

< 논문 >

HC-DeNOx 촉매용 인젝터의 분무 특성 연구

이동훈* · 정해영* · 이기형** · 이진하*** · 여권구***
(2006년 9월 8일 접수, 2006년 10월 23일 심사완료)

Spray Characteristics of Injector Used for HC-DeNOx Catalyst System

Donghoon Lee, Haeyoung Jung, Kihyung Lee, Jinha Lee and Kwongu-Yeo

Key Words: Diesel Engine(디젤 엔진), Selective Catalytic Reduction(SCR, 선택적촉매저감), Aftertreatment(후처리기술), Sauter Mean Diameter(SMD, Sauter 평균입경)

Abstract

A new method that optimizes a control of hydrocarbon (HC) addition to diesel exhaust gas for HC type DeNOx catalyst system has been developed. These catalysts are called the HC-DeNOx catalyst in this paper. The system using HC-DeNOx catalyst requires a reasonable quantity of hydrocarbons addition in the inlet gas of the catalyst, because the HC concentration in a diesel engine is so low that the HC is not sufficient for NOx conversion. It is expected that this study offers a robust data developing HC injection system.

기호설명

SMD : 평균입경 크기(μm)

RMS : Root mean square

1. 서 론

디젤엔진은 가솔린엔진보다 높은 압축비에서 운전이 가능하므로 열효율과 연료소비율이 우수하다. 또한 기후변화 협약 및 온실가스 배출규제의 일환인 이산화탄소 배출량 규제에 대응할 수 있는 유력한 대안으로 평가되고 있다. 이러한 장점 때문에 디젤 차량의 수요가 급격히 증가하고 있으나 삼원 촉매를 사용하여 거의 완벽하게 배기가스를 처리하는 가솔린 엔진의 경우와는 다르

게 현재 디젤 엔진에서 발생하는 입자상물질(Particulate matter) 및 질소산화물(NOx) 등의 배기가스는 효과적으로 처리되지 못하고 있으며, 사회 환경 문제로 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 자국 내 디젤 배기가스에 대한 규제를 연차적으로 강화하고 있는 실정이며, 다양한 방법으로 배기가스를 저감하기 위해 노력하고 있다. 이러한 방법으로는 크게 엔진개량에 의한 방법, 청정연료의 사용에 의한 방법 등의 전처리 기술과 선택적 촉매 저감장치, 입자상물질 여과장치 등의 후처리 기술로 구분되어 진다.

이중 선택적 촉매 저감장치는 연소된 배출가스 상류에 환원제를 분사시킴으로써 선택적으로 반응하여 NOx를 저감시켜주는 시스템이며, 최근에 HC를 환원제로 이용하는 DeNOx 촉매 시스템 연구가 활발이 이루어지고 있다. NOx의 높은 저감 효율과 연료소비율 측면에서 실제 배기관에 분사된 HC의 분포특성 및 미립화는 상당히 중요한 부분이다.

본 연구에서는 HC-DeNOx 촉매에 이용되는 인젝터의 대기중 분무특성을 파악하여 보고자한다.

† 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : insight79@gmail.com
TEL : (031)400-4064

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

***현대자동차 배기연구팀

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 분무 거동 측정 장치

인젝터의 거시적, 미시적 분무특성을 파악하기 위하여 분무 가시화 시스템을 Fig.1과 같이 구성하였다. 분무발달과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템은 제논 및 텅스텐 광원과 고속카메라(Phantom 7.0)를 이용하였다. 또한 고속카메라와 인젝터 드라이버를 디지털 신호 발생기(BNC, Model 555 Pulse/delay generator)를 이용하여 동기화 하였다. 분무 입경을 측정하기 위하여 광지속 시간이 50ns 이하인 스파크 광원과 고해상도 CCD 카메라를 통하여 고속으로 움직이는 액적들의 정지상을 얻었다.

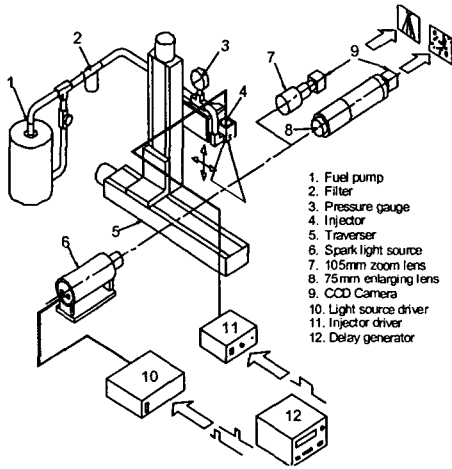


Fig. 1 Spray visualization system

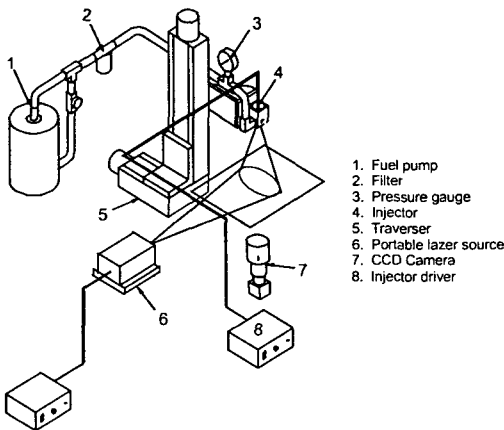


Fig. 2 Spray sectional pattern measuring system

Fig. 2는 분무 단면 패턴을 측정하기 위한 가시화 시스템을 나타낸 그림이다. 500mW Nd:YLF 레이저와 실린더리얼 렌즈를 이용하여 레이저 시트를 형성하고, 시트면에 수직으로 연료를 분사시켜 액적들이 시트면을 지나면서 생성되는 산란광을 가시화하였다.

2.1.2 연료 분사 시스템

연료 분사 시스템은 저압 연료 공급부와 연료 분사 유닛으로 구성되었다. 저압 연료 공급부는 7bar까지 공급할 수 있는 저압 펌프, 연료 필터, 압력계 및 압력 조절용 니들밸브 등으로 이루어지며, 연료분사 유닛은 연료측정 밸브와 분사노즐의 2개 부분으로 나누어볼 수 있다.

연료측정 밸브는 전기적 신호에 의한 솔레노이드 제어를 통하여 분사시기, 분사기간 그리고 분사량 조절이 가능하다. 분사노즐은 압력에 의해 열리고 닫히는 노즐형태이다.

모든 실험은 밀도와 점성 측면에서 경유와 거의 일치하는 ISO 4113 시험유를 이용하였다.

2.2 디지털 화상 처리

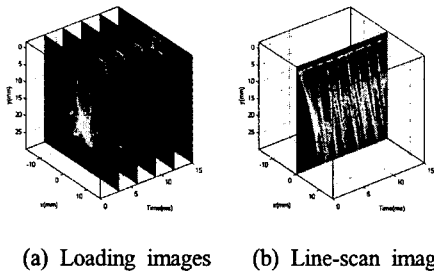
2.2.1 모사 라인 스캔 이미지

고속카메라를 통하여 취득한 화상을 Fig. 3(a)처럼 matlab을 이용하여 (Width)×(Height)×(Time)의 3D 행렬 형태로 메모리에 읽어 들인 후, 이를 (Height)×(Time)×(Width) 형태로 차원을 변경하고 분무 반경 방향으로 이미지 하나의 정보를 평균함으로써 Fig. 3(c)와 같은 모사 라인 스캔 이미지를 취득하였다.

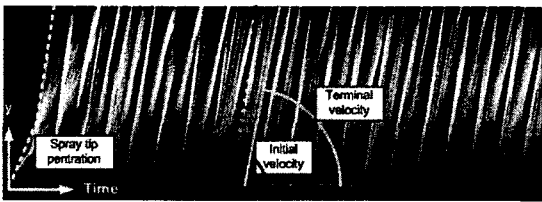
Fig. 3의 (c)에서 보듯이 왼쪽 아래의 원점으로 가로 방향은 시간 흐름, y축은 노즐 팁까지의 수

