

박용 디젤엔진의 NO_x, CO_x 배출특성과 측정법에 관한 실험연구

안 숙헌¹⁾, 최 재성²⁾

An Experimental Study on Characteristics of NO_x, CO_x Emissions for the Marine Diesel Engine and Measuring Methods

S.H.Ahn, J.S.Choi

Abstract

Now it is tried to regulate and decrease contaminants from the ship's diesel engine by the IMO(International Marine Organization). It is important to understand the actual emission disposition of the marine engine, in order to study its reduction techniques in the view of protecting from air pollution in the future.

In this paper, it was investigated the emission characteristics of the ship's diesel engine with CPP(Changeable Pitch Propeller) under the Passage Test and Turning Trial Test on the sea. As a result, it is confirmed that the NO_x, CO₂ concentrations increased according to increase the engine speed and to decrease the torque. But the amount of NO_x, CO_x emission[g/kWh] decreased according to increase the torque regardless of the engine speed. Also it was compared with the NO_x concentrations measured by the two methods - CPE(Controlled Potential Electrolysis), CLD(CheMiluminescence Detector) for the correct measurement, and the CLD indicated higher value than the CPE.

1. 서론

대기오염 문제가 심각한 상태로 대두되고 있는 가운데 지구 온난화에 대한 국제회의가 계속되고 있으며 NO_x, SO_x에 의한 산성비 때문에 유럽에서는 산림의 30%가 고목이 되고 전체 호수중 약 50%의 호수에는 어류가 완전히 사멸되었다는 보고도 있다. 최근에는 해양환경 보존에 대한 의식의 확대로 국제 해사기구(IMO, International Marine Organization)에서 2000년 1월 1일부터 선박엔진의 NO_x를 규제할 예정이다.

여러 가지 대기오염 물질 중에서 분진이나 유황산화물등은 제거시설을 통하여 배기가스내의 오염물질을 제거하지만, 질소산화물(NO_x)은 연소과정에서 억제하는 것이 바람직하고 육·

해상용 디젤엔진에서 이에 대한 연구와 함께 성과도 많았다. 특히 선박에 있어서 중저속 디젤엔진을 이용하여 각 운전조건하에서 배기가스 유해 물질들의 배출특성을 파악한 연구와¹⁾, 육지에 직접적인 영향을 미치는 주요 항구에서의 오염물질 배출량에 대한 연구도²⁾ 있었다. 그리고 NO_x 계측에 있어서 화학발광법(CLD), 정전위 전해법(CPE), 비분산형 적외선법(NDIR), 비분산형 자외선법(NDUV) 등의 측정원리의 상이에 따른 계측치의 차이에 대해 비교·분석한 연구도 있었다. 선박 디젤엔진의 경우 세계 저질중유 소비의 대부분을 차지하고 있기 때문에 이러한 대기오염 문제뿐만 아니라 자원 절약이라는 대과제 아래 연구가 이루어졌다.

1) 한국해양대학 대학원 안 숙헌

2) 한국해양대학 교수 최 재성

본 논문에서는 일본 고베 상선대학의 실습선 Fukae-Maru를 이용하여 실제 해상에서 각 운전조건에 따른 배기가스의 배출특성을 조사한 내용을 보고하고자 한다. 실습선의 추진 시스템은 CPP(Controllable Propeller Pitch)가 설치된 디젤기관으로 Table.1에 선박과 주기관의 제원을 나타낸다. 측정은 육상의 자동차용 디젤 엔진과는 달리 장시간 일정한 운전조건을 유지하는 경우와 운전조건에 변화가 많은 경우를 가정하여 추진 성능시험(Passage Test)과 선회 성능시험(Turning Trial Test)으로 나누어 실시하였다. 즉, 추진 성능시험시 기관 회전수와 토오크 등의 운전조건에 변화에 따른 NOx, COx 등의 배출경향을 분석하고 실린더내 연소압력 및 열발생율과 NOx 배출농도와의 관계를 조사했다. 또한 선회 성능시험시의 과도한 운전조건에 따른 변화에 따른 각 유해가스 성분의 배출특성을 파악하며, NOx 측정원리에 따른 계측치 차이에 대하여 비교·분석하였다. 이로부터 디젤 엔진의 유해가스 배출을 저감시킬 수 있는 운전조건을 제시하고, 2년 앞으로 다가온 IMO의 NOx규제에 대한 자료를 준비하고자 한다.

