

NO_x와 PM 배출물 특성을 고려한 오프로드 디젤 엔진의 강건 설계에 관한 연구

정진은^{1*}, 안중규²

¹한국기술교육대학교 기계공학부, ²한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

Study of Robust Design of a Off-road Diesel Engine considering Emission characteristics of NO_x and PM

Jin-Eun Chung^{1*} and Jueng-Kyu Ahn²

¹School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University of Technology and
Education

요약 적극적인 환경보호를 위해 그동안 상대적으로 소홀하였던 오프로드 엔진에 대한 배기가스 배출 규제가 강화되고 있다. 본 연구에서는 NO_x와 PM 배출물 특성을 고려하여 오프로드 디젤 엔진의 강건 설계를 수행하였다. 이를 위하여 실험계획법에 따라 배출물 NO_x와 PM의 측정 실험을 수행하고 다구찌 기법으로 망소 SN 비를 산출하고 분산 분석을 수행하였다. NO_x와 PM 배출량에 영향을 미치는 제어 인자로 인젝터 홀 수, 연료 분사 시기, EGR 율을 선택하였으며 각 제어 인자에 대하여 2 또는 3 수준을 고려하여 직교 배열표를 작성하였고, 이에 근거하여 실험을 수행하였다. 망소 SN 비를 산출하고 델타 통계량을 계산하였다. 저부하 운전 조건에서는 분사 시기가 NO_x 배출량에 가장 큰 영향을 미치며, EGR 율이 PM 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 결과를 얻었다. 제어 인자들에 대한 신뢰수준은 90% 이상이였다.

Abstract To protect the environment, the regulation of emissions from off-road engines which are relatively neglected, is being reinforced. This paper deals with the robust design of off-road diesel engines considering the emission characteristics. Measurements of the NO_x and PM levels based on the DOE were carried out. The injector hole number, injection timing and EGR rate were selected as the control factors. The orthogonal arrays table L₉(3³) was made from 2 or 3 levels for each factor and measurements of emissions were accomplished based on the table. The small-the-better SN ratio according to the Taguchi method was evaluated. The ANOVA (analysis of variance) for the SN ratio was conducted. The injection timing on the NO_x emissions and the EGR rate on the PM have the largest effect on the low-load operation condition. The confidence levels of the control factors were more than 90%.

Key Words : NO_x, Off-road Diesel Engine, PM, Robust Design, Taguchi Method

1. 서론

환경오염과 인체에 대한 유해성으로 인해 자동차 배기가스에 대한 규제가 지속적으로 강화되고 있다. 2009년 국립환경과학원의 발표에 따르면 농업기계, 건설기계 등의 오프로드(off-road) 이동 오염원에서 발생하는

NO_x와 PM이 국내 이동 오염원 총 배출량의 30%를 차지하고 있어 오프로드용 엔진 역시 배기가스 저감이 중요시 되고 있다. 이에 따라 국내에서 사용되는 농기계용 엔진에 대해 2015년부터 일괄적으로 Tier4 배기 규제가 적용될 예정이다[1]. 이러한 배기 규제를 충족시키기 위해 디젤 엔진의 배기가스 배출량 저감을 위한 장치로는

*Corresponding Author : Jin-Eun Chung(Korea University of Technology and Education)

Tel: +82-41-560-1152 email: jechung@koreatech.ac.kr

Received May 23, 2014

Revised July 10, 2014

Accepted August 7, 2014

EGR 시스템, 과급기 및 후처리 방식인 DPF와 SCR 장치 등이 있다[2].

다구찌 기법(Taguchi method)은 생산 공정이나 제품 설계에 적용되어 생산의 질 혹은 제품의 기능을 저해하는 요소들의 영향을 최소화하기 위하여 고안된 방법이다 [3]. 다구찌 기법은 실험계획법의 직교 배열 등이 사용되고, 신호 대 잡음(SN) 비가 도입되며 각종 응답치에 대해 제어 가능한 인자와 제어 불가능한 인자로 나눈 후 이에 대한 분석을 실시하여 응답치가 잡음에 대한 영향을 적게 받도록 하는 강건 설계를 가능하게 하며 다양한 분야에 적용되어 왔다[4,5].

