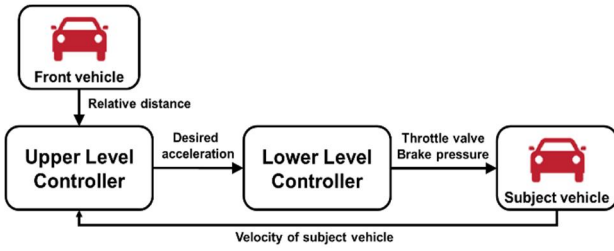


Fig. 2 Flowchart of ACC system

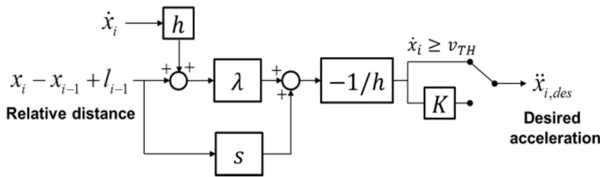


Fig. 3 Block diagram of upper level controller

그리고 식 (5)에서 h 가 식 (6)을 만족한다면 안정성을 보장할 수 있다.⁽⁴⁾

$$h \geq 2\tau \tag{6}$$

여기서 τ 는 시상수(time constant)이다. 본 논문에서는 안정성을 보장할 수 있는 일정 공간 정책을 사용하여 종 방향 적응형 순항 제어 시스템을 구성하였으며, 이에 대한 흐름도는 Fig. 2와 같다. 상위 제어기는 전방차량과의 상대거리와 추종차량의 속도를 입력 받으면, 목표 가속도가 출력되고 이는 식 (7)과 같다.

$$\ddot{x}_{i,des} = -\frac{1}{h}(\dot{\varepsilon}_i + \lambda\delta_i) \tag{7}$$

여기서 ε 는 앞차와의 상대거리, λ 는 상수, δ 는 거리 오차이다. 상위 제어기는 식 (5)와 식 (7)을 고려하여 블록 다이어그램을 구성하였으며, 이는 Fig. 3과 같다. 여기서 v_{TH} 는 임계속도(threshold velocity)를 의미하며 추종차량의 속도가 v_{TH} 보다 크거나 같을 때는 식 (7)의 목표 가속도가 출력되도록 하였다. 하지만 추종차량의 속도가 v_{TH} 보다 작으면 목표 가속도를 K 만큼 곱하여 추종성을 높이고 정지상태 일 때 안정성을 증가시키는 역할을 한다.

하위 제어기는 출력된 목표 가속도가 입력되면 종방향 차량 동역학 해석과 엔진 맵을 통하여 목표 가속도에 도달하기 위한 스로틀 밸브 양과 브레이크 압력이 출력되어 추종차량을 제어하도록 구성하였다.

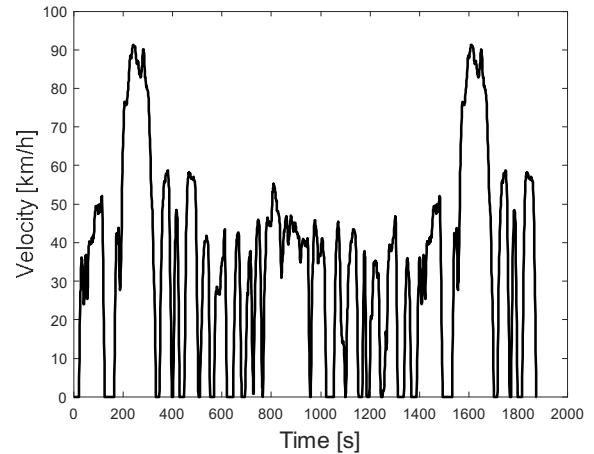


Fig. 4 Driving cycle of FTP-75



Fig. 5 Simulation scenario of ACC

2.3 시뮬레이션 시나리오

적응형 순항 제어 시스템을 테스트하기 위한 선행 차량의 주행 사이클은 FTP-75(Federal Test Procedure)이고 속도 프로파일⁽⁵⁾은 Fig. 4와 같다. FTP-75 주행 사이클은 미 환경 보호국(US environmental protection agency, EPA)에서 도심 주행을 하는 승용차 대상으로 연비를 측정하기 위해 실시하고 있는 실험 절차로 넓은 범위의 속도 분포를 가지고 있다. 따라서 본 논문에서 연비, 추종성, 승차감, 안전거리 등의 성능을 측정하는 데 FTP-75 주행 사이클이 적합하다고 판단하였다.