Table 1 Physical characteristics of test oil

Cloud point (°C)	-20
Specific gravity at 15°C	0.822
Pour point (°C)	-30
Flash point (°C)	85
Water content (ppm)	<50
Distillation 5% max. at 210°C	4.0
Distillation 5% min. at 360°C	96
Viscosity at 40°C cSt	2.57



(a) Loading images (b) Line-scan image



(c) Parameter

Fig. 3 Line scan image

직 거리를 나타내고, 제일 왼쪽의 점선 그래프는 분사 시작후 분무 선단의 분무 도달 거리를 나타낸다. 또한 중앙의 적색 점선의 기울기는 액막 생성시의 액막의 성장 속도를 나타내고, 오른쪽의 실선 그래프는 액막 분열시의 속도를 나타낸다.

2.2.2 RMS(Root mean square) 평균

모든 분사 영역을 파악하기 위하여 RMS 평균을 취한 이미지를 주로 활용한다. RMS를 구하기 위한 알고리즘은 식 (1)과 같다.

$$S_s(x,y) = \sqrt{\frac{\sum^n S(x,y) \cdot S(x,y)}{n}} \quad (1)$$

여기서, $S_s(x,y)$ 는 RMS 평균 이미지, $S(x,y)$ 는 각각의 분무 화상, n 은 화상의 개수이다.

2.3 실험 방법

분무발달과정을 가시화하기 위하여 다음과 같이 실험하였다. 분사압력은 4bar, 5bar, 6bar, 7bar로 변경시켰으며 분위기 압력은 대기압으로 고정하였고, 분사시간은 35ms, 65ms로 변화시켜가며 촬영하였다.

또한 미립화 특성을 알아보기 위해서 스파크광원과 고해상도 CCD 카메라를 이용하여 분사압력은 4bar부터 7bar까지 0.5bar 단위로, 분사시간은 35ms로 고정하여 실험을 수행하였다. 측정 지점은 Fig. 4와 같이 노즐 팁 하류방향 30mm부터 60mm 지점까지 10mm 단위로, 반경방향은 3mm 간격으로 측정하였다. 측정된 입경 수 2000개 혹

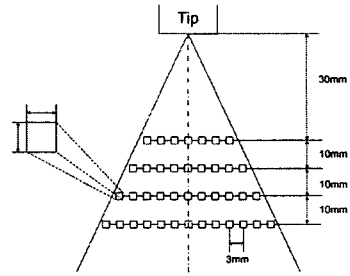


Fig. 4 SMD measuring points

Table 2 Nozzle spec. and experimental conditions

Nozzle Type		Outwardly opening pintle
Spray Geometry		Solid cone
Visualization	Inj. Pressure	4, 5, 6, 7bar
	Inj. duration	35, 65ms
SMD measure	Inj. Pressure	4, 5, 6, 7bar
	Inj. duration	35ms
Spray section measure	Inj. Pressure	4, 4.5, 5, 6, 7bar
	Inj. duration	35ms
Ambient gas condition		Room temperature Atmospheric pressure

은 측정 횟수 200회로 어느 한 조건을 만족시키면 다음 지점으로 이동을 하도록 하였다.

분무 단면의 패턴을 측정하기 위하여 연료 공급압력은 4bar부터 0.5bar 단위로 공급압을 증가시키면서 단일 분사시 팁하단 60mm 지점에서의 분무 단면 화상을 취득하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분무발달과정

분사노즐 입구부분에 설치한 압력 센서로부터 분사시간(35ms, 65ms) 동안 측정한 압력 데이터와 분무 가시화를 통하여 크게 분무 초기 구간, 분무 안정화 구간 그리고 분무 말기 구간의 뚜렷한 경향을 보였다. Fig. 5는 분사시간이 65ms일 경우에서 각 구간의 실제 분무 사진과 노즐 입구에서의 압력 파형을 보여준다.

분사가 되면서 분무 초기 구간은 액막이 분열 시점까지 발달되어가는 과정이므로 미립화 특성을 기대하기는 힘들다. 하지만 점차 분무가 안정화 되어가면서 압력도 일정하게 유지가 되고, 액막 분열도 규칙적으로 일어난다. 이러한 분무발달과정을 살펴본 결과, 미립화 특성을 파악하기 위한 SMD 측정의 적절한 시점을 고려할 수 있었다.

