

선박디젤기관용 De - NOx System의 운전성능분석

최재성* · 조권희* · 전효중* · 진해광** · 임영식**

An Investigation on the Performance of De-NOx System for Marine Diesel Engines

J.S. Choi, K.H. Cho, H.J. Jeon, H.K. Jin, Y.S. Lim

< 목 차 >

Abstract	4. 운전 결과의 분석
1. 머리말	4.1 정상운전시 주기관의 NOx 배출특성
2. 대상선박과 주기관의 사양 및 배기 배출가스 규제현황	4.1 De-NOx System에 의한 정상 운전 시의 NOx배출특성
2.1 선박 및 주기관계원	5. 입·출항시 System의 운전성능 분석
2.2 배기배출가스 규제현황	5.1 입항식
3. De-NOx System 개요 및 운전자료의 측정	5.2 출항식
3.1 De-NOx System의 개요	6. 결 론
3.2 운전자료의 측정	참고문헌

Abstract

In this paper, the operation performance of De-NOx System for reduction of NOx emission from marine diesel engines, was investigated. The measured data for analysing were obtained from a ship with a emission monitor at sea, which carried hot coil from Pohang in Korea to Pittsburg in U.S.A..

As the results, it seemed that the system performance was good for reducing NOx emission on steady condition. But on transient condition like as during in or out port, it was clear that more improvement should be required for rapid heating method of SCR and transient control system.

Key Words : Marine Diesel Engine(선박디젤기관), Exhaust Emission(배기배출물), NOx(질소산화물), Selective Catalytic Reduction(선택식촉매환원법)

* 한국해양대학교

** 한국해양대학교 해사산업대학원

1. 머리말

환경오염에 관한 관심이 급속도로 증가하고 있는 가운데 IMO의 MEPC에서는 2000년부터 환경오염물질의 배출을 규제할 계획으로 알려져, 디젤기관의 배기배출물에 관한 규제가 대양을 항해하는 선박기관에도 적용되기에 이르렀다. 1990년 제29차 MEPC에서 노르웨이측은 국제해상운송에 의하여만 배출되는 SOx 및 NOx의 배출량은 각각 지역전체 배출량의 4% 및 7%를 차지한다고 보고한 바 있다. 따라서, 선박으로 부터의 대기오염이 심한 '특별해역'을 정하는 방법, SOx에 관하여는 연료유종의 유황분을 기준(전체적으로 5%이하)으로 규제하는 방법, NOx에 관하여는 주기회전수를 파라메타로하여 배출규제치를 설정하는 방법 및 검사방법 등이 검토되고 있다.

또한, 미국에서는 EPA(Environment Port Agency, 연방환경보호국)가 배기정화법에 의하여 선박으로 부터의 대기오염물질과 관련한 배출삭감방안을 검토하고 있으며, 이에 의하면, 2001년부터 배출부과금(10,000\$/tonNOx)을 납입하도록 하고, 저NOx엔진의 채용, 정박시 육상전원의 사용 등, 배출삭감방안을 채용한 선박의 경우에는 배출부과금을 할인해주는 등의 제도를 검토하여 94년 7월에 공청회를 개최하였다⁽¹⁾. 따라서, 입항빈도가 높은 선박은 삭감기술을 도입하는 것이 경제적으로 유리할 것으로 생각된다.

미국의 샌프란시스코 피츠버그항에서는 한국의 포항제철에서 hot coil을 운송하는 한국국적의 선박에 대하여 배기배출물을 규제하고 있다. 이 선박들은 SOx에 대한 대책으로 저유황연료(LSDO)를 사용하고, NOx에 대한 대책으로는 De-NOx System을 설치하여 운항하고 있다. 이 선박들은 동형의 hot coil전용선박으로 건조당시부터 De-NOx System을 계획, 설치하였으며 이에 관한 보고가 기관제작자들에 의하여 보고된 바 있다.⁽²⁾

필자들은 현재 운항되고 있는 이 시스템의 운전성능에 관하여 관심을 가지고 운전자료를 수집하여 왔다. 본 연구에서는 De-NOx System이 설치되어 있는 P선박의 관련운전자료들의 분석을 통하여 주기기관의 NOx배출특성을 조사하고, 이 시스템의 운전성능을 파악하였으며, 특히, 이 시스템이 가동되는 입출항시의 NOx배출특성에 관하여 분석, 검토한 결과를 보고하고자 한다.

2. 대상선박과 주기기관의 사양 및 배기배출가스 규제현황

2.1. 선박 및 주기기관제원

현재 이 항로에 투입되어 있는 선박은 모두 4척이며, 동일한 제원으로 건조되었다. Table 2.1은 이 선박 및 주기기관의 제원을 보인다.

Table 2.1. Specification of Ship with M/E

TOA	610 feet
Breath	93 feet
Draft	31 feet
DWT	37,000 tons
Bow Thruster	1,000 kW
M/E Type	MAN B&W 6S50MC
MCR	10,680 BHP / 123RPM
NCR	9,610 BHP / 118.8RPM

2. 2. 배기배출가스 규제현황

Table 2.2는 UPI(USS-POSCO Ind.)가 BAAQMD(Bay Area Air Quality Management District)로부터 승인을 받은 내용을 보인다. 이 규제치는 피츠버그항으로부터 48마일(Golden Gate 서쪽 약5마일)지점부터 적용되고, 배출총량을 규제하며, 여기에는 이·접안시 사용되는 tug boat나 기타 부대시설에서 배출되는 공해물질도 포함된다. 따라서, 정박중 디젤발전기로부터 배출되는 NOx를 억제하기 위하여 육상전력을 사용하고 있으며, tug boat의 사용척수를 감소시키기 위하여 bow thruster가 설치되어 있다.

NOx의 감소량은 첨가되는 암모니아의 양에 의하여 결정되지만, 암모니아의 공급량을 과대하게 증가시키면 미사용 암모니아의 양(암모니아슬립)이 증가되게되어 배관계통의 부식 및 유해가스의배출을 유발하게 된다. 따라서, NOx의 배출농도는 130ppm을 유지하도록 하고 있다. UPI의 보고에 의하면 이상적인 NH₃와 NOx의 비는 0.94이며, 정상상태에서 암모니아슬립은 10ppm 이하이지만, 급격한 부하변동등의 이유로 평균적으로 20ppm이하를 나타낸다고 한다.

Table. 2.2 Regulation of Emission certified by BAAQMP

Item	MAXIMUM	
	lbs/day	tons/year
PM	24	1.26
NOX	485	26.97
SO2	67	3.68
Organics	40	2.19
CO	152	8.69

3. De-NOx System 개요 및 운전자료의 측정

3. 1. De-NOx System의 개요

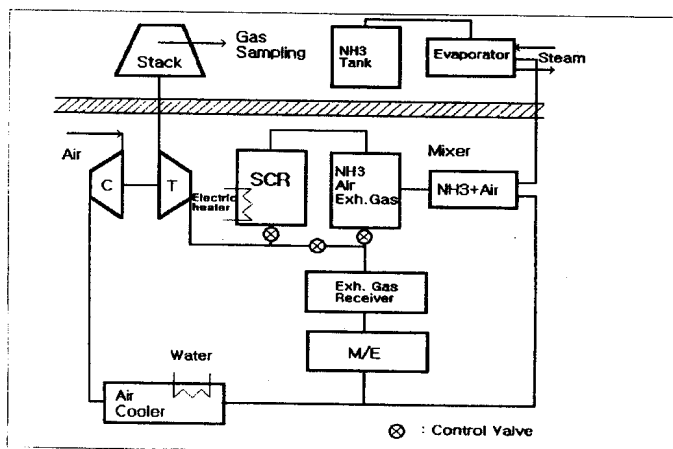


Fig. 3.1. Schematic Diagram of De-NOx System

Fig. 3.1은 시스템의 구성을 간략히 나타낸 것이다. 암모니아탱크 및 증발기는 기관실 외부에 설치되어 있으며, 암모니아는 공기와 혼합기에서 혼합된다음 배기가스와 다시 혼합된다. 혼합가스는 SCR반응기에 유입되어 촉매에 의하여 혼합가스중의 NOx가 N₂로 환원된 후 T/C에 유입된다. De-NOx System의 성능을 확인하고, 또한 feedback control하기 위하여 연돌에서 샘플가스를 채취하여 배출가스중의 NOx농도를 측정한다.

Table 3.1은 시스템의 기본설계사양을 보인다.

