

CO₂/NO_x 초저배출형 HCCI 엔진 연소기술과 신촉매제어기술

김 문 현

대구대학교 환경공학과

(2008년 11월 17일 접수; 2008년 11월 28일 수정; 2008년 12월 5일 채택)

HCCI Combustion Engines with Ultra Low CO₂ and NO_x Emissions and New Catalytic Emission Control Technology

Moon Hyeon Kim

Department of Environmental Engineering, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

(Manuscript received 17 November, 2008; revised 28 November, 2008; accepted 5 December, 2008)

Abstract

The Kyoto Protocol, that had been in force from February 16, 2005, requires significant reduction in CO₂ emissions for all anthropogenic sources containing transportation, industrial, commercial, and residential fields, etc, and automotive emission standards for air pollutants such as particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO_x) become more and more tight for improving ambient air quality. This paper has briefly reviewed homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion technology offering dramatic reduction in CO₂, NO_x and PM emissions, compared to conventional gasoline and diesel engine vehicles, in an effort of automotive industries and their related academic activities to comply with future fuel economy legislation, e.g., CO₂ emission standards and corporate average fuel economy (CAFE) in the respective European Union (EU) and United States of America (USA), and to meet very stringent future automotive emission standards, e.g., Tier 2 program in USA and EURO V in EU. In addition, major challenges to the widespread use of HCCI engines in road applications are discussed in aspects of new catalytic emissions controls to remove high CO and unburned hydrocarbons from such engine-equipped vehicles.

Key Words : Homogeneous charge compression ignition (HCCI), CO₂ emissions, Automotive emission standards, Fuel economy, Catalytic emission controls

1. 서 론

1992년 체결되어 1994년 3월에 발효된 유엔기후 변화협약의 부속의정서인 교토의정서(Kyoto Protocol)가 1997년 일본 교토에서 개최된 3차 당사국 회의에서 채택된 지 8년 만인 2005년 2월 16일 발효되었다.

Corresponding Author : Moon Hyeon Kim, Department of Environmental Engineering, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea
Phone: +82-53-850-6693
E-mail: moonkim@daegu.ac.kr

이 교토의정서에는 지구온난화를 방지하기 위해 6 종류의 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) 감축 등에 관한 행동지침들을 상세히 규정하였는데^{1,2)}, 그 핵심은 1단계 감축목표기간(2008 ~ 2012년)에 선진국들은 온실가스 배출량을 1990년 대비 평균 5.2%를 의무적으로 감축해야 한다는 내용이다. 또한 교토의정서에 규정된 여러 행동지침들의 이행 촉진을 위하여 배출권거래(emission rights trading), 공동이행제도(joint implementation), 청정개발체제(clean develop-

ment mechanism, CDM) 등의 교토 메카니즘 (Kyoto Mechanism)을 제안하고 있다. 이는 인류 역사상 처음으로 전 지구적 차원에서 온실가스 배출을 규제하고, 일반 상품이나 유가증권처럼 거래할 수 있는 사회의 도래를 의미한다.

1998년 9월 25일에 서명, 2002년 11월 8일에 비준한³⁾ 우리나라는 1997년 교토의정서 채택 당시에 개도국으로 분류되어 온실가스 의무감축량을 면제받았으나, 경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 회원국임과 동시에 2004년 CO₂ 배출량 기준으로 세계 9위이므로⁴⁾ 앞으로 계속될 유엔기후변화협약 부속기구회의에서 우리나라에 대한 의무감축요구가 거세어질 것으로 전망되고 있다. 우리나라가 전 세계 교역량에서 차지하는 경제적인 규모, OECD 회원국으로서의 지위, 현재의 CO₂ 배출량 등을 감안할 때, 2차 의무감축기간(2013~2018년)에는 그 대상국에 포함될 것으로 생각된다. 산업, 운송, 상업, 주거 부문 등과 같은 모든 분야에서 CO₂ 배출저감을 위한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이지만, 본 논고에서는 자동차로부터의 CO₂ 배출량을 획기적으로 저감시킬 수 있는 신개념의 균일 압축착화(homogeneous charge compression ignition, HCCI) 엔진 연소기술의 필요성과 주요 연구동향을 다루고자 한다. 아울러, HCCI 엔진 연소기술의 성공적인 상용화에 있어서 걸림돌로 작용하고 있는 배가스 정화용 신축매제어기술의 필요성을 기존 촉매제어기술의 제약과 대비하여 알아보고자 한다.

