

바이오디젤 혼합연료의 배기특성 실험결과에 대한 통계학적 해석[§]

염 정 국* · 윤 정 환*†

* 동아대학교 기계공학과

Statistical Analysis of Experimental Results on Emission Characteristics of Biodiesel Blended Fuel

Jeong Kuk Yeom* and Jeong Hwan Yoon*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received February 23, 2015 ; Revised August 30, 2015 ; Accepted October 5, 2015)

Key Words: Biodiesel Fuel(바이오디젤연료), Pearson Correlation Coefficient(피어슨 상관계수), Spearman Rank-Order Correlation Coefficient(스피어만 상관계수), Trade-Off(상충관계)

초록: 본 연구는 경유와 바이오디젤(대두유) 혼합연료의 디젤엔진 배기특성을 조사하였고, 연료 혼합비는 BD(biodiesel)3, BD5, BD20, BD50 및 BD100이며, 분사압력 조건을 400 bar, 600 bar, 800 bar, 1000 bar 및 1200 bar로 변화시켰다. 그리고 연료 혼합비 및 분사압력에 따른 엔진배출물인 NOx와 Soot의 정량적인 분석을 위해 통계학에 기초한 피어슨 상관계수와 스피어만 상관계수를 이용하였다. 본 연구의 결과로서 실험변수인 혼합비와 분사압력에 대한 NOx 및 Soot 발생량의 피어슨 상관계수는 -0.811이며, 스피어만 상관계수는 -0.884로 NOx와 Soot 발생량 관계가 선형적이며, 이것은 trade-off관계를 나타낸다. 또한 각각의 분사압력 조건에서 피어슨 상관계수가 음의 상관 관계를 나타내며 이것은 NOx와 Soot 배출관계가 반비례적인 것을 나타낸다.

Abstract: In this study, the exhaust gas of a diesel engine operating on biodiesel(BD) fuel(a mixture of diesel and soybean oil) was investigated for different fuel mixing ratios in the range of BD3 to BD100. The experiments were conducted using injection pressures of 400, 600, 800, 1000, and 1200 bar. The Pearson correlation coefficient and Spearman rank-order correlation coefficient were used to quantify the NOx and Soot emissions based on the fuel mixing ratio and injection pressure. Consequently, the Pearson correlation coefficient obtained for NOx and Soot emissions according to the mixing ratio and injection pressure was -0.811 and the corresponding Spearman rank-order correlation coefficient was -0.884, which indicated that the correlation of the NOx and Soot emissions was linear. Thus, the NOx and Soot have a trade-off relationship. Moreover, at each injection pressure, the Pearson correlation coefficient was a negative number, which indicated an inversely proportional relationship between NOx and Soot.

- 기호설명 -

BD : 바이오디젤
p : 연료 분사압력, bar
R, S : x, y의 평균 순위
r : 상관계수

t : t-분포
x, y : 관측 데이터

하첨자
inj : 분사
p : 피어슨
s : 스피어만

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2015. 2. 25-27., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, jeonghwan789@naver.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

디젤엔진은 가솔린엔진과 비교해 연비가 좋고,

불완전연소가 적은 등의 장점으로 그 사용이 증가되고 있는 추세이다. 하지만 질소산화물(Nitrogen oxide : NO_x)과 입자상물질(Particulate matter : PM)은 가솔린 엔진과 비교하여 배출량이 많아 이러한 배기가스를 저감시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 대표적인 연구로써 바이오디젤 혼합연료가 있다. 바이오디젤 혼합연료는 식물성 기름인 대두유, 유채유 및 동물성 지방, 폐식용유를 에스테르교환반응을 통해 얻어진 합산소 디젤연료를 뜻한다. 이러한 바이오디젤은 기존의 경유와 물성치가 비슷하여 기존의 엔진에 적용이 가능하고, 세탄가가 높은 장점이 있다. 경유에 비해 바이오디젤 연료는 발암성 공해물질인 유황성분 및 방향족 고분자가 없고, 연소 반응을 촉진시키는 산소 성분이 연료내 11%~15% 포함되어 있어 황산화물, Soot 등의 감소에 효과가 있다.⁽¹⁾ 또한 기존 경유 공급체계를 이용할 수 있어 바이오디젤에 대한 많은 연구^(2,3)가 활발히 진행되고 있다.

Lim 등은 바이오디젤 혼합유를 직접분사식 4행정 디젤기관에 사용하여 실린더 압력과 압력상승율은 경유에 비해 바이오디젤 혼합유가 감소되었고, 연료 소비율의 경우 경유 보다 높았으며, Soot 발생량은 저부하에서 보다 고부하에서 현저히 감소되었다고 보고하였다.⁽⁴⁾ 또한 Lee 등은 4기통 직접분사식 커먼레일 디젤엔진에서 바이오디젤 30%연료를 사용하여 EGR량의 변화가 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 조사하였다. EGR율이 증가함에 따라 두 연료 모두 NO_x는 감소되었고 Soot 배출량의 경우 EGR율이 증가할수록 바이오디젤이 경유에 비해 크게 감소되는 경향이 있다고 보고하였다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 대두유를 혼합한 바이오디젤 혼합연료를 커먼레일 디젤엔진에 사용하여 배기가스를 측정하였고, 분사압력과 바이오디젤 혼합연료의 혼합비를 변수로 설정하여 NO_x와 Soot의 배출특성을 평가하였다. 배기가스특성 평가에는 혼합비와 분사 압력변화에 대한 NO_x와 Soot의 배출관계를 변수간의 상관관계를 분석하는 통계학에 기초한 피어슨(Pearson correlation coefficient) 및 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficient)^(7,8)를 이용하여 정량적으로 해석하였고, 엔진 배출물 분석에 이러한 수치적 기법을 적용하고 제안하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험 장치 및 방법

