

● 해 설

# 저공해 자동차용 배기후처리 시스템의 개발 현황

최 병 철\*

## A State of the Art of Exhaust Gas Aftertreatment System for Low Emission Vehicles

B. C. Choi\*

### 1. 서 언

지구규모의 대기오염의 원으로 자동차 배출가스가 차지하는 비율은 날로 증가하는 추세에 있다. 따라서, 미국을 비롯한 유럽 각국들은 자동차의 배기규제를 점차적으로 강화하고 있다. 미국 캘리포니아주에서 발표하고 있는 저공해자동차(Low emission vehicle, LEV) 프로그램과 유럽의 EURO III, IV가 대표적인 규제이다. 이 강화되어 가는 규제를 만족시키기 위한 기술로는, 엔진측에서 공해물질의 농도를 줄일 수 있는 새로운 엔진 기술의 개발과, 배출된 공해물질을 후처리하는 기술로 크게 나눌 수 있다. 엔진기술 개발 측면에서는 가솔린 엔진의 연소실 최적화, 밸브 개폐시기 및 연료 시스템의 최적화, 엔진 냉각수 제어, 실린더별 공연비 제어, 과도상태의 공연비 제어 등을 들 수 있다. 그리고 배기 후처리 측면에서는, 어느 운전 모드를 막론하고 냉시동시 배출되는 배기농도가 전모드에서 배출되는 농도의 약 80%를 차지하고 있어 이 기간에 배출되는 배출가스의 저감에 관한 기술 개발이 저공해 자동차 개발의 주요 관건이 될 것이다.

본고에서는 자동차용 오토타입 엔진에 있어서 배기후처리 기술과 냉시동시의 배기의 후처리기술의 최근 동향에 대하여 논하고자 한다.

### 2. 자동차 배출가스의 규제 동향

선진국들은 1980년대 후반부터 자동차의 배출가스의 배출규제를 강화하고 있다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 미국의 LEV 프로그램과 유럽의 EURO III, IV는 날로 강화되고 있다는 사실을 한눈에 알 수 있다. 우리나라에서도 1998년, 2000년 규제치로 강화하고 있는 실정이며, 2000년 규제치는 TLEV 수준에 육박하는 수치를 보이고 있다. 이와 같이 강화되어 가는 규제치를 만족시키기 위해서는 자동차업체는 관련 연구에 많은 투자를 하여야 할 것이며, 민·관연구소 및 대학에서도 저공해 자동차 관련기술의 연구가 다양한 관점에서 진행되어 기술축적이 요망된다.

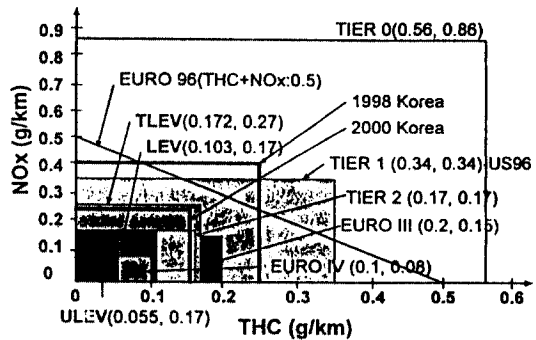


Fig. 1 Emission regulations

\* 전남대학교 기계공학과

### 3. 배출가스의 후처리 기술

#### 3.1 삼원촉매

자동차용 촉매는 기본적으로 코디에라이트(cordierite)의 담체(substrate), 담체의 표면적 향상을 위해 사용하는 워시코트(washcoat)제 및 주촉매인 귀금속으로 구성이 된다.

전세계에서 사용하고 있는 촉매의 담체는 미국의 Corning사와 일본의 NGK사에서 전량 생산하고 있다. 일반적으로 자동차용으로 사용하고 있는 담체의 셀 형태는 사각형으로 400셀/in<sup>2</sup>, 지금은 thin wall의 600셀/in<sup>2</sup> 제품도 나오고 있다. 워시코트제에는 주로 감마알루미나에 조촉매를 첨가하여 사용한다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 워시코트의 코팅기술도 종래의 기술과 달리 반응성분이 촉매의 표면을 선택하여 반응하게 하는 이중(double) 워시코트법(Engelhard사)도 나오고 있다. 자동차용 촉매로 많이 사용하는 귀금속은 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 로듐(Rh)이며, 이들은 남아프리카와 러시아에서 집중적으로 공급되고, 주요 수요처는 자동차, 전자, 보석류이다. 이 중에서 자동차용 귀금속의 수요비율은 백금이 전수요의 39%, 팔라듐이 16%, 로듐이 96%를 각각 나타내어, 자동차용으로 많은 귀금속이 사용되고 있다.

