

실험계획법에 의한 바이오 디젤 혼합유의 NOx 배출 최적화 Optimization of NOx Emission with Blends of Bio-diesel Oil and Diesel Fuel Using Design of Experiments

이상득* · 김경현** · 이한성*** · 정석호****†

Sang-Deuk Lee*, Kyong-Hyon Kim**, Han-Seong Lee*** and Suk-Ho Jung****†

(접수일 : 2013년 01월 18일, 수정일 : 2013년 02월 23일, 채택확정 : 2013년 03월 12일)

Abstract: Since bio-diesel oil has a merit that it satisfies both demand of substitution for fossil fuel and reduction in carbon dioxide emission, it is widely used in diesel engines by blending in gas oil in small quantity. It is needed to reduce in NOx emission in some way or others if blending ratio of bio-diesel oil is going to increase, because it is demerit that bio-diesel oil emits more NOx emission than gas oil. In this study, it was accomplished to optimize 3 factors what effect on NOx emission as blending ratio of bio-diesel oil, injection timing and common rail pressure with an introduction of a design of experiments, in order to minimize a number of tests. It was cleared that to introduce the design of experiments was very available in NOx optimization.

Key Words : Bio-diesel Oil, NOx, Diesel Engine, Design of Experiments, Optimization

1. 서 론

최근 지구 온난화 현상으로 인한 재해가 국제적으로 증가하고 있어 지구 온난화 현상을 억제하기 위한 규제가 국제적으로 도입되기 시작했다. 특히 기후변화협약에서는 교토 의정서의 채택 이후 탄력을 받아 교토 메카니즘의 도입을 서두르고 있고 우리나라에서도 2009년 12월 제 15차 기후변화협약 당사국총회에서 2020년까지 온실가스 배출을 배출 전망치(BAU) 대비 30%줄일 것임을 선언하였고, 이에 따라 국회에서 탄소배출권 거래제도에 대한 기본 법안이 마련되어 있는 상황이

다. 이런 시점에서 바이오 연료는 탄소의 배출량이 궁극적으로 0이라는 탄소 중립(Carbon neutral)의 관점과 고갈되어 가는 화석 연료의 대체 연료로써 환영받고 있다.

또 가솔린엔진에 비해 열효율이 높아 디젤엔진의 수요가 전 세계적으로 증가하고 있어서 바이오 연료 중에서 바이오 디젤유에 관한 관심도 증가하였다. 2011년부터 우리나라에서는 2%의 바이오 디젤유를 경유에 혼합하여 디젤 차량에 공급하도록 하는 등¹⁾ 바이오 디젤유의 사용에 적극적이다.

그러나 바이오 디젤유는 경유에 비해 HC, CO, PM등 대부분의 배기배출물이 감소하지만 NOx는

****† 정석호(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*이상득 : 한국해양대학교 실습운항원

**김경현 : 부경대학교 탐양호

***이한성 : 동주대학교 자동차-기계과

****† Suk-Ho Jung(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, PuKyong University.

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*Sang-Deuk Lee : Sea training center

**Kyong-Hyon Kim : TamYangHo, PuKyong University.

***Han-Seong Lee : Department of Vehicle & Mechanical Engineering, DongJu University.

약간 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다²⁻⁴⁾. 따라서 경유에서와 비슷한 NOx 배출량 또는 그 이하로 줄일 필요가 있다. 디젤엔진의 연소실과 같은 고온의 조건에서 발생하는 NOx의 발생에 영향을 미치는 인자로는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 바이오 디젤유의 혼합비, 연료 분사시기, 커먼레일 연료분사압력을 변수로 채택하여 NOx가 가장 적게 배출되도록 최적화하고자 하였다.

한편, 실험계획법⁵⁻¹⁰⁾은 각각의 인자가 특성치에 미치는 영향을 분석하기 위해 인자와 수준을 적절히 배치하여 실험을 설계하는 방법으로 직교배열표를 이용한 실험계획법은 최소한의 실험횟수로서 각각의 인자가 특성치에 미치는 영향을 분석할 수 있게 해준다. 이를 통해 산업현장 및 이공계 실험분야에서는 널리 사용되고 있으나 국내의 디젤엔진 분야의 연구에 적용된 예는 드물다. 본 연구에서는 바이오디젤혼합유를 이용하여 운전조건에 따른 NOx 배출물을 최소화하기 위한 실험을 실시하였고, 또한 각 인자의 최적 조합에 대하여 직교배열표를 이용하여 실험계획을 세웠고 결과에 따른 분산분석을 실시하여 그 결과를 검증하였다.

2. 실험방법 및 실험계획

2.1 실험방법

Fig. 1에 본 실험의 실험 장치도를 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 H사의 D4EA로 4기통 4행정 커먼레일 직분식 과급 디젤엔진이며 사양은 Table 1에 나타난 것과 같다. 엔진의 출력을 조정하기 위해서 사용된 동력계는 (주) 환웅의 와전류식 동력계 HE-130 (Eddy current type, 132kW)을 사용하였다. 연료유는 시중에서 구입한 경유와 바이오 디젤유를 사용하였고 Table 2에 사용된 연료의 정상¹¹⁾을 나타내었다. 연료의 연료 분사시기, 연료 분사압력은 MOTEC사의 M800이라는 ECU와 연결된 컴퓨터를 통해서 임의로 조절할 수 있도록 구성하였다.

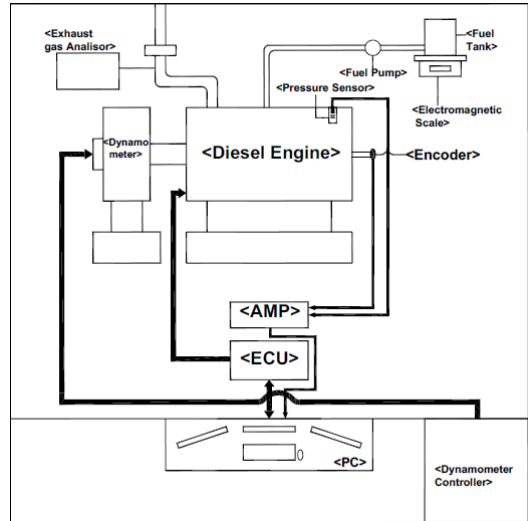


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Model	HYUNDAI D4EA
Engine Type	water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinders	4
Piston Displacement	1991 cc
Bore × Stroke	83mm × 92mm
Max. power	84/4000 kW/rpm
Compression ratio	17.7

연료소비율은 탱크 아래에 전자저울을 설치하여 5분간 소비되는 중량을 측정하여 산출하였고, NOx는 Eurotron사 제작의 GreenLine MK2를 이용하여 5분간 측정된 데이터를 평균으로 나타내었다. 연소압력 센서는 Kistler사의 6125A를 이용하였고 취득 프로그램은 LabVIEW로 코딩하였다.

엔진 회전수와 부하는 각각 1700rpm과 13kW로 고정하였다. NOx의 배출량에 영향을 미치는 인자와 각 수준을 다음과 같이 정하였다. 분사시기는 BTDC 15, 10, 5°로 변화시켰고, 커먼레일 압력은 NOx 배출량이 적도록 30, 35, 40MPa로 낮게 설정하였으며, 연료는 바이오 디젤유의 체적 혼합비를 10%, 20%, 30%로 변화시키며 실행하였다.

Table 2 Properties of tested fuels

Property	Gas Oil	Bio-diesel
Kinetic viscosity (mm ² /s) at 40°C	1.9~4.1	1.9~6.0
Specific gravity (mg/L)	0.85	0.88
Low heating value(MJ/kg)	43.2	39.6
Flash point (°C)	60~80	100~170
Cloud point (°C)	-15~5	-3~12
Carbon (wt.%)	87	77
Hydrogen (wt.%)	13	12
Oxygen (wt.%)	0	11
Sulfur (wt.%)	0.05	0.05
Cetane number	40~55	48~60

Table 3 Factors and levels

Factor	Symbol	Level of factors		
		0	1	2
Blend ratio (%)	A	10	20	30
Injection timing (CA°)	B	-15	-10	-5
Common rail Pressure (MPa)	C	30	35	40

2.2 직교배열포에 의한 실험계획

2.1.1 특성치, 인자 및 각 인자의 수준 선택

특성치는 NOx 발생량으로 정하고 인자는 앞서 설명한 것처럼 바이오 디젤 혼합비, 연료분사시기, 커먼레일 압력으로 하였으며, 인자별 수준은 각각 3 수준으로 하였다. 실험의 목적을 달성하기 위하여 관련이 있는 모든 인자를 선택하여 주는 것이 원칙이나 과도한 인자의 수는 오히려 실험의 정도(precision)를 떨어뜨리고 실험비용을 증가시키기 때문에 실험의 목적을 달성할 수 있다고 생각되는 범위 내에서 최소의 인자를 선택하였다. Table 3은 각 인자와 인자별 수준을 나타내고 있다.