2. 자동차에 대한 CO₂/NO_x 배출규제

유럽연합(European Union, EU)에서는 1990년대 초부터 탄소세(carbon tax), 환경세(environmental tax), 기후변화세(climate change tax) 등과 같은 CO₂ 배출억제를 위한 각종 세제를 도입하는 등 유엔기후변화협약 체결 이전부터 준비해 왔고(Table 1), 또한 그 부속의정서에 해당되는 교토의정서 발효에 선제적으로 대응해왔다. EU는 최근 25개 회원국 내의 11,500여 에너지 관련 기업을 대상으로 온실가스 배출거래시스템(emission trading system, ETS)을 도입하였고⁵⁾, 런던 국제석유거래소(International Petroleum Exchange, IPE) 내의 유럽기후거래소(European Climate Exchange, ECX)는 미국 시카고 기후거래소(Chicago Climate Exchange, CCX)와 제휴하여 CO₂ 배출권을 시장에 이미 상장하였다^{5,6)}. Fig. 1에서 보듯이, 2008년 1월 초 기준으로 ECX에서 2008년 12월 12일분에 해당하는 CO₂는 26.1 €/ton에 거래되었고, 10월 31일에는 20.7 €/ton에 거래되었다⁷⁾. 교토의정서에 규정된 2차 CO₂ 의무감축기간이 시작되는 2013년 이후에는 40 ~ 60 €/ton까지 거래가격이 상승할 것으로 전망되고 있다.

EU에서는 2008년 하반기까지 자동차 운행거리당 CO₂ 배출규제기준으로 186 g/km을 적용하였으나, 현재는 140 g/km으로 한층 강화되었고(Table 2), 2012년 이후부터는 EU에서 생산 및 EU로 수출되는 모든 자동차에 대해서 CO₂ 배출량을 120 g/km로 낮춰야만 한다⁸⁾. 2008년 하반기부터 2011년 말까지 적용되는 140 g/km CO₂ 배출기준의 경우에, 우리나라

Table 1. Representative taxes system for CO₂ emissions in highly industrialized countries

Country	Designated to:	Introduction	Comments
Finland	Carbon tax	1990	Except for LPG and electricity
Norway	Carbon tax	1991	Except for LPG and electricity
Sweden	Carbon tax	1991	Except for electricity
Denmark	Carbon tax	1992	Except for gasoline
Netherlands	Environmental tax	1996	Except for gasoline, diesel and coal
Germany	Electricity tax	1999	For electricity
United Kingdom	Climate change tax	2001	For coal, natural gas and electricity
Switzerland	CO ₂ tax	2004	For gasoline, diesel and residential oils
Japan	Carbon tax	2006	For gasoline and electricity
New Zealand	Carbon tax	2007	For gasoline, natural gas, LPG and electricity

Note. LPG: liquefied petroleum gas.

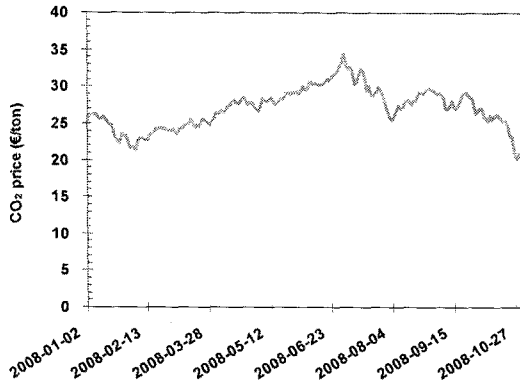


Fig. 1. CO₂ trading price at the ECX market in 2008. Produced from data in Ref. 7.