본 논문에서는 56 kW급 오프로드용 기계식 디젤 엔진의 연료 분사시기 등 제어 인자가 NOx와 PM 배출물 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다구찌 기법을 사용하였다. 제어 인자로는 인젝터 홀 수, 연료 분사 시기 및 EGR 율을 선정하여 실험하였다. 이를 통하여 배출량이 뚜렷한 상관관계를 가진다고 알려진 NOx와 PM에 대해 해당 제어 인자가 미치는 영향의 민감도를 분석하여 강건 설계를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치의 구성도와 설치 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 3,400 cc급의 오프로드용 디젤 엔진이며, 세부 제원은 Table 1과 같다. WGT(Waste Gate Turbocharging) 과급 방식을 택하였으며 과급된 공기가 인터쿨러(inter-cooler)를 거쳐 흡기 매니폴드로 유입되도록 실험 장치를 구성하였다.



[Fig. 1] Engine installation and experimental equipment

[Table 1] Specifications of test engine

Components	Specifications
Type	4 stroke / 4 cylinder
Displacement	3,409cc
Max Power	82 PS @ 2,500 rpm
Intake type	Turbo-charged
Fuel supply system	Direct injection
EGR loop type	High pressure EGR

엔진 동력계는 AVL사의 ALPHA 240 kW를 사용하였으며, WTC(water temperature control)를 사용하여 냉각수 온도를 80℃로 유지하였다.

NOx 측정은 Horiba사의 MEXA-9100D EGR로 하였다. PM 분석을 위해 FSN(filter smoke number)을 활용하였으며, FSN은 AVL사의 Smoke Meter 415S로 측정하였다. 제어 인자 중 EGR 율의 경우 식 (1)을 사용하여 계산하였으며, EGR 듀티 값을 제어하여 원하는 값을 설정하였다[6].

$$EGR \text{ rate} = \frac{CO_{2[In]} - CO_{2[Amb]}}{CO_{2[Ex]} - CO_{2[Amb]}} \quad (1)$$

여기서, CO₂는 이산화탄소 농도, 하첨자 In은 흡기 매니폴드, 하첨자 Amb는 대기, 하첨자 Ex는 배기 매니폴드를 나타낸다.

2.2 실험 방법

2.2.1 제어 인자와 수준 선정

디젤 엔진의 NOx와 PM 배출량에 영향을 미치는 인자는 다양하다. 그 중 본 실험에서는 인젝터 홀 수, 분사 시기 및 EGR 율을 제어 인자로 선택하였으며, 각각 2수준, 3수준, 3수준을 갖는다. 인자와 수준을 Table 2와 같이 설정하여 실험을 진행하였다. 각각의 수준 값은 예비 실험의 결과로 지정되었다.

[Table 2] Levels of the control factors

Factor	Code	Level		
		1	2	3
Injector hole number	A	5	6	
Injection timing (deg)	B	TDC	2° ATDC	4° ATDC
EGR rate (%)	C	10	15	20

실험과 데이터 분석을 위하여 다구찌 기법을 사용하여 SN 비를 도출하고 기여도 파악과 분산 분석을 실시하였다.

실험 인자 중 EGR 율 20%를 적용할 수 있도록 엔진 속도 1,250 rpm, 부하 100 Nm를 엔진 작동 조건으로 선택하였다.

2.2.2 다구찌 기법

다구찌 기법은 직교 배열표를 이용한 실험계획법으로 유일한 해를 찾으려는 것보다는 품질과 비용의 최적해를 구하려는 의도에서 출발한 것으로, 제품 설계에서 가장 저렴한 비용으로 안정적이고 신뢰성이 높은 성능을 나타내는 인자의 조합을 찾는 데 이용된다.

직교 배열표는 제어 인자 수와 수준의 수, 교호작용 존재 여부를 고려하여 선정한다. 직교 배열표 중 내측 배열(inner array)은 제어 인자와 각 수준이 포함되며, 외측 배열(outer array)은 신호 인자, 잡음 인자 등의 조합으로 전체 실험의 반복 횟수를 나타낸다. 동특성 실험에서는 신호 인자와 잡음 인자를 모두 고려하고, 정특성 실험에서는 신호 인자를 고려하지 않는다.

본 연구에서는 정특성 실험을 수행하였으며, 3개의 제어인자에 대한 3 수준계 표준형 직교 배열표 $L_9(3^3)$ 는 Table 3과 같다. 이때, 제어 인자 중 인젝터 홀 수의 경우 3수준이 아닌 2수준이므로, 2수준 중에서 6 홀을 세 번째 수준으로도 반복시키는 가수준법을 이용하였으며[7], 교호작용이 없다는 전제하에 실험의 배열을 지정하였다.

[Table 3] $L_9(3^3)$ orthogonal array

No.	Inner array			Outer array	
	Injector hole number	Injection timing	EGR rate	R1	R2
1	1	1	1		
2	1	2	2		
3	1	3	3		
4	2	1	2		
5	2	2	3		
6	2	3	1		
7	2'	1	3		
8	2'	2	1		
9	2'	3	2		

3. 실험 결과

다구찌 기법은 성능 특성이 언제 어디서나 목표치를 유지할 수 있는 이상과 같은 손실의 개념인 손실함수(loss function)를 도입하여 그 값을 정량화하고 있다. 손실함수는 품질 특성치의 종류에 따라 망목 특성(nominal-is-best characteristic), 망소 특성(small-the-better characteristic), 망대 특성(larger-the-better characteristic) 등 세 가지로 나눌 수 있다. 망목 특성은 실린더 내경처럼 특정한 품질특성치의 목표치가 정해져 있는 경우에 사용하며, 망소 특성은 차량의 배기 소음과 같이 특성치가 작을수록 좋은 경우이다. 마지막으로, 망대 특성은 연비처럼 특성치가 클수록 좋은 경우이다. 또한, 데이터 분석 시 사용하는 SN 비는 신호 대 잡음의 비율(signal-to-noise ratio)을 의미하며, 식 (2)와 같다[8].

$$SN \text{ ratio} = \frac{\text{power of signal}}{\text{power of noise}} \quad (2)$$

본 연구에서 반응 특성치로 선택한 NOx와 PM의 배출량은 그 값이 작을수록 좋기 때문에 다구찌 기법의 손실함수 중 망소특성을 적용하여 SN 비를 도출하였다. 망소특성의 SN 비를 구하는 방법은 식 (3)과 같다.

$$SN \text{ ratio} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

여기서 y 는 측정된 특성값이다.

[Table 4] Orthogonal array and SN ratio of NOx

N O.	Inner array			Outer array :NOx (ppm)		SN ratio
	Hole No.	Inj. timing	EGR rate	R1	R2	
1	5	TDC	10%	205	206	-46.2563
2	5	ATDC 2°	15%	137	138	-42.7661
3	5	ATDC 4°	20%	105	106	-40.4651
4	6	TDC	15%	223	225	-47.0050
5	6	ATDC 2°	20%	160	161	-44.1095
6	6	ATDC 4°	10%	172	173	-44.7358
7	6'	TDC	20%	195	195	-45.8007
8	6'	ATDC 2°	10%	201	202	-46.0855
9	6'	ATDC 4°	15%	166	166	-44.4022

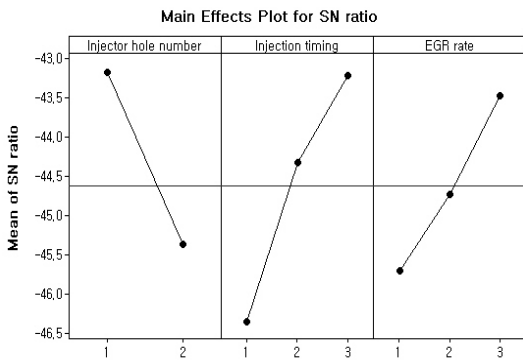
3.1 NOx 배출량 분석

NOx 배출량 분석을 위해 Table 4와 같은 직교배열을 구성하였으며, Minitab을 이용하여 망소특성 SN 비를 산출하였다[9].

