

4행정 중속 디젤기관의 스모크리스 시동 Smokeless Starting for 4 Cycle Medium Speed Diesel Engine

정석호*†

Suk-Ho Jung*†

(접수일 : 2014년 03월 27일, 수정일 : 2014년 06월 24일, 채택확정 : 2014년 06월 24일)

Abstract: Although smoke emitted from ships is not included in IMO(International Maritime Organization) regulation yet, it is one of the substance what is polluting mainly the air. Especially, its concentration is very high when an engine is started and a load is rapidly changed. This is caused by unburned fuel what is injected more than necessary quantity after combustion period. It is possible to decrease smoke concentration emitted at starting engine by controlling fuel injection quantity, but it is concerned that time to rated speed must be spent. Then a governor what can reduce the smoke concentration without a loss of time to rated speed is needed. We adopted a electro-hydraulic governor what can control dual fuel start limit function and achieved very low level of smoke concentration without greater the loss of time to rated speed.

Key Words : Smokeless, Starting engine, Medium speed diesel engine, Electro-hydraulic governor

1. 서 론

환경오염 문제에 대한 관심이 증가하면서 디젤기관의 배기가스 규제가 단계적으로 엄격해져 가고 있다. 특히, 선박에서는 NOx의 배출규제에 맞추어 국제해사기구에서 Tier I, II and III로 단계적으로 실행해 가고 있다. 그러나, 2011년 1월 1일부터 시행이 된 Tier II에는 아직 스모크(정확하게는 PM)에 대한 규제가 실행되지 않고 있다¹⁾. 이는 자동차에서 뿜어져 나오는 배기가스는 우리의 생활권 내에서 쉽게 감지되는 반면 선박에서 뿜어져 나오는 스모크는 대부분 생활권과는 거리가 먼 바다 위의 문제로만 여겨지고 있기 때문이며,

국제적으로 규제를 할 수 있는 스모크 측정장비의 부재가 원인인 것으로 고려된다. 스모크의 배출규제가 아직 정해지지 않았지만, 선주들은 선박으로부터 배출되는 스모크에 대한 불만을 꾸준히 제기해 왔다. 특히, 우리의 생활권에서 가장 가까운 항구에서 시동 시에 배출되는 스모크는 우리의 시야에 바로 들어오고, 환경에 대한 관심이 높아진 시민들에 의한 신고가 잦아지기 때문에 선주들의 스모크 저감에 대한 요구가 급증하였고, 스모크 배출 저감은 엔진 메이커가 대책을 시급히 마련해야 하는 상황에 이르러 있다.

디젤엔진의 시동에 관련된 연구는 대부분 냉간 시동의 문제점을 개선하는 데 중점을 두었었다²⁻⁸⁾.

*† 정석호(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*† Suk-Ho Jung(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University.
E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

이는 대부분이 자동차용으로 배터리와 스타터 모터를 이용하여 디젤엔진을 시동하는 방식이다. 그러나 선박용으로 주로 사용되는 4행정 중속 디젤엔진은 2.5-3.0 MPa로 압축된 스타팅 에어로 시동이 되며 운전 중인 발전기관의 출구 냉각수로 워밍업이 가능하여 냉간 시동이 거의 없다.

시동 시의 스모크 배출에 관한 실험적, 이론적 연구는 지금까지 발표된 것이 거의 없지만, 기본적으로 스모크의 배출량은 연료의 농도에 큰 영향을 받는 것으로 밝혀져 있다⁹⁾. 따라서 시동 시의 스모크를 저감하기 위해서는 초기 폭발 이후에 필요 이상의 연료가 분사되지 않도록 가버너를 제어할 필요가 있다. 비교적 가격이 싼 기존의 기계 유압식 가버너는 시동 시 외부 연결장치에 의해서 연료 제한을 주기 때문에 한 단계로 제어할 수밖에 없다. 본 개발 연구에서는 가버너 자체적으로 시동 시에 연료 제한을 2단계까지 지정할 수 있는 전자 유압식 가버너를 탑재시켰다. 그리고 연료 제한과 관련된 각각의 기능에 따른 가버너 운전특성에 대해서 실험적으로 분석하였고, 최종적으로 2단계 연료 제한을 통해 스모크리스 시동 엔진을 구현하였다.

2. 전자유압식 가버너

실험에 사용한 전자유압식 가버너는 미국 우드워드 가버너사(WOODWARD GOVERNOR)의 UG-25+로 시동 시 연료 제한을 2단계로 제어할 수 있는 기능, 즉 듀얼 모드 연료 제한 기능을 가지고 있다. 시동이 제어되는 순서를 설명하면 다음과 같다. Fig. 1에 나타낸 것처럼 기관 회전수가 ①(start speed 1)을 넘으면 Fig. 2의 설정된 위치 ②(start fuel limit 1)로 랙이 움직이게 된다. 그리고, 회전수가 ③(start speed 2)을 넘으면 랙은 ④(actuator ramp rate)의 설정된 비율로 ⑤(start fuel limit 2)의 위치로 움직이게 된다. 그 다음 회전수가 ⑥(run speed)을 넘게 되면 ⑦(start target speed rate)의 설정된 비율로 ⑧(rated speed)의 속도에 회전수가 도달하게 되고 엔진은 아이들링 상태가 된다. 이 때 가버너는 시동 제어 모드에서 일반

제어 모드로 바뀌게 되며 min. speed set point 이하로 엔진 속도가 떨어지면 시동 제어모드로 전환된다.

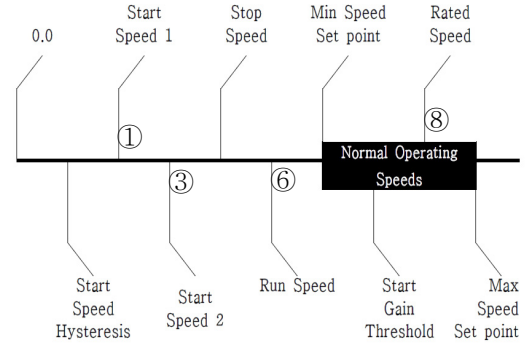


Fig. 1 Speed order to control the governor¹⁰⁾

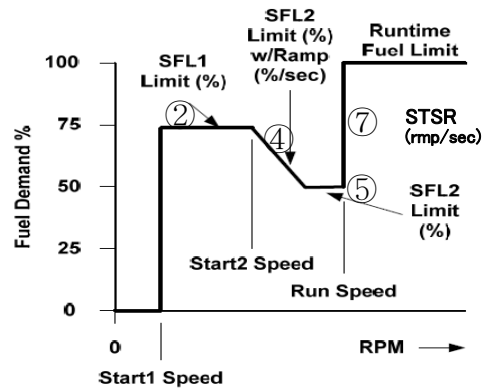


Fig. 2 Schematic diagram of dual start fuel limit¹⁰⁾

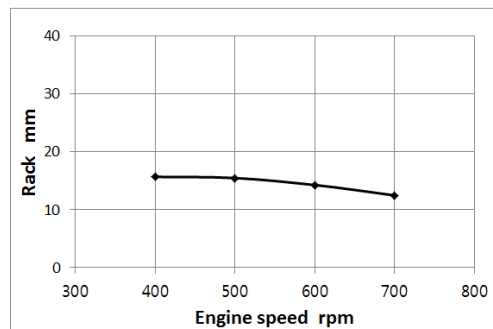


Fig. 3 Relationship between rack and engine speed on no load

다음으로 가버너에 설정값을 지정하기 위해서는 각 엔진과 탑재된 가버너의 특성을 파악해야 할 필요가 있다. 첫 번째는 Fig. 3에 나타난 것처럼 무부하에서 기관 회전수에 따른 랙의 위치를 파악해야 한다. 이 값들은 시동 시 랙의 최적 위치를 설정하는 기준이 된다. 따라서 시험 엔진에 있어서 400 rpm 이하에서는 랙의 위치가 16 mm 보다는 높아야 엔진이 정지하지 않는다고 볼 수 있다.