2. 측정장치 및 기관 운전방법

배기가스 분석을 위한 실험장비는 Fig.1의 개략도에 보이고 있다. 주기관의 과급기 출구 직후 배기가스 온도 측정홀(HOLE)에 동계 샘플링 튜브를 연결하고 가열 샘플링 관을 통해서 각 계측기에 이르도록 했다. CLD는 샘플링 및 분석계 시스템의 ISO8178에서 추천하는 가열 유로 방식(55℃)을 채택하여 습한 상태의 가스분석이 가능했다. CPE는 전처리 장치에서 배기가스중의 수분·불순물 등을 제거하였다. Table.2는 가스 분석기의 사양을 나타낸다. 기관 운전방법은 Fig.2에 보여주고 있다.

그림 뒷부분의 추진성능시험은 기관 회전수와 PPA를 조정하여 부하를 설정하고 각 운전조건하에서 5~10분간 배기가스를 연속 측정하였다. 그리고 선회 성능시험에서는 기관 회전수를 503rpm, PPA를 19°로 설정하고, 타각“0”도 상태로 몇 분간 전진 운전하여 기관상태가 안정된 후, 하드-스타보드로 최대가능 타각 35°로 5분간 선회하고, 다시 타각을 “0”도로 돌렸다. 선속이 원상태로 복구된 후, 반대방향의 하

드-포트로 5분간 선회 운전했다. 같은 조건으로 각각 10분간 선회 운전을 재차 실시했다.

Table.1 Specification of Test Ship

Length(Overall)	49.95m
Breadth	10.0m
Gross Tonnage	449ton
Speed	14.28knot
Date of Delivery	Oct, 1987
Type	6DLM-26S, 4cycle
Output	1100kw
Engine Speed	720rpm
Bore×Stroke	260mm×340mm
Comp. ratio	12.6
Fuel	A Oil
Propeller	No.of Blade=4, C.P.P=2100mm
Injection Timing	16 ~ 17deg

Table.2 Particular of Detector

CLD		
	Measuring Method	Measur'range
	Chemiluminescence Detector	0~2500ppm
	Galvanic cell	0~25 vol%
Sample Gas Flow rate : 200 ~ 300 cc/min		
CPE		
	Measuring Method	Measur'range
	Electro chemical measur'cell	0~2000 ppm
	Electro chemical measur'cell	0~100 ppm
	Electro chemical measur'cell	0~8000 ppm
	Galvanic cell	0~21 vol%
Sample Gas Flow rate : 500 ~ 1000cc/min		

그리고 타를 중앙에 놓고 수분간 운전한 후, 5분간 풀-어스턴을 실시하고 엔진을 정지 시켰다가 다시 10분간 풀-어스턴을 실시했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 추진 성능 시험

먼저, Fig.3은 추진 성능시험시 설정된 각 운전조건으로써, 시간 경과에 따른 기관 회전수, PPA, 토오크 및 부하변화를 보여주고 있다. Fig.4와 5는 Fig.3에서 보여준 추진 성능 시험시 운전조건에 따라 CPE와 CLD에 의하여 계측한 각 배기 가스 성분의 변화를 시간 경과에 대하여 보여주고 있다. 그림으로부터 NO_x(NO, NO₂)와 CO는 Fig.3에 있는 부하의 증가에 따라 증가하고 CO와 O₂는 반대 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig.6은 토오크의 증가에 따른 NO, NO_x, CO, CO₂의 단위 출력당 농도치의 변화를 보여주고 있다. Fig.4와 5에서 NO_x와 CO₂농도는 부하의 증가에 따라 증가하고 CO는 반대 경향을 보였으나, 모두 토오크의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 그림과 같이 [CO]_k는 그 감소율이 있으며, [NO]_k, [NO₂]_k 및 [CO]_k는 각각 8g/kWh, 3g/kWh, 1g/kWh 근방으로 양적으로 큰 변화를 보이지 않았다. Fig.7은 CPE와 CLD의 NO_x 계측치의 정량적인 차이를 비교하기 위해 CLD/CPE의 백분율을 각 기관 회전수와 배기가스 온도변화에 대하여 나타내고 있다. %가 낮을수록 두 계측치 차이가 큰 것을 의미하며 그림에서 기관회전수가 높고, 배기가스온도가 낮을수록 차이가 큰 것을 알 수 있다.