적응형 순항 제어 시스템은 MATLAB R2016b의 Simulink와 차량 동역학 소프트웨어인 Mechanical Simulation사의 CarSim 8.2.1을 이용하여 구축하였다. Simulink에서는 CarSim으로부터 거리, 속도 등의 정보를 받아 추종차량들을 제어하는 스로틀 밸브 양과 브레이크 압력을 출력하여 CarSim에 입력한다. CarSim에서는 Simulink 입력을 받아 차량 동역학 해석을 통해 다시 Simulink로 입력하는 흐름으로 구성하였다.

CarSim을 이용하여 Fig. 5와 같이 선행차량 1대와 추종차량 2대로 구성을 하였다. 차량들은 CarSim에서 기본으로 제공하고 있는 E-class Sedan을 사용하였으며, 1회 시뮬레이션 해석 시간은 약 20분 정도 소요되었다.

위에서 구축한 적응형 순항 제어 시스템에는 h, λ, K, v_{TH} 등의 제어 파라미터가 존재하는데, 그

Table 1 Descriptions of candidate vehicle parameters

Parameter	Description	Current value	Unit	
Vehicle	m_s	Sprung mass	1650	kg
	m_{us}	Unsprung mass	90	kg
	l_f	Longitudinal distance between center of gravity and front axle	1.400	m
	l_r	Longitudinal distance between center of gravity and rear axle	1.650	m
	l_w	Lateral distance between center of gravity and wheel	0.800	m
	h_{CG}	Vertical distance between center of gravity and wheel	0.220	m
	r_{eff}	Effective rolling radius	0.353	m
	k_{sf}	Front suspension spring stiffness	34000	N/m
	k_{sr}	Rear suspension spring stiffness	46000	N/m
	k_t	Tire spring stiffness	278000	N/m

Table 2 ANOVA result of vehicle parameters

Parameter	Performance				
	η_{fuel}	TR	RC	d_{safe}	
Vehicle	m_s	O	X	O	O
	m_{us}	X	X	X	X
	l_f	X	X	X	X
	l_r	X	X	O	X
	l_w	X	X	X	X
	h_{CG}	X	X	O	X
	r_{eff}	O	O	O	O
	k_{sf}	X	X	X	X
	k_{sr}	X	X	X	X
	k_t	X	X	O	X

값은 시행착오를 통하여 도출된 값으로 성능을 향상시킬 수 있는 최적의 값이 존재할 것으로 예상 되어 3장에서 최적설계를 수행하였다. 하지만 최적화를 수행하면서 많은 횟수의 시뮬레이션 해석이 필요하여 시간이 매우 많이 소요가 되기 때문에 수학적 모델인 크리깅 대체모델을 도입하여 최적설계를 수행하고자 한다.

3. 크리깅 대체모델기반 최적설계

3.1 주요 차량 파라미터 선별

차량 파라미터 개수가 증가할수록 최적화 시간이 증가하며 수렴성이 감소하기 때문에 성능에 주요한 영향을 미치는 차량 파라미터를 선별하였다. 주요 차량 파라미터를 선별하는 방법으로는 분산 분석을 사용하였으며 후보 차량 파라미터는 Table 1과 같다.