Table 5와 Fig. 1은 제어 인자들에 대한 SN 비의 반응표와 주효과도이다. 반응 표에서 Delta는 한 인자 내에서 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이이며, Rank는 Delta 값에 따라 세 가지 인자가 SN 비에 대해 기여도가 큰 순서이다. 이러한 관점에서 볼 때 분 시기가 NOx 배출량의 SN 비에 가장 큰 영향을 주는 인자이다. 다음으로는 EGR 율과 인젝터 홀 수 순으로 영향을 주기는 하지만 둘의 기여도는 거의 차이가 없다.

[Table 5] Response of the SN ratio of NOx

Level	Hole No.	Inj. timing	EGR rate	Total
1	-43.16	-46.35	-45.69	
2	-45.35	-44.32	-44.72	
3		-43.20	-43.46	
Delta	2.19	3.15	2.23	7.57
Rank	3	1	2	
%	28.93	41.61	29.46	100



SN ratio: smaller-the-better characteristics

[Fig. 1] Main effect plot for the SN ratio of NOx with respect to each factor

EGR은 NOx 저감 효율이 높은 방법 중 하나로 알려져 있다. 그러나 이번 연구에서는 EGR 율은 분사 시기 대비 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났는데, 실험 부하 조건인 1,250rpm/100Nm는 엔진 전체 작동영역 중 저부하 운전 조건에 속한다. 이러한 저부하 운전 조건에서는 공기가 과잉 상태로 존재하여 EGR의 영향을 적게 받은 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 인하여 분사 시기가 NOx 배출량에 가장 큰 영향을 끼치는 제어 인자로 반응을 보

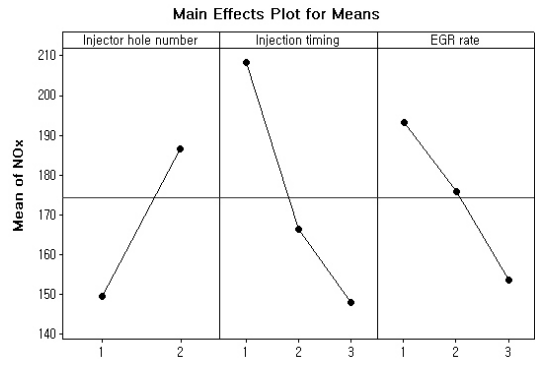
인 것으로 사료된다[10].

Table 6과 Fig. 2는 제어 인자들에 대한 NOx 배출량의 평균에 대한 반응표와 주효과도이며, NOx 배출량의 평균에 대한 기여도가 SN 비의 반응 분석 때와 동일하게 분사 시기, EGR 율, 인젝터 홀 수 순으로 나타났다.

분사 시기가 TDC에서 4° ATDC로 지각 될수록 NOx 가 배출되는 양이 감소하였는데, 이는 분사 시기가 늦춰짐에 따라 팽창과정 중에 연소가 시작되어 연소 최고압력이 낮아지고 이로 인해 연소 최고온도 또한 낮아졌기 때문으로 판단된다[10].

[Table 6] Response of the mean values of NOx

Level	Hole No.	Inj. timing	EGR rate	Total
1	149.5	208.2	193.2	
2	186.6	166.5	175.8	
3		148.0	153.7	
Delta	37.1	60.2	39.5	136.8
Rank	3	1	2	
%	27.12	44.01	28.87	100



[Fig. 2] Main effect plot for the mean values of NOx with respect to each factor

Table 7은 Minitab의 분산 분석 중 일반 선형 모형을 사용한 NOx의 SN 비에 대한 분산 분석 결과이다. 여기서 DF는 각 인자별 자유도, SS는 각 인자별 제곱합, MS는 제곱 평균, F0는 제곱평균비를 나타낸다. F 검정의 결과 인젝터 홀 수, 분사 시기, EGR 율의 F0 값이 각각 65.50, 52.15, 25.62이며 P 값은 각각 0.004, 0.005, 0.013이다. 따라서 세 제어 인자 모두 95% 신뢰수준에서 유의하다.