#### o PM alloying and complexing controlled by segregated loading



#### o Washcoat architecture optimized to enhance reactions

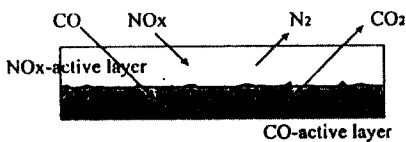


Fig. 2 Precious metals effectiveness enhanced by washcoat technology

귀금속 가격은 백금이 14500원/g, 팔라듐이 7690원/g(1997.11.20 매일경제신문 기준) 정도이다. 최근에는 TWC에 사용되던 Pt, Rh계열의 촉매가 원가절감을 위하여 Pd로 변하고 있다. Pd 촉매만 사용할 경우 NOx 정화율이 저하하고, 촉매의 내구성이 떨어지는 특성이 있다. 이러한 특성을 개선하기 위하여 조촉매로 란탄계열을 사용하여 어느정도 개선효과를 얻고 있다. Fig. 3에 Pd 촉매에 조촉매로서 란탄계열 성분을 첨가하였을 경우의 NOx 정화율 특성을 나타내고 있다. Pd 촉매에 란탄계열의 조촉매를 첨가하므로써 내구성이 강해지고 NOx의 정화율도 개선되고 있음을 나타내고 있다.

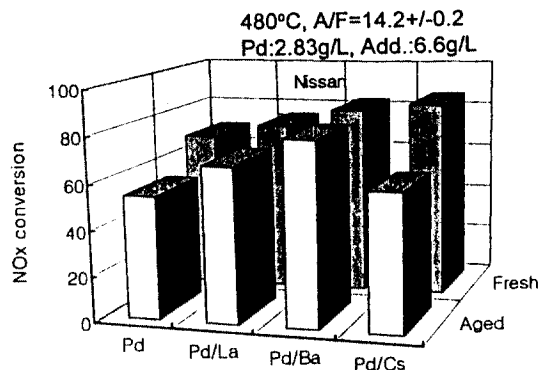


Fig. 3 Effects of additives on NO conversion

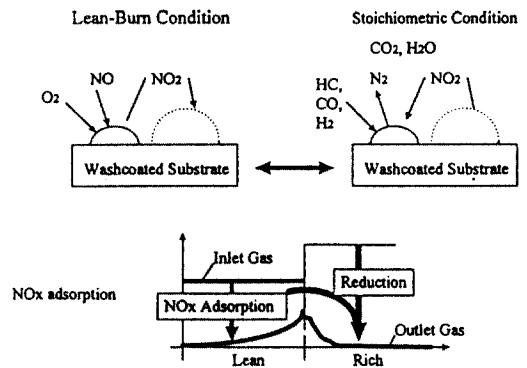


Fig. 4 TWC of NOx adsorption and efficiency for Pd only catalyst storage reduction mechanism

### 3.2 회박연소 엔진용 삼원촉매

연비향상이나 NOx 배출량 저감을 위해서는 회박연소가 유리하지만, 원만한 연소를 유지하기 위해서는 공연비의 회박 정도에는 한계가 있다. 회박연소 엔진에 현재 자동차용 TWC를 사용할 경우 정상조건에서 보다 감속, 가속을 많이 하는 비정상적인 상태에서 NOx의 정화율이 높다는 사실을 발견하였다. 이러한 개념을 기초로 일본의 Toyota에서는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 회박연소시에는 촉매에 NOx를 저장하였다가, 순간적으로 이론공연비 상태로 운전하여 저장된 촉매를 환원시키는 새로운 개념의 촉매를 개발하였다. Mazda에서는 Pt-Ir-Rh를 활성촉매로 사용하고 담체에 H+ 이온교환 제올라이트를 사용한 회박연소 엔진용 NOx 저감 촉매를 개발하였다. 이 촉매의 NOx 저감 기구의 개념도를 Fig. 5에 나타낸다. 반응기구는 제올라이트 구조내에 탄화수소를 저장하였다가 제올라이트 표면의 귀금속과 결합하는 NOx를 내부의 탄화수소 환원제로 반응시키는 것이다. 이 촉매의 NOx 저감율은 일본 10-15모드에서 fresh 상태에서 평균 51%, 100,000km 실차 열화 상태에서도 48%를 나타내는 등 성능이 우수함을 나타내었다.