최소한의 실험점을 사용하여 응답에 미치는 영향도를 분석하기 위해 2수준 직교배열표(2-level orthogonal array)를 사용하였다. 최적설계를 수행할

때 파라미터 범위는 현재 값 기준 $\pm 10\%$ 로 설정하여 2장에서 설명한 성능들에 대해 분산분석을 수행하였으며 유의수준(significance level)은 0.01로 설정하였다. 분산분석을 수행한 결과 각 성능에 유의한 영향을 미치는 차량 파라미터는 Table 2와 같다.

연비에 주요한 영향을 미치는 차량 파라미터는 2개, 추종성은 1개, 승차감은 5개, 안전거리는 2개로 분석되었다. 최종적으로 최적설계에 사용할 차량 파라미터는 5개로 각 성능에 1번이라도 주요한 영향을 미치는 차량 파라미터로 분석된 경우를 모두 고려하였다.

3.2 크리깅 대체모델

3.1 절에서 분석한 주요 차량 파라미터와 2.3 절에서 언급한 제어 파라미터에 대하여 최적설계를 수행한다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 1회 시뮬레이션 해석 시간이 20분 정도 소요되므로 최적화를 수행하는 데 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션 모델을 대체할 수 있는 수학적 모델인 크리깅 대체모델을 도입하였다.

크리깅 대체모델은 전역모델과 편차항의 합으로 구성되며^(6,7) 식 (8)과 같다.

$$\hat{Y}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}(\mathbf{x})^T \mathbf{R}^{-1} \{ \mathbf{Y} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}} \} \quad (8)$$

전역모델은 일반화된 최소제곱법(generalized least squared method)에 의해 추정되며 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 는 회귀모델을 구성하는 함수이고 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 은 추정된 회귀모델의 계수를 의미한다.

편차항은 상관행렬 \mathbf{R} 등으로 구성되어 있으며 상관행렬은 식 (9)와 같은 가우스(Gauss) 상관함수를 사용하였다.

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^{n_d} \theta_k (x_k^i - x_k^j)^2\right) \quad (9)$$

여기서 n_d 는 설계변수 개수이고 $\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x} \in R^{n_d}$ 이다. 상관행렬의 상관계수 $\boldsymbol{\theta}$ 는 우량함수(likelihood function)를 최대화하여 구하며, 이를 최우량추정(maximum likelihood estimation, MLE)이라 한다.

3.2.1 순차적 실험계획을 통한 대체모델 구축

크리깅 대체모델을 구축하기 위해서는 실험점과 그에 해당하는 응답이 있어야 하는데, 실험점을 계획하는 방법을 실험계획법(design of experiment, DOE)이라 한다.

본 논문에서 설계범위 내부의 실험점을 추출하기 위해 초기 실험점은 최적라틴방격법(optimal Latin hypercube design, OLHD)⁽⁸⁾을 이용하여 실험점을 추출하였고, 초기 실험점 개수는 크리깅 대체모델의 회귀모델 2차항까지 구하기 위해 포화 개수(saturated number) n_s 만큼 샘플링 하였다.

$$n_s = \frac{(n_d+1)(n_d+2)}{2} \quad (10)$$

또한 크리깅 대체모델의 정확성을 높이기 위하여 순차적 실험계획을 도입하였다. 시뮬레이션 해석 시간을 고려하여 1회 반복(iteration) 시 1개의 실험점을 추가로 샘플링 하였고 설계범위 경계의 실험점을 추출하기 위해 최소거리최대화법(maximin distance design, MDD)⁽⁹⁾을 사용하였다. 최소거리최대화법은 실험점이 존재할 때 추가되는 실험점과의 최소거리가 최대로 되도록 샘플링을 하는 것이며 이에 대한 정식화는 식 (11)과 같다.

$$\text{Maximize}_D \min_{x_k^i, x_k^j \in D} \sqrt{\sum_{k=1}^{n_d} (x_k^i - x_k^j)^2} \quad (11)$$

여기서 $D = \{x^1, \dots, x^n\}$ 이고, n 은 기존 실험점 개수와 추가되는 실험점 개수를 합한 것이다.