Fig.8은 IMO의 NO_x 규제안을 나타내는 그래프상에 실험선박의 배출상태를 나타낸 것이다. IMO에서 제안한 규제치는 다음과 같다.

$$\text{NO}_x \text{ 규제치}(\text{g/kWh}) \leq 45 \times n^{0.2}$$

여기서 n은 기관회전수이고, NO_x 규제치는 E3모드로 계산했으며 E3모드의 NO_x 배출량 계산식은 다음과 같다.

$$\text{E3}(\text{NO}_x) = 100\% \text{NO}_x \times 0.2 + 75\% \text{NO}_x \times 0.5 + 50\% \text{NO}_x \times 0.15 + 25\% \text{NO}_x \times 0.15$$

본선은 최대출력 1100kWh, 정격회전수 720rpm의 선박으로서 CPE, CLD의 계측치 모두 IMO의 규제치 범위를 벗어나지 않았음을 알 수 있다. Fig.9는 CPE와 CLD의 13% O₂ 환산 NO_x치를 각각 X, Y 축으로하여 두 계측치를 비교한 것이다. 그림에서 대각선의 X축으로 지우친 것을 볼 때, CPE의 계측치가 대체로 높은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 실제 계측치를 확인한 결과도 CPE를 기준으로 했을 때 약 28% CPE가 높음을 나타냈다. Fig.10과 11은 기

관 회전수와 토오크의 변화에 대한 연료 소비율(B.S.F.C)과 NO_x 중량치([NO_x]g)를 나타낸 것으로, 두 그림 모두 저회전 영역 503 rpm과 저부하에서 특히 높은 경향을 나타내어 NO_x 발생량은 연료 소비율과 관계가 깊음을 보여주고 있다. Fig.12는 추진 성능 시험에서 부하가 약 77%로 거의 같은 두 상태에서 실린더내 연소 압력과 열발생율을 비교하고 있다. 그림에서 실선과 점선은 운전 조건이 각각 600 rpm, PPA 20° 와 673 rpm, PPA 17° 이었으며, NO_x 배출량을 확인한 결과 각각 1,060 ppm과 1,009 ppm이었다. 따라서 같은 부하로 운전하는 경우 기관 회전수를 높게 하고 PPA를 낮게 함으로써 NO_x 배출량을 저감시킬 수 있음을 알 수 있다. 회전수가 높은 점선은 회전수가 낮은 실선보다 섬화지연 시간이 길고, 실선에서 후연소 부분을 확인 할 수 있는데 이때의 써빌 NO_x 때문에 NO_x 발생량이 높은 것으로 생각 된다.

3.2 선회 성능시험

Fig.13은 부하변동이 많은 선회 성능시험시 각 배기가스 성분의 배출경향에 대하여 나타내고 있다. 그림으로부터 정상운전시의 추진 성능 시험시와 마찬가지로 NO, NO₂, CO₂ 등은 토오크의 증가에 따라 증가하고 CO, O₂ 는 반대 경향을 나타내었다. Fig.14는 선회성능시험시의 시간경과에 대하여 배기가스 온도변화와 함께 CPE와 CLD의 NO_x계측치를 보여주고 있다. 그림에서 배기가스 온도변화가 급격히 떨어지는 부분은 기관 운전조건이 급격하게 변화하는 시기로 NO_x농도의 변화도 이 시기에서 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 즉 운전조건이 변화되는 시점에서는 NO_x배출량도 급격하게 높아짐을 볼 수 있다. Fig.15는 배기가스중의 NO와 NO₂ 를 합한 NO_x중의 NO의 비율을 나타내는 NO발생율과 공기과잉율의 변화를 보여주고 있다. 그림의 뒷부분에서 NO발생율과 공기과잉율이 급격한 변화를 보이는 부분이 있는데 이것은 풀-어스틴 운전시험시 정지상태에서 엔진을 시동하는 순간의 변화를 나타내고 있다. Fig.16은 추진 성능시험시와 마찬가지로 CPE와 CLD의 13% O₂ 환산 NO_x치를 비교한 것으로 선회 성능시험시도 CPE가 약 9.2% 높은 값을 나타

났다. Fig.17은 배기관에서 시료를 샘플링하여 CLD와 CPE의 두 계측기에서 NO_x농도를 표기하기까지의 시간적인 차이를 비교하기 위한 것으로 선회 성능시험에서 풀-어스턴 운전후 스톱엔진을 실시하여 부하가 급격히 떨어지는 부분이 있는 Fig.13 뒷부분의 일부를 확대한 것이다. 결과는 CPE가 약 30초 빠름을 보여 주었다.