### 3.3 냉시동성 향상을 위한 후처리 시스템

엔진의 배출가스에 영향을 미치는 인자로는 연소실 온도, 급기의 공급방식, 압축비, 연소실 형상, 연료공급 방식, 배기의 재순환, 배기 매니폴드의 촉매화, 배기계의 단열화, 운전방법, 엔진 배기 매

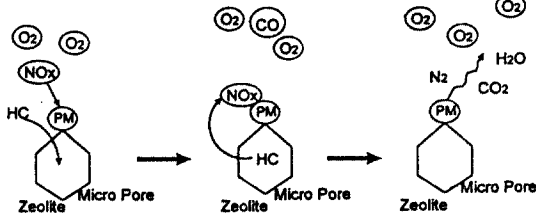


Fig. 5 Reaction mechanism of advanced

니폴드 근접근 촉매의 설치, 이차공기의 공급 및 촉매의 가열 등을 들 수 있다. 자동차 배기규제를 위한 시험모드는 미국의 FTP(Federal Test Procedure) 75, 유럽의 ECE 모드 및 일본의 10-15 모드가 있다. 이들 모드의 공통적인 사항은 냉시동 기간을 포함하고 있는 것이다. 냉시동 기간, 즉 촉매가 활성화하지 않은 온도상태에서 배출되는 배기는 정화되지 못하고 그대로 배출된다. Fig. 5에 FTP 75 모드에서 실시한 자동차의 배기 배출특성을 경과시간에 따른 전 모드의 축적량에 대한 경과 시간에서 축적량의 비율로 나타내고 있다. HC의 경우는 초기 약 200초에 축적율이 78%에 도달하고 있다. 따라서, 저공해 자동차를 개발의 성공여부는 냉시동시 부터 촉매가 활성화하기 까지의 기간에 배출되는 배기를 어떻게 저감하는가에 달려 있다. 이하에서 냉시동시의 초기 배출가스의 저감법에 대하여 논한다.

Fig. 7은 CCC(Close coupled-catalyst)를 장착한 배기 후처리 시스템의 정화특성을 나타내고 있다. CCC는 주촉매 이외에 소형의 촉매를 배기 매니폴드에 근접하여 장착함으로써 엔진의 연소 배기열을 적극적으로 이용하여 초기의 배출가스를 저감시키는 후처리 시스템이다. 시험 모드는 FTP 75 모드의 초기 냉시동후의 기간을 나타내

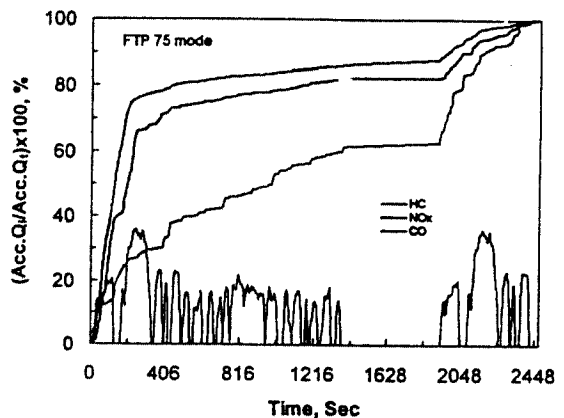


Fig. 6 Tailpipe accumulative emissions of Pt-Ir-Rh/H-MFI catalyst base gasoline vehicle

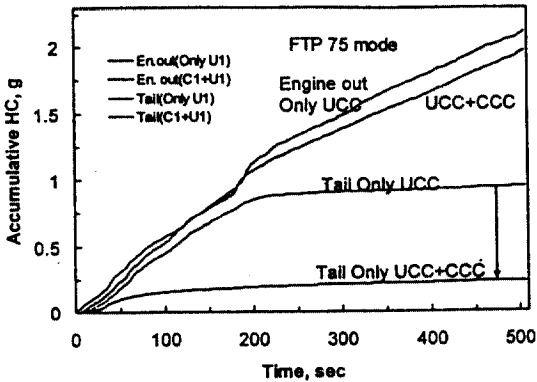


Fig. 7 Accumulative HC during phase 1 of FTP 75 mode

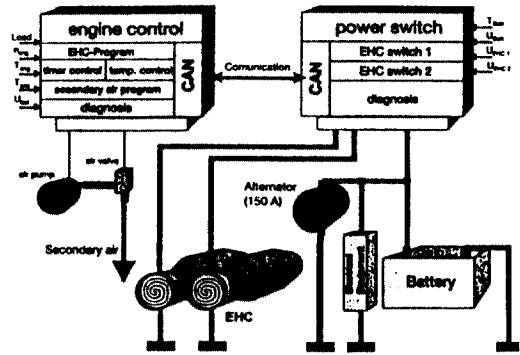


Fig. 8 Electrically heated catalyst (EHC) system (Emitec)

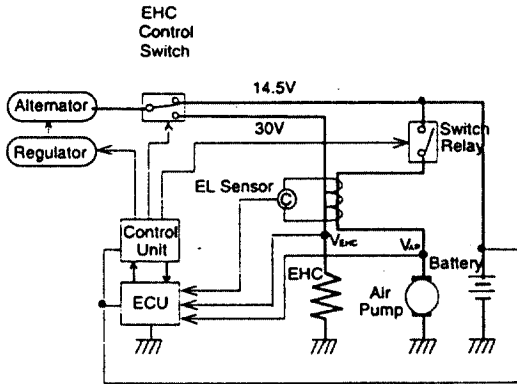


Fig. 9 Electrical control system for alternator powered EHC (NGK)

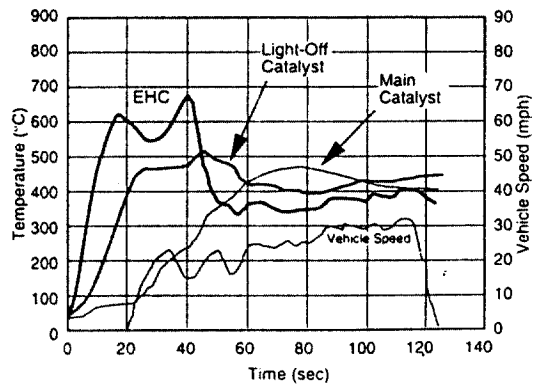


Fig. 10 Catalyst temperature profiles of EHC system (NGK)

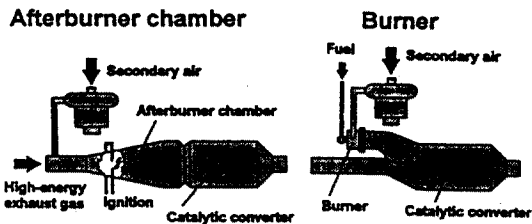


Fig. 11 Features of fuel-fed catalyst heating system

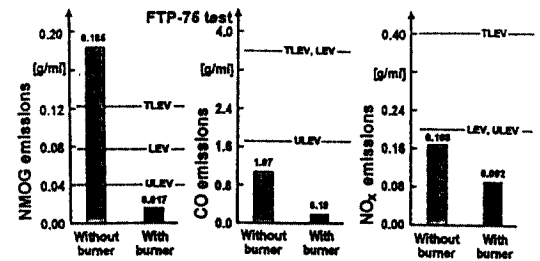


Fig. 12 Reduction of emissions using burner system

고 있다. CCC를 장착한 후 배출가스의 배출량은 약 75%가 저감되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 EHC(Electrically heated catalyst)

시스템의 개략도를 나타내고 있다. Light-off용 세라믹촉매의 전단에 전기가열식의 메탈촉매(EHC 전용 배터리 사용)를 장착하여 짧은 시간에 light-

off 촉매를 고온으로 유지시켜 냉시동시의 배기를 저감시키는 시스템이다. 이 시스템으로는 시동 후 약 20초에 light-off 촉매를 430°C까지 상승시킬 수 있다. 자동차용 EHC를 적극적으로 개발하고 있는 곳은 미국의 Corning사, 일본의 NGK사, 독일의 Emitec사를 들 수 있다. 각사는 매년 시스템을 개선해 나가고 있다. 그 결과 최근의 Emitec사의 시스템으로 EU stage II 규제를 만족시키고 있다. 그리고, 최근에는 EHC 전용 배터리 대신에 엔진의 교류발전기와 배터리를 동시에 사용하는 시스템을 NGK사에서 개발하고 있다. Fig. 9에 시스템의 개략을 나타내고, Fig. 10에 촉매 각부의 온도를 나타내고 있다. Light-off 촉매의 온도가 시동 후 약 25초에 430°C까지 올라가고 있다. 배기시험 결과는 내구성까지 보장하면서 ULEV 규제를 만족시키고 있다.

Fig. 11에는 BHC(Burner heated catalyst)의 개략도를 나타내고 있다. 냉시동 후의 light-off 촉매의 온도를 짧은 시간에 올리는 방법으로 EHC와 같은 전기가열장치 대신 연소기를 light-off 촉매 가열용으로 설치하는 시스템이다. 이 시스템은 별도의 연료 및 공기의 공급라인이 필요하다. 시험결과는 Fig. 12에 나타난 것처럼 전 배출가스가 ULEV 규제를 만족하고 있다.

Fig. 13은 미국의 SwRI에서 개발한 배기 후처리

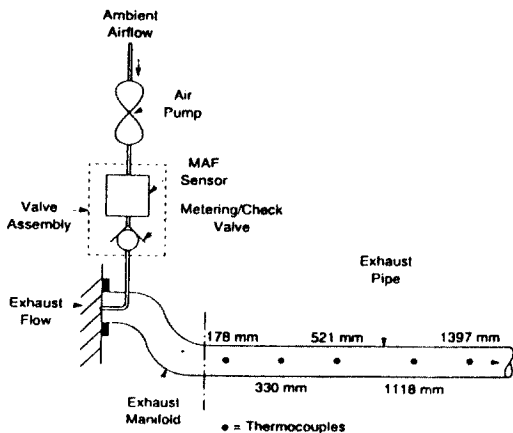


Fig. 13 Rapid exhaust port oxidation(REPO) system

시스템(Rapid exhaust port oxidation, REPO)으로, 시동시 엔진의 공기과잉율은 0.51로 rich한 상태로 운전하고 배기계 중에 이차공기를 공급하여 미연소 연료성분을 산화시키는 방법이다.

Fig. 14는 REPO 시스템 실험결과와 한 예이다. Baseline에 비교하여 HC이 획기적으로 저감하고 있다. 그러나, 시스템은 실험실 실험단계이며 완전히 개발된 상태는 아니다.

Fig. 15는 탄화수소의 흡착 시스템의 개략도이다. 이 시스템은 냉시동 후에 배출되는 HC를 저온에 흡착하였다가 light-off 촉매의 온도가 상승하면서 흡착한 HC를 산화반응시켜 저감하는 방법이다. Fig. 16에 탄화수소 흡착 시스템에 사용하는 각부의 촉매의 사양을 나타낸다. Fig. 17은 촉매의 입출구의 농도를 측정하여 시스템의 흡착특성을 나타내고 있다. 이 시스템의 FTP 75 시험 결과 HC가 거의 ULEV 규제치에 접근할 정도 수준까지 발전하고 있다.

이상의 가솔린 자동차용 배기 후처리 시스템의 냉시동 개선장치의 가격을 비교하여 보면 Fig. 18과 같다. 기존의 주촉매보다 50 - 100% 단가가 상승한다는 것을 알 수 있다. 자동차사회에 있어서 지구규모의 공해대책을 위해서는 사용자

