

바이오디젤 및 바이오디젤 혼합연료의 산화특성 연구에 의한 사용 수명 예측

정충섭¹⁾, 이영재²⁾, 동종인³⁾

Life Time Estimation of Biodiesel and Biodiesel Blend Fuel from the Oxidation Stability Analysis

Chung-Sub Jung, Young-Jae lee, Jong-In Dong

Abstract 대두유로부터 생산된 바이오디젤과 바이오디젤 혼합 연료유를 대상으로 지방산메틸에스터 함량과 화학적 분석을 통해 산화 특성과 오일의 수명 예측 연구를 수행하였다. 바이오디젤, 경유, BD5, BD20은 산화가 진행될수록 산가(Acid number), 동점도(Kinematic Viscosity) 및 밀도(Density)는 증가하였다. 산가 측정결과의 활용에 의해 임의의 온도조건에서 정확한 사용수명을 예측하기 위하여 화학속도론에 의거하여 각각의 연료에 대한 사용수명식을 도출하였다. 도출된 사용수명식으로부터 바이오디젤이 가장 빠르게 산화가 진행되었고 바이오디젤 혼합량이 증가할수록 사용수명이 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

Key words Fatty acid methyl ester(지방산메틸에스터), Bio-diesel blend fuel(바이오디젤 혼합연료), Bio-diesel oxidation(바이오디젤 산화), Stability of oxidation(산화안정성), Carbon number distribution(탄소수 분포), Life time estimation(사용수명 예측)

* 한국석유품질관리원 연구센터
 ■E-mail : csjung@kipeq.or.kr ■Tel : (043)240-7910 ■Fax : (043)240-7949

Nomenclature

k : reaction constant, day⁻¹
 A : constant
 E : activation energy, cal/mol
 T : temperature, K

subscrip

FAME : fatty acid methyl ester
 ULSD : ultra low sulfur diesel
 BD : biodiesel
 CO : carbon monoxide
 HC : hydrocarbon
 TGA : thermogravimetric analyzer
 CRDI : common-rail direct injection system

1. 서론

바이오디젤(Biodiesel)은 식물성 기름, 동물성 지방, 폐식용유 등 에너지 자원의 고갈 문제가 없는 재생 가능한 바이오매스(biomass) 유지를 촉매 존재 하에 메탄올 등 알코올과 반응시켜 생성하는 에스테르화 기름을 말하며¹⁾, 디젤엔진 자동차용 연료인 경유와 점도 등의 물성이 유사하여 디젤엔진의 특별한 구조 변경 없이 경유에 대체 또는 혼합하여 사용이 가능한 연료이다.

바이오디젤은 분자 중에 10~12%의 산소원자를 포함하고 있는 함산소 연료이기 때문에 디젤기관에서의 연소성 향상이 가

능하고 동시에 CO, HC 등의 배출가스를 저감시킬 수 있는 장점을 가지고 있다²⁾.

그러나, 바이오디젤은 탄화수소만으로 구성되어 있는 석유계 경유와는 달리 지방산메틸에스테르(Fatty Acid Methyl Ester, FAME)로 구성(96.5% 이상)되어 있어, 온·습도 등의 저장조건과 자동차 연료분사 환경 등에 따라 경유에 비해 쉽게 산화되는 단점이 있다.

특히, 우리나라의 바이오디젤 원료는 유럽에서 주로 사용하고 있는 유채유와 동남아에서 사용하고 있는 팜유 등과는 달리 불포화지방산이 상대적으로 많고 이중결합의 수를 나타내는 요오드가가 높은 대두유가 주종을 이루고 있어 산화반응에 의한 품질 열화 가능성이 더욱 클 것으로 예상되고 있다³⁾.

바이오디젤 보급이 활성화되어 있는 유럽에서는 기존 경유와 유채유로부터 생산된 바이오디젤을 대상으로 온·습도변화 등의 다양한 실험(저장)조건에 따른 산화반응 시험의 결과로서 생성된 검(Gum) 등의 물질에 대한 양을 측정·비교함으로써 바이오디젤의 산화특성을 규명하는 연구가 상당히 수행되었다^{4,5,6,7)}. 국내에서도 양 등⁸⁾이 TGA를 사용하여 폴리올에스테르 오일의 열안정성과 오일의 수명 예측에 관한 연구를 수행한 바 있으나 대두유로부터 생산된 바이오오일의 수명 예측에 대한 연구는 수행된 예가 없다.