Table 3.1. Design Basic of De-NOx System

(a) Main Engine

Engine Capacity	10,680 BHP
Exhaust Gas	68,400 ± 5% kg/h
Temp. of Exh. Gas	390 ± 10 ℃
Press. of Exh. Gas	2.3 ± 0.3 bar
Max. NOx Inlet & Outlet	1600 & 130 ppm

(b) Consumption Figures for De-NOx System

Load (%)	100	82	25
NH3 (kg/h)	64.0	52.5	18.0
Steam (kg/h)	38	31	12
Dilution Air (NM3/h)	1,500	1,200	400
Electric Power (kW)	7	7	7

3. 2. 운전자료의 측정

(1) Load (%)

기관의 부하는 공급연료량에 의하여 나타낼 수 있다. 따라서 F.O. 유량계를 통과하는 F.O 유량을 측정하여 Load (%)로 나타낸다.

(2) NOx의 배출농도측정 (Chemiluminescent NOx Analyser : ppm)

NOx의 배출농도측정은 화학발광법(chemi-luminescence)을 이용한 방법으로 측정하며, De-NOx System의 운전중에 NOx의 측정을 위한 샘플가스는 T/C이후의 배기관출구에서 채취한다. T/C이후의 배기관에서 채취되는 샘플가스는 soot와 암모니아가스등이 포함되어 있기 때문에 이들을 제거하기 위하여 샘플가스는 암모니아 흡수장치와 필터를 거치도록 되어있다. 샘플가스는 분석기에 도달하는 동안 가열되며, 샘플가스의 흡입압력이 높은 부압으로 되기 때문에 수분의 응축은 일어나지 않는다. 샘플가스중의 NO2는 카본 converter에서 NO로 전환된다. NOx의 측정치는 계속적으로 기록기에 기록된다.

(3) O2 농도측정 (Zirkoniumoxid Oxygen Analyser : %)

배기가스 중의 산소농도는 SCR내에서의 반응에도 영향을 미친다. 또한 계측된 NOx는 산소농도에 따라 다르기 때문에 산소농도를 측정하여야 한다. 측정위치는 샘플링한 배기가스를 이용하기 때문에 NOx의 측정위치와 같다.

(4) 촉매온도 측정 (℃)

SCR내의 촉매와 가스의 온도는 NOx의 환원작용에 크게 영향을 미친다. SCR 입구에서의 가스온도를 측정하여 나타낸다.

(5) NH3 공급량 측정 (kg/h)

NH3의 공급은 Load에 따라 결정되나 공급량은 유량계를 이용하여 측정된다.

4. 운전 결과의 분석

4.1. 정상운전시 주기관의 NOx 배출특성

대상기관의 정상 상태에서의 운전조건 즉 부하에 따른 NOx의 배출특성을 파악하기 위하여 모든 입·출항시 및 시운전시의 계측결과로부터 부하의 변동이 비교적 작고 암모니아의 공급이 차단된 상태(1.0 kg/h이하)에서의 계측결과만을 선택하여 이들을 15% O₂로 환산한 결과를 Fig. 4.1에 나타내었다. 이 결과는 NOx 배출농도를 억제하기 위하여 공급되는 암모니아 양을 feed forward control하는데 이용된다. Fig. 4.1.로부터 부하 20%정도까지는 NOx의 배출이 직선적으로 증가되고, 20%~50% 사이에는 부하의 변동에 따라 NOx배출농도의 증가는 크지 않음을 알 수 있다. NOx의 계측 결과가 차이를 보이는 것은 운전자료에도 기인하는 것으로 판단된다.

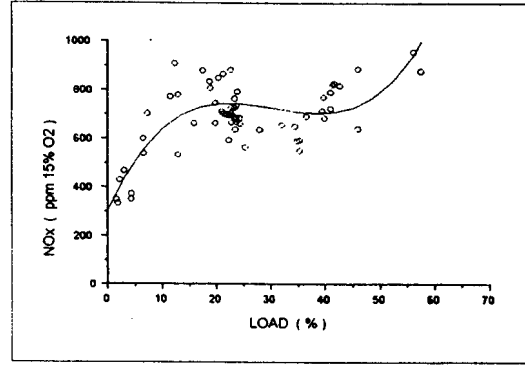


Fig.4.1 Measred data of uncontrolled NOx emission concentration

Load 60% 이상에서 계측된 결과가 없어서 고부하 영역에서의 배출특성을 파악하기는 곤란 하였다. 이는 De-NOx System이 주로 입·출항시에만 운전되기 때문이며, SCR용량 결정에 고려되어야 할 사항으로 생각된다. 즉