와 일본은 1년의 유예기간을 받았으나 2009년부터 이 기준을 만족시켜야만 한다. 미국에서는 2010년부터 자동차 생산회사에 대해 기업연비(corporate average fuel economy, CAFE) 규제기준으로 35.5 mpg를 만족하도록 하고 있고, 2012년부터는 CAFE 36.0을

따라야만 한다.

2009년까지 phase-in되는 미국의 Tier 2 프로그램에서 경량용 차량(light-duty vehicles, LDVs)에 대한 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x) 배출허용기준으로서는 사용연료에 관계없이 0.07 g/mile를 적용할 예정인데(Table 3), 이렇게 될 경우 우리 일상생활에서 흔히 승용차(passenger car)라고 통칭되는 모든 자동차뿐만 아니라 12인승 이하의 승용목적으로 운행되는 모든 자동차는 2010년 1월 1일부터 이 NO_x 배출허용기준을 충족시켜야 한다. Table 3에서 있듯이, 0.07 g/mile NO_x 배출허용기준은 연료로 가솔린을 사용하느냐 디젤을 사용하느냐를 구분하지 않고 LDV에 속하는 모든 자동차에 동일하게 적용된다는 것을 의미한다.

Table 3에 주어져 있듯이, 현재 EU에서 적용되고 있는 EURO V에서 규정하는 자동차 중량 2,500 kg 이하인 M 그룹에 속하는 자동차에 대한 NO_x 배출허용기준의 경우에는 가솔린 자동차와 디젤 자동차를 구분하여 규제하고 있다. 이 그룹에 속하는 모든 가

Table 2. Fuel economy for new passenger cars and light-duty trucks (LDTs)

Country	Implementation year									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
USA ^a	27.5 ^b			27.5 ^c			35.5 ^d			36.0
EU ^e		186			140 ^f					120

Note. The unit is the respective mpg (mile per gallon fuel) and g/km for USA and EU.

^aKnown as the Corporate Average Fuel Economy (CAFE) program since 1975.

^b21.0 mpg for LDTs.

^c22.2 mpg for LDTs.

^d26.1 mpg for LDTs.

^eBased on CO₂ emissions.

^fApplied to Korean and Japanese car makers from 2009.

Table 3. NO_x emission standards for new passenger cars and light commercial vehicles^{a)}

Country	Legislation program	Category	NO _x emission standards	
			Gasoline	Diesel
USA	Tier 2	LDVs ^{b)}	0.07 g/mile ^{c,d)}	0.07 g/mile ^{c,d)}
EU	EURO V	M ^{e)}	0.06 g/km	0.2 g/km

Note. LDVs: light-duty vehicles.

^aDetails have been reviewed earlier⁹⁾.

^bA passenger car or passenger car derivative seating 12 passenger or less.

^cAverage fleet standard applied from model year 2010.

^dCorresponded to the Bin # 5 in the EPA Tier 2 system.

^eExcept for vehicles the maximum mass of which exceeds 2,500 kg.

솔린 자동차들은 0.06 g/km의 기준을 만족하여야 하고, 디젤 자동차일 경우에는 이보다 높은 0.2 g/km 배출허용기준을 충족시켜야 한다. 특히, 미국의 Tier 2에서 2010년부터 적용하게 될 NO_x 배출허용기준은 현재에 비하여 매우 엄격해지게 되는 것으로 기존의 자동차 엔진 기술과 촉매제어기술로는 이러한 배출허용기준을 충족시키기 어려울 것으로 생각된다. 미국 및 EU의 자동차 분류방법, 자동차별 적용되는 배출허용기준 등의 체계에 관한 구체적인 총설은 본 논고의 선행연구⁹⁾에서 상세하게 기술하였다.