본 연구에서는 선행된 산화특성 연구를 응용하여 국내에서 사용되고 있는 산화안정성이 상대적으로 열악한 대두유 유래 바이오디젤을 대상으로 산화 특성을 이해하고, 산화과정에서의 물리·화학적 변화에 대한 고찰을 통하여 바이오디젤의

혼합량에 따른 사용 한계와 사용 수명식을 제시하고자 하였다.

2. 실험

본 연구에 사용한 바이오디젤은 대두유를 원료로 국내 제조사에서 단일배치 공정에 의해 에스티교환반응으로 생산된 순도 94.7%의 FAME를 사용하였으며, 경유(Petrodiesel)는 국내 정유사에서 생산된 동절기 제품으로 황분이 30 mg/kg 이하인 초저유황경유(Ultra Low Sulfur Diesel, ULSD)를 사용하였다. 경유는 원유로부터 정제된 연산제품으로 그 성분 및 물성은 도입 원유의 물성에 따라 다소 차이가 있으나, 최근의 친환경정책에 따라 유해물질 저감이 요구되어 탈황, 탈질공정 등의 제2차 공정으로 처리되고 있고 가솔린의 다양한 기재와는 달리 경유 기재는 상대적으로 단순하기 때문에 정유사별로 품질면에서 큰 차이가 없다. 바이오디젤과 경유를 상온에서 부피비로 혼합하여 BD5(경유 95% + 바이오디젤 5%)와 BD20(경유 80% + 바이오디젤 20%)을 제조하였다. Table 1에 바이오디젤, 경유 및 혼합유에 대한 물리·화학적 성상을 나타내었다.

Mineral oil 또는 Fatty oil은 공기 분위기하에서 산소의 접촉으로 자연산화가 진행된다⁹⁾. 이 자연산화의 산화속도는 매우 느리게 진행되나 진행정도에 따라 검 등 고분자 물질이 형성되어 연료 고유의 품질을 잃게 하고 자동차 연료공급시스템의 작동을 불량케 하거나 부품손상을 초래하는 원인이 되기도 한다¹⁰⁾. 바이오디젤유의 사용수명 예측과 산화메커니즘을 이해하기

Table 1 Property of test fuel

Item	Class	Specification			*BD0	BD5	BD20	BD100
		*BD0	BD20	BD100				
FAME(vol%)		5 ↓	20±3	96.5 ↑(wt %)	-	1.88	17.50	94.74
Sediment (mg/100mL)		-	-	-	2.86	6.34	0.63	11.17
K.V(40 °C, mm ² /s)		1.9~5.5		1.9~5.0	2.990	3.021	3.152	4.260
90% Dist., (°C)		360 ↓		-	336	337	341	358
Cetane No.		45 ↑		-	52	52	53	59
Pour point (°C)		0.0 ↓(W : -17.5 ↓)		-	-25.0	-22.5	-20.0	-5.0
CFFP (°C)		-16 ↓		0 ↓	-24.0	-19.0	-17.0	-2.0
Density @ 15°C (kg/m ³)		815~845		860~900	836.9	839.1	846.3	886.5
Water(ppm)			-	-	60	47	139	395
Acid No. (mg KOH/g)		-	0.10 ↓	0.50 ↓	0.032	0.042	0.080	0.256

*BD0 = Petrodiesel

위해서는 실제의 저장 및 사용조건을 구현하고 장기저장하면서 모니터링을 수행하여야 하나, 장기간 모니터링에 어려움이 존재하므로 장기저장을 모의할 수 있는 가속산화방법을 사용하여 비교적 단기간 내에 연료사용 수명을 예측하고자 하였다.

2.1 장치의 구성

가속산화를 시키기 위하여 Convection Dry Oven을 사용하여 시료용기를 공기분위기하에서 실온, 43 °C, 80 °C 및 100 °C로 구별하여 저장하였다. Stainless steel 재질의 용량 18ℓ의 시료 용기 내에 바이오디젤, 경유, BD5 및 BD20을 각각 12 ℓ 주입하여서 Convection Drying Oven 의 중앙에 설치하였으며, 가속산화 실험을 위한 시스템은 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 가속산화 실험

대두유로부터 유래된 바이오디젤은 이중결합을 갖고 있는 Oleic(C18:1), Linoleic(C18:2) 및 Linolenic(C18:3) acid methyl ester를 다량 함유하고 있기 때문에 공기중 또는 연료 탱크중의 산소와 결합하여 자동산화(Autoxidation)가 일어날 것으로 추정되고 있다³⁾. 실제 바이오디젤은 생산된 후 유통과정에서 서서히 산화될 가능성이 있으며 자동차용 연료로 사용될 때에는 고온·고압의 엔진 및 연료분사계에서 그 산화정도가 가속될 가능성이 크다. 더우기 디젤차량의 연료공급시스템은 최근 Common-Rail Direct Injection System과 같은 고온·고압의 정밀전자제제품으로 전환되고 있어 실린더내의 공급연료이외에 연료탱크로 회수되는 연료 온도가 80 °C까지 이르기 때문에 장기간 사용시 급속 산화될 소지가 더욱 커지고 있다.

실제 현장에서 바이오디젤의 산화메커니즘 해석과 혼합연료인 BD5와 BD20의 사용수명을 예측하기 위해서는 가속산화 실험을 수행하기 전에 산화에 영향을 끼치는 첫 번째 factor인 저장온도를 실제 상황에 근접하게 설정할 필요가 있었다.

따라서, 저장온도는 첫 번째로 유통과정 중의 주유소 등의 연료탱크 온도와 유사한 상온(약 21 °C), 두 번째로 상온보다 가혹한 조건인 43 °C [ASTM D 4625 (Distillate fuel storage stability at 43 °C(110 oF)에 의하면 43 °C에서 가속노화 한 시료의 불용성물질 및 점착성 물질은 상온 21 °C에 보관한 시료에 비하여 약 4배 가속 노화되는 관계를 보인다는 결과에 의

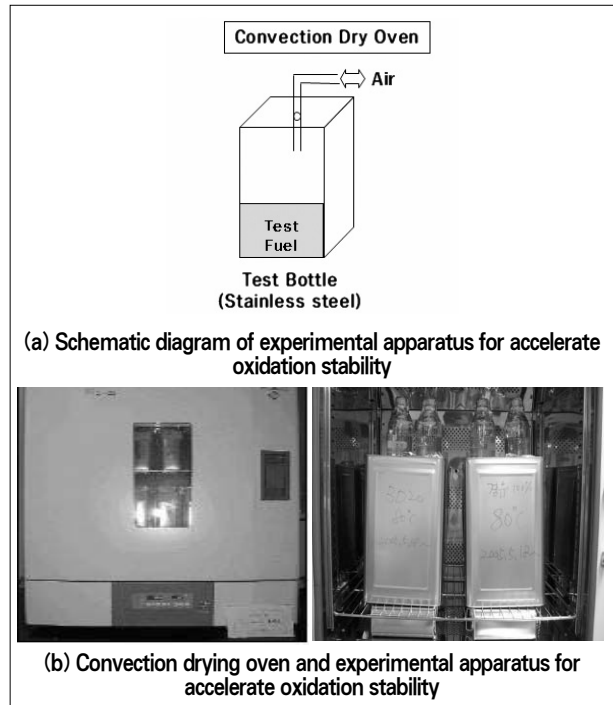


Fig. 1 Experimental apparatus for accelerate oxidation stability test

거], 세 번째로 연료분사시스템 연료온도인 80 °C, 네 번째로 실제 연료분사시스템 내에서는 고온·고압의 가혹한 조건이기 때문에 보다 가혹한 조건인 100°C 등 4가지 저장 온도조건을 설정하였다.

각각의 저장조건하에 있는 바이오디젤, 경유, BD5 및 BD20의 사용수명을 예측하기 위하여 산화와 가장 밀접한 관계가 있는 시험항목의 선정이 우선 요구되었다. 따라서 10개 품질기준 항목을 대상으로 10일 간격으로 300 ml씩 sampling하면서 80 일 동안 예비시험을 수행하였다. 예비시험을 완료하고 시험결과를 분석하여 산화와 가장 밀접한 항목으로 판단된 동점도, 산가 및 밀도를 선정하여 1주 간격으로 sampling하면서 30주 동안 본 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바이오디젤(BD100) 산가(Acid Number) 측정

바이오디젤, BD20, BD5, 경유(BD0)를 대상으로 물리·화학적 시험분석을 각각 수행하여 자동차용 연료로서 품질특성

을 우선 파악하고자 하였다.