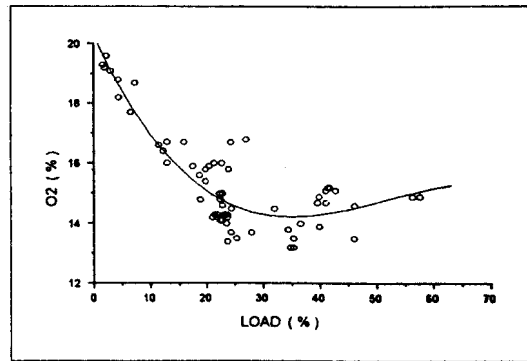


Fig.4.2 Measured data of O₂ concentration

최대 배출농도 1600ppm을 목표로 설계되어 있으나, 실제 운전되는 범위에서는 1000ppm 이하이므로 용량을 감소시킬 수 있을 것이다. 참고로 O₂의 농도도 Fig. 4.2.에 나타내었다.

4.2. De-NOx System에 의한 정상운전시의 NOx배출특성

앞에서 언급한 바와같이 De-NOx System은 암모니아의 공급량에 의하여 기관으로부터 배출되는 NOx양을 감소시킨다. 따라서 System의 운전성능을 파악하기 위하여 Load에 따른 암모니아의 공급량과 이때 배출되는 NOx의 농도를 Fig. 4.3.에 나타내었다. System이 안정된 저감성능을 발휘하기 위하여는 SCR내의 반응온도가 중요하다. 따라서 충분히 예열이 되어 있는 상태 즉 입항시의 계측결과 중에서 암모니아의 공급량이 5kg/h이상이고 부하변동이 적은 경우의 결과만을 선택하여 나타냈다. 그럼으로부터 반응기내의 온도는 거의 360°C 이상을 유지하고 있어 안정된 성능을 나타내고 있다고 판단된다. 또한 암모니아의 공급량은