EU, 일본 등에서는 이미 교토의정서 발효에 대비하여 1997년부터 새로운 자동차 엔진기술의 개발에 박차를 가해 오고 있었고, 일본의 닛산자동차에서는 2004년부터 CO₂ 배출량을 획기적으로 줄인 하이브리드형 HCCI 엔진을 탑재한 자동차를 상용 생산하여 유럽과 일본에서 시판하고 있는 중이다. 또한 미국의 GM 자동차에서는 디젤 엔진과 결합된 하이브리드형 HCCI 엔진 탑재차량을 2007년 후반부터 유럽에서 시판 중에 있다. 교토의정서에서 최우선 감축대상으로 설정한 CO₂의 배출량을 획기적으로 저감하고 2010년 이후 더욱 강화되는 CAFE 기준에 대응하면서 NO_x와 PM에 대해 매우 엄격해지는 배출허용기준을 만족시킬 수 있는 여러 해결책들 중에 유력한 방안으로 세계의 여러 자동차 회사와 주요 연구기관들이 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 연소방식을 하나로 통합하는 형태의 신개념 엔진연소기술인 HCCI 엔진기술에 관하여 증점적으로 연구를 진행해 오고 있다^{8,9)}. EU나 미국 등의 선진국에서 보다 강화된 NO_x에 대한 자동차 배출허용기준과 기업연비기

준을 점진적으로 확대하여 적용한 2012년 이후부터는 현재의 가솔린 엔진이나 디젤 엔진 연소방식으로는 이들 기준을 만족시키기 어려울 것으로 전망되고 있다⁸⁾. 이러한 사실들이 지금 선진국의 메이저 자동차 회사들이 full HCCI 엔진 연소기술을 적용한 신차 개발에 전력투구하는 주요 이유들 중에 하나이다.

3. HCCI 엔진 연소기술 및 배가스의 특성

3.1. HCCI 엔진 연소기술의 특성

HCCI 엔진 연소기술은 2010년 이후에 상업화를 목적으로 세계 메이저 자동차 및 부품 회사에서 엔진 및 이와 관련한 부품의 최적화 기술을 활발히 진행해 오고 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 전통적인 내연엔진으로 자동차에 광범위하게 적용되어 온 가솔린 엔진에서는 균일 예혼합 상태의 연료와 공기를 고압에서 점화시키기 때문에 점화 플러그가 반드시 요구된다. 압축착화 방식을 이용하는 디젤 엔진의 경우에는 점화 플러그를 요구하지 않으나 연소실 내에 초고압으로 압축된 공기 내에 소량의 연료를 안정적으로 분사시킬 수 있는 연료 인젝터를 필요로 한다(Fig. 2).

신개념 엔진 연소기술로 활발하게 연구되고 있는 HCCI 엔진의 경우에는 여러 측면에서 이들 전통적인 엔진 연소기술과는 차이점을 갖고 있다¹⁰⁾. 가솔린 및 디젤 엔진의 헤드 공간구조와는 전혀 다른 형상의 연소실 구조를 갖게 되는 HCCI 엔진은 가솔린 엔진의 높은 출력과 디젤 엔진의 높은 연료효율을 엔진설계 및 연소기술 측면에서 통합하는 것으로 헤드부에 연료 인젝터나 점화용 플러그가 존재하지 않

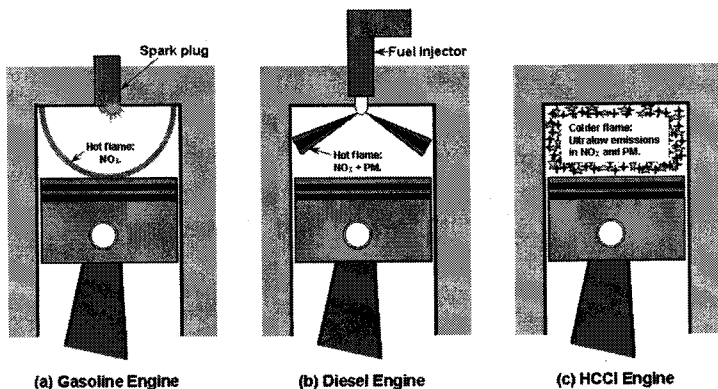


Fig. 2. Schematic of conventional gasoline and diesel, and HCCI engines¹⁰⁾.