바이오디젤, BD5, BD20 및 경유의 각 시험항목별 추세곡선 식과 추세곡선식에 의해 도출된 사용수명을 검토한 결과, 첫 번째 동점도의 경우 저장온도에 따라 동점도의 변화가 증가하는 경향을 보이고 있어 산화반응이 온도의 함수라는 것을 보여 주고 있으나, 상온의 저장조건에서 BD20에 대한 예측 사용수명이 경유와 BD5보다 길게 나오는 모순점을 드러내고 있었다. 이는 상온에서 저장기간에 따라 동점도가 의미 있는 변화를 보이고 있지 않은 결과에 기인한 것으로 판단되며, 추세곡선식의 상관도(R²)도 0.26~0.66으로 극히 낮게 나왔다.

두 번째로 밀도의 경우, 각 저장온도에서 전체적으로 변화폭이 0.01~0.4로 극히 낮게 나와 의미있는 변화를 보이지 않고 있다. 이에 따라 바이오디젤, BD5, BD20 및 경유의 추세곡선식의 상관도(R²)도 동점도와 산가에 비해 상대적으로 낮게 나왔으며, 예측된 사용수명도 BD함량 증가에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 있어 밀도를 factor로 한 산화반응 정도 추정 및 사용수명 예측 등은 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

마지막으로 산가(Acid number)의 경우 저장기간 및 온도상승에 따라 수십배 증가하는 등 가장 변화폭이 크고 추세곡선식의 상관도(R²)도 상대적으로 높게 나왔으며, 바이오디젤 연료의 산화 정도를 추정할 수 있는 factor로서 가장 유용한 항목으로 판단된다. 또한, 예측된 사용수명도 바이오디젤 혼입량 증가 및 온도상승에 따라 감소하는 등 일정한 경향을 보이고 있었다. 따라서, 사용수명 예측을 위한 가장 적절한 factor로서 산가를 선정하였다.

BD100을 대상으로 실온, 43 °C, 80 °C 및 100 °C에서 시간 변화에 따라 산가가 변화하는 결과를 그래프로 그리고 최소제곱법으로부터 Table 2와 같은 상관관계 식을 도출하였다. BD100은 『석유및석유대체연료사업법』에 품질기준(0.5 mgKOH/g 이하)이 있으나 이는 자동차용 연료로서의 품질기준이 아니라 원료 개념이기 때문에 이 기준을 사용수명 예측에 그대로 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서, BD20의 산가가 0.0716 mgKOH/g 일 때 품질기준은 0.1 mgKOH/g 임을 감안하여 이와 동일 비율로 BD100의 품질기준을 정하면 0.23 mgKOH/g으로 된다. 이 기준을 근거로 추세곡선식에 의하여 수명예측을 Table 2와 같이 도출할 수 있었다. 전체 온도조건에서 대단히 우수한 상관도 (R²)를 보이고 있어 산화정도과 사용수명 예측을 위한 최적의 factor임을 알 수 있다.

Table 2. Equations of Acid Number according to temperature for BD100

	산가 추세곡선식	상관도 (R ²)
RT	$Y = 0.16105 + 0.00191 X$	0.95
43 °C	$Y = 0.12736 + 0.013 X$	0.99
80 °C	$Y = 0.15122 + 0.00962 X + 0.000729X^2$	0.99
100 °C	$Y = 0.14276 + 0.06409 X + 0.000287X^2$	0.98

3.2 바이오디젤(BD100)의 색 변화

BD100을 대상으로 실온, 43 °C, 80 °C 및 100 °C에서 가속노화시킨 시료를 대상으로 시간 변화에 따라 색(color) 변화를 Fig. 2와 같이 나타내었다. 가속노화 시간에 따른 BD100의 색 변화는 실온, 43 °C 및 80 °C에서 노화시킨 시료의 경우 25주차까지 관찰한 결과 미세한 갈색으로 서서히 변화되었다. 100 °C에서 가속노화 시킨 시료의 경우 1주후부터 색변화가 진행되기 시작하였으며, 노란색→갈색→검정색으로 변화였다.