엔진의 배기특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 그림과 같이 상용 커먼레일 디젤엔진을 사용하였고, 연료공급장치, EC 동력계, 엔진 제어 장치 및 배기가스 분석기 등으로 구성되어 있다. 엔진제어에 사용된 프로그램은 IVCA V5.4 프로그램 ECU이며 가스 배출물은 Horiba사의 배기가스 분석장치(MEXA-554JK)와

Table 1 Experimental conditions for emissions

Engine	Type : CRDI	
Engine speed [rpm]	1,500	
Engine load [N·m]	80	
Injection timing [deg.]	pilot	BTDC 0, 10
	main	TDC
Compression ratio	17.3	
Coolant temperature [°C]	90	
Injection pressure [bar]	400~1,200	

Table 2 Biodiesel-fuel properties

Mixed fuels	Kinematic viscosity [mm ² /s]	Density [kg/m ³]	Surface tension [mN/m]	Lower heating value [MJ/kg]
BD2	3.94	826.6	30.9	44.83
BD3	3.95	829.8	31	44.75
BD5	3.99	831.8	31.1	44.59
BD20	4.14	838.9	31.5	43.37
BD50	4.5	853.5	32.8	40.95
BD100	5.1	876.0	34.8	36.89

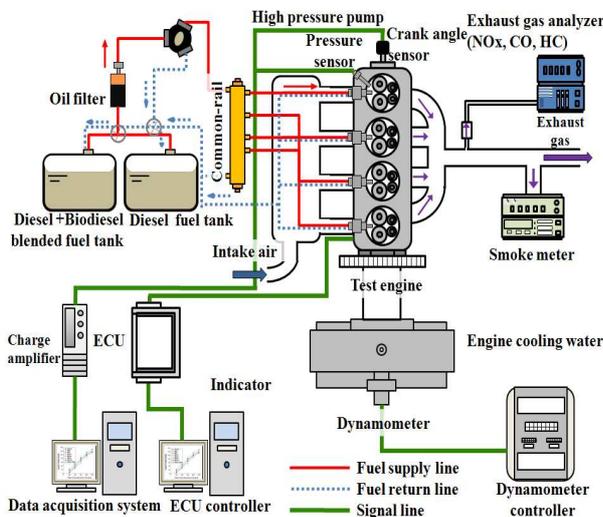


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for engine combustion analysis⁽⁶⁾

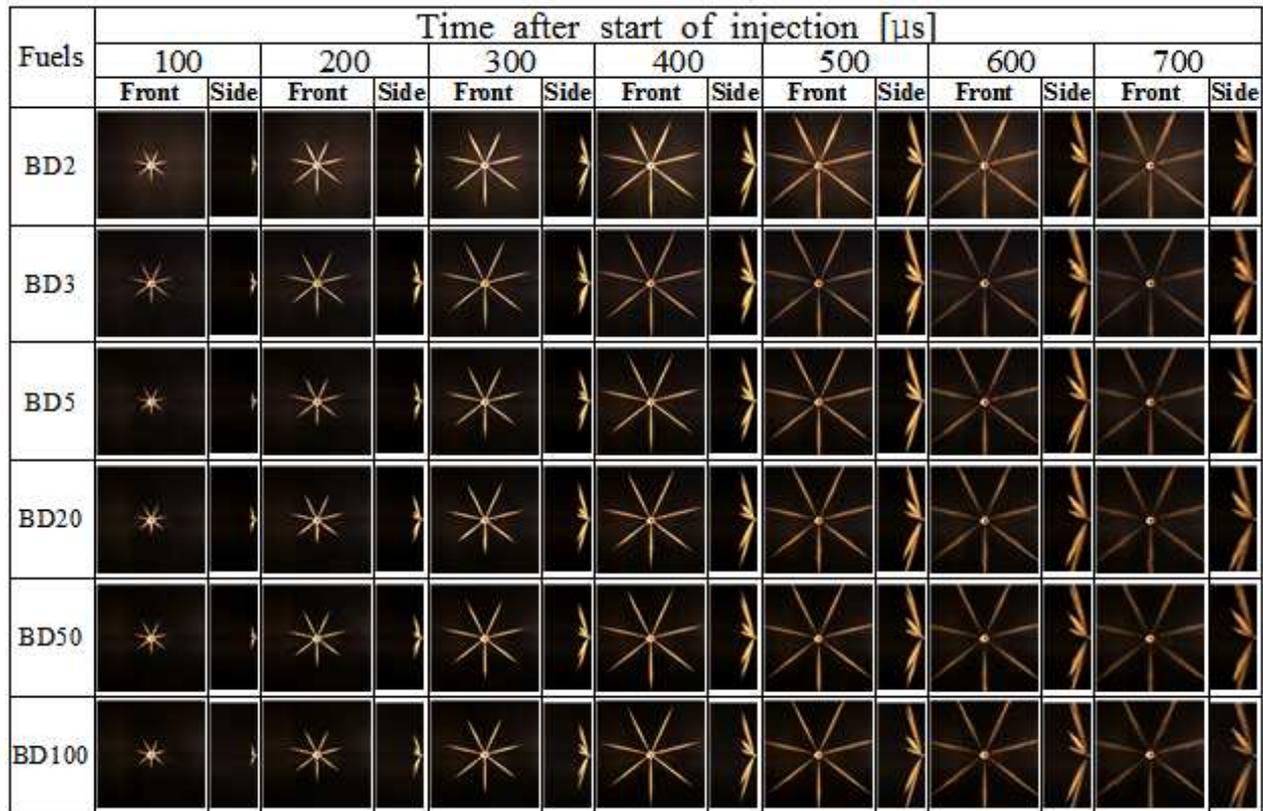


Fig. 2 Temporal change of spray behavior images in accordance with mixed fuel ratio, $p_{inj} = 1000$ [bar] (Soybean oil)

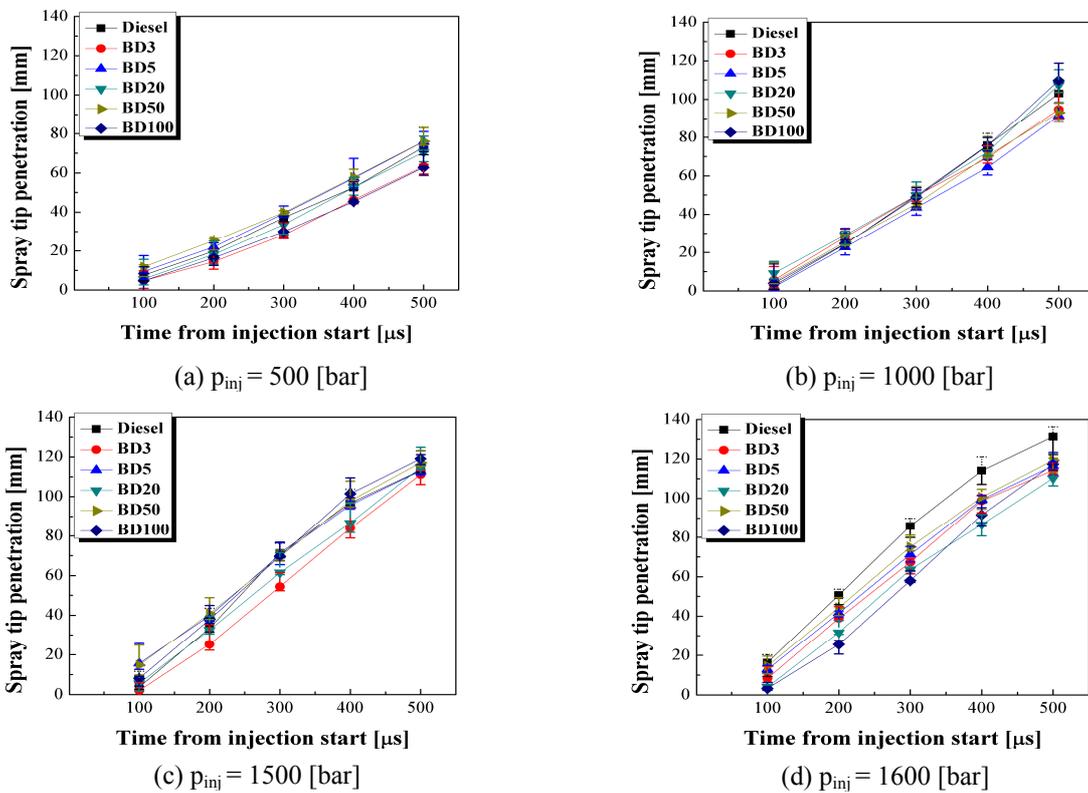


Fig. 3 Spray tip penetration with injection pressure

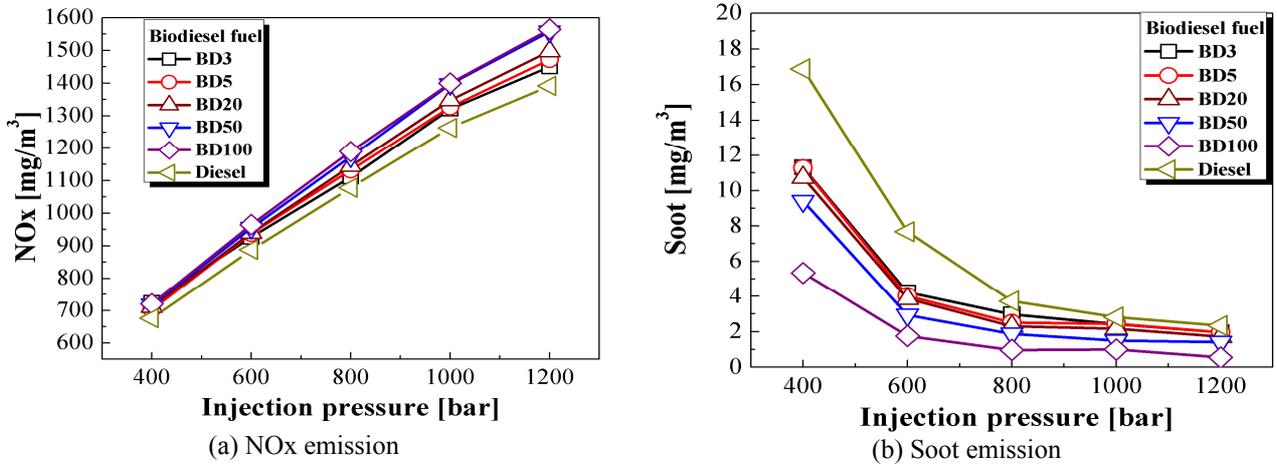


Fig. 4 Change in the NOx and Soot generation in accordance with injection pressure and mixed fuel ratio(Soybean oil)

AVL사의 Soot 측정기(Smoke meter 415S)를 이용하여 측정하였다. 바이오디젤 혼합연료를 사용한 엔진 구동의 실험 조건을 Table 1에 자세히 나타내었다. 엔진의 분사시기는 BTDC 0, BTDC 10으로 설정하였다(엔진 운전조건 및 배기에 대한 상세는 부록 참조). 대두유 바이오디젤[지방산메틸에스테르(FAME; $C_{n,m}$): $n=16\sim 18$, $m=0\sim 3$]과 경유 혼합연료에 대한 물성치를 Table 2에 나타내었고 바이오디젤과 경유의 혼합비는 경유에 혼합하는 바이오디젤의 체적비에 따라 나타내었다. 예로 BD3는 바이오디젤연료 3% 포함된 경유를 의미하며 바이오디젤연료 혼합비를 3%(BD3), 5%(BD5), 20%(BD20), 50%(BD50) 및 100%(BD100, Biodiesel only)로 제작하여 실험에 사용하였다. 배기가스 측정 시기로는 각각의 실험에서 배출된 배기가스가 촉매변환기를 거치기 전 단계에서 포집하여 NOx 및 Soot의 배출량을 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 실험결과

바이오디젤 혼합연료를 사용한 엔진실험의 사전 연구로 엔진실험에 사용된 인젝터와 동일 인젝터를 사용하여 바이오디젤 혼합연료의 분무거동특성을 조사하였다. 분사압력 1000 bar에서 대두유를 혼합한 바이오디젤 혼합연료의 정면, 측면의 촬영 이미지는 Fig. 2와 같다. 측면 이미지를 사용하여 분무거동특성인 분무선단도달거리를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림과 같이 기존 연구⁽⁹⁾의 결과와 동일하게 분무선단도달거리에 분사압력이 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 분사압력이 증가됨에 따라 분무선단도달거

리는 선형적으로 증가한다. 반면 바이오디젤 혼합연료의 혼합비변화에 따라서는 그 차이가 미미한 것을 알 수 있다.

이러한 사전연구를 바탕으로 분사압력 400 bar, 600 bar, 800 bar, 1000 bar 및 1200 bar에서 바이오디젤 혼합연료 BD3, BD5, BD20, BD50 및 BD100 조건을 각각 실험하였다. Fig. 4는 이러한 배기가스 측정 실험의 결과이다. Fig. 4(a)는 분사압력변화에 따른 NOx의 배출 관계를 나타낸 것이다. 그래프와 같이 분사압력의 증가에 따라 NOx의 배출량은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 분사압력이 높아질수록 연료 액적의 무화가 잘 일어나며⁽¹⁰⁾ 신속하고 균일한 혼합기 형성이 가능하고 이로 인하여 NOx의 생성에 필요한 고온조건(1500°C 이상)에 빠르게 도달하여 배출량이 증가된 것으로 판단된다.⁽¹¹⁾ 분사압력이 NOx의 생성에 영향을 미치는 것에 반해 바이오디젤 혼합연료 혼합비에 따른 NOx 배출량 변화는 적다. 즉, 바이오디젤 혼합연료의 NOx생성에는 분사압력의 영향이 지배적이며, 혼합비의 영향은 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 분사압력 변화에 따른 Soot 배출량을 나타낸 것이다. 분사압력이 증가될수록 Soot 값은 감소하는 경향이 있다. 이는 분사압력증가에 따른 연료의 미립화가 촉진되어 완전 연소에 가까워져 그 생성량이 감소한 것으로 판단된다. 또한 혼합비변화에 따른 Soot 배출량은 저압분사영역에서는 혼합비의 영향이 크지만 고압분사로 갈수록 그 차이는 미미해진다. NOx와 Soot의 배출량의 결과는 기 보고된 결과와 같이 분사압력 증가에 따른 NOx와 Soot 배출량 사이의 관계는 분명한 trade-off의 관계가 존재한다.⁽⁵⁾ 이러한 배출관계로부터 NOx와

Table 3 Statistical correlation analyses of linear relationship between the two variables and NOx/Soot

(a) Pearson correlation

Fuel index	Pressure 400	Pressure 600	Pressure 800	Pressure 1000	Pressure 1200	Total
BD	-0.79	-0.889	-0.965	-0.963	-0.867	-0.811

(b) Spearman correlation

Fuel index	Pressure 400	Pressure 600	Pressure 800	Pressure 1000	Pressure 1200	Total
BD	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.884

Soot의 정량적 해석을 위해 상관분석(피어슨, 스피어만 상관분석)을 도입하였고, 해석변수로 분사압력과 바이오디젤 혼합연료의 혼합비를 선택하여 엔진 배출물 저감을 위한 압력 및 혼합비제어를 제시하고자 한다.

