

선박용 저속 2행정기관의 밀러사이클 효과의 향상

이지웅¹ · 백현민² · 최재성³ · 조권희[†]

(Received September 26, 2017 ; Revised October 16, 2017 ; Accepted October 26, 2017)

Improvement of Miller cycle effect on 2-stroke marine diesel engine

Ji-Woong Lee¹ · Hyun-Min Baek² · Jae-Sung Choi³ · Kwon-Hae Cho[†]

요약: IMO의 환경규제로 인해 엔진 제작사에서는 Tier III를 만족하기 위해 가스연료 엔진과 EGR, SCR을 부가적으로 장착한 엔진 등을 선보이고 있다. 질소산화물과 연료소비율(SOFC)을 동시에 감소시키길 수 있는 4행정 밀러사이클 기관에 대한 연구들이 많이 보고되고 있으나, 2행정 기관의 밀러사이클에 관한 연구들은 많이 보이지 않는다. 필자들은 앞서 2행정기관에 밀러사이클의 적용이 가능하다는 연구 결과를 보고하였다. 본 연구에서는 환경규제를 만족하기 위해 2행정기관의 밀러효과를 향상시킬 수 있는 방안에 대해 연구하였으며, 밀러사이클 효과는 소기온도, 과급효율 및 소기과정의 개선을 통해 향상될 수 있다. 본 연구는 유니플로 소기방식을 채택하고 있는 2행정기관의 소기포트에 슬라이딩 기구의 적용을 제안하고 밀러사이클을 동시 적용한 결과에 대해서 보고한다. 고효율 과급기와 소기의 냉각을 통해 밀러사이클은 NO의 60%, SFOC의 1.6% 감소효과를 얻을 수 있었다. 또한, 슬라이딩 기구의 적용으로 NO와 SFOC의 감소효과가 더욱 향상될 수 있다.

주제어: 질소산화물, 밀러사이클, 선박용 2행정기관, 소기포트, 슬라이딩 기구

Abstract: Gas-fueled engines and engines equipped with EGR (Exhaust Gas Recirculation) and SCR (Selective Catalytic Reduction) are being designed by large-engine manufacturers in order to satisfy Tier III due to forced emission control rule by IMO. Many studies have reported the simