

휘발유/에탄올 혼합연료의 자연발화 및 연소배기가스 특성에 관한 수치적 연구

이의주

부경대학교 안전공학과

Numerical Study on Auto-ignition and Combustion Emissions Using Gasoline/Ethanol Surrogates

Eui Ju Lee

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received December 1, 2014; Revised April 15, 2016; Accepted May 30, 2016)

요 약

자동차화재는 매년 5,000건 이상의 사고가 발생되며, 직접적인 피해 뿐 아니라 교통혼잡과 공해물질 배출 등 많은 2차적 손실을 가져온다. 최근에는 자동차 연료로서 휘발유에 에탄올을 섞는 것을 미국 등 여러 나라에서 상용화하고 있는데 이는 기존의 화석연료의 사용을 억제하고 바이오연료의 소비를 촉진시키기 위함이며, 향후 법제화를 통해 이러한 에탄올 함유량을 향후 더 크게 늘릴 예정이다. 본 연구에서는 에탄올을 혼합한 가솔린 연료를 사용하는 자동차의 엔진과 후처리 시스템 화재 위험성을 조사하기 위해 PSR로 모델링한 엔진에서 연소특성을 조사하였다. 에탄올 첨가 연료를 사용하는 경우에는 에탄올 분율이 증가하면 열적인 화재 가능성이 감소되었다. 또한, NO_x와 CO 배출량이 감소하였지만, 미연탄화수소의 배출은 증가됨으로 예측되었다. 이러한 결과는 후처리 장치 중 기존의 삼원촉매의 경우에는 보다 저온이 예측되므로 열적인 화재발생이 감소한다고 예상되지만, 미연탄화수소의 증가로 후처리장치에 고온분위기가 형성되어야 하므로 화재의 위험성이 증가될 수 있다.

ABSTRACT

More than five thousands transportation fires occur annually in Korea and the resulting destruction of property and loss of life is huge and results in traffic and environmental pollution. The recent development of automobile technology such as the hybrid concept and use of bio fuels makes fire protection even more difficult due to a lack of understanding of the new adapted system including vehicle engines. In this study, a numerical simulation was performed on a PSR (perfectly Stirred Reactor) to simulate an automobile engine and to clarify the effect of gasoline/ethanol surrogates as a fuel. The temperature, NO_x and soot emissions were predicted to decrease with increasing ethanol content, but that of unburned hydrocarbons was found to increase dramatically. The result will provide not only the basic thermal characteristics for engines and their after-treatment systems, but also make it possible to assess the potential for fire events in these systems when an ethanol mixed fuel is used in gasoline vehicles.

Keywords : Vehicle fires, Gasoline/ethanol surrogates, Perfectly stirred reactor (PSR), Internal engine

1. 서 론

소방방재청의 통계에 의하면 자동차화재는 최근 5년간 약 5,000건 이상 매해 발생하고 있으며, 2011년 화재연감에서는 전체 5,595 건 중 기계적 요인 1,699건으로 가장 큰 원인으로 알려져 있다⁽¹⁾. 이러한 자동차 화재로 인해 자동차와 적재물의 소실 및 탑승자의 사상과 도로시설물의 손상 등 직접적인 피해는 물론 교통정체와 2차 교통사

고 유발, 환경오염 등을 초래하고 있다. 자동차화재는 자동차 자체에 기인하여 발생하는 화재, 교통사고에 의한 화재, 방화, 기타의 원인에 의한 화재로 분류할 수 있다. 또한 전기계통에 의한 화재, 연료계통의 화재, 배기관계통의 화재 등으로도 분류할 수 있는데, 전기계통은 주로 배선단락 등이나 전기기기에 기인하고 연료계통은 연료·오일계통 그리고 배기관계통은 배기관의 발열이나 가연물 낙하에 기인한 화재가 주된 이유로 알려져 있다⁽²⁾.