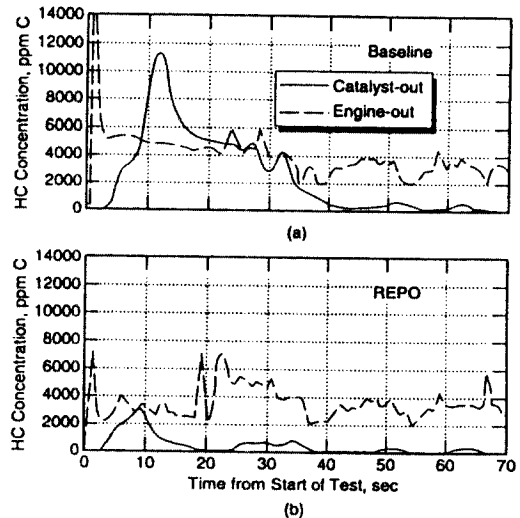


Fig. 14 Cold-start HC emission under baseline and REPO conditions

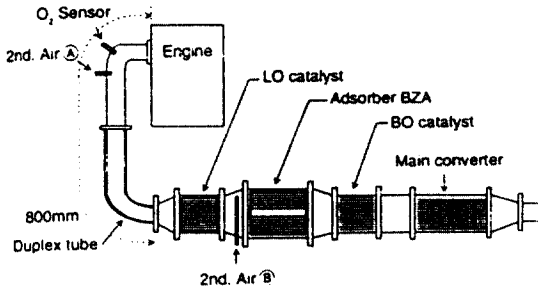


Fig. 15 Illustration of the "In-line HC adsorber system"

	LO	BZA	BO	MC
Dimensions :				
Wall Thickness [mm]	0.10	0.15, 0.25, 0.3	0.10	0.15
Cell Density [cells/cm <sup>2</sup> ]	62	62, 46.5	62	62
(mil/cpsi)	(4/400)	(5/400, 10/300, 12/300)	(4/400)	(6/400)
Substrate				
Diameter [mmØ]	93	118, 144	93	Oval
Volume [liter]	0.6	0.86-2.23	0.6	1.7
Center Hole Dia. [mmØ]	---	25, 40	---	---
Catalyst				
PM Component	Pd/Rh	Pd + Zeolite-A	Pd, Pd/Rh	Pt/Rh
PM Loading [g/liter]	7.07/0.12	Pd: 4.24	4.24	1.18/0.24
(g/ft <sup>2</sup> )	(200/3.35)	(120)	(120)	(33.3/6.7)
	4.24/0.49			(120/14)

Fig. 16 Component parameters of the "In-line HC adsorber system"