2.2.2 직교배열표

직교배열표(Orthogonal array)는 최소한의 실험 횟수로 각각의 인자가 특성치에 미치는 영향을

분석할 수 있도록 실험계획을 표로 만든 것이다. 이는 인자의 수가 많을 경우에 큰 그물을 쳐서 주 효과와 기술적으로 있을 것 같은 교호작용을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 교호작용에 관한 정보를 희생시켜 만든다. 본 연구에서는 3 인자 3 수준계이고 인자 간에는 교호작용이 존재하지 않는다고 가정한다. 따라서 총 27회의 실험을 교호작용이 없는 것으로 하여 각 인자들의 주효과만을 구하기 위해 L9(3⁴)의 직교배열표를 만들었고 이는 9회의 실험으로 가능하다. 각 A, B, C 인자와 수준 0, 1, 2를 랜덤하게 배치시킨 결과를 Table 4에 나타내었고 이 표에 따라 실험 결과를 이용하여 최적조건을 도출할 수 있다.

Table 4 Orthogonal arrays[L₉(3⁴)]

Experimental No.	Column No.		
	A	B	C
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	2	2
4	1	0	2
5	1	1	0
6	1	2	1
7	2	0	1
8	2	1	2
9	2	2	0

3. 실험결과 및 고찰

3.1 바이오 디젤유의 성능 특성

Fig. 2에 커먼레일 압력과 바이오 디젤유 혼합비에 따른 연소압력을 나타내었다. 운전 조건은 기관회전수 1700rpm, 출력 13kW, 연료분사시기가 BTDC 15°이다. 그래프에서 실선은 바이오 디젤 혼합유 10%를 나타내고 점선은 30%를 나타내고 최대압력부분에서 위쪽이 커먼레일 압력 40MPa일 때이고 아래쪽이 30MPa일 때이다. 커먼레일 압력이 높아짐에 따라 무화가 용이하게 되므로 착화가 빨라짐에 따라 연소압력이 높아지고 있다. 그러나 바이오 디젤유의 혼합비에 따른 특성은

혼합비가 높아짐에 따라 약간 착화가 늦어지고 최고압력이 낮아지는 정도이다.

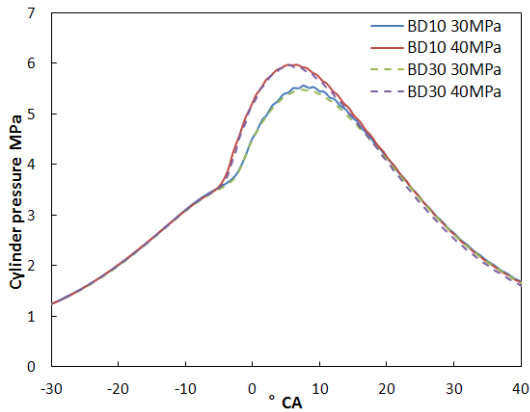


Fig. 2 Effects of common rail pressure and BD ratio on the combustion pressure with injection timing 15° BTDC

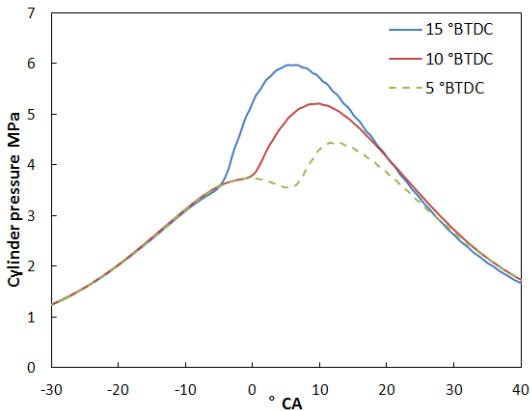


Fig. 3 Effects of fuel injection timing on the combustion pressure with common rail pressure 40MPa and BD ratio 10%

Fig. 3은 다른 조건은 동일할 때 연료분사시기에 따른 연소압력을 나타내고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 연료분사시기에 따른 연소압력 변화는 커먼레일 압력과 바이오 디젤유 혼합비에 비하면 상당히 크다. 따라서 연료분사시기는 본 연구에서 최적화하고자 하는 NOx 배출물에 가장 큰 영향을 미칠 인자로 고려된다.