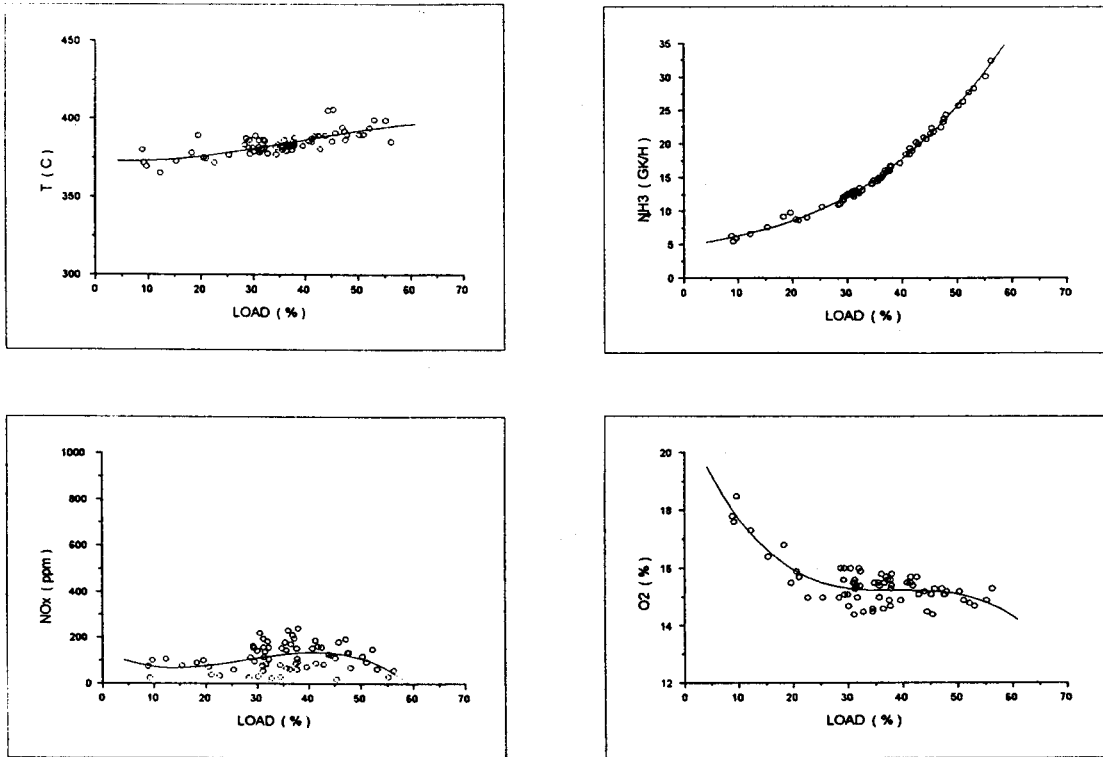


Fig.4.3 Operation characteristics of De-NOx System

Load의 변화와 일정한 관계를 가지고 있음을 알 수 있으며, 이로부터 암모니아의 공급량은 Load의 변화에 의하여 제시되어 feed forward control을 하고 있음을 알 수 있다.

암모니아 공급량과 부하와의 상관관계는 NOx농도, 산소농도, 배기가스량 및 연료유량을 동시에 측정한 결과에 기초하여 정하여지며, 측정결과는 동형기관의 공장시운전시에 얻어진다. 이 결과는 각 부하에 있어서의 요구암모니아량을 산출하는 데 이용된다. 그러나, NOx배출량은 냉각수온도, 연료분사시기, 연소실의 실제상태등의 변화에 따라 변하기 때문에 이를 보상하기 위하여 제어계통에 NOx계측기로 부터의 feedback signal이 포함되어 있다. 따라서 계측기의 고장등으로 계측이 실패하는 경우에도 제어할 수 있도록 되어있다.

제어결과는 배출농도를 대체적으로 200ppm 이하로 억제하고 있으나, 제어 목표치가 130 ppm 이므로 만족할 만한 상태는 아니라고 생각된다. 이는 부하변동에 따른 영향으로 판단된다. 산소농도는 부하 30% 이하에서는 부하의 증가에 따라 급격히 감소하나 그 이상에서는 부하의 변동에 관계없이 15% 정도를 유지하고 있으며, 이는 T/C에 의한 급기 압력과의 관계에 의한 것으로 판단된다.

5. 입·출항시 System의 운전성능 분석

5. 1. 입항시

Fig. 5. 1.은 피츠버그항 입항시 측정된 결과를 측정항목별로 시간에 따라 나타낸 것이다. 두 항차의 측정결과를 (a)와 (b)로 나타낸다. 그림 (b) 로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

(1) Load (%)

Load의 변화는 입항시 선박의 운항상태를 짐작할 수 있는 사항으로 70%를 넘지 않는 범위에서 기관이 운전되고 있다. 기관정지 즉 부두접안까지 약 4시간30분정도 소요되었음을 나타낸다.

(2) SCR 내부온도 T(°C)

SCR 내부온도는 기록초기 270°C로부터 배기가스가 통과함에 따라 서서히 온도는 상승하여 30분이후 부터는 380°C 이상을 유지하게 된다. 부하의 변동에 따라 SCR 내부온도도 변동하고 있으나 시간지연이 있음을 알 수 있다.

(3) 산소농도 O₂(%)

배출가스중의 산소농도는 공급공기량과 공급연료량 즉 Load에 의하여 영향을 받는다. Load의 변화가 심하지 않은 측정초기에는 약15% 정도로 일정한 값을 나타내고 있으나 부하변동이 심한 경우 즉 120분이 지난 이후에는 산소 농도의 변화가 심하게 나타나며 이는 부하변동과 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 부하가 아주적은 경우에는 Blower에 의하여 보조 공기가 공급되기 때문에 산소 농도가 20%가까이 되어 공기에 가까운 농도를 나타내고 있다.

(4) 암모니아 공급량 NH₃(kg/h)

암모니아의 공급량은 앞에서 언급한 바와 같이 기본적으로 Load에 의하여 제어된다. Load는 F.O flow meter에 의한 공급유량을 계측하여 Load로 환산하고 이 결과에 의하여 feed forward control 방식으로 제어하기 때문이다. feed forward control 방식을 채용하는 이유는 SCR 장치내에서 발생하는 NO_x를 환원시키는데 요하는 반응시간이 길기 때문이다. 그럼으로부터 암모니아 공급량은 SCR 내부온도가 350°C 정도까지 상승한 이후부터 공급되고 있으며 부하의 변화에 따라 제어되고 있음을 알 수 있다.