4. 결론

- (1) 박용 디젤엔진의 NO_x농도 배출특성은 토오크가 증가에 따라 증가하고, 기관 회전수에 대해서는 고회전 영역보다 저회전 영역에서 배출량이 높고, CO₂ 농도는 토오크의 증가에 따라 증가하고, CO농도는 감소했다. 그러나 엔진의 단위출력당 NO, NO₂, CO, CO₂는 모두 토오크의 증가에 따라 감소했다.
- (2) CPP선박에서 동일한 부하로 운전하는 경우 기관 회전수가 높고, PPA가 낮을수록 NO_x 발생량이 적었다.
- (3) CPE, CLD의 NO_x 계측결과는 정성적으로는 같은 경향을 보였지만, 정량적으로는 CPE가 약20% 높은 값을 나타냈다. 그 원인은 해상에서의 계측으로 인한 염분의 영향, 선체 및 기관실의 진동과 두 계측기의 샘플링 유량의 차이등으로 생각된다.
- (4) 본선 주기관의 NO_x배출량은 CPE, CLD의 두 계측결과가 모두 IMO의 NO_x 배출규제치를 벗어나지 않았다.

참고 문헌

- (1) 作田 朋巳, "練習船[深江丸]의 NO_x, CO_x及びばいじん排出實態", 日本舶用機關學會 第30卷 第12号, 1997
- (2) 船舶大氣汚染 抑制檢討委員會, "船舶からのNO_x測定における問題點と課題", 日本舶用機關學會 第30卷 第6号, 1997
- (3) 鈴木 章方, "燃焼가스 稀薄化過程におけるNO_x生成・分解に及ぼす未燃ガス混入の影響", 日本機械學會講演論文 No.974-1
- (4) 松本 崇志, "確率過程論モデルによるディーゼル排氣およびEGRにかんする解析", 日本機械學會講演論文 No.974-1
- (5) 平田 賢, "船舶大氣汚染防止の動向と對應", 日本舶用機關學會誌第30卷第6号, 1997