[Table 7] ANOVA for the SN ratio of NOx

Source	DF	SS	MS	F0	P
Hole No.	1	9.6269	9.6269	65.50	0.004
Inj. timing	2	15.3296	7.6648	52.15	0.005
EGR rate	2	7.5310	3.7655	25.62	0.013
Error	3	0.4410	0.1470		
Total	8	32.9285			

3.2 PM 배출량 분석

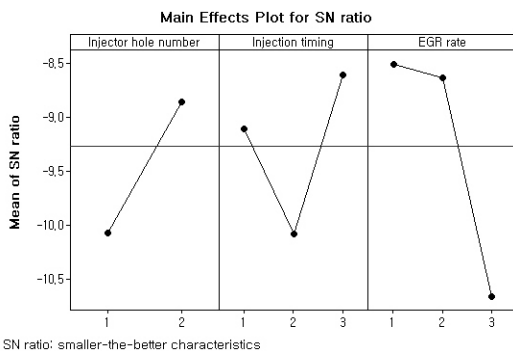
PM 배출량 분석을 위해 Table 8과 같은 직교배열을 구성하고, 측정된 FSN(filter smoke number) 값을 외측 배열에 입력하였다. 그리고 Minitab을 이용하여 망소특성 SN 비를 구하였다.

[Table 8] Orthogonal array and SN ratio of PM

N O.	Inner array			Outer array : FSN (SZ)		SN ratio
	Hole No.	Inj. timing	EGR rate	R1	R2	
1	5	TDC	10%	3.00	2.66	-9.0514
2	5	ATDC 2°	15%	3.23	3.12	-10.0362
3	5	ATDC 4°	20%	3.38	3.81	-11.1295
4	6	TDC	15%	2.65	2.51	-8.2356
5	6	ATDC 2°	20%	3.63	3.30	-10.8039
6	6	ATDC 4°	10%	2.27	2.25	-7.0823
7	6'	TDC	20%	2.99	3.35	-10.0352
8	6'	ATDC 2°	10%	3.08	2.81	-9.3908
9	6'	ATDC 4°	15%	2.44	2.37	-7.6232

[Table 9] Response of the SN ratio of PM

Level	Hole No.	Inj. timing	EGR rate	Total
1	-10.072	-9.107	-8.508	
2	-8.862	-10.077	-8.632	
3		-8.612	-10.656	
Delta	1.211	1.465	2.148	4.824
Rank	3	2	1	
%	25.10	30.37	44.53	100



[Fig. 3] Main effect plot for the SN ratio of PM with respect to each factor

3개의 제어 인자들에 대한 PM 배출량 SN 비의 반응표와 주효과도를 Table 9와 Fig. 3에 나타내었다. PM 배출량에 대해서는 NOx 배출량과 달리 EGR 율의 기여도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 분사 시기, 인젝터 홀 수 순으로 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있다.

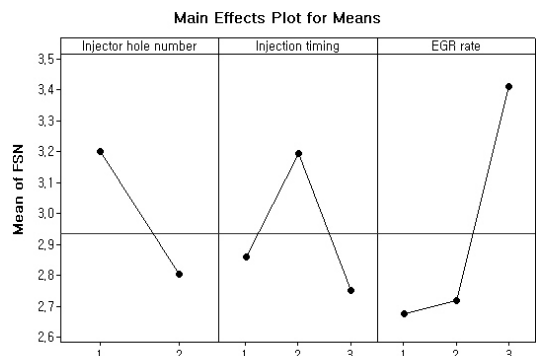
Table 10과 Fig. 4는 제어 인자들에 대한 PM 배출량의 평균에 대한 반응표와 주효과도이며, SN 비의 반응 분석 때와 동일하게 PM 배출량의 평균에 대한 기여도가 EGR 율, 분사 시기, 인젝터 홀 수 순으로 나타났다.