는다(Fig. 2). 따라서 공기/연료 혼합물은 연소실 헤드부에 도달하기 전에 매우 높은 수준으로 균질에 혼합 상태에 이르러야 하고, 이것이 초고압의 charge 시스템에 의해 연소실에 공급되었을 때 자동발화 메카니즘에 의해 연료가 연소되어야 한다.

3.2. HCCI 엔진 배가스의 특성

차세대형 HCCI 엔진이 자동차에 탑재될 경우에 대기오염물질들의 획기적인 저감, 연비향상 측면에서 여러 장점들이 있다¹¹⁻¹⁵. Table 4에 주어졌듯이, HCCI 엔진 연소기술은 높은 열효율(40 - 50%)과 연료효율성으로 인해 20 - 25% 이상의 CO₂ 배출량을 저감할 수 있기 때문에, 매우 엄격해지고 있는 EU의 CO₂ 배출허용기준이나 미국의 CAFE 규제기준을 만족시킬 수 있는 수준으로 기대되고 있다. 기존 디젤 및 가솔린 엔진의 NO_x 배출농도인 350 - 1,000 및 100 - 4,000 ppm에 비하여¹⁶ 배기가스 내의 NO_x 농도를 20 ppm 이하로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 입자상 물질(particulate matter, PM)은 검출한계(detection limit) 이하인 것으로 보고되었다^{11,17}. 또한 HCCI 엔진 연소기술에서는 천연가스(natural gas, NG), 가솔린, (바이오)디젤, 수소, 알코올 등의 모든 연료를 사용할 수 있기 때문에 수소 자동차, 바이오디젤 자동차 등에도 적용이 가능하다. 최근의 한 보고에 의하면, full HCCI 엔진 연소기술을 적용한 자동차일 경우에는 이를 위한 별도의 최적 연료와 그 조성이 개발되어야 한다¹⁸.

상술한 바와 같은 여러 장점을 갖고 있는 HCCI

Table 4. Major advantages and challenges to HCCI engines

- No need of spark plug and fuel injector
- High thermal efficiency (40 - 50%)
- Very high fuel economy
- Significant reduction in CO₂ emissions (20 - 25%)
- Ultra low PM emissions under detection limit
- Very low NO_x emissions (< 20 ppm)
- Wide compatibility with fuels, *i.e.*, NG, gasoline, diesel, H₂, etc
- Very high CO and HCs emissions (> 1%)

Note. This review does not include other challenges, such as ultra precise control of combustion phasing, high peak pressures, full load operation and relatively lower power density¹⁹.

엔진 자동차의 상용화를 위해 반드시 극복되어야 할 것으로는 1% 이상의 탄화수소 (hydrocarbons, HCs), CO 등을 효과적으로 제거할 수 있는 신축매제어기술의 개발 여부이다^{11,12}. HCCI 엔진의 상용화와 관련된 연소 배가스 정화용 신축매제어기술의 필요성 외에, 본 논고에서는 구체적으로 논의되지 않은 연소기술과 관련한 제어측면의 문제점들²⁰은 정보통신기술에 기반한 제어/계측기술 및 시스템 통합기술의 발전 속도를 감안할 때, 2010년에는 극복 가능할 것으로 대부분의 외국 자동차 회사와 연구기관들이 예측하고 있고, 2015년 경에는 HCCI 엔진 연소기술을 적용한 자동차들의 시장점유율이 50% 정도에 이를 것으로 전망되고 있다²¹.