이중에서 자동차 엔진연소와 관련한 화재원인은 연료계통과 배기계통에 위치한다. 엔진 내 연소에 의한 화재원인은 크게 연소에 의한 실린더 주위 열전달 특성과 연료누설이 주된 원인으로 알려져 있다. 그리고 배기계통과 관련해서는 엔진 내에서 고온상태의 연소 가스가 우선 배기 매니홀드에서 각 실린더로부터 모아져 머플러로 보내 외부로 배출되는데 현재 자동차에는 배기매니홀드와 머플러 사이에 촉매장치가 설치되어 있다⁽³⁾. 이는 배기가스에 포함된 유해한 CO, UHC(미연탄화수소), NO_x(질소산화물)를 저감시키는 것이 목적이다. 이들 현상이 발생하면 미연소 가스가 촉매장치에 유입하여 기기 내에서 가스가 연소되어 장치 자체가 적열상태가 되며, 이 때 복사열에 의해 차실 내의 바닥케트 등에서 발화하고 있다. 이와 같이 엔진연소에서 화재현상을 정확히 예측하고 방화성을 적용하기 위해서는 실린더 내의 온도와 함께 다양한 배기가스의 배출 특성을 규명하고 이해하여야 할 필요성이 있다. 하지만 복잡한 시스템의 이유 뿐 아니라 환경규제에 따라 달라지는 자동차 시스템의 변화에 쉽게 적응하지 못하는 화재특성 기초연구 때문에 자동차 화재에 대한 이해와 규명이 다른 분야에 비해 늦어지고 있는 실정이다.

위에서 보듯이 자동차 화재 기초연구를 위한 엔진 내 연소특성 조사에서 연료의 다양성이 전체 연소현상과 배기 시스템의 종류 및 성능을 결정하고 있다. 최근의 자동차 사용 연료는 휘발유에 에탄올을 섞는 것은 미국 등 여러 나라에서 상용화하고 있는데 이는 기존의 화석연료의 사용을 억제하고 바이오연료 등의 소비를 촉진시키는 이유에서이다. 미국의 경우 주마다 다르지만 최소 10%의 에탄올을 섞도록 법제화하고 있으며 이러한 에탄올 함유량을 향후 더 크게 늘릴 예정이다. 대기환경 오염물질로서 본 연구에서 주된 관심을 가지는 물질은 NO_x와 매연으로서 이 두 물질은 디젤엔진에서 가장 대표적인 공해물질로 알려져 있을 뿐 아니라 두개의 저감이 동시에 이루어지지 않는 기구적 특성이 존재한다. NO_x의 발생은 기존의 Zeldovich mechanism으로서 열적 특성이 가장 두드러진 생성기구이고 그 이외에도 prompt NO_x, Fuel NO_x 등으로 특성화 할 수 있다⁽⁴⁾. 매연이 탄화수소계 연료로부터 발생하는 과정은 연료의 열분해, 다중고리 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH), 초기입자, 응집, 표면성장, 탄화, 응고, 그리고 산화와 같은 복잡한 화학적·물리적 단계로 구성되어 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 하지만 이러한 연구는 비교적 간단한 기체 탄화수소 연료들로서 수행되어 왔으므로, 가연물의 종류가 기존 가솔린 뿐 아니라 에탄올이 포함되어 있는 연료의 엔진연소 등에는 실험적 결과가 매우 제한되어 있어, diesel particulate filter (DTF) 등의 후처리 장치를 설계 및 화재원인 특성예측에 많은 어려움이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 자동차엔진을 수치적으로 간단히 모사하여 알코올 연료를 휘발유에 첨가하였을 때 엔진 특

성과 오염물질 배출특성에 대해서 연구하였다. 즉, 자동차 엔진실린더를 완전혼합반응로(PSR)로 가정하고 반응로 내의 온도특성과 NO_x, 매연 등의 배출특성을 조사하였다. 이러한 간단한 연소특성은 자동차화재에서 엔진 주위의 고온 열전달에 기인한 화재특성과 DTF 등의 배기시스템에서의 화재 가능성을 예측하고 방지 방법을 위한 설계에 기초적인 데이터와 방법론을 제시할 수 있다.