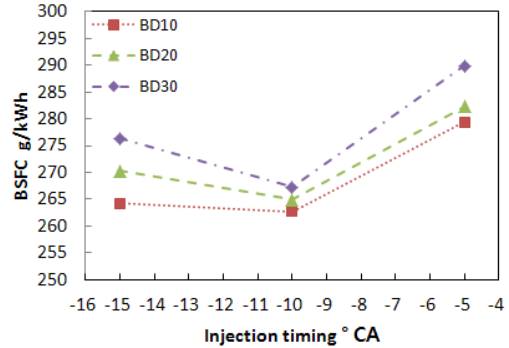


Fig. 4 Effect of fuel injection timing and BD ratio on BSFC with common rail pressure 35MPa

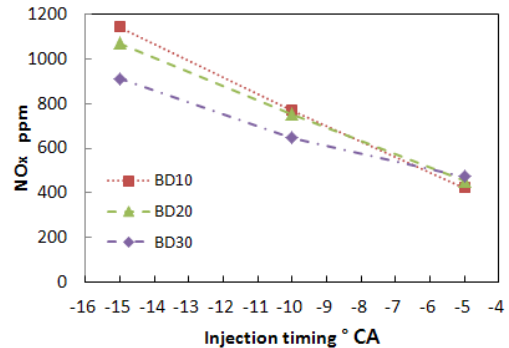


Fig. 5 Effect of fuel injection timing and BD ratio on NOx concentration with common rail pressure 35MPa

Fig. 4는 기관회전수 1700rpm, 출력 13kW, 커먼레일 압력 35MPa의 조건에서 바이오 디젤유의 혼합비와 분사시기에 따른 정미연료소비율을 나타내고 있다. 바이오 디젤유의 혼합비가 낮을수록 연료소비율이 작아지고 있다. 이는 바이오 디젤유의 발열량이 경유에 비해 낮은 것에서 기인한다. 한편 연료분사시기가 연료소비율에 미치는 영향을 살펴보면 BTDC 10°에서 가장 낮은 연료소비율을 나타내고 있어 이 부근에서 가장 좋은 효과를 나타내는 것으로 고려되며 본 논문에서는 언급하지 않았지만 연료소비율의 최적화에 중요한 요소가 될 것으로 생각된다.

Fig. 5에는 Fig. 4와 같은 조건에서 NOx의 배출량을 나타내었다. 연료분사시기가 지연될수록 바

이오 디젤유의 혼합비에 따른 NOx 배출량의 차이는 100ppm 이하로 줄어든다. 즉, 연료분사시기가 지연될수록 바이오 디젤유 혼합비의 영향은 작아진다. 그러나 연료분사시기가 지연될수록 각 혼합유는 일정한 비율로 NOx의 배출량이 200-300ppm의 큰 폭으로 감소하고 있다. 요약하면 연료분사시기가 바이오 디젤유의 혼합비보다 NOx 배출량에 더 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

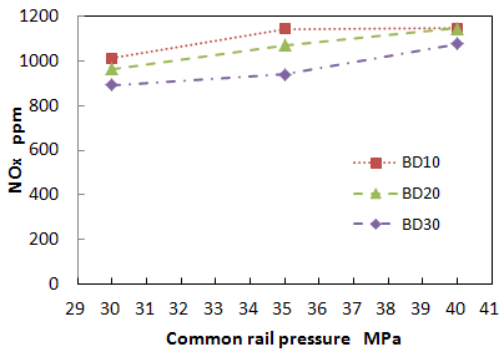


Fig. 6 Effect of common rail pressure and BD on NOx concentration with injection timing 15°BTDC

Fig. 6에 연료분사시기를 BTDC 15°로 일정하게 하고 커먼레일 압력을 변화시켰을 때의 NOx 배출량을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 커먼레일 압력이 NOx의 배출량에 미치는 영향은 연료분사시기에 비해 미비한 것을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6의 결과로부터 바이오 디젤유의 체적비가 증가하였을 때 NOx의 배출량이 적은 것으로 나타나는데 이는 커먼레일의 압력이 낮기 때문에 점성의 영향이 크게 나타나기 때문에¹²⁾ Fig. 2에서 보이는 것처럼 착화가 느려지기 때문인 것으로 고려된다. 그리고 세 개의 인자 중 NOx 배출량에 더 많은 영향을 미치는 순서는 연료분사시기, 바이오 디젤유의 혼합비, 커먼레일 압력으로 나타났다. 이를 바탕으로 실험계획법에 의한 최적조건 선정을 실시하도록 한다.