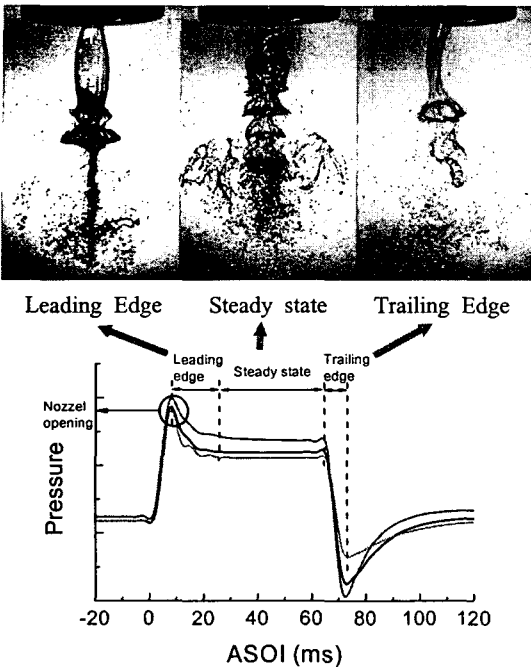


Fig. 5 A pressure graph with spray images

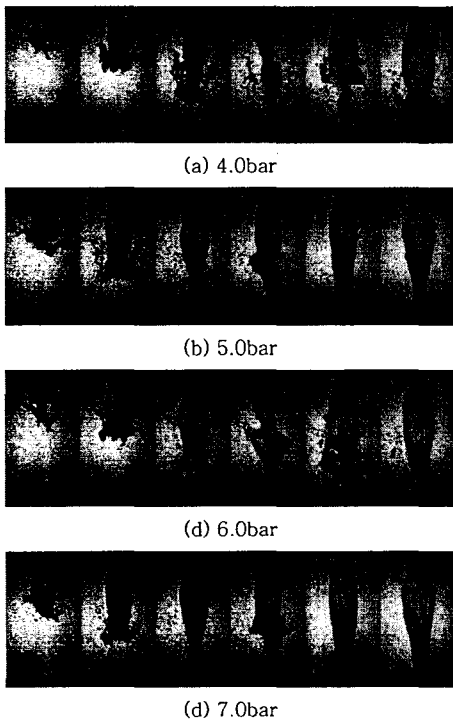


Fig. 6 Images obtained under various supply pressure for leading edge

Fig. 6은 각 연료공급압에 따른 분무 초기 구간에서의 분무발달과정을 간략하게 나타낸 것이다. 연료공급압이 증가할수록 분무도달거리가 증가하는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 정량적으로 알아보하고자 디지털 화상처리를 통하여 얻어진 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7은 분사기간 65ms 동안 압력 증가에 따른 분무도달거리를 보여준다. 연료 공급 압력이 증가할수록 동일 시간대의 분무도달거리는 길어지며, 도달거리 14~17mm를 기점으로 그 증가 추세가 더 커지는 경향을 보였다.