2. 수치해석 방법

엔진 연소 모사를 위해 PSR 모델을 도입하였다. PSR는 물리적 차원이 없는 반응로로서 혼합기의 유체역학적 특성을 배제하고 화학반응에 중심을 둔 모델이다. 본 연구의 대상은 엔진실린더 내 연소현상이므로 혼합기가 실린더 내에 균질하게 분포되어 있음을 가정하면 반응온도와 여러 오염물질을 예측하는데 매우 적합한 모델이다. PSR모델에서는 정상상태를 가정하였고 CHEMKIN 3.0의 PSR 코드를 이용하였다⁽⁸⁾. 이 조건에서 방정식은 식(1)과 (2)의 대수방정식으로 간략화된다.

$$\dot{m}(Y_k - Y_k^*) = \dot{\omega}_k W_k V = 0 \quad (1)$$

$$\dot{m} \sum_{k=1}^K (Y_k h_k - Y_k^* h_k^*) + Q = 0 \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 질량유량, Y_k 는 K 화학종의 질량분율, $\dot{\omega}_k$ 는 화학종의 몰생성율(molar production rate), W_k 는 화학종의 분자량, V 는 체적을 의미한다. h_k 는 화학종의 단위 질량당 엔탈피(specific enthalpy)이고, Q 는 반응로의 외부 열손실을 의미하는데 본 연구에서는 단열조건이라 가정하여 $Q = 0$ 으로 가정하였다. 그리고 상첨자(*)은 입구조건을 의미한다. 반응로에서의 체류시간, τ 는 식(3)으로 정의되는데 혼합기의 체류시간이 매우 크면 평형상태로 간주될 수 있다.

$$\tau = \rho V / \dot{m} \quad (3)$$

본 WSR 수치해석을 위해 혼합기가 엔진 실린더에 채워지고 연소까지의 과정을 정상상태, 특정압력에 놓여있다고

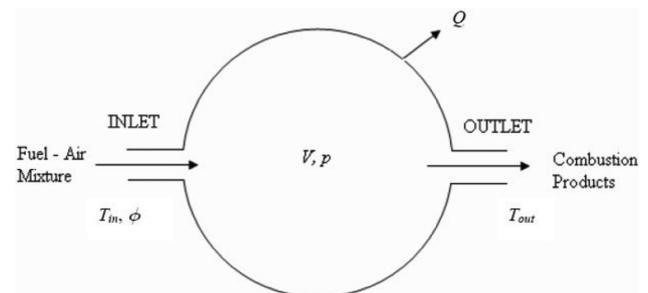


Figure 1. Schematics of WSR.

가정하였다. 실제 엔진작동에 기반한 계산을 수행하기 위해 WSR의 체적을 고려한 체류시간을 0.005 s로 설정하였다. 이 체류시간은 일반적인 4행정 엔진의 2,500 rpm에 해당하는 값이다. 연료로는 가솔린 모사연료에 에탄올을 다른 분율로 섞어 효과를 고찰하였고 순수 가솔린의 결과와 비교하기 위하여 에탄올의 함량을 0%에서 100%까지 넓은 범위에서 조사하였고, 혼합연료와 산화제인 공기의 비율은 실제 자동차 연소에서 사용되는 완전혼합 당량비를 사용하였다. 가솔린/에탄올 혼합물을 모사하기 위해서 사용된 화학 반응기구는 모사 가솔린(gasoline surrogate)을 사용하였는데 실제 가솔린은 매우 다양한 분자들의 화합물이므로 이에 대한 단순화된 검증된 기구가 요구되었다. 따라서 문헌조사를 통해 검증된 A. Frassoldati 등의 모델을 사용하였고⁽⁹⁾, 이 화학 상세반응기구는 73개의 화학종(species)과 8553개의 반응기구로 구성되어 있다. 이 반응기구에서는 모사 가솔린 연료를 3가지의 유기화합물을 혼합하였는데 iso-octane (iC₈H₁₈) 50%, toluene (C₇H₈) 35% 그리고 1-hexene (nC₆H₁₂) 15%로 구성하였다.