3.3 바이오디젤의 사용 수명 예측

앞서 수행한 산화특성 연구결과(7)를 활용하여 산화와 밀접한

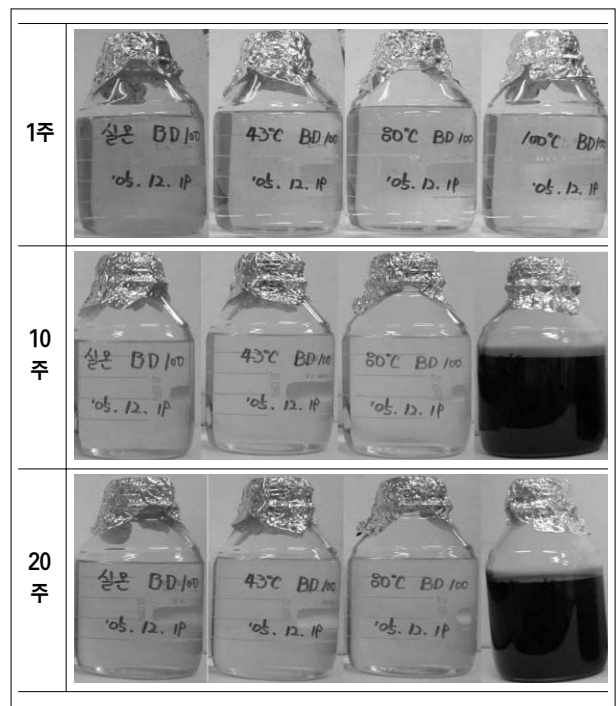


Fig. 2 Color variation of BD100 according to storage time

품질항목을 선정하고, 저장조건별로 산화시간 경과에 따라 주기적으로 시료를 채취하여 저장안정성을 평가하여 사용한계를 추정하고자 하였다. 또한, 품질변화 측정결과를 시간에 따라 Plot하고 이 들 관계로부터 상관도(R²)가 가장 양호한 추세곡선식을 도출한 다음, 화학반응 속도를 적용하여 임의의 온도에서 사용 한계를 예측할 수 있는 사용 수명식을 도출하고자 하였다. 산가결과의 활용에 의해 임의의 온도조건에서 정확한 사용 수명을 예측하기 위한 사용수명식을 도출하기 위한 방법으로서 화학속도론에 의거한 Arrhenius' equation을 적용하였다. 일반적인 연료 및 오일의 산화속도는 아래 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$-r = -\frac{1}{V} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \quad (1)$$

농도가 일정할 경우 식 (1)에서 오일의 산화속도 상수 k 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$-k = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서 k = 분해속도 상수, A = 상수, E = 활성화에너지 (kcal/mol), T = 절대온도 (K)

오일의 수명은 연료의 산화속도와 반비례하므로 식(2)를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Life time} \propto \left(\frac{1}{A}\right) \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

식(3)의 양변에 로그를 취하면 식(4)와 같다.

$$\log(\text{Life time}) \propto \frac{C}{T} - \log A \quad (4)$$

여기서 $C = \left(\frac{E}{R}\right) \log e$

수명식(4)을 활용하여 임의의 온도에서 경유, BD5, BD20 및 바이오디젤에 대하여 사용수명식을 도출하고자 하였다. 사용 수명식을 도출하기 위하여 첫 번째로 산가에 의하여 각 연료의 추세곡선식을 통해 도출된 각 온도(실온, 43 °C, 80 °C 및 100 °C)에서의 사용수명값에 Log를 취한 Log (life time)을 구하고 (Y축), 두 번째로 각각의 온도를 1/T로 하여 값을 구한 다음(X

축) 이를 도식화하였다. 도출된 사용수명식에 의해 임의의 온도에서 각 연료의 사용수명을 예측하였다.

3.3.1 자동차용 경유(Petrodiesel)

경유의 사용 수명식은 Y축인 Log (life time)과 X축인 온도에 대한 상관도와 상관관계식을 구하기 위해 Fig. 3과 같이 그래프를 그렸다. 온도와 Log (life time)의 데이터로부터 최소제곱법 (least square method)를 적용한 경우 상관도 (R²)는 0.93였으며, 양호한 상관관계를 나타내어 자동차용 경유의 사용 수명식으로서 식(5)는 적절한 것으로 판단하였다. 또한 사용 수명은 온도상승에 따라 급속히 감소함을 알 수 있었다.