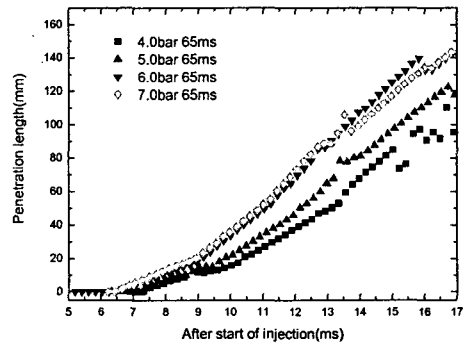


Fig. 7 Effect of supply pressure on the spray penetration

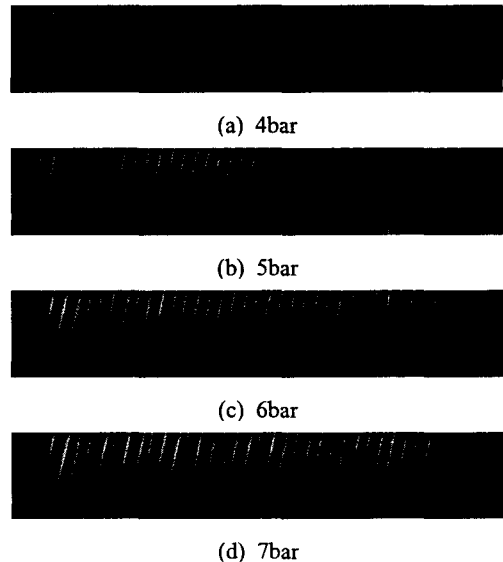


Fig. 8 Line scan image with supply pressure

Fig. 8은 각 압력별 촬영한 화상을 통하여 모사 라인 스캔 이미지 취득한 것을 나타내었다. 이 그림으로부터 정상 상태의 분무 기간에서는 초기 속도가 최종속도보다 더 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 위에서 얻어진 모사 라인 스캔 이미지를 정량화하여 나타낸 그래프이다. 액막의 초기 및 최종속도를 각각의 연료 공급압에 대하여 평균한 결과로서, 액막 평균 초기 속도의 경우 4bar에서 6bar까지 증가하는 경향을 보이다 7bar에서는 감소하였으나 속도의 변동 폭은 매우 커짐을 알 수 있었다. 평균 최종 속도는 압력 증가에 따라 그 경향성을 찾기 어려우나, 압력 증가에 따라 속도 변동폭은 감소하는 것을 알 수 있었다.

3.2 분무 단면 패턴

Fig. 10은 단일 분무 기간동안 각 시간별 이미지를 RMS(root mean square) 평균한 그림이다.

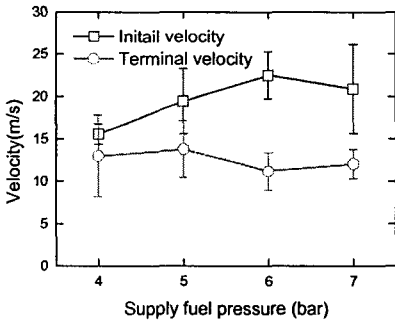


Fig. 9 Comparison of internal velocity and terminal velocity

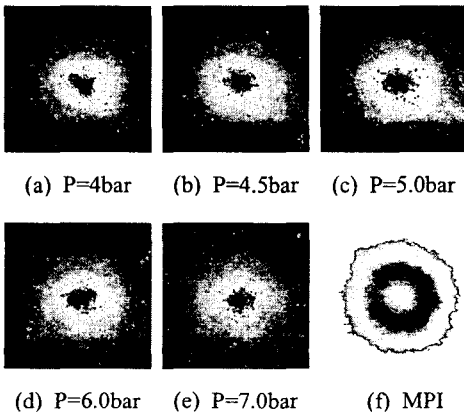


Fig. 10 Spray sectional pattern (w:60mm, h:60mm)

실험에 사용된 노즐이 핀틀 타입이지만 일반 MPI의 핀틀 타입 인젝터(f)와는 달리 중공형 형태의 분무가 아닌, 중심축에 분무 유량이 집중된 솔리드콘(Solid cone) 형태의 분무 패턴을 보였다.

이러한 분무 축방향의 유량 집중 현상은 점성이 큰 경유를 낮은 압력으로 분사하였기 때문에 표면 장력이 크게 작용한 것으로 판단된다. 그리고 그림에서 보듯이 공급압이 높아질수록 분무의 축 대칭성이 향상되며, 분무 분포 영역도 넓어짐을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인은 니들 가이드가 없기 때문에 압력이 낮을 경우에는 니들이 제대로 자리를 잡지 못하고 기울어지기 때문이라고 판단된다.

3.3 미립화 특성

Fig. 11은 연료 공급 압력에 따른 각 측정점에서의 SMD를 비교한 그래프이다. 전체적으로 분무 축을 중심으로 한 대칭성이 상당히 떨어지는 것을 확인할 수가 있다. 이것은 실험에 사용된 노즐의 특성에 기인한 현상으로 보인다. 이 결과 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 연료 공급 압력이 증가할수록 입경이 작아지고 있으며, 노즐 끝단과 가까운 지점에서는 SMD가 작게 측정되고 멀어질수록 SMD가 증가하는 경향이 나타난다.