3. 수치해석 결과 및 토의

에탄올 희석된 유사 가솔린 연료의 자연점화온도(auto ignition temperature)를 에탄올의 부피분율에 따라 계산하여 Figure 2에 도시하였다. 실제 비정상적으로 엔진룸 등에서 유출되는 연료가 주변의 뜨거운 표면에 의해 발화되어 화재로 되는 현상이 자동차 화재의 빈번하므로 자연점화온도는 화재위험성을 나타내는 중요한 파라미터이다. 자연점화온도를 계산하기 위해서 기존연구⁽¹⁰⁾의 방법론을 사용하였는데, 이 방법에서는 혼합기에 초기온도를 달리하여 발화지연시간(ignition delay)을 결정한다. 이러한 경향은 잘 알려진 log를 취한 지연시간이 온도의 역수에 비례한다

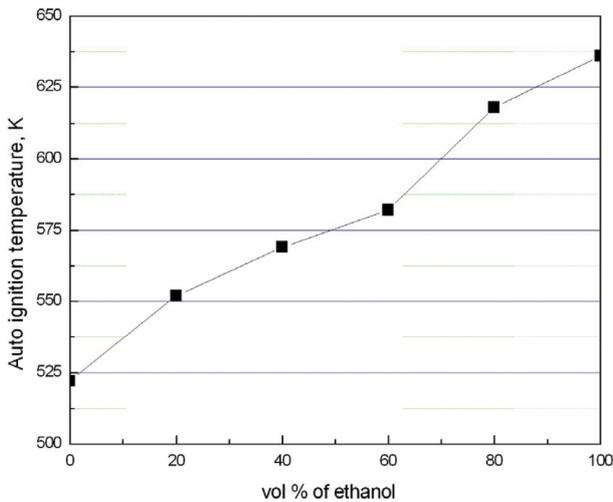


Figure 2. Auto-ignition temperature of stoichiometric gasoline/ethanol mixture at 1 atm.

는 사실을 잘 보여주고 있는데, 특정 온도 이하로 낮추게 되면 발화시간은 무한대로 접근하게 되고, 이때의 온도를 자연발화온도(autoignition temperature, AIT)로서 정의할 수 있다. 본 연구에서는 혼합기의 조건을 1기압 상태로 놓아 외부로 누출된 상황을 모사하였고, 발화지연시간을 수치적으로는 무한히 할 수 없으므로 5초 이상의 발화지연시간을 보이는 온도를 자연점화온도로 채택하였다. Figure 2에서와 같이 혼합연료에서 높은 에탄올의 부피분율은 자연점화온도를 상승하게 한다. 이러한 경향은 같은 온도의 고온표면에 연료가 누출이 되었을 때 발화의 가능성이 에탄올 희석 연료가 보다 작아진다고 할 수 있다. 또한 계산된 유사 가솔린의 자연발화온도를 보면 약 520 K으로서 에탄올보다 낮음을 볼 수 있다. 사용된 유사연료 성분의 자연점화온도를 참고문헌⁽¹¹⁾ 값과 비교해보면 주성분인 iso-octane과 toluene은 에탄올보다 높은 온도를 보이고 hexene 만이 에탄올보다 낮음을 볼 수 있다. 따라서 혼합연료의 자연점화온도는 낮은 물질이 주된 영향을 미침을 알 수 있었다.

PSR 온도 등 변수에 대한 압력효과를 고찰하기 위하여 1기압과 20기압 하에서 계산을 수행하였고, 그 결과를 Figure 3에 도시하였다. 전체적인 에탄올 부피분율 증가에 따른 온도의 변화 경향은 1기압과 20기압 결과 모두 단조 감소하는 경향을 보인다. 물론 유입되는 혼합기의 당량비를 모든 계산에서 1로 정하였기 때문에 유입되는 산화제의 유량이 달라지므로 직접적인 비교는 가능하지 않지만, 가솔린과 에탄올의 발열량(heat of combustion)을 보면 가솔린의 경우 43.7 MJ/kg이고, 에탄올의 경우 26.8 MJ/kg 임을 비교하면⁽⁴⁾ 높은 에탄올 부피분율의 경우 반응열의 감소가 낮은 온도의 주된 이유로 볼 수 있다. 또한 산소의 몰농도는 반대의 경향을 보이는데 역시 반응에 참여하는 산화제의 산소의 양이 달라지기 때문이다. 압력이 높으면 Arrhenius 형태의 화학반응율이 커지므로 20기압의 경우가 대기압의 경우보다 반응 후 온도가 모든 범위에서 약