(5) 배출가스중 질소산화물의 농도 NO_x (ppm)

NO_x의 배출농도는 암모니아의 공급에 의하여 대체적으로 200ppm이하로 낮게 나타내고 있으며 비교적 양호하게 운전되고 있음을 알 수 있다. NH₃와 NO_x의 변화는 역비례관계를 잘 나타내고 있어 NO_x 저감성능을 파악할 수 있다. 그러나 목표치가 130ppm인 점을 감안하면 제어계통에 대한 연구가 더욱 필요한 것으로 생각된다. 또한 NH₃의 공급량이 변동하는 시기 즉 부하가 변동하는 시기에 있어서 NO_x의 배출농도도 증가되어 나타내고 있는 것으로부터 과도기에 있어서의 제어 안정성 문제도 연구되어야 할 것으로 생각된다. SCR 내부온도가

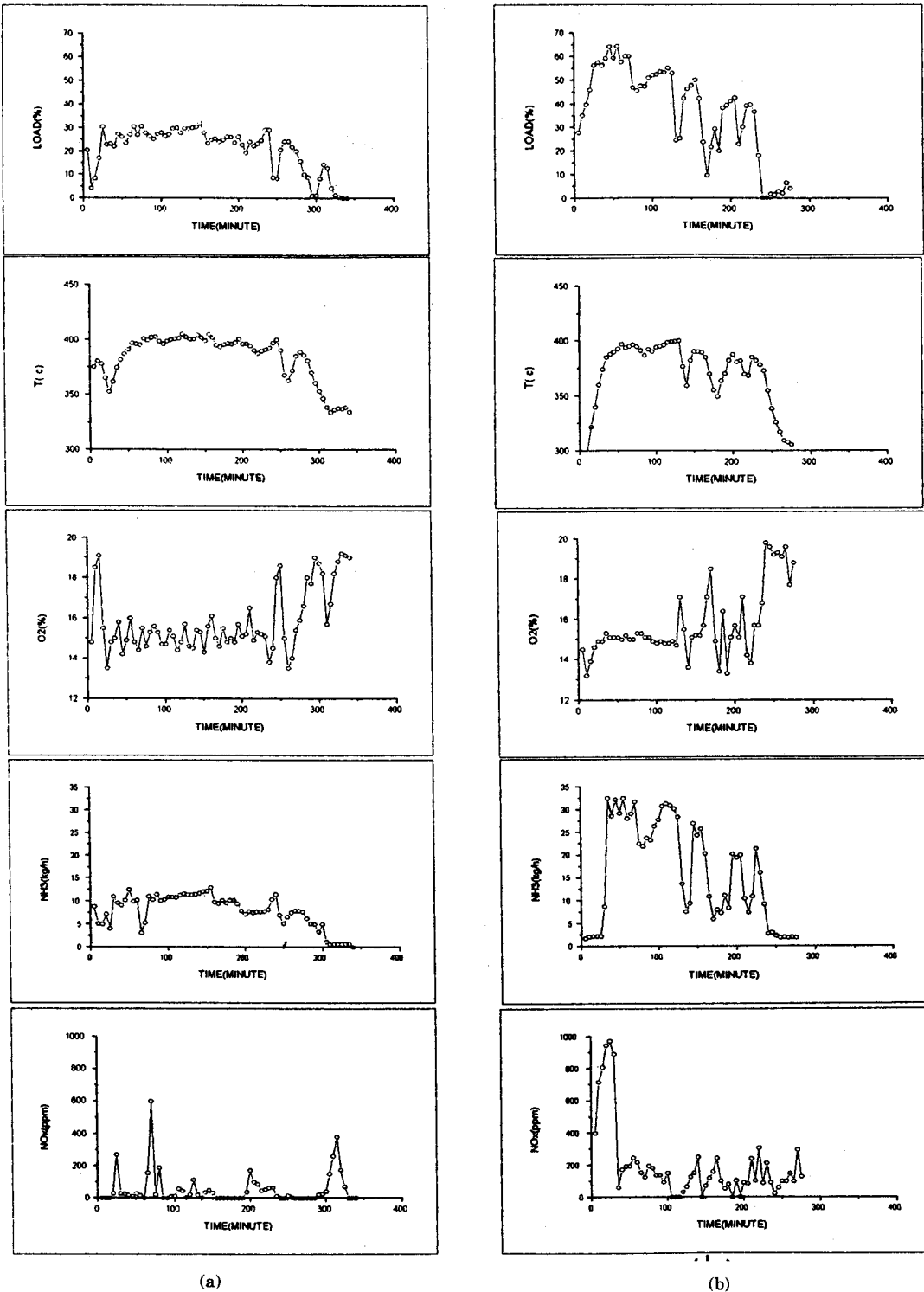


Fig.5.1 Time histories of measured data for De-NOx System during arrival

낮은 기록초기에 있어서는 암모니아 공급이 차단 되기 때문에 NOx가 저감되지 않아 배출농도가 높게 나타나고 있으며 이로부터 운전 초기에 있어서 warming방법등의 개선이 요구됨을 알 수 있다.

(6)기타

그림 (a)의 경우에도 대체로 위에서 언급한 것과 같은 영향을 나타내고 있다. 다만 입항시의 부하가 30% 정도로 낮고 따라서 입항에 요하는 시간도 5시간 이상 걸린 것을 알 수 있으나 부하변동이 심하지 않았기 때문에 상태적으로 NOx의 제어에 있어서도 유리하여 NOx의 배출농도가 매우 낮아져 있음을 알 수 있다. Table 5.1.에 두 항차의 경우 입항시 배출된 NOx의 총량을 나타낸다. Table 5.1.로부터 항차에 따라 입항소요시간 및 연료소비량의 차이는 물론 총 NOx 배출량에도 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 기록을 시작한 시기에서 선박의 위치를 정확히 파악하는 것이 곤란하기 때문에 단정적으로 말하기는 어렵지만, 표로부터 배출량의 저감을 위하여는 부하변동을 적극 억제하여 운항하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