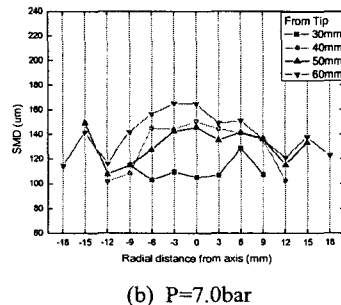
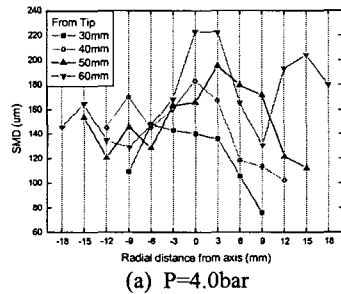
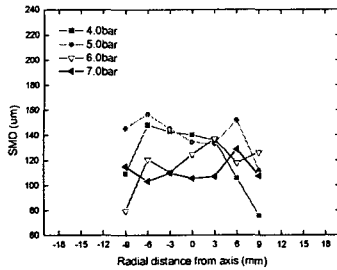
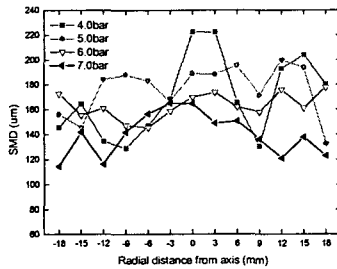


Fig. 11 Comparison of SMD in case of each distance from nozzle tip



(a) 30mm from nozzle tip



(b) 60mm from nozzle tip

Fig. 12 Comparison of SMD in case of each distance from nozzle tip

Fig. 12는 노즐 팁하단 동일 거리에서 연료 공급 압력에 따른 반경 방향의 평균 입경을 비교한 결과이다. 모든 조건에서 압력이 높아질수록 평균 입경이 작아지는 경향을 보이고 있으며 팁으로부터의 거리가 멀어질수록 대칭성이 향상되었다. 특히, 60mm인 경우에는 연료 공급압에 상관없이 대칭성이 뚜렷하게 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 HC-DeNOx 촉매에 이용되는 인젝터의 분무발달과정을 가시화하고 미립화 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분사기간 동안 측정된 압력 데이터와 분무 가시화를 통하여 크게 분무 초기 구간, 분무 안정화 구간 그리고 분무 말기 구간으로 나눌 수 있었다.

(2) 분무도달거리는 연료 공급 압력이 증가할수록 길어지며, 도달거리 14~17mm를 기점으로 그

증가 추세가 더 커지는 경향을 보였다.

(3) 정상 상태의 분무 기간에서는 액막의 성장 초기속도가 최종속도보다 더 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 분무 축방향의 유량 집중 현상은 점성이 큰 경우를 낮은 압력으로 분사하였기 때문에 표면장력이 크게 작용한 것으로 판단된다.

(5) 2차 분사 인젝터는 핀틀타입 MPI와는 달리 중심에 유량이 집중되는 솔리드콘 형태의 분무 패턴을 보였으며, 공급압이 증가할수록 축대칭성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

(6) 분무 입경 측정 결과, 분무축을 중심으로 비교적 축대칭성이 떨어졌으나 팁으로부터 멀어질수록 대칭성이 향상되어 60mm의 경우 공급압에 상관없이 대칭성이 명확해졌다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 미래형 자동차 배기가스 제로화 개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jeong, H. Y. and Lee, K. H., 2006, "Investigation of the Relationship Between Liquid Sheet Characteristics and Spray Mean Diameter," ILASS-Americas, 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Toronto, Canada.
- (2) Ueda, M., Asamo, A., Kondo, T., Watanabe, Y., Fukuma, T. and Harada, Y., 2003, "A New Optimizing Technique of a Diesel Engine Aftertreatment System Using HC DeNOx Catalyst," *JSAE*, 20034007.
- (3) Westerberg, B., Kunkel, C. and Odenbrand, I., 2003, "Transient Modeling of a HC-SCR Catalyst for Diesel Exhaust Aftertreatment," *Chemical engineering Journal*.
- (4) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw Hill.