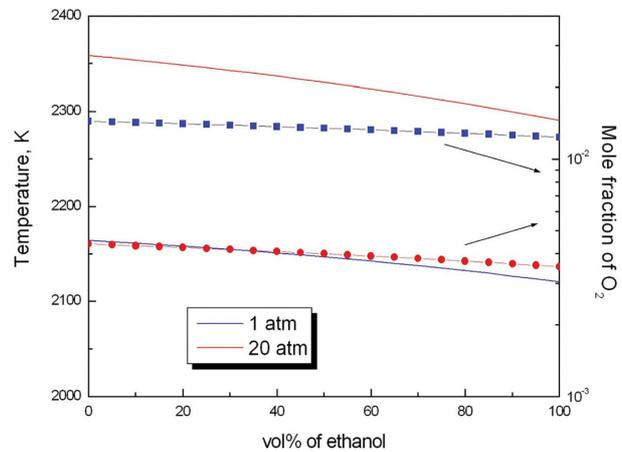


Figure 3. Temperature & X_{O2} under 1 atm and 20 atm.

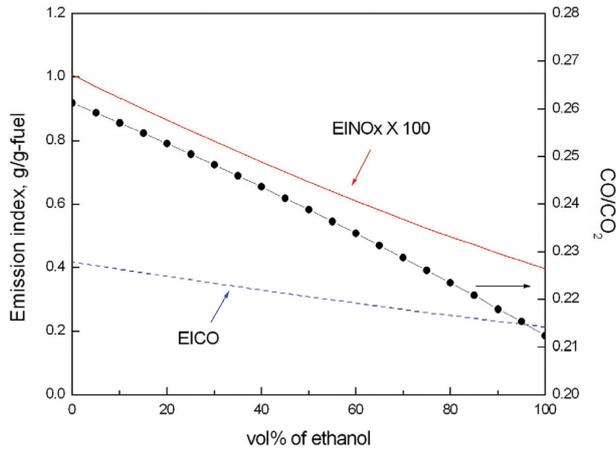


Figure 4. NO_x & Comb. properties at 1 atm.

200 K 상승함을 볼 수 있다. 압력에 따른 정량적인 온도변화는 에탄올 100%인 경우가 가솔린 100%보다 20기압의 차이에서 50 K 정도 차이가 보이는데 이도 연료의 발열량에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 엔진과 오일 시스템에서는 에탄올 첨가 연료를 사용하는 경우에는 열적인 화재 가능성이 감소된다 할 수 있다.

1기압 하에서 대표적 오염물질로서 NO_x의 양과 CO, CO₂의 양을 Figure 4에 도시하였다. 오염물질 농도표기에 사용된 단위는 emission index로서 공급된 연료의 단위 질량에 대한 생성물질의 질량비를 나타낸다. 에탄올의 양이 커질수록 NO_x의 양은 크게 감소함을 볼 수 있는데 이러한 경향은 에탄올의 특성이라기보다는 온도의 영향으로 생각된다. 실제 EINO_x를 구성하는 질산화합물의 주된 두 성분인 NO와 NO₂를 비교하여 보면 약 10,000배 정도 NO의 농도가 높음을 볼 수 있었다. 따라서 주된 NO_x 생성기구인 Thermal NO_x를 고려하면 연소 온도 감소에 따라 NO 생성이 크게 감소하는 것이 전체 NO_x 생성량을 감소시키는 기구라고 판단된다. EICO와 CO/CO₂ 비율의 경우에는 에탄올 초기 부피분율이 커질수록 감소함을 나타내고 있다. EICO의 경우에는 가솔린 연료의 탄소 원자가 보다 많으므로 감소하는 것이 일반적이지만 CO/CO₂ 비율이 감소하는 현상은 에탄올 연료가 가솔린에 비해 보다 탄소전환이 완전히 된다는 것을 의미하여 완전연소에 보다 가깝게 반응함을 볼 수 있다.