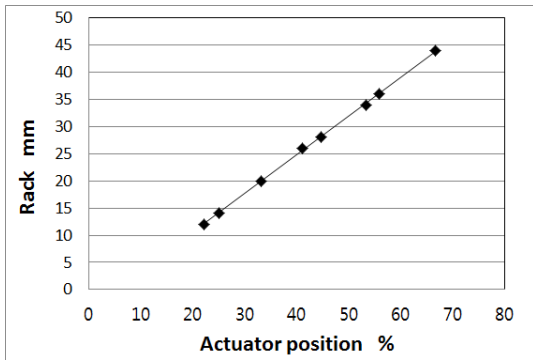


Fig. 4 Relationship between rack and governor actuator position

두 번째로 가버너의 설정치는 액츄에이터의 포지션을 %로 지정하기 때문에 랙의 위치와 액츄에이터 포지션의 관계를 파악해야 한다. Fig. 4에 본 실험에 사용된 엔진의 랙과 액츄에이터 포지션의 관계를 포인트 별로 취득한 예를 나타내었고 관계식은 다음과 같다.

$$rack = 0.7147 \times position - 3.7775 \quad (1)$$

이상의 조건들을 가지고 공장 출고 시 일반적으로 설정되는 싱글 모드의 결과를 토대로 듀얼 모드의 각 설정치를 변화시키면서 최적의 시동 성능을 나타내는 실험을 실행하였다. 본 실험에 사용된 엔진은 다이하츠디젤(주)의 6DC-32이며 그 사양을 Table 1에 나타내었다. 시동은 압축 공기를 사용하며 매번 약 2.5 MPa로 설정하였다. 시동 시의 스모크 배출량은 AVL 439 오파시미터(OPACIMETER)를 이용하여 터보차저 후단의 배

기가스 라인에서 측정하였다. 마지막 스모크리스 시동을 구현한 뒤에는 터보차저 후단의 배기가스 라인을 제거하고 비디오 카메라로 실제 스모크 배출 장면을 촬영하였다.

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Model	6DC-32
Engine type	water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinders	6
Bore × Stroke	320mm × 400mm
Max. Pme	2.51MPa
Max. output	2905kW
Generator output	2760kW

3. 결과 및 고찰

Fig. 5에는 싱글 모드에서 start fuel limit 1을 랙의 표시로 22 mm에서 2 mm씩 줄인 실험 결과를 나타내고 있다. 그래프에서 실선은 22 mm, 짧은 점선은 20 mm, 긴 점선은 18 mm를 나타낸다. 그래프의 왼쪽 종축은 연료의 랙과 오파시미터의 값을 나타내고 오른쪽 종축은 엔진회전수를 나타낸다. 그래프 위쪽의 엔진회전수를 보면 18 mm로 했을 경우 연료 분사량이 부족하여 실화로 인한 엔진 정지 현상을 나타내었다. 따라서 start fuel 1 limit를 20 mm 이상으로 정하는 것이 실험엔진에서는 좋을 것으로 판단되었다. 싱글모드에서는 정

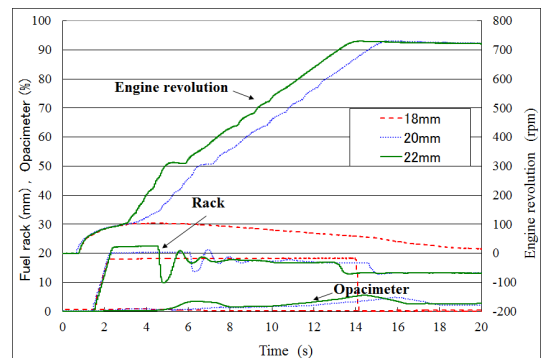


Fig. 5 Effect of start fuel limit 1 for single mode at starting engine

격속도에 이르는 시간을 길게 함으로서 오판시메터가 적게 나타나고 있으나 운전자들의 요구에 따라 일반적으로 이를 10초 이내로 할 필요가 있다. 또한 싱글모드에서는 오판시메터의 측정을 필터링하였기 때문에 그래프가 약간 낮고 부드럽게 나타나고 있다.