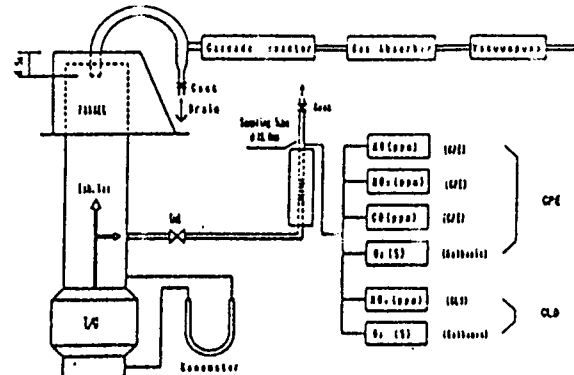


Fig.1 Schematic Diagram of Exhaust Gas Sampling System

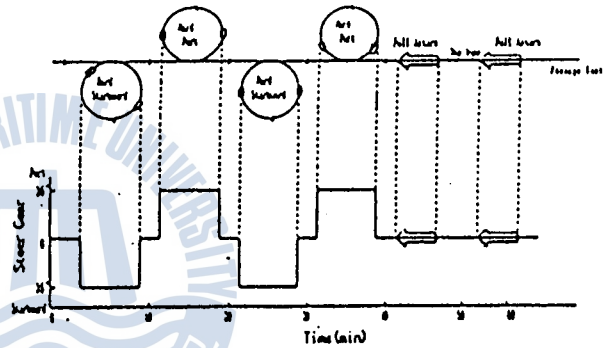


Fig.2 Schematic Diagram of Engine Operation

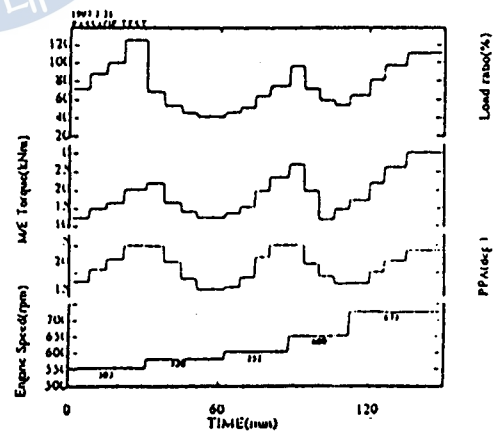


Fig.3 Engine Conditions during the Passage Test

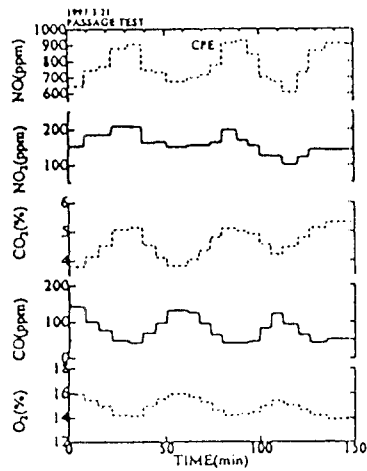


Fig.4 Time History of each Exh' Gas Components by the CPE

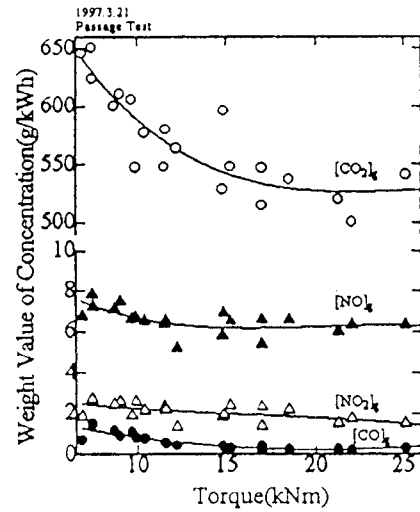


Fig.6 Variations of NO_x, CO_x with the Shaft Torque

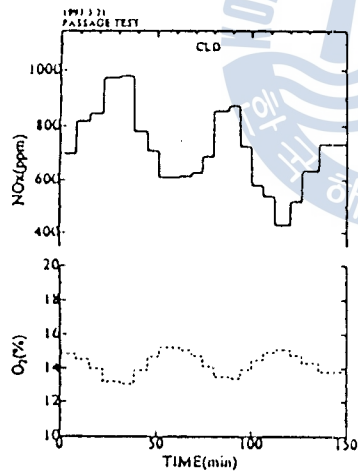


Fig.5 Time History of each Exh' Gas Components by the CLD

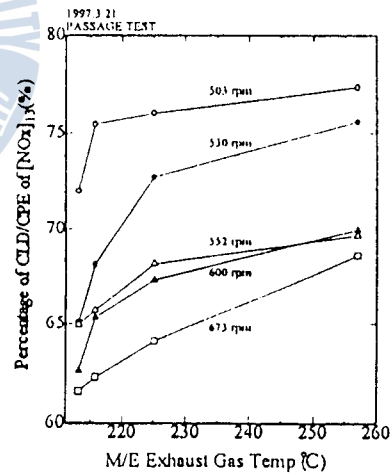


Fig.7 Comparison of the CPE & CLD for [NO_x]₁₃

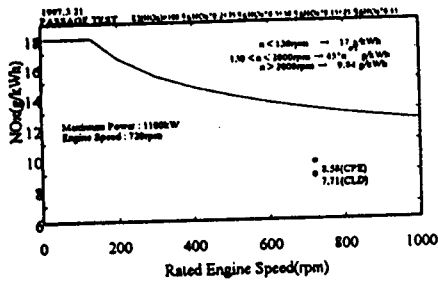


Fig.8 Permitted Limit of NOx Emission on a Weight

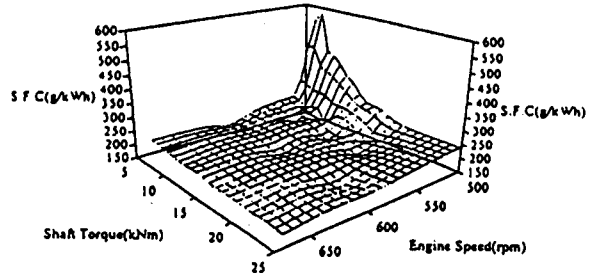


Fig.11 Variations of Weight Conversion NOx on the RPM & Shaft Torque