Table 5.1. Operation results of De-NOx System

	Voyage No. B (January)		Voyage No. A (May)	
	Arrival	Departure	Arrival	Departure
Recording time	4h 39m 51s	3h 31m 11s	5h 42m 36s	4h 0m 11s
Fuel Comsum.	791.1 gals	495.8 gals	548.8 gals	410.5 gals
NOx Emission	91.9 lbs	80.8 lbs	17.1 lbs	63.2 lbs

5. 2. 출항시

Fig. 5.2.는 앞에서 언급한 입항항차와 같은 항차에서의 Pittsburg항 출항시 측정된 결과를 항목별로 시간에 따라 나타낸 것이다. 출항시는 약 3시간 전부터 De-NOx System을 warming up하고 1시간 30분 전부터 NH₃의 warming up을 시작한다. 각각의 측정 항목간의 관계는 입항시에 언급한 바와 같으나 암모니아는 SCR 내부온도가 350°C 이상이 되었을 때 비로소 공급되기 때문에 이 기간 동안(약 30분) NOx의 배출농도는 대단히 높게 나타나며, 이에 대한 대책이 요구된다. 그러나 부하가 낮기 때문에 배출량은 크지 않을 것이다.

두 항차의 경우 비교적 부하 변동이 적은 (b)의 경우 양호한 결과를 나타내고 있으며 앞서와 마찬가지로 부하 변동시의 제어방법에 관한 연구가 요구된다고 생각한다.

6. 결 론

선박의 경우 이미 특정해역에서 환경오염과 관련하여 규제를 적용받고 있으며, 그중 NOx와 SOx가 문제로 되고 있다. 본 연구에서는 NOx저감대책으로 설치된 De-NOx System의 실선운전기록을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 주기관 정상운전시 주로 저부하영역에서의 NOx배출특성을 파악할 수 있었다.