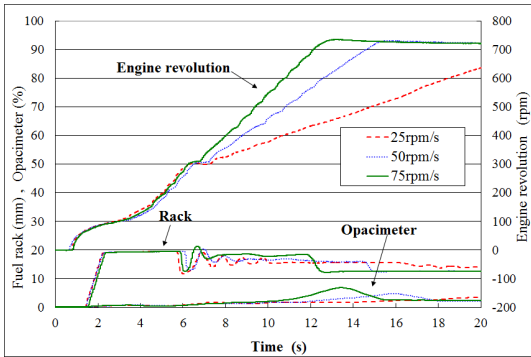


Fig. 6 Effect of start target speed rate for single mode at starting engine

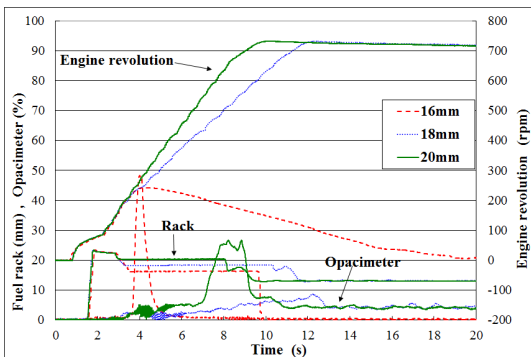


Fig. 7 Effect of start fuel limit 2 for dual mode at starting engine

Fig. 6에는 싱글모드에서 start target speed rate를 25 rpm/s, 50 rpm/s, 75 rpm/s로 설정한 경우의 실험결과를 나타낸다. start target speed rate를 작게 할수록 정격속도에 이르는 시간이 느려지기 때문에 오판시메터의 양이 적게 나왔다. 스모크가 적게 배출되지만 정격속도에 이르는 시간이 10초를 넘어가기 때문에 싱글모드에서는 이 값을 75 rpm/s 이상으로 할 필요가 있다.

Fig. 7에는 start fuel limit 1을 22mm로 설정하고 start fuel limit 2를 16 mm(긴 점선), 18 mm(짧은 점선), 20 mm(실선)로 설정한 듀얼 모드의 실험 결과를 나타낸다. 싱글모드에서와 마찬가지로 16 mm에서 실화로 인한 엔진정지 현상이 나타났다. 이는 Fig. 3에 나타내었던 내용에 일치하고 있다. 따라서 start fuel limit 2는 16 mm 이상으로 할 필요가 있다. 그리고 스모크가 많이 생성되는 부분을 자세히 보면 랙이 급격하게 움직이는 부분임을 알 수 있다. 긴 점선의 경우 랙이 start fuel limit 1에서 start fuel limit 2로 변경된 직후에 스모크가 많이 생성되었고, 실선의 경우 랙이 start fuel limit 2에서 rated speed로 움직일 때 급격하게 생성되었다. 따라서 스모크의 생성은 연료의 농도에 영향을 받는 것이 확실하며 랙의 급격한 움직임을 줄이는 것이 스모크리스 시동을 실현시키는 방법으로 사료된다.

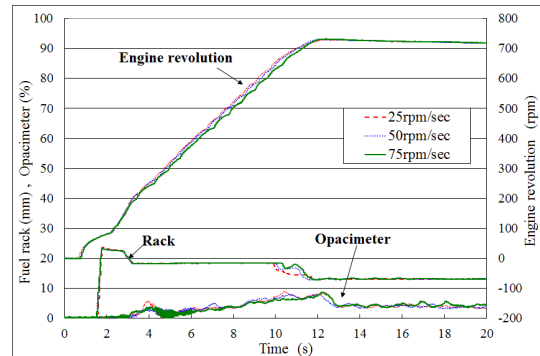


Fig. 8 Effect of start target speed rate for dual mode at starting engine

Fig. 8에는 듀얼모드에서 start target speed rate를 25 rpm/s, 50 rpm/s, 75 rpm/s로 설정한 경우의 실험결과를 나타낸다. 듀얼모드의 경우 이 설정값이 영향을 미치는 부분은 엔진이 정격속도에 이르기 직전이기 때문에 그래프 중의 랙이 거의 일치하다가 정격속도부근에서 약간의 차이를 낸다. 또한 오판시메터의 값도 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 듀얼모드에서는 start target speed rate보다는 start fuel limit 2의 역할이 엔진이 정격속도에 달하는데 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있