$$\text{Log(Life time)} = \frac{2.95813 \times 10^3}{T} - 6.89531 \quad (6)$$

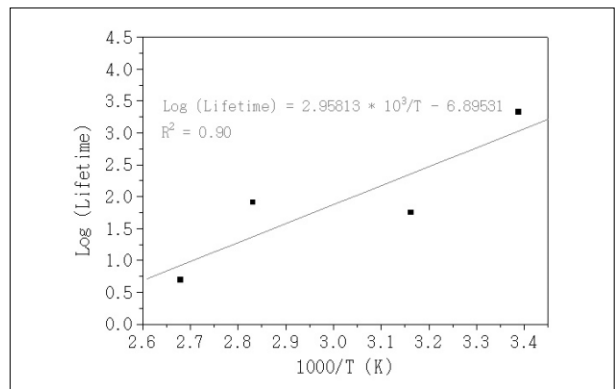


Fig. 3 Life time equation of petrodiesel

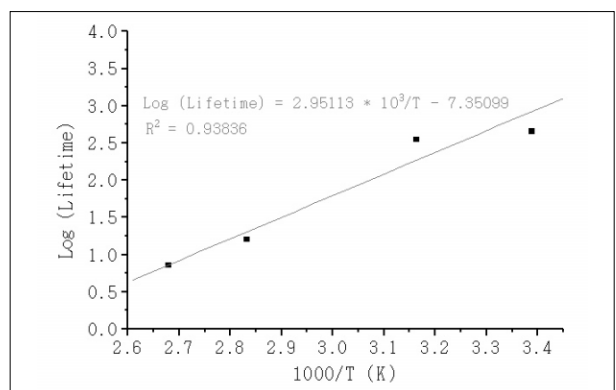


Fig. 4 Life time equation of BD5

3.3.2 BD5

BD5의 경우 상관도 (R²)는 0.99로 대단히 양호한 상관관계를 나타내어 식(6)이 BD5의 사용 수명식으로서는 최적으로 판

단하였다. BD5 또한 사용 수명은 온도상승에 따라 급속히 감소하며 Petrodiesel과 비교하여 각 온도조건에서 사용수명이 약 1/2~1/3로 줄어든 것을 알 수 있다.

$$\text{Log(Life time)} = \frac{2.95113 \times 10^3}{T} - 7.35099 \quad (6)$$

3.3.3 BD20

BD20의 경우 상관도 (R^2)가 1에 가까워 대단히 양호한 상관 관계를 나타내고 있으며, 따라서 식(7)을 BD20의 사용 수명식 으로서는 최적으로 판단하였다. BD20 또한 사용 수명은 온도 상승에 따라 급속히 감소함을 알 수 있었으며, 경유와 비교하여 각 온도조건에서 사용수명이 약 1/5~1/8로 대폭 줄어든 것을 알 수 있다.

$$\text{Log(Life time)} = \frac{2.16232 \times 10^3}{T} - 5.52021 \quad (7)$$

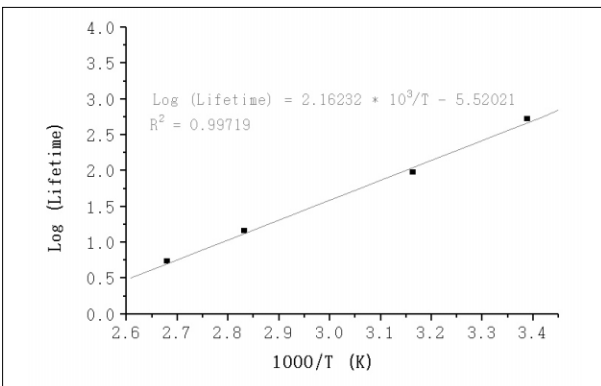


Fig. 5 Life time equation of BD20

3.3.4 바이오디젤 (BD100)

BD100의 경우 상관도 (R^2)는 0.94로서 비교적 양호한 상관 관계를 나타내고 있어 식(8)이 BD100의 사용 수명식으로서 적절한 것으로 판단하였다. BD100 또한 사용 수명은 온도상승에 따라 급속히 감소하고 각 온도조건에서 Petrodiesel, BD5 및 BD20과 비교하여 사용수명이 가장 짧다는 것을 알 수 있었다.

$$\text{Log(Life time)} = \frac{1.79291 \times 10^3}{T} - 4.52245 \quad (8)$$

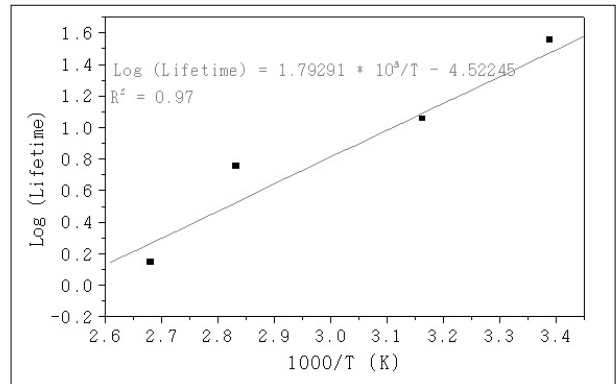


Fig. 6 Life time equation of Biodiesel (BD100)