3.2.2 크리깅 대체모델의 정확성 평가

연비, 추종성, 승차감, 안전거리에 대하여 크리깅 대체모델을 구축할 때 크리깅 대체모델의 정확성을 평가하기 위해 1점 교차검증법(Leave-one-out cross validation, LOOCV)을 사용하였고 정확성을 판단하는 척도는 식 (12)와 같다.

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{Y}_i(x_i) - Y(x_i)}{\max(Y(x)) - \min(Y(x))} \right)^2} \times 100[\%] \quad (12)$$

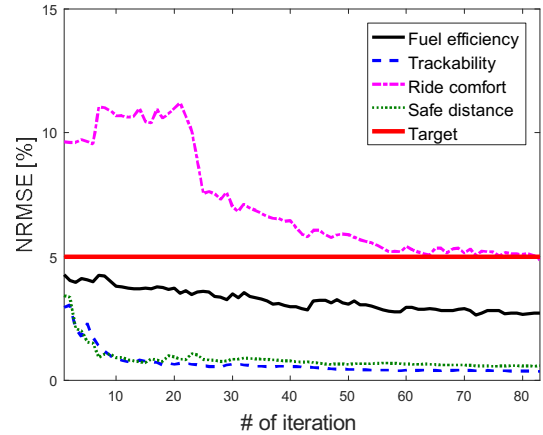


Fig. 6 History of NRMSE for kriging surrogate model

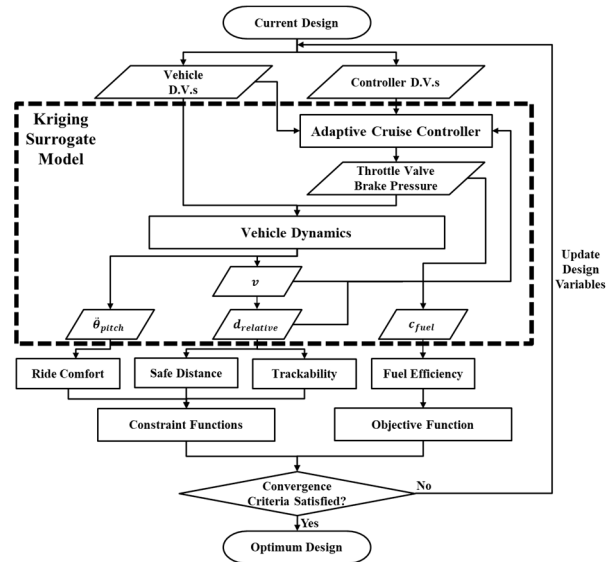


Fig. 7 Flowchart of kriging surrogate model-based design optimization

여기서 NRMSE는 정규화 된 평균 제곱근 오차(normalized root mean squared error)를 말하며, $\hat{Y}_i(x_i)$ 는 i 번째 실험점만 제외하고 크리깅 대체모델을 구축하여 구한 예측 값이다. 기존 RMSE는 식 (12)의 분모항이 존재하지 않아 다른 성능의 RMSE와 비교가 어렵기 때문에 분모항을 추가하여 정규화를 하였다.

일반적으로 시뮬레이션 응답과 크리깅 대체모델의 응답 차이가 5% 정도이면 시뮬레이션 모델을 대체할 만하다고 판단하여 순차적 실험계획의 수렴기준으로 NRMSE를 5%로 설정하였고 3.2.1항에서 설명한 순차적 실험계획을 이용하여 크리깅 대체모델을 구축한 결과 Fig. 6과 같다. 승차감을 제외한 나머지 3개 성능들은 초기 실험점으로만 크리깅 대체모델을 구축하였을 때 목표 NRMSE

를 만족하였다. 하지만 승차감은 초기 반복에서 목표 NRMSE를 만족하지 못했지만, 반복수가 증가하면서 승차감의 NRMSE가 감소하는 경향을 보였다. 초기 실험점 이후 83번째에서 모든 성능의 NRMSE가 5%보다 작아 반복이 종료되고 최종 크리깅 대체모델을 구축하였다. 따라서 최종 크리깅 대체모델을 구축하는 데 사용된 실험점의 개수는 초기 실험점 55개와 추가 실험점 83개로 총 138개이다.