다. 또한 start fuel limit 2가 일정한 것에 비해 오판시미터가 지속적으로 증가하기 때문에 start fuel limit 2 부분을 지속적으로 감소시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

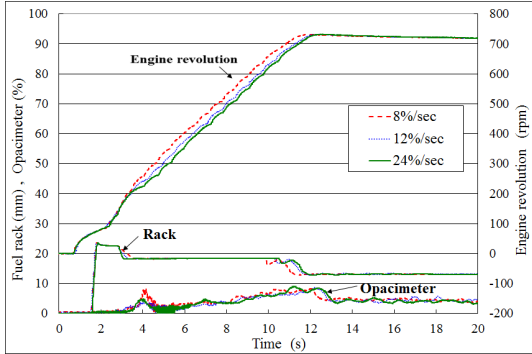


Fig. 9 Effect of actuator ramp rate for dual mode at starting engine

Fig. 9에는 듀얼모드에서 actuator ramp rate를 8%/s, 12%/s, 24%/s로 설정한 경우의 실험결과를 나타낸다. actuator ramp rate는 랙이 start fuel limit 1에서 start fuel limit 2로 움직이는 속도를 조절하는데 12%/s, 24%/s는 거의 차이가 나지 않는다. 8%/s의 경우 start fuel limit 2로 가는 속도가 다른 것에 0.4초 정도로 느려진다. 이에 따라 랙이 천천히 움직이게 되므로 분사되는 연료의 양이 많아지게 된다. 따라서 엔진 회전수가 다른 것들에 비해 좀 더 빨라지게 되면서 오판시미터의 피크치가 다른 것에 비해 약간 크게 되었다.

이상의 실험을 통하여 스모크는 랙이 급격하게 움직이는 부분에서 많이 생성됨을 알 수 있었다. 그리고 정격속도에 이르는 시간을 단축시키기 위해서는 저회전속도에서 연료를 더 많이 요구하기 때문에 start fuel limit 1에서 정격속도에 이르기까지 랙을 적절하게 감소시켜 나가야 한다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해서 start fuel limit 1, actuator ramp rate, start fuel limit 2를 적절히 조절하면 스모크리스 시동이 가능할 것으로 판단하였다.

Fig. 10에는 싱글 모드와 듀얼 모드에서의 기관 회전수, 랙 및 오판시미터의 시간 이력을 나타낸

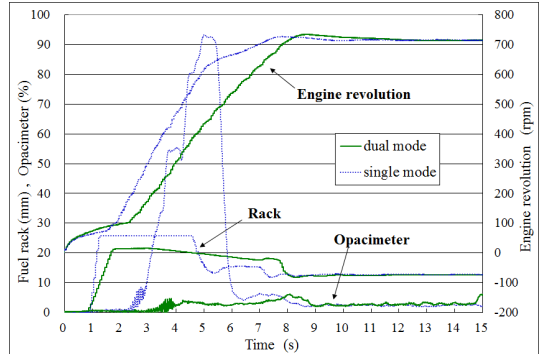
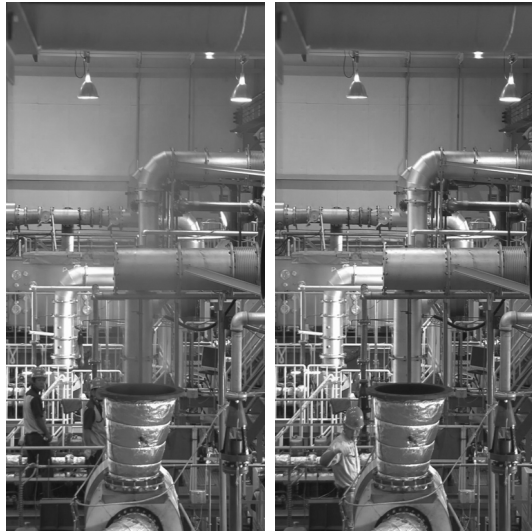