4. HCCI 엔진 배가스 처리용 신축매제어기술의 필요성

본 논고에 앞서 다루어진 총설들^{9,22}에서 상세히 기술되었듯이, 현재 전 세계적으로 사용되고 있는 가솔린 엔진 배가스 정화용 촉매인 삼원촉매장치(three-way catalytic convertor, TWC)는 650°C 이상에서 NO_x, HC, CO 등의 효율적인 제거에 초점이 맞추어져 있는 closed-couple catalyst(CCC) 또는 underbody catalyst(UBC) 시스템이다. 최근에는 NO_x, HC 및 CO에 대한 배출허용기준이 훨씬 강화되어 UBC 만으로는 사용하지 않고 CCC + UBC 복합시스템으로 사용되는 것이 일반적인 추세이다. 디젤 엔진 배가스 정화용으로 널리 사용되는 디젤매연필터/디젤산화촉매(diesel particulate filter/diesel oxidation catalyst, DPF/DOC)는 PM, HCs, CO를 효과적으로 제거할 수 있으나, 600°C 이상의 고온에서 주기적인 재생이 반드시 요구되므로 별도의 on-board heating(OBH) 시스템이 필요하며 이는 결국 연료효율(연비) 저하로 연결된다^{9,22}. 또한 DOC/DPF의 가장 큰 단점으로 지적되는 것은 NO_x를 효과적으로 제거할 수 없기 때문에, 앞서 상술한 바와 같이 점차 강화되는 NO_x 배출허용기준을 만족시킬 수 없다는 것이다.

HCCI 엔진 배가스의 온도는 280°C 이하이기 때문에 기존의 TWC는 사용할 수 없으며, 또한 HCCI 엔진 배가스의 조성은 현재 상용화된 린번 가솔린 엔진(lean-burn gasoline engine)보다도 훨씬 과잉산소

조건이므로 TWC를 적용할 수 없다^{9,22,23}). 과잉산소 조건에서 TWC를 사용할 수 없는 가장 큰 이유는 TWC의 주요 활성성분들인 Pt, Pd, Rh에서 Pt와 Pd는 전혀 문제가 되지 않으나, Rh는 과잉산소 조건에서 쉽게 RhO_x로 되어 비활성화되기 때문이다^{9,22}). HCCI 엔진기술에서는 디젤 엔진 배기가스 정화를 위하여 장착되는 DOC/DPF의 재생에 필요한 post injection의 효용성이 없으므로 이 또한 사용하기 어렵다 - 디젤 엔진에서는 DOC/DPF를 600°C 이상의 고온에서 주기적으로 재생하기 위해 초고압의 커먼레일 인젝터 (common rail injector) 외에, 사이드 인젝터를 사용하여 연료탱크 내의 디젤 연료유를 DOC/DPF 전단부에 분사하여 온도를 증가시킨다^{9,22}). HCCI 엔진의 전형적인 배가스 온도인 280°C 이하에서 고농도의 CO와 HC를 선택적으로 동시제거(simultaneous removal) 할 수 있는 저온 고산화 활성을 갖는 신축매제기술이 요구되고 있다.

5. 결 론

교토의정서 발효 후 전 세계적으로 CO₂ 배출감축 노력이 광범위한 분야에서 이루어지고 있고, 기존 가솔린 및 디젤 자동차로부터 배출되는 대표적인 대기오염물질인 NO_x와 PM에 대한 배출허용기준은 날로 강화되고 있는 추세이다. EU의 주행거리당 CO₂ 배출량이나 미국의 CAFE와 같은 CO₂ 배출규제기준을 충족시킬 수 있는 신엔진 연소기술을 필요로 하고 있다. 또한 미국에서 2010년부터 시행될 Tier 2 프로그램이나 EU에서 현재 적용되고 있는 EURO V 자동차 배출허용기준은 기존의 가솔린 및 디젤 엔진과는 다른 자동차용 신엔진의 상용화를 요구하고 있다.

상술한 바와 같은 새로운 요구에 부합할 수 있는 HCCI 엔진 연소기술은 기존 자동차 엔진에 비해 25% 정도까지 CO₂ 배출량을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 20 ppm 이하의 NO_x 배출농도를 달성할 수 있고 디젤 엔진에서 문제가 되고 있는 PM은 거의 발생되지 않는다. 이러한 연소 배기특성을 갖는 HCCI 엔진은 연소제어기술 측면의 문제점 해결 외에 고농도로 배출되는 CO와 미연 HC를 280°C 이하의 배가스 온도에서 효과적으로 제거할 수 있는 축

매제어기술의 개발이 시급한 실정이다.