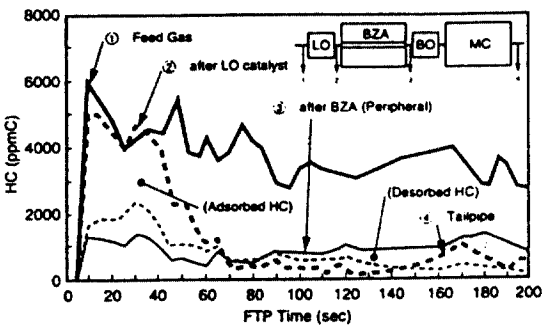


Fig. 17 HC concentration profiles at various points

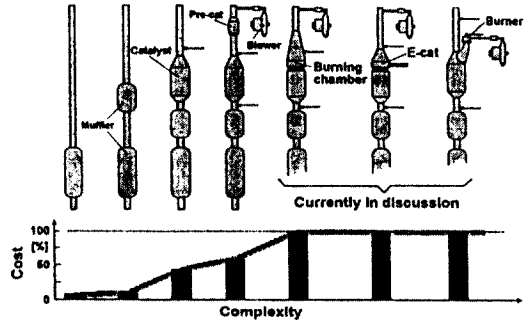


Fig. 18 Expenditure and cost of exhaust gas systems

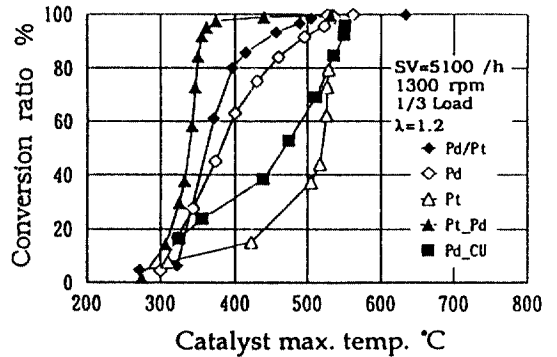


Fig. 19 Conversion efficiency of catalytic converter for natural gas vehicle

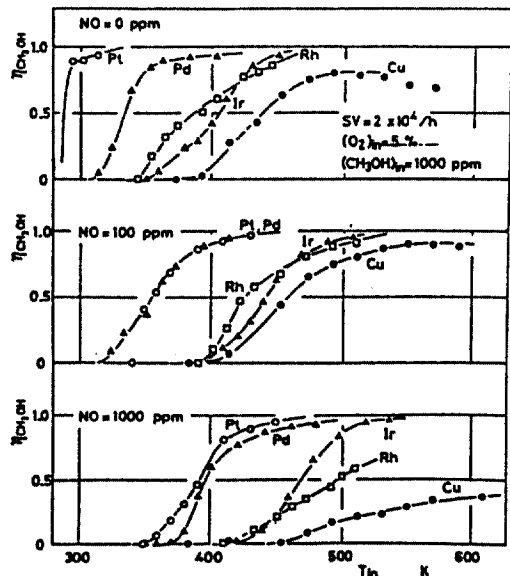


Fig. 20 Methanol conversion efficiency with various PM

측의 부담도 증가한다는 것을 의미한다. 그리고 자동차업계 및 관련 부품업계에서는 현재 시스템보다 값싸고 고품질의 배기후처리 시스템의 개발에 노력해야 할 것이다.

### 3.4 대체에너지 자동차용 촉매

ULEV 규제 대응 기술로 기존의 가솔린자동차 대신에 석유대체 효과도 있고, 저공해 자동차로서 인정을 받고 있는 것으로는 천연가스자동차, 메탄올자동차, 수소자동차, 태양열자동차 등이 있다. 이 중에서 실용가능성이 높은 것으로는 천연가스자동차와 메탄올자동차를 들 수 있다. 이들 대체연료자동차가 저공해자동차로서 입지를 확보하기 위해서는 우선 그 연료에 적합한 최적의 엔진 시스템이 구성되어야 하고, 그 다음으로 배기의 후처리 기술이 뒤따라야만 한다. Fig. 19에 천연가스자동차용 촉매의 배출가스 정화특성을 나타내고 있다. 천연가스자동차도 가솔린자동차에 비교해서 저공해의 특성은 있지만, ULEV 규제를 달성하기 위해서는 주촉매(Under body catalyst)만으로는 불가능하여 냉시동초기의 배출가스 저감책으로 CCC 혹은 EHC 등의 적용을 검토하고 있다. 이 중에서 시스템이 비교적 간단한 CCC가 채택될 가능성이 크다.

Fig. 20은 메탄올자동차용 촉매를 검토한 예이다. 메탄올의 산화반응에 유리한 귀금속의 화성순위는  $Pt > Pd > Rh$  라는 것을 발표하고 있다. 메탄올자동차는 메탄올의 연료반응 특성상 천연가스보다 배기의 제어가 어려운 점이 있다. 그 한 예로 메탄올 연소의 중간생성물인 포름알데히드가 저온시에 미연메탄올의 촉매반응 과정에서 생성되는 특성이 있다. 이 포름알데히드는 인체에 유독한 물질로 미국의 LEV 프로그램에서 규제대상 물질로 규정하고 있다.

## 4. 결 언

이상의 최근의 저공해자동차를 위한 배기후처리 시스템의 개발 동향을 살펴 본 결과를 정리하

면 다음과 같다.

날로 증가하는 자동차의 수에 대응하여 자동차가 지구의 환경오염에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 선진 각국은 배기규제를 점차 강화하고 있는 실정이다. 따라서, 지구규모의 환경보존의 측면에서 자동차 사용자측의 부담이 증가한다는 것도 인지해야 할 시기가 온 것 같다. 그리고 현재의 배기후처리 시스템이 성능이나 내구성면에 있어서 완벽하게 완성되었다고는 생각되지 않는다. 따라서, 자동차업계, 민·관연구소 및 대학에서 다함께 값싸고 고품질의 배기후처리 시스템의 개발에 최선의 노력을 해야 할 것이다.

---

### 필자소개

1982년 부산수산대학 졸업

1990년 북해도대학 대학원 기계공학과 수료

1990~1993년 일본 자동차연구소 (천연가스자동차 엔진 개발)

1993~1995년 고등기술연구원 (저공해자동차 후처리 시스템 개발)

1996~현재 전남대학교 기계공학과

---