Fig. 10 Comparison between single mode and dual mode at starting engine



(a) single mode (b) dual mode

Fig. 11 Pictures captured from video screen

다. 싱글 모드는 기계식 유압 가버너가 일반적으로 공장에서 출고될 때와 같은 설정 값이고, 듀얼 모드는 본 연구에 의해 최적으로 설정된 값이다. 정격 속도에 이르는 시간은 싱글 모드가 약 7.5초인 것에 비해 듀얼 모드는 8.5초 정도로 약 1초 느려졌지만 오판시미터의 최대값은 싱글모드의 10분의 1정도로 감소하는 효과를 얻었다. 또한 오판시미터의 값이 듀얼모드에서는 5% 이하로 나타나며 이는 눈으로 확인이 거의 불가능한 수준이다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 start fuel limit 1, actuator ramp rate, start fuel limit 2의 설정을 최적

으로 하는 것에 의해 스모크리스 시동이 실현되었다.

Fig. 11은 Fig. 10과 같은 조건에서의 실험 사진을 각각 나타내었다. 왼쪽의 사진이 싱글 모드를, 오른쪽 사진이 듀얼 모드를 나타내고 있다. 사진에서도 싱글 모드의 경우 터보차저에서 배출되는 스모크가 확실히 보이지만 듀얼 모드의 경우는 거의 확인되지 않았다.

4. 결 론

시동 시의 스모크 배출량을 저감시키기 위해 전자 유압식 가버너를 이용, 듀얼모드 기능을 실행하였다. 각각의 파라미터가 시동에 미치는 영향을 살펴보고 종합적인 판단에 따라 적절한 파라미터의 설정값을 얻을 수 있었다. 그 결과 정격 속도에 이르는 시간이 8.5초로서 싱글모드에 비해 1초 정도 느려졌지만 오파시미터의 최대값이 싱글모드의 약 10분의 1 정도로 감소하였고 전체적으로는 스모크 배출이 5% 이하를 나타내는 감소 효과를 얻었다.

본 연구에서는 최적 조건을 찾는 실험으로만 끝이 났지만, 기관 회전수에 따른 연료량과 공기량을 측정하여 이론적인 내용을 체계적으로 수립하면 시동 시 뿐만 아니라 스모크가 많이 발생하는 저부하 운전 상태에서도 스모크리스를 달성시킬 수 있는 최적 조건을 밝혀낼 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음

Reference

1. IMO, 2009, "Revised MARPOL annex VI - regulations for the prevention of air pollution from ships", IMO.
2. S. H. Choi, 1988, "Measures of White Smoke from Direct Injection Diesel Engine", Conference of KSAE at 1998, pp. 113-122.
3. J. K. Park, K. S. Bae and C. Yoo, 2000, "Dynamic Modelling and Simulation of Engine Starting Process for Optimization of Diesel Engine Cold Starting System", KSAE, Vol. 8, No. 1, pp.32-39.
4. Z. Han, N. Henein, B. Nitu and W. Bryzik, 2001, "Diesel Engine Cold Start Combustion Instability and Control Strategy", SAE 2001-01-1237.
5. David J. Junge, 1994, "Cold Start Automotive Research Efforts at the University of Alaska Anchorage", SAE 940083.
6. P. Bielaczyc, J. Merksiz and J. Pielecha, 2001, "Investigation of Exhaust Emissions from DI Diesel Engine During Cold and Warm Start", SAE 2001-01-1260.
7. H. Peng, Y. Cui, L. Shi and K. Deng, 2008, "Effects of exhaust gas recirculation(EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection(DI) diesel engine", Energy, Vol. 33, Issue 3, pp. 471-479.
8. S. S. Kim, 2010, "The effects of High Torque Starters on the Starting Characteristics of a Micro-hybrid Engine", KSPSE, Vol. 14, no. 2, pp. 12-15.
9. Kitamura, T. et al., 2002, "Mechanism of smokeless diesel combustion with oxygenated fuels based on the dependence of the equivalence ratio and temperature on soot particle formation", International Journal of Engine Research, Vol. 3, No. 4, pp. 185-195.
10. Sam Coleman, 2002, "Technical Manual 26330, Installation and Operation Manual", Woodward governor company, Colorado America, pp. 38-62.