3.2 인자의 변동 및 분산분석표 작성

직교배열표에 나타난 실험계획에 의한 실험결과로 NOx 배출량을 Table 5에 나타낸다. 표의 맨

밑의 Total은 9회 실험의 총 NOx 배출량을 나타낸다.

Table 5 Results of experiments

Experimental No.	Column No.			NOx data ppm
	A	B	C	
1	0	0	0	1013
2	0	1	1	770
3	0	2	2	535
4	1	0	2	1148
5	1	1	0	623
6	1	2	1	454
7	2	0	1	912
8	2	1	2	676
9	2	2	0	399
Total				6530

실험에서 얻어진 데이터를 기준으로 각 인자의 변동을 구하기 위해 먼저 수정항을 산출하여야 하는데 이는 식 (1)에 의해서 구해진다.

$$CT = \frac{T^2}{9} \quad (1)$$

수정항이 산출되면, 인자 A의 변동은 식(2)에 의해서 구할 수 있다.

$$S_A = \sum_{i=0}^2 \frac{T_{i..}^2}{3} - CT = \frac{1}{3}(T_{0..}^2 + T_{1..}^2 + T_{2..}^2) - CT \quad (2)$$

여기서 $T_{0..}$ 는 A인자의 수준 0(A_0)의 데이터의 합이고 $T_{1..}$, $T_{2..}$ 는 각각 수준 1, 2(A_1 , A_2)의 데이터의 합이다. B, C의 변동도 이와 같은 방법으로 구할 수 있고 총 변동은 다음의 공식에 의해서 구해진다.

$$S_T = S_A + S_B + S_C + S_E \quad (3)$$

3.3 분산분석표 작성

위의 결과를 종합하여 분산분석표를 작성하면 Table 6에 위의 결과를 종합한 분산분석표 (Analysis of variance table)를 나타내었다. F분포표

로부터 분자의 자유도 2, 분모의 자유도 2, 유의수준(F) 5%에 해당하는 값은 19이다. A, C의 분산비(Contributions)는 1.8, 1.7로 F(0.05)값 19보다 작고, B의 분산비는 44.6으로 이보다 크다. 따라서 5% 유의수준에서 바이오 디젤유의 혼합비, 커먼레일 압력의 변동에 의한 차이는 크게 없고, 연료분사시기가 NOx 배출량에 큰 영향을 미친다. 이는 전체적인 실험결과와 마찬가지로 세 인자 중에서 연료분사시기가 NOx의 배출량에 가장 큰 관련이 있음을 나타낸다.

3.4 최적조건의 선정 및 검증

분산분석에 의한 결과를 바탕으로 특성치를 최소로 하는 A, B, C의 최적조건을 구하도록 한다. 서로에게 교호작용이 없기 때문에 각 인자의 1원 표를 만들어 결정하면 되고 Table 7에 그 결과를 나타내었다. Table 7로부터 각 인자에서 가장 작은 특성치를 나타내는 A2, B2, C0가 최적의 조건이 된다. 따라서 NOx 발생량을 최소로 하는 최적조건은 바이오 디젤유 혼합비 30%, 연료분사시기 BTDC 5°, 커먼레일 압력 30MPa이다.

Table 7 Factor effects on response variables

Factors	Level 0	Level 1	Level 2
A	2318	2225	1987
B	3073	2069	1388
C	2035	2136	2359

이를 검증하기 위하여 가장 영향을 미치는 연료분사시기를 BTDC 5°로 일정하게 하고 연료분사압력과 바이오 디젤유 혼합비를 변경한 NOx의

Table 6 Analysis of variance table

Factor	Sum of squares (<i>S</i>)	Degree of freedom (Φ)	Mean of square (<i>V</i>)	Contributions (F_0)	F(0.05)	F(0.01)
A	19428	2	9714	1.8	19	99
B	479001	2	239500	44.6	19	99
C	18323	2	9161	1.7	19	99
Error(E)	10735	2	5367		19	99
T	527486	8				

Table 8 NOx concentration on verification tests

Experimental No.	Column No.			NOx data ppm
	A	B	C	
3	0	2	2	535
9	2	2	0	399
10	0	2	0	387
11	0	2	1	422
12	1	2	0	395