또한 EGR 율이 증가 할수록 PM의 배출량이 증가하였는데, 이는 EGR 율의 상승으로 인해 연소실 내 배기가스 유입량이 늘어남에 따라 산소의 농도가 낮아지게 되어 연소과정에서 국부적으로 농후한 영역이 증대되는 것이 그 원인으로 판단된다[11].

인젝터 홀 수가 5홀에서 6홀로 증가함에 따라 PM 배출량은 감소하였다. 이는 인젝터 홀 수가 늘어남에 따라 분사 불균일성에 기인한 불완전 연소가 감소하고 고온의 확산 연소가 가능하였기 때문으로 사료된다.

[Table 10] Response of the mean values of PM

Level	Hole No.	Inj. timing	EGR rate	Total
1	3.200	2.860	2.678	
2	2.840	3.195	2.720	
3		2.753	3.410	
Delta	0.396	0.442	0.732	1.570
Rank	3	2	1	
%	25.22	28.15	46.63	100



[Fig. 4] Main effect plot for the mean values of PM with respect to each factor

Minitab의 분산 분석 중 일반 선형 모형을 사용한 PM의 SN 비에 대한 분산 분석 결과를 Table 11에 나타내었다. F 검정의 결과 인젝터 홀 수, 분사 시기, EGR 율의

F0 값이 각각 14.14, 8.04, 21.06이며 P 값은 각각 0.033, 0.062, 0.017이다. 따라서 인젝터 홀 수와 EGR 율은 95% 신뢰수준에서 유의하며, 분사 시기는 90% 신뢰수준에서 유의함을 확인하였다.

[Table 11] ANOVA for the SN ratio of PM

Source	DF	SS	MS	F0	P
Hole No.	1	2.9307	2.9307	14.14	0.033
Inj. timing	2	3.3330	1.6665	8.04	0.062
EGR rate	2	8.2780	4.3640	21.06	0.017
Error	3	0.6217	0.2072		
Total	8	15.6134			

3.3 최적 조건 선정

NOx와 PM 각각에서 배출량이 최소가 되는 조건은 NOx에 대하여 A1-B3-C3(인젝터 홀 수 5개, 분사 시기 4° ATDC, EGR 율 20%)이며, PM에 대하여 A2-B3-C1(인젝터 홀 수 6개, 분사 시기 4° ATDC, EGR 율 10%)이다.

앞 절의 실험과 분석의 결과를 이용하여 오프로드 디젤엔진의 저부하 작동 조건에서의 NOx와 PM 배출을 동시에 고려한 최적 조건을 다음과 같이 선정하였다.

NOx 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 제어 인자는 분사 시기이므로 NOx 배출량이 가장 적게 발생하는 3번째 수준(4° ATDC)을 선택하고, PM 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 제어 인자는 EGR 율이므로 PM 배출량이 가장 적게 발생하는 첫 번째 수준(EGR 율 10%)을 선택한다.

인젝터 홀 수는 NOx와 PM 배출량에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 인젝터 홀 수가 5개에서 6개로 늘어날 때 NOx 배출량은 24% 증가하나 PM 배출량은 11% 감소하였다. 따라서 인젝터 홀 수 5개에서 PM 배출량이 많아 지기는 하나 NOx 배출량 감소분이 더 크므로 인젝터 홀 수 5개를 선택한다.

따라서 NOx와 PM 배출 특성을 고려한 최적 조건은 A1-B3-C1(인젝터 홀 수 5개, 분사시기 4° ATDC, EGR 율 10%)이다.