3.2 상관계수 방법

두 변수 사이의 관계 유무 또는 관계의 강도에 대한 통계적 분석 방법을 상관분석(Correlation analysis)⁽⁸⁾이라고 하며, 표본상관계수를 이용하여 상관계수에 대한 추론을 한다. 본 논문에서는 두 가지 상관계수(피어슨 상관계수, 스피어만 상관계수)를 사용하였으며, 피어슨 상관계수(Pearson coefficient)는 두 변수간의 관계를 분석하는 방법으로 식 (1)에 의해 정의된다.

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

단, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 이고 $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 이다.

여기서 x_i, y_i 는 각각 관측한 데이터이며, n 은 데이터 개수이다. \bar{x}, \bar{y} 는 각 데이터의 평균값들이다. 또한, 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficient)는 집단에 대하여 구체적인 분포함수를 가정하는 것이 어렵다고 판단될 경우, x_i, y_i 로 주어진 자료를 각각의 데이터 크기에 따라 서열순위인 R_i, S_i 로 변환하여 사용함으로써 집단 가정의 오류를 줄이는 방법이며 식 (2)에 의해 정의된다.

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

단, $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ 이고 $\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$ 이다.

여기서 R_i, S_i 는 데이터 x_i, y_i 의 각각의 순위이다. \bar{R}, \bar{S} 는 R_i, S_i 의 평균값들이다. 한편, 상관계수의 유의성을 결정하기 위해서 가설검정(Hypothesis test)이 필요하다. 본 연구의 결과들은 근사적으로

자유도 $v=n-2$ 인 t-분포(Student's t-distribution)를 따른다고 가정한다.

$$t = |r_p| \sqrt{\frac{n-2}{1-r_p^2}} \quad (3)$$

3.3 바이오디젤 연료에 대한 배기가스 특성

대두유를 이용한 바이오디젤 혼합연료를 이용하여 혼합비 및 분사압력 변화에 대한 배기가스 특성을 상관분석을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 분석의 결과로 피어슨 상관계수 및 스피어만 상관계수를 Table 3에 나타내었다. 각각은 설정 분사압력에서 혼합비 변화에 따른 상관분석의 결과로써 분사압력 400 bar, 600 bar, 800 bar, 1000 bar 및 1200 bar에서는 상관계수의 관계가 음의 관계를 나타내고 있다. 분사압력 전체에 대해서 NOx와 Soot의 피어슨 상관계수의 값은 -0.811, 스피어만 상관계수의 값은 -0.884이다. 이러한 값은 NOx와 Soot사이의 선형관계 정도가 -0.811, -0.884이고 이는 NOx가 증가함에 따라 반대로 Soot는 감소한다는 의미를 나타낸다. 특히, 전 구간의 상관계수, 절대값이 1에 가까워 각각의 압력조건에서 혼합비에 대한 NOx와 Soot의 선형정도가 높다. 즉, 이것은 NOx의 증가량과 Soot의 감소량 관계가 서로 영향을 미친다는 것을 의미한다. 또한 스피어만 상관계수는 데이터의 정규분포유무를 확인할 수 없을 때 쓰는 방법으로 데이터의 값을 서열점수로 변환하였기 때문에 본 자료가 지니고 있는 데이터 정보를 상실하므로 두 상관계수 값이 약간의 차이를 보인다. 본 연구에서는 예로 스피어만 상관계수를 제시하였다. 상관분석의 유효성 확인을 위해 상관계수의 검정을 앞서 제시한 식 (3)으로 양측 검정을 실시하였다. 가설 설정으로는 상관계수가 통계적으로 0이 아닌 값을 갖는지를 검정하는 것이므로 귀무가설을 식 (4)의 H_0 와 같이 "상관계수가 0과 같다"라고 설정하였고, 또한 대립가설은 식 (4)의 H_1 과 같이 "상관계수가 0이 아니다"라고 설정하였다.⁽⁸⁾