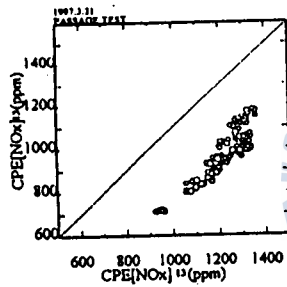


Fig.9 Comparison of the CPE & CLD for [NOx]₁₃

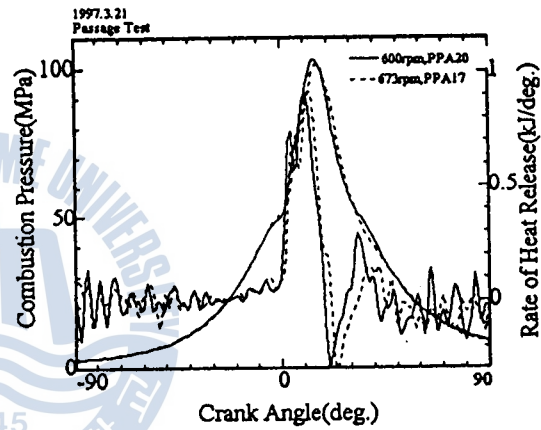


Fig.12 Combustion Press. & Heat Release rate (600rpm ,PPA20 °)(673rpm, PPA17 °)

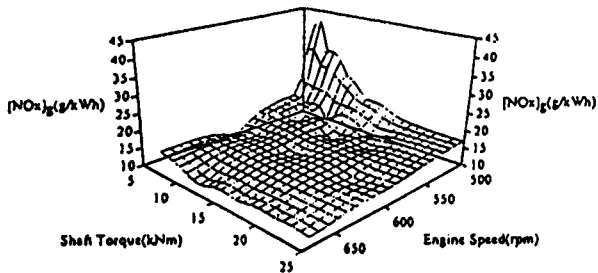


Fig.10 Variations of Specific Fuel Consumption on the RPM & Shaft Torque

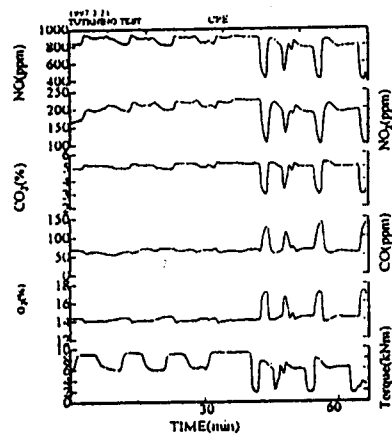


Fig.13 Variations of each Exh' Gas Components during the Turning Trial Test

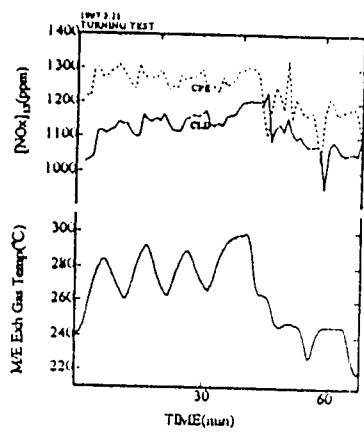


Fig.14 Time History of [NO_x]₁₃ of CLD, CPE and Exh' Gas Temp.

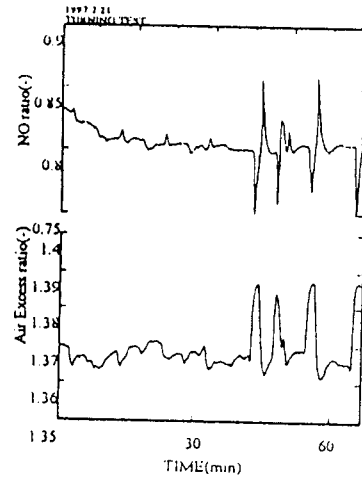


Fig.16 Time History of NO ratio & Air Excess ratio

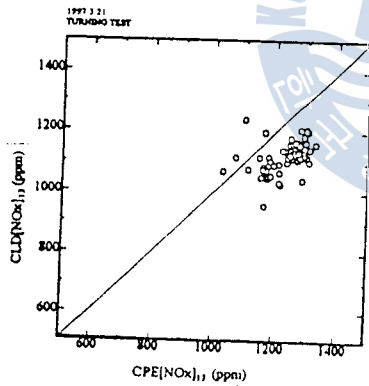


Fig.15 Comparison of the CPE & CLD for [NO_x]₁₃

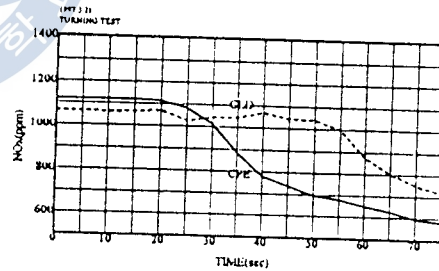


Fig.17 Comparison of the Time Delay of Sampling Gas Process on the CPE & CLD