아래 Figure 5의 그래프는 매연과 관련된 화학종의 농도를 도시하였다. 먼저 매연 입자의 생성 및 성장에 가장 큰 영향을 미치는 C₂H₂의 농도는 에탄올의 증가에 따라 증가하지만 매연의 핵화(inception)에 결정적인 pyrene (C₁₆H₁₀)의 농도는 감소함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 에탄올의 증가는 아세틸렌 반응기(radical)가 pyrene과 같은 PAH로의 변환을 억제하는 효과로서 설명할 수 있다. 이러한 효과는 미연소 탄화수소(unburned hydrocarbon, UHC)의 농도가 에탄올의 분율이 증가할수록 증가하는 결과로 비 확

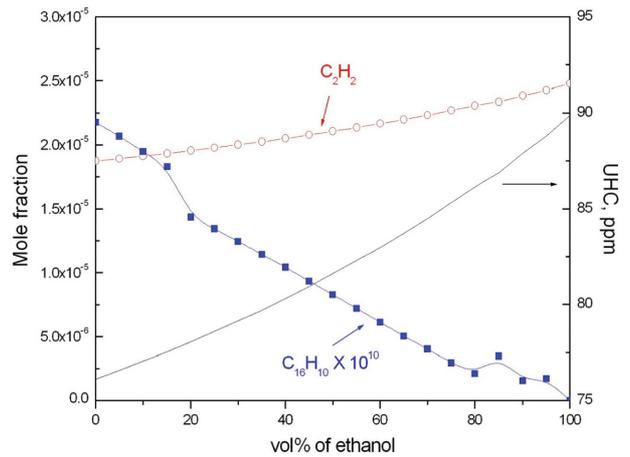


Figure 5. Soot related properties at 1 atm.

인할 수 있다. 즉, Figure 5의 결과로부터 에탄올의 증가는 매연의 성장에 필수적인 기체상의 탄화수소는 증가시키지만 매연입자로의 전환을 위한 핵화 및 초기입자생성을 둔화시키는 효과를 가져와 궁극적으로는 매연의 생성을 억제시킨다고 볼 수 있다. 하지만 UHC 결과에서 보듯이 배기가스에는 탄화수소 연료가 다량 함유되어 있어 순수 가솔린 연료에 비해 UHC 성분을 제거하는 노력이 요구된다고 볼 수 있다. 이러한 매연관련 특성은 알콜류에 포함되어 있는 OH기에 의해 설명될 수 있고 일반적으로 OH기가 존재하는 연료에는 매연생성이 극히 둔화됨이 잘 알려져 있다. 최근에 자동차 엔진 방식으로 널리 사용되고 있는 가솔린 직분사(GDI) 엔진의 경우 후처리 장치로서 기존의 삼원촉매 뿐 아니라 gasoline particulate filter (GPF)를 이용할 예정으로 있는데, NO_x나 매연 등의 저감을 위해서는 에탄올 첨가 고온반응을 요구하지는 않지만 UHC의 증가로 인하여 기존의 후처리 시스템에 비하여 보다 고온분위기가 형성되어야 하므로 화재의 위험성이 증가될 수 있음을 고려하여야 한다.