3.3 크리깅 대체모델기반 최적설계

2장에서 설명한 제어 파라미터와 3.1절에서 선별한 주요 차량 파라미터에 대하여 최적설계를 수행할 것이기 때문에 파라미터를 설계변수라 부르도록 하겠다. 따라서 최적설계에 사용되는 설계변수는 차량 설계변수 $m_s, l_r, h_{CG}, r_{eff}, k_t$ 5개와 제어 설계변수 h, λ, K, v_{TH} 4개로 총 9개이다. 그리고 차량 설계변수 범위는 현재 값 기준 $\pm 10\%$, 제어 설계변수 범위는 현재 값 기준 $\pm 20\%$ 로 설정하였다.

3.3.1 최적설계 문제 정식화

연비를 최소화하면서 목표 성능을 만족하는 최적설계 문제 정식화를 식 (13)과 같이 구성하였다. 추종성과 승차감의 목표 성능은 초기 설계안의 응답보다 10% 향상된 값으로 설정하였고, 목표 안전거리는 2m로 설정하였다.

$$\text{Maximize}_{\mathbf{x}} \eta_{fuel}(\mathbf{x})$$

$$\text{Subject to } TR(\mathbf{x}) \geq TR^t$$

$$RC(\mathbf{x}) \geq RC^t$$

$$d_{safe}(\mathbf{x}) \geq d_{safe}^t$$

where

$$\mathbf{x} = \{m_s, l_r, \dots, K, v_{TH}\}$$

$$TR^t = 1.1 \times TR(\mathbf{x}^{curr}) = 0.064$$

$$RC^t = 1.1 \times RC(\mathbf{x}^{curr}) = 0.056$$

$$d_{safe}^t = 2$$

(13)

최적설계 흐름도는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있으며, 차량 동역학 해석과 적응형 순항 제어의 복잡한 시뮬레이션 해석을 크리깅 대체모델로 대체하여 크리깅 대체모델기반 최적설계를 수행하였다.

3.3.2 크리깅 대체모델 기반 최적설계 결과

3.3.1항의 최적설계 문제 정식화를 토대로 최적설계를 수행하였다. 최적화 알고리즘은 순차적 이차 프로그래밍(sequential quadratic programming, SQP)을 사용하였고 20번 반복 후 수렴하였으며, 최적설계 수행시간은 Windows 10 Pro, Intel® Core™

Table 3 Results of optimum design

Design variable		Current design	Optimum design	Unit
Vehicle	m_s	1650	1485 (LB)	kg
	l_r	1.650	1.522	m
	h_{CG}	0.220	0.220	m
	r_{eff}	0.353	0.388 (UB)	m
	k_t	278000	285335	N/m
Controller	h	1.500	1.318	-
	λ	0.400	0.320 (LB)	-
	K	15	12 (LB)	-
	v_{TH}	10	9.132	m/s

Table 4 Performances at optimum design

Performance		Current design	Optimum design	Unit
Obj.	η_{fuel}	12.104	12.998 (7.4% ↑)	km/kg
	TR	0.058	0.064 (Active)	1/m
Con.	RC	0.051	0.065	sec ⁴ /deg ²
	d_{safe}	2.491	2.288	m

i7-6700K@4.00GHz, RAM 32.0GB 컴퓨터 기준 17초 이내였다. 최적설계 결과는 Table 3~4와 같다.

목적함수인 연비는 현재 설계안 대비 약 7.4% 향상되었고 추종성이 활성화 제한조건(active constraint)인 최적설계안이 도출되었다. 또한 연비, 승차감, 안전거리와 추종성과는 서로 상충관계가 있기 때문에 설계변수들이 한쪽방향으로 수렴하지 않는 결과가 도출된 것을 확인할 수 있다.