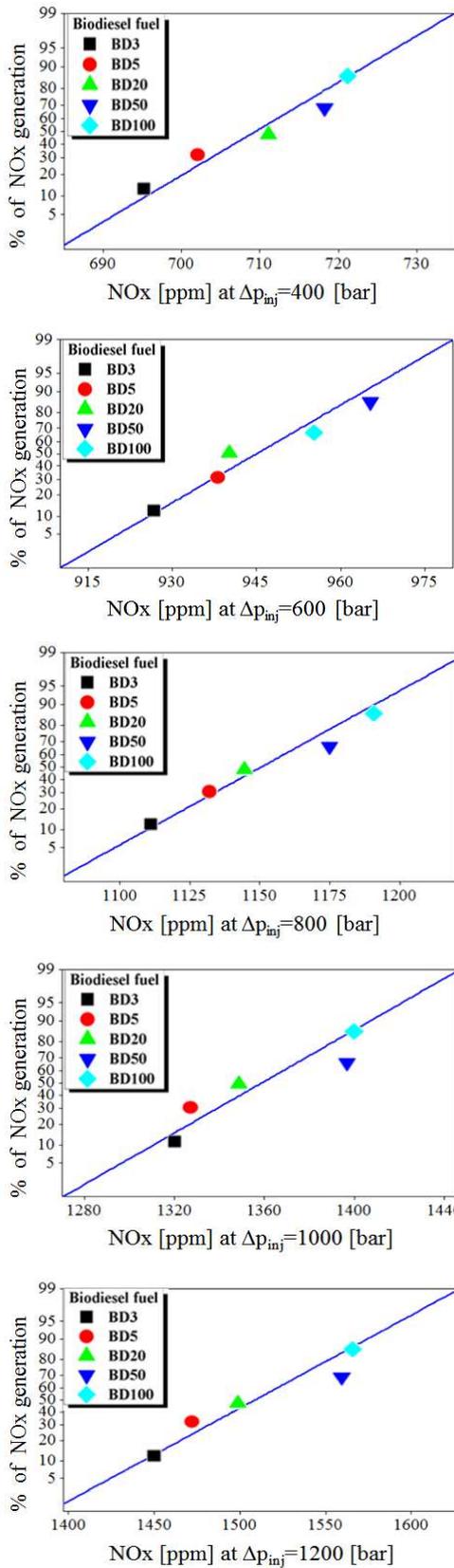


Fig. 5 Change in NOx normality test for mixing ratio of the biodiesel

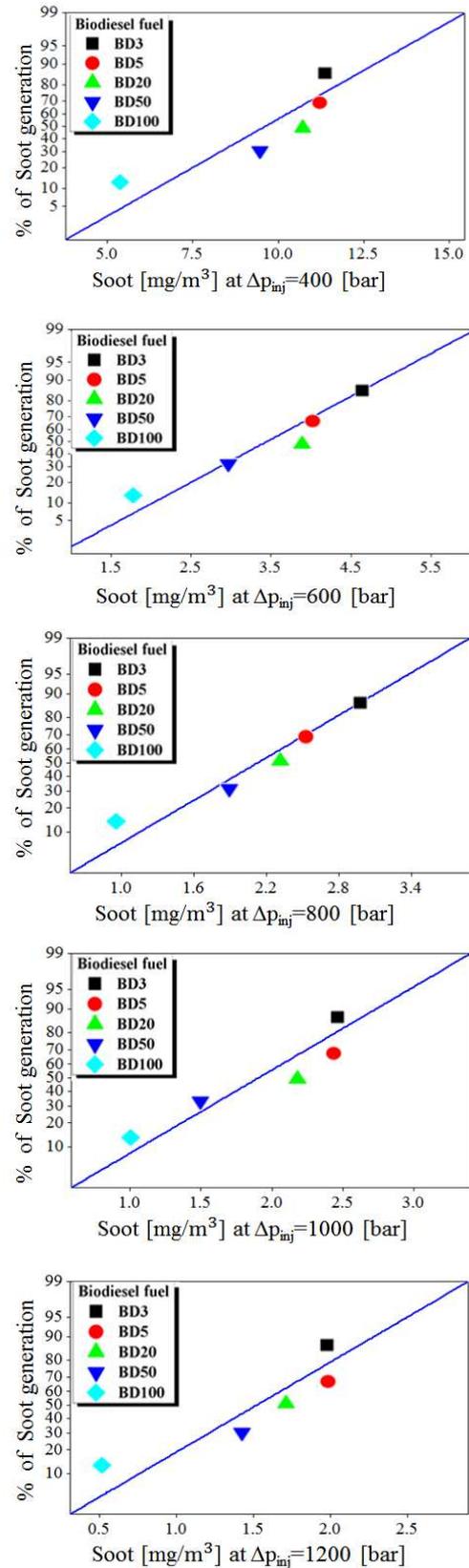


Fig. 6 Change in Soot normality test for mixing ratio of the biodiesel

Table 4 P-value for the injection pressure

Parameter	NOx	Soot
Injection pressure [bar]	P-value	P-value
400	0.69	0.06
600	0.678	0.541
800	0.833	0.688
1,000	0.199	0.260
1,200	0.413	0.158

$$\begin{aligned}
 H_0: \rho &= 0 \\
 H_1: \rho &\neq 0
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