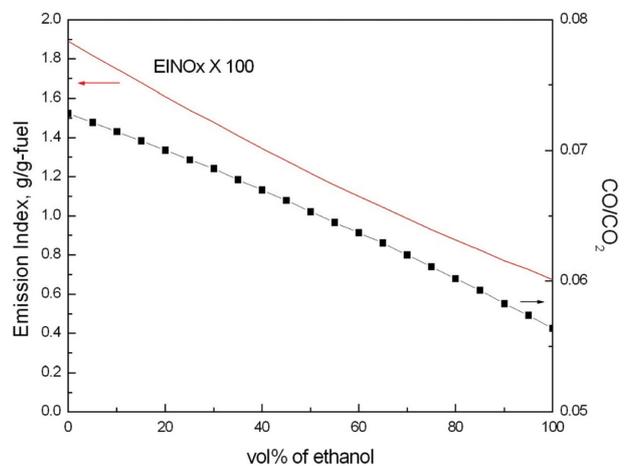


Figure 6. Nox & Combustion properties at 20 atm.

Figure 6에는 20 atm에서의 NO_x와 CO/CO₂ 비를 도시하였다. 에탄올 분율에 따른 전체적인 경향은 Figure 3의 1 atm의 경우와 유사하지만 절대값에 큰 차이를 보이고 있다. 1기압에 비해 전체적으로 약 2배 가까이 EINO_x가 증가함을 볼 수 있는데 이러한 결과는 Figure 3에서 결과 되었던 온도상승이 thermal NO_x의 증가를 야기시켰기 때문이다. 하지만 CO/CO₂ 비율의 절대치는 1/3배 정도 감소되었음을 확인할 수 있다. 전체 연소과정 중 CO의 감소는 압력의 증가가 화학반응을 촉진하여 보다 완전한 반응으로 바뀐 결과라 볼 수 있다. 매연의 대한 그래프는 도시하지 않았지만 Figure 5와 정성적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었고, 다만 그 절대값의 범위는 1/2로 감소됨을 확인하였다. 이러한 결과도 압력의 증가는 화학반응을 촉진시켜 동일한 WSR 조건에서 산화반응이 촉진되었기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 압력이 높은 엔진연소 시 상압에서 예측되는 물리량에 비해 질산화합물의 처리는 보다 다량의 처리가 요구되고, 매연의 경우에는 반대로 감소됨을 예측할 수 있다.

앞에서의 에탄올 결과는 실제 에너지 방정식을 풀어서 에탄올의 분율이 달라짐에 따라 온도가 변하게 되고, 앞에서 설명한 것처럼 모든 배기가스의 농도가 온도에 크게 바뀌게 된다. 따라서 온도의 영향을 배제하고 순수하게 연료 조성에 대한 배기가스 효과를 고찰하기 위해서는 온도를 일정하게 두고 계산을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 WSR의 반응온도를 1700 K으로 고정하고 에탄올의 조성을 바꾸었을때 NO_x와 CO의 변화를 계산하였고, 이를 Figure 7에 도시하였다. EICO의 경우 상대적으로 저온 분위기에서 반응이 지체되어 불완전 연소에 의해 증가되는 경향을 보이고, EINO_x도 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 에탄올의 함량이 클수록 그 차이는 줄어들는데 이는 에탄올의 산소성분이 CO의 발생을 저하시키고 NO_x의 생성을 억제시키는 연료적 특성에 기인한다고 판단된다.

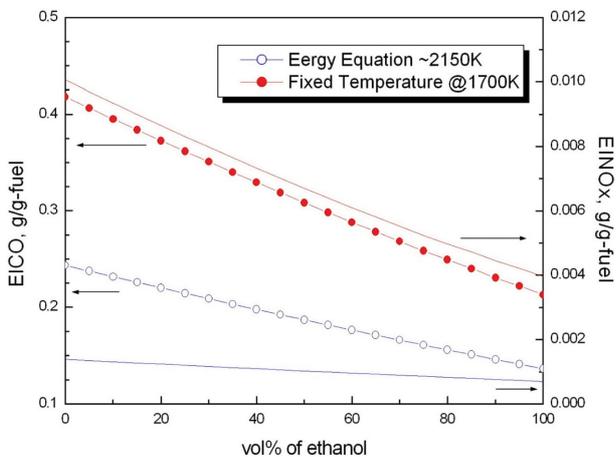


Figure 7. EICO and EINO_x with or without energy equation at 1 atm.