배출량을 Table 8에 나타내었다. 그 결과는 실험 10번이 387ppm으로 가장 낮게 배출되었기 때문에 실험계획법에 의한 특성치 최적화 결과와 일치하지는 않았다. 그러나 이 값은 분석된 실험 9번의 399ppm에 매우 근사하며 NOx 배출량에 영향을 미치는 대기온도 및 습도의 차이를 고려한다면 측정오차에 포함된다. 따라서 이러한 측정오차를 앞으로 배제할 수 있다면 최근 요구되는 기관 성능의 최적화 연구에 있어서 실험계획법이 매우 유용할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 바이오 디젤유의 혼합비, 연료분사시기, 커먼레일 압력의 3가지 인자를 각각 3수준으로 나누어 NOx 배출량을 최소화하는 최적의 조건을 찾기 위해 실험계획법을 활용하여 실험 및 분석하였다. 이를 통해서 NOx 배출량을 최소화하는 3인자의 최적 조건을 찾을 수 있었다. 그 결과는 검증결과와 일치하지 않았지만 측정오차에 포함될 정도의 작은 차이였다. 본 연구의 결론을 종합하면 다음과 같다.

1) 실험결과 세 인자 중에 NO_x 배출량에 가장 큰 영향을 미친 인자는 연료분사시기였고 분산분석에 의한 결과도 같았다. 따라서 NO_x 배출량을 최적화하기 위해서 세 인자 중에서 연료분사시기를 최우선 고려사항으로 잡아야 할 것으로 판단된다.

2) 9가지의 실험조건을 통해서 분석한 결과 NO_x 배출량을 최소화할 수 있는 최적조건은 바이오 디젤유 혼합비 30%, 연료분사시기 BTDC 5°, 연료분사압력 30MPa이었다. 그러나 검증 실험결과와는 바이오 디젤유 혼합비 10%, 연료분사시기 BTDC 5°, 연료분사압력 30MPa이었다.

3) 위 분석결과와 실험결과와의 차이는 측정오차 범위내로 고려됨에 따라 바이오 디젤 혼합유의 NO_x 최적화에 있어서 실험계획법은 상당히 유효하다고 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. C. S. Jung, 2011, "Status and Future Trend of Alternative fuel for Petroleum", K Petro magazine, Vol. 101, pp. 38-45.
2. S. H. Choi and Y. T. Oh, 2007, "An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NO_x with Biodiesel Fuel in a CRDI Type Diesel Engine", KSAE, Vol. 15, No. 3, pp. 35-40.
3. K. S. Jeong et al., 2011, "Combustion and Emission Characteristics of Biodiesel Blended Fuel by EGR Rate in a 4-cylinder CRDI Diesel Engin", KSAE, Vol. 19, No. 4, pp. 130-136.
4. K. H. Kim et al., 2011, "Combustion Characteristics of Biodiesel Blended Fuel by Fuel Injection Timing and Pressure in a CRDI Diesel Engine", KSPSE, 2011, KSPSE Fall

- Conference, pp. 3-6.
5. S. Saravanan, G. Nagarajan and S. Sampath, 2010, "Multi response optimization of NO_x emission of a stationary diesel engine" Fuel, Vol. 89, Issue 11, pp. 3235-3240.
6. S. H. Park, 2009, "Modern Design of Experiments", Min Young Sa, Soeul, pp. 63-76, 417-420.
7. B. C. Yoon, 2002, "Statistical Analysis of Life", Books Hill, Soeul, pp. 203-218.
8. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2009, "Process Optimization for Thermal-sprayed Ni-based Hard Coating by Design of Experiments", KSPSE, Vol 13, No. 5, pp. 89-94.
9. K. T. Kim, J. D. Kim and Y. S. Kim, 2011, "Effect of Process Parameters on the Hardness and Wear Rate of Thermal Sprayed Ni-based Coatings", KSPSE, Vol 15, No. 1, pp. 51-56.
10. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2012, "Optimization for Thermal spray Process by Taguchi Method", KSPSE, Vol 16, No. 2, pp. 54-59.
11. Y. K. Lim et al., 2009, "Determination of Fuel Properties for Blended Biodiesel from Various Vegetable Oils", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 47, No. 2, pp. 237-242.
12. J. D. Kim et al., 2011, "An Experimental Study on Spray Characteristics of Diesel and Bio-diesel Fuel", KSME, Vol. 35, No. 1, pp. 53-59.