4. 결론

국내에서 상용화가 시작되고 있는 대두유로부터 생산된 바이오디젤을 대상으로 하여 바이오디젤(Biodiesel), BD5, BD20 및 경유(Petrodiesel)의 연료로서 사용수명 예측을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 바이오디젤, 경유, BD5, BD20은 산화가 진행될수록 산가(Acid number), 동점도(Kinematic Viscosity) 및 밀도(Density)는 증가하였으며 특히 산가는 저장기간 및 온도상승에 따라 수십배 증가하는 등 가장 변화폭이 크고 추세곡선식의 상관도(R^2)도 상대적으로 높게 나와 바이오디젤 연료의 산화 정도를 추정할 수 있는 인자로서 가장 유용한 항목으로 판단되었다.
- (2) 산가 측정결과의 활용에 의해 임의의 온도조건에서 정확한 사용수명을 예측하기 위하여 화학속도론에 의거한 Arrhenius 식을 적용하여 각각의 연료에 대한 사용수명식을 도출하였다.
- (3) 도출된 사용수명식으로부터 BD100이 가장 빠르게 산화가 진행되었고 바이오디젤 혼합량이 증가할수록 사용수명이 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

References

- (1) W. Hiroaki, 2005, "FAME混合輕油の小型ディーゼル車の排氣に及ぼす影響", ENEOS Technical Review, 47(1), 11-12.
- (2) C.Y. Seo, S.C. Gwoak, J.M. Park, D.I. Kang, Y.S. Lim, C.C. Kim, M.D. Eom, C.S. Hwang, Y.J. Lee, Y.D. Pyo, C.S. Jung, E.J. Jang, 2005, "The Characteristics of the Exhaust Gas Emission by Fuel Typs", National Institute of Environmental Research, NIER No. 2005-31-776, 35-49
- (3) Shiro Saka, 2006, "All of Biodiesel", 1-31, IPC.
- (4) Florence Lacoste, Lionel Lagardere, 2003, Stability of Biodiesel, 6-15, BLT.
- (5) P. Bondioli, A. Gasparoli, L.D. Bella, S. Tagliabue, 2002, "Evaluation of Biodiesel Storage Stability Using Reference Methods", Eur. J. Lipid Sci. Technol., 104, 777-784.
- (6) P. Bondioli, A. Gasparoli, L.D. Bella, S. Tagliabue, G. Toso, 2003, "Biodiesel Stability Under commercial Storage Condition over One Year", Eur. J. Lipid Sci. Technol., 105, 735-741.
- (7) C.S. Jung, J.I. Dong, 2007, "Oxidation characteristics of biodiesel and biodiesel blend fuel I", J. Korean Ind. Eng. Chem., accepted.
- (8) D.S. Yang, Y.U. Kim, G.U. Jung, I.O. Seo, J.S. Han, 2002, "The Life Time of Polyolester Oils through Oxidation Stability Analysis and TGA", 6(1), 178-181.
- (9) J.G. Speight, 1991, "The Chemistry & Technology of Petroleum", 724.
- (10) Delphi, Bosch, Denso, Siemens, Stanadyne, 2004, "Fatty Acid Methyl Ester Fuels", Joint FIE Manufacturers Statement.

정 총 섭



1988년 전남대학교 화학공학과 공학사
2000년 경원대학교 화학공학과 공학석사
2007년 서울시립대학교 환경공학과 공학박사

현재 한국석유품질관리원 연구개발팀장
(E-mail : csjung@kipeq.or.kr)

이 영 재



1977년 전북대학교 기계공학과 공학사
1980년 고려대학교 기계공학과 공학석사
1990년 토요하시기술과학대학 총합에너지공학 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 자동차에너지환경연구센터 센터장
(E-mail : yjl@kier.re.kr)

동 종 인



1979년 서울대학교 화학공학과 공학사
1981년 한국과학기술원 화학공학과 공학석사
1990년 미국 New Jersey Inst. of Tech. 환경공학과 공학박사

현재 서울시립대학교 환경공학부 정교수
(E-mail : jidong@uos.ac.kr)