4. 결 론

에탄올을 혼합한 가솔린 연료를 사용하는 자동차의 엔진과 후처리 시스템 화재 위험성을 평가하는데 기초적인 물성특성을 제공하기 위해 PSR로 모델링한 엔진에서 연소특성을 조사하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 혼합연료에서 에탄올의 부피분율 ϕ 증가할수록 자연점화온도는 상승한다. 이러한 경향은 고온표면에 연료가 누출이 되었을 때 발화의 가능성이 에탄올 희석 연료의 경우 작아진다고 볼 수 있다. 또한 계산된 유사 가솔린의 자연발화온도를 연료 성분의 자연점화 온도와 비교해보면 혼합연료의 자연점화온도는 낮은 물질이 주된 영향을 미침을 알 수 있었다.

2) 전체적인 에탄올 부피분율 증가에 따른 온도의 변화 경향은 1기압과 20기압 결과 모두 단조 감소하는 경향을 보이는데 이는 높은 에탄올 연료의 발열량 감소에 기인한다. 따라서 엔진과 오일 시스템에서는 에탄올 첨가 연료를 사용하는 경우에는 열적인 화재 가능성이 감소된다 할 수 있다.

3) 가솔린/에탄올 혼합연료에서 에탄올 분율이 증가하면 NO_x와 CO 배출량이 감소하는데, 이러한 결과는 후처리 장치 중 기존의 삼원촉매의 경우에는 보다 저온이 예측되므로 열적인 화재발생이 감소한다고 예상된다.

4) 에탄올 분율이 증가함에 따라 매연은 줄어들지만 UHC가 크게 증가된다. 그러므로 가솔린 직분사(GDI) 엔진의 경우 GPF에서는 UHC의 증가로 인하여 에탄올 혼합 연료 사용시 보다 고온분위기가 형성되어야 하므로 화재의 위험성이 증가될 수 있다.

후 기

이 논문은 2012학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2012-0909).

References

1. National Fire Data System, "2011 Annual Report for Fire Statistics", Seoul, NEMA (2012).
2. E. P. Lee, "Analysis of Actual State of Motor Vehicle Fires in Korea", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 25, No. 2, pp. 47-59 (2011).
3. J. Y. Song, S. H. Sa, J. W. Nam, Y. J. Cho, J. P. Kim and N. K. Park, "Analysis on Vehicle Fires Caused by Damage of Diesel Particulate Filter (DPF)", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 70-76 (2012).
4. I. Glassman, "Soot Formation in Combustion Process", Proc. Comb. Inst., Vol. 22, pp. 295-311 (1988).
5. I. M. Kennedy, "Models of Soot Formation and Oxidiza-

- tion”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, pp. 95-132 (1997).
6. G. W. Mulholland, “Smoke Production and Properties”, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy (2002).
 7. E. J. Lee, K. C. Oh and H. D. Shin, “Soot Formation in Inverse Diffusion Flames of Diluted Ethene”, *Fuel*, Vol. 84, pp. 543-550 (2005).
 8. R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, M. E. Coltrin, J. F. Grcar, E. Meeks, H. K. Moffat, A. E. Lutz, G. Dixon-Lewis, M. D. Smooke, J. Warnatz, G. H. Evans, R. S. Larson, R. E. Mitchell, L. R. Petzold, W. C. Reynolds, M. Caracotsios, W. E. Stewart, P. Glarborg, C. Wang and O. Adigum, “The Chemkin Thermodynamic Databass”, *CHEMKIN Collection*, Release 3.0, Reaction Design, Inc., San Diego, CA (1997).
 9. A. Frassoldati, A. Cuoci, T. Faravelli and E. Ranzi, “Kinetic Modeling of the Oxidation of Ethanol and Gasoline Surrogate Mixtures”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 182, pp. 653-667 (2010).
 10. E. J. Lee and C. B. Oh, “Ignition Suppression in Hydrogen/Air Mixtures Inhibited by Heptafluoropropane”, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 22, No. 3, pp. 234-238 (2008).
 11. I. Glassman, *Combustion*, Third edition, Academic Press (1996).