차량 설계변수의 경우 연비를 향상시키기 위해 m_s 는 하한 값에 수렴을 하였고 안전거리를 향상시키기 위해 r_{eff} 는 상한 값에 수렴하였다. 제어 설계변수의 경우 연비와 승차감을 향상시키기 위해 λ, K 는 하한 값에 수렴하였으며, 나머지 설계변수들은 성능들의 상충관계를 고려하여 제한조건을 만족하는 결과로 수렴하였다.

4. 결론

본 논문에서는 적응형 순항 제어가 적용된 차량의 연비 향상을 위하여 크리깅 대체모델을 이용하여 차량 및 적응형 순항 제어 파라미터 최적설계를 수행하였다.

연비, 추종성, 승차감, 안전거리의 성능 측정 방법을 제안하여 적응형 순항 제어가 적용된 차량을 정량적으로 평가하는 기준을 제시하였다. 적응형

순항 제어 시스템을 구축하여 성능들을 테스트 하기 위해 시뮬레이션 시나리오를 구축하였다. 특히 FTP-75 주행 사이클은 미 환경 보호국에서 실제 사용하고 있는 것으로 연비 등의 성능을 측정할 때 의미 있는 결과로 판단할 수 있다.

분산분석을 이용하여 10개의 후보 차량 파라미터 중 5개의 주요한 차량 파라미터를 선별하였다. 선별된 차량 파라미터와 제어 파라미터에 대한 순차적 실험계획을 이용하여 크리깅 대체모델을 구축하였다. 이 과정에서 크리깅 대체모델의 정확성을 확보하기 위해 NRMSE를 사용하였다. 그 결과 목표 NRMSE를 만족하는 크리깅 대체모델을 구축하였고, 이를 사용하여 연비를 최대화하고 목표 성능을 만족하는 최적설계를 수행하였다. 그 결과 20번 반복 후 수렴하였으며, 최적설계 수행시간은 17초 이내이다. 연비는 현재 설계안 대비 약 7.4% 향상되었고 목표 성능은 만족하는 최적 설계안을 얻었다.

따라서 본 논문에서는 크리깅 대체모델을 도입하여 효율적이고 체계적으로 최적의 차량 및 제어 파라미터를 추정하는 연구를 수행하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호: UC150014ID)

참고문헌 (References)

- (1) Park, C., Jeon, N. and Lee, H., 2015, "A Study of Adaptive Cruise Control System to Improve Fuel Efficiency," *Proceedings of the World Congress on New Technologies*, No. 202, pp. 1~6.
- (2) Luo, Y., Chen, T., Zhang, S. and Li, K., 2015, "Intelligent Hybrid Electric Vehicle ACC With Coordinated Control of Tracking Ability, Fuel Economy, and Ride Comfort," *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 2303~2308.
- (3) Kim, H., Song, Y., Lee, S., Huh K. and Lee, T. H., 2016, "Kriging Surrogate Model-based Optimal Adaptive Cruise Control Design Considering Fuel Efficiency," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 310~310.
- (4) Rajamani, R., 2012, *Vehicle Dynamics and Control*, 3rd Edition, Springer, New York, pp. 141~ 153.
- (5) Barlow, T. J., Latham, S., McCrae, I. S. and Boulter, P. G., 2009, *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*, IHS, Berkshire, pp. 32~34.
- (6) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Henry, P. W., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 409~ 423.
- (7) Lophaven, S. N., Nielsen, H. B. and Sondergaard, J., 2002, "DACE-A MATLAB Kriging Toolbox," *Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark*.
- (8) McKay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J., 1979, "Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," *Technometrics*, Vol. 21, No. 2, pp. 239~245.
- (9) Johnson, M. E., Moore, L. M. and Ylvisaker, D., 1990, "Minimax and Maximin Distance Designs," *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 26, No. 2, pp. 131~148.

(1) Park, C., Jeon, N. and Lee, H., 2015, "A Study of Adaptive Cruise Control System to Improve Fuel