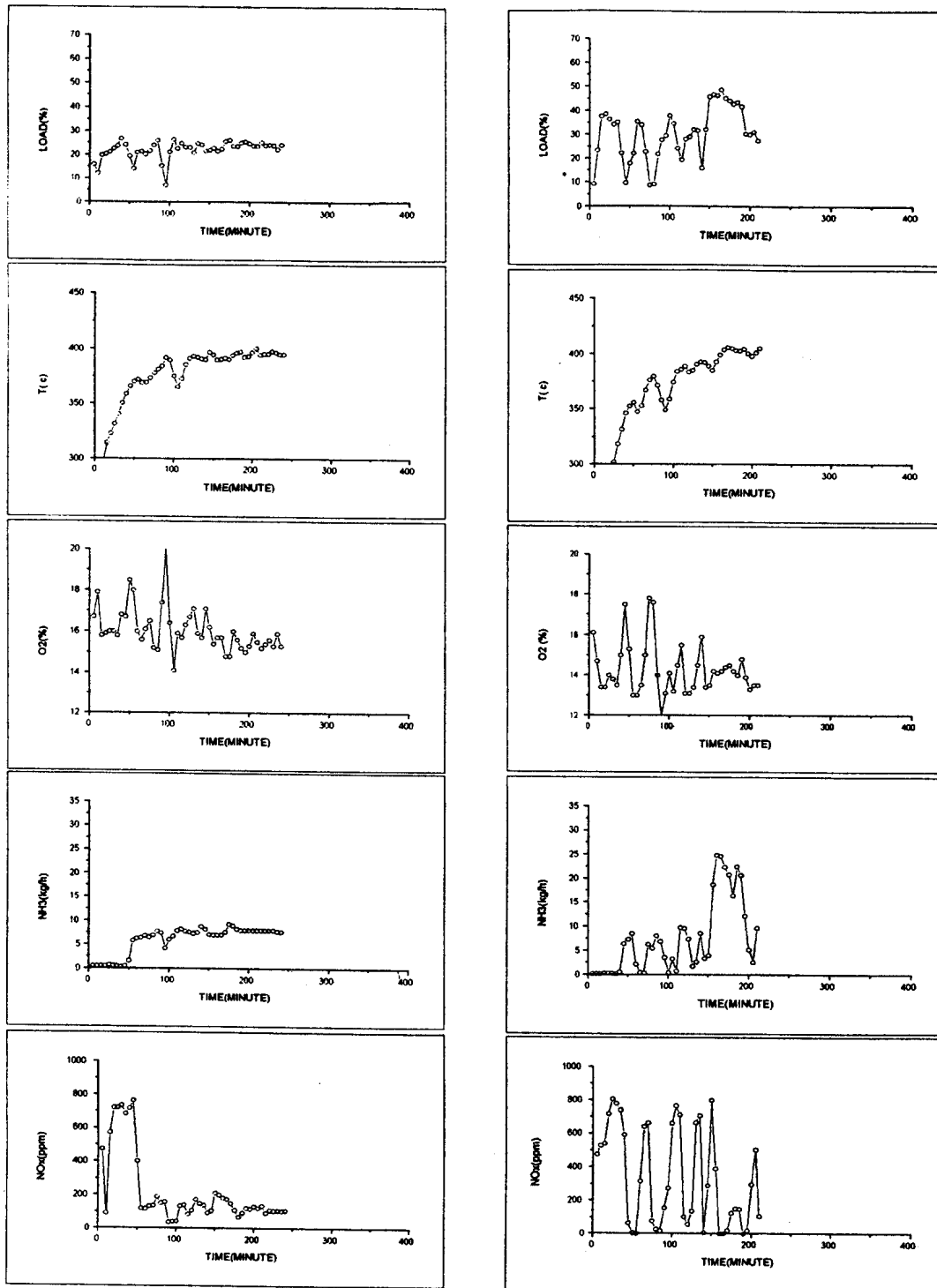


Fig.5.2 Time histories of measured data for De-NOx System during departure

(2) De-NOx System은 정상운전시 feed forward control 방법으로 비교적 양호한 성능을 나타내고 있다. 그러나, 입·출항시와 같이 부하변동이 심한 경우의 제어방법에 관한 개선이 요구된다.

(3) 운전초기의 배출농도를 감소시키기 위하여는 SCR내부의 가열방법에 관한 개선이 요구된다.

참 고 문 헌

1. 平田賢, '船舶大氣汚染防止の動向と對應', 日本船用機關學會誌, 第32卷 第6號, 1997, 6.
2. MAN B&W Diesel A/S 'Emission Control Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines', Technical Review, 1996, 12.