4. 결론

본 연구에서는 실험 계획법 중 하나인 다구찌 기법을 사용하여 인젝터 홀 수, 분사 시기 및 EGR 율이 오프로드 디젤 엔진의 배기가스 NOx와 PM 배출 특성에 끼치

는 영향과 상대적인 기여도를 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 선택한 제어 인자들로 배기가스 측정 횟수를 2회로 실험할 경우 일반적인 실험 방법으로는 36번을 진행해야 하지만 다구찌 기법을 이용한 결과 18번의 실험을 수행하였다. 즉, 실험 횟수가 반으로 되어 실험에 소요되는 비용과 시간을 줄일 수 있었다.
- 2) 다구찌 기법에 따라 망소 SN 비를 산출하여 분석한 결과, 저부하 운전 조건에서는 NOx 배출량에 분사 시기가 큰 영향을 미치고, 인젝터 홀 수와 EGR 율은 상대적으로 작은 영향을 보이며, PM 배출량에 EGR 율이 큰 영향을 미치고, 인젝터 홀 수와 분사 시기는 상대적으로 작은 영향을 미치는 것을 밝혔다.
- 3) NOx과 PM 배출을 동시에 고려하여 인젝터 홀 수 5개, 분사 시기 4° ATDC, EGR 율 10% 을 최적 조건으로 선정하였다.
- 4) 본 연구에서 밝혀진 바와 같이 각각의 제어 인자들이 NOx와 PM 배출량에 미치는 영향의 정도가 다르며 서로 상반관계에 있기도 한다. 따라서 본 연구에서 다룬 제어 인자 외에도 배기가스 저감을 위한 다양한 기술들을 제어 인자로 추가하고 수준의 수를 늘려, 보다 합리적인 결과 도출이 필요한 것으로 판단되며, 이에 대한 연구는 추후에 진행할 예정이다.

References

- [1] T. V. Johnson, "Diesel Emission Control in Review", SAE 2006 World Congress & Exhibition, 2006
- [2] W. Knecht, "Diesel engine development in view of reduced emission standards", *Energy*, Vol.33, No.2, pp.264-271, 2008
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.003>
- [3] G. S. Peace, *Taguchi Methods : A Hands-on Approach to Quality Engineering*, pp.1-12, Addison-Wesley Publishing Co., 1993
- [4] H. Y. Yoo, "A Study on the Forming Conditions of a Forging Piston by using the Finite Elements Simulation and the Taguchi Method," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 5, pp.1990-1995, 2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.1990>

- [5] J. Chung, J. Ahn, " A Study of Robust Design of FCM Gasket Using Taguchi Method," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 7, pp.3177-3183, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.7.3177>
- [6] M. Zheng, G. T. Reader and J. G. Hawley, "Diesel engine exhaust gas recirculation - a review on advanced and novel concepts", *Energy Conversion and Management*, 45, pp.883-900, 2004
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00194-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00194-8)
- [7] Y. J. Jeong, "A Case Study for Resolution of Variation and Determination of Optimum Conditions in Taguchi's Design of Experiments", MS Thesis, Chung-Ang University, 2002
- [8] G. Taguchi, *Introduction to Quality Engineering*, pp. 104-105, Asian Productivity Organization, 1986
- [9] S. H. Park and J. U. Kim, *Modern Design of Experiments using MINITAB*, pp.528-534, Minyoung Publishing Co., 2011
- [10] H. J. Gong, I. G. Hwang, A. H. Ko, C. L. Lee, S. S. Park, C. S. Lim, "Effect of EGR Rate and Injection Timing on the Characteristics of Exhaust Emissions in Light-duty Diesel Engine", *Transactions of KSAE*, Vol. 30, No. 3, pp.7-12, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2012.20.3.007>
- [11] J. Y. Heo, J. P. Cha, S. H. Yoon, C. S. Lee, "Effect of EGR Rate on Combustion and Emission Characteristics in a Single-cylinder Direct Injection Diesel Engine with Common-rail", *Transactions of KSAE*, Vol. 19, No. 2, pp.20-25, 2011

안 중 규(Jueng-Kyu Ahn)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과 석사과정

<관심분야>

열유체 시스템, HEV, 배기가스

정 진 은(Jin-Eun Chung)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1990년 8월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1991년 2월 : 한국과학기술연구원 연구원
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

열유체 시스템, 동력장치, 시스템 신뢰성