유의수준은 0.05[꼬리확률(tail probability): 0.025]로 하였다. r_p 의 값은 -0.811, 표본의 개수 n의 값은 25이다. 검정통계량 T의 값을 구하면 약 6.4이고, t-분포표를 이용하여 x축 경계치의 값을 구하면 꼬리확률 0.025에서 $t_{(0.025;25)}=2.06$ 이다. 따라서 구한 검정통계량의 값 6.6이 기각역에 속하기 때문에 귀무가설을 기각하며, 대립가설을 채택한다. 상관계수가 0이라고 가정한 귀무가설을 기각함으로써 $r_p=-0.811$ 는 5% 오차 이내에서 유효하며 통계적으로 0이 아닌 상관계수라 할 수 있다. 이러한 결과로부터 바이오디젤 연료의 혼합비가 증가함에 따라 혼합연료 내 산소 성분은 증가하고, 그 결과 고온의 연소실에서 연료 혼합비의 증가에 따라 NOx도 활발히 생성된다고 판단된다. 이와 반대로 합산산소연료인 바이오디젤 연료의 혼합증가는 연소실 내 연소를 촉진시켜 불완전연소에 기인하는 Soot 배출량을 감소시킨다. 또한 NOx와 비교해 혼합비 변화가 Soot 발생량에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 NOx의 배출에 지배적인 영향을 주는 인자는 분사압력이며, 혼합비율의 변화가 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있다. NOx의 저감을 위해서는 혼합비제어보다는 분사압력제어를 하는 것이 유리하다. Soot 발생의 경우는 상대적으로 저압 분사압력 범위인 400 bar ~ 800 bar의 경우는 바이오디젤 혼합연료의 혼합비가 증가할수록 Soot의 발생이 감소한다. 또한 분사압력이 800 bar 이상의 범위에 있어서는 혼합비가 Soot 발생에 미치는 영향은 작아진다. 저압분사 영역인 400 bar ~ 800 bar의 경우 Soot 발생량에 바이오디젤 혼합연료 혼합비율 변화의 영향이 크기 때문에 연료 혼합비율의 설정을 통한 Soot 저감이 유리하다고 판단된다.

상관분석은 데이터의 정규분포를 가정한다. 따

라서 데이터의 정규분포 유무를 확인하였다. 중심극한정리(Central limit theorem)로 표본의 크기가 충분히 클 때(보통 $n>30$, 여기서 n은 표본의 데이터 개수를 의미한다.) 표본의 분포가 정규분포를 이룬다고 가정하지만, 본 실험에서는 표본의 크기가 충분히 크지 않기 때문에 중심극한정리를 이용할 수 없다. 따라서 각 설정 분사압력에 대해 정규성 검정을 실시하였다. Figs. 5, 6은 각각 400 bar, 600 bar, 800 bar, 1000 bar 및 1200 bar에서의 바이오디젤 혼합연료 혼합비 변화에 따른 NOx와 Soot 배출량 데이터의 정규성 검정의 결과이다. 제시된 그래프에서 x축은 NOx, Soot 배출량 데이터 값이며, y축은 NOx와 Soot 배출량 데이터의 백분위를 나타내었다. 예를 들어 분사압력 400 bar인 경우, NOx 배출량을 685mg/m^3 에서 735mg/m^3 까지의 구간을 100%로 설정하고 각각의 NOx 배출량 데이터가 구간에서 위치하는 정도를 %로 나타내었으며, 이와 같이 Soot의 경우 전체 구간에서 위치하는 Soot 배출량의 정도를 %로 나타내었다. 또한 정규성 검정의 판단 척도인 P-value를 Table 4에 나타내었다. 데이터의 P-value의 값이 0.05이상^(12,13)이면 정규성 분포를 만족한다. 따라서 검정의 결과와 같이 전 분사압력구간에서 P-value값이 0.05이상이기 때문에 정규성을 이룬다고 판단하였고, 이를 통해 상관분석방법의 타당성을 제시하였다.

4. 결론

본 논문은 바이오디젤(대두유) 혼합연료를 커먼레일 엔진에 적용하여 분사압력 및 바이오디젤 혼합비가 NOx와 Soot의 배출량에 미치는 영향을 조사하였다. 바이오디젤 혼합연료의 배기가스 배출 특성을 수치적으로 해석하기 위하여 상관분석을 적용하여 데이터를 분석하였다. 본 연구에서 구한 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 대두유를 혼합한 바이오디젤 엔진적용 시 분사압력 증가에 따라 연료액적의 무화가 잘 되어 혼합기 형성 촉진으로 인해 연소실 내의 고온의 분위기가 만들어져 NOx의 배출량은 선형적으로 증가하였다. 하지만 각 설정 압력에서 NOx의 배출량에 연료의 혼합비가 미치는 영향은 분사압력에 비해 상대적으로 작았으며, 이를 통해 NOx의 배출량에 지배적인 영향을 미치는 인자가 분사압력이라는 것을 확인하였다. Soot 배출량의 경우 분사압력이 증가될수록 그 값은 지수함수적으로 감소하는 경향을 확인하였다. 연료의 혼합비가 Soot 배출량에 미치는 영향은 상대적으로 저압분

사영역에서 크지만 고압분사영역으로 갈수록 작아진다.

(2) 혼합비 변화가 NOx의 배출량에 미치는 영향은 상대적으로 저압 분사영역에서는 그 차이가 적으나, 고압분사영역에서 혼합비가 증가할수록 NOx의 발생량은 많아진다. Soot의 배출량은 저압 분사영역에서 그 영향이 크며, 고압분사 영역으로 갈수록 그 차이는 미미해진다. 즉, NOx의 저감을 위해서는 분사압력제어가 유리하고, Soot의 저감을 위해서는 저압분사 영역에서 혼합비제어가 유리하다고 판단된다.