감사의 글

2007년 한국학술진흥재단 기초연구지원사업에서 지원된 재원으로 본 연구의 일부가 수행되었다 (KRF-2007-314-D00039).

참 고 문 헌

- 1) Wigley T. M. L., 1998, The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2285-2288.
- 2) United Nations (UN), 1998, Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change, UN, 20pp.
- 3) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2006, Kyoto Protocol: Status of ratification, UNFCCC, 10pp.
- 4) The World Bank, 2007, Growth and CO₂ emissions: How do different countries fare?, The World Bank, 33pp.
- 5) Parker L., 2006, Climate change: The European Union's emissions trading system (EU-ETS); in CRS Report for Congress, Congressional Research Service, 23pp.
- 6) Ellerman A. D., Joskow P. L., 2008, The European Union's emissions trading system in perspective, The Pew Center on Global Climate Change, 64pp.
- 7) European Climate Exchange, 2008, ECX EUA futures contracts: Historic data 2008.
- 8) Kageson P., 2005, Reducing CO₂ emissions from new cars, T&E, 42pp.
- 9) Kim M. H., 2007, Current and future US Tier 2 vehicles program and catalytic emission control technologies for meeting the future Tier 2 standards, *Korean J. Chem. Eng.*, 24, 209-222.
- 10) Coleman G. N., 2001, Homogeneous charge compression ignition (HCCI), in 7th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Workshop, Washington D.C., August 5-9.
- 11) Stanglmaier R. H., Roberts C. E., 1999, Homogeneous charge compression ignition (HCCI): Benefits, compromises, and future engine applications, SAE paper 1999-01-3682.
- 12) Linna J. R., Stobart R., Wilson R. P., 2000, Homogeneous charge compression ignition, in Windsor Workshop 2000 Transportation Fuels: ATF Engine Management Systems, Toronto, Canada, June 6.
- 13) Koopmans L., Denbratt I., 2002, Cycle to cycle variations: Their influence on cycle resolved gas temper-

- atures and unburned hydrocarbons from a camless gasoline compression ignition engine, SAE paper 2002-01-0110.
- 14) Jun D., Iida N., 2004, A study of high combustion efficiency and low CO emission in a natural gas HCCI engine, SAE paper 2004-01-1974.
 - 15) Chang J., Filipi Z., Assanis D., Kuo T. W., Najt P., Rask R., 2005, Characterizing the thermal sensitivity of a gasoline homogeneous charge compression ignition engine with measurements of instantaneous wall temperature and heat flux, *Int. J. Engine Res.*, 6, 289-310.
 - 16) Kaspar J., Fornasiero P., Hickey N., 2003, Automotive catalytic converters: current status and some perspectives, *Catal. Today*, 77, 419-449.
 - 17) Yang W. H., Kim M. H., Ham S. W., 2007, Effect of calcination temperature on the low-temperature oxidation of CO over CoOx/TiO₂ catalysts, *Catal. Today*, 123, 94-103.
 - 18) McFarlane R., Billette N., 2005, Fuel Processing, in *Oil Sands Chemistry and Engine Emissions Roadmap Workshop*, Alberta, Canada, June 6-7.
 - 19) Steeper R. R., 2007, Automotive HCCI combustion research, in *FY 2007 Progress Report, Advanced Combustion Engine Technology*, DOE, Washington D.C., pp. 73-78
 - 20) See the *Note* in Table 4.
 - 21) Epping K., Aceves S., Bechtold R., Dec J., 2002, The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emission, SAE paper 2002-01-1923.
 - 22) Kim M. H., Nam I. S., 2005, New opportunity for HC-SCR technology to control NO_x emissions from advanced internal combustion engines, in "A Specialist Periodical Report", *Catalysis (Vol. 18) - A Review of Recent Literature*, Spivey J. J., Senior Reporter, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 198pp.
 - 23) Aceves S., 2004, Engine shows diesel efficiency without the emissions, *Sci. Technol. Rev.*, 17-19.