(3) 전체 분사압력 구간의 혼합비 변화에 따른 NOx와 Soot의 배출 관계의 상관계수 값은 -0.811로 이는 NOx 배출량과 Soot 배출량의 관계가 서로 trade-off 관계임을 나타낸다. 마찬가지로 분사압력 400 bar, 600 bar, 800 bar, 1000 bar 및 1200 bar에서 혼합비 변화에 따른 NOx와 Soot의 상관계수는 그 값이 -1에 가깝기 때문에 trade-off 관계임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A2011842).

참고문헌
(References)

(1) No, S. Y., 2009, Bioenergy Engineering, ABCNURI, Chungbuk National University, pp. 47~60.

(2) Yoon, S. K., Kim, M. S. and Choi, N. J., 2014, "Characteristics of Canola Biodiesel Fuel Blended with Diesel on the Combustion and Exhaust Gas Emissions in a Compression Ignition Diesel Engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 38, No. 9, pp. 1081~1085.

(3) Chen, L., Cheng, Y. K., Kim, J. D. and Song, K. K., 2014, "A Study on Biodiesel Fuel of Engine Performance and Emission Characteristics in Diesel Engine," *Trans. of the KSAE*, Vol. 22, No.5, pp. 59~65.

(4) Lim, J. K., Choi, S. Y. and Cho, S. G., 2009, "Comparative Analysis on Combustion Characteristics of Diesel Oil and Biodiesel Blends in DI Diesel Engine(Using Soybean Oil)," *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 29~34.

(5) Lee, D. G., Roh, H. G., Choi, S. C. and Lee, C. S., 2011, "Combustion and Emission Characteristics of 4 Cylinder Common-Rail DI Diesel Engine with Biodiesel Blended Fuel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 2, pp. 137~143.

(6) Baek, S. H., Yoon, J. H, Jung, W. S., Ha, H. S., Chung, S. S. and Yeom, J. K., 2014, "Estimation of the Exhaust Characteristics of Biodiesel Used in Diesel Engine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 2, pp. 129~137.

(7) Kim, W. C., 2009, Modern Statistical, YONUNGCHI MUNHWASA, Seoul, pp. 256~325.

(8) Jeon, C. H., Jeong, M. G. and Lee, H. S., 2004, Applied Statistics for Engineers, HONGRUNG PUBLISHING COMPANY, Seoul, pp. 12~132.

(9) Kim, J. D., Ainull, G., Song, K. K., Jung, J. Y. and Kim, H. G., 2011, "An Experimental Study on Spray Characteristics of Diesel and Bio-Diesel Fuel," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 1 pp. 53~59.

(10) Kim, D. J., Yang, D. G. and Lee, J. K., 2013, "Effect of Injection Pressure on the Atomization Characteristics of a Liquid Sheet-Type Swirl Injector for Urea-SCR System," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 37, pp. 510~519.

(11) Chung, J. W., Kang, J. G., Lee, S. M., Kim, H. C. and Kang, W., 2006, "Effects of the EGR and Injection Pressure on the Combustion and Emission Characteristics of DME Common Rail Diesel Engine," *Trans. of the KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp. 84~91.

(12) Seong, T. J., 2009, Understanding and Applying Modern Basic Statistics, KYOYOOKBOOK, Paju, pp. 361~365.

(13) MINITAB Help Anderson Darling Statistic Release 16.2.3, Minitab Inc., Pennsylvania, 2012.

Appendix

< Summary of emission characteristics in accordance with engine operating condition with biodiesel blended fuel >

Injection Pressure (bar)	RPM	load (Nm)	ambient pressure (bar)	cooling temp. (°C)	in-air (kg/h)	in-air (mg/hub)	main tuning (BTDC)	1 pilot tuning (BTDC)	main quantity (mg/inj)	1 pilot quantity (mg/inj)	total quantity (mg/cycle)	λ	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	CO2 (%)	λ	O2 (%)	Soot (mg/m3)	intake temp. (°C)	exhaust temp. (°C)	ambient temp. (°C)
400	1500	80	1023	70	77.8	432.17	0	10	16.522	1.6	18.122	1.852	3.01	8	724	8.04	1.85	10.08	11.32	61	431	18
600	1500	80	1022.9	71	77.94	432.95	0	10	16.924	1.6	18.524	1.866	3.01	10	927	7.94	1.88	10.2	4.23	63	416	18
800	1500	80	1022.9	72	77.52	430.62	0	10	16.911	1.6	18.511	1.863	3.01	11	1111	7.96	1.87	10.12	2.98	63	409	18
1000	1500	80	1022.9	72	76.14	422.95	0	10	16.333	1.6	17.933	1.821	3.01	11	1321	8.14	1.83	9.88	2.43	64	403	18
1200	1500	80	1023	72	75.68	420.35	0	10	15.938	1.6	17.538	1.802	3.01	13	1450	8.22	1.8	9.7	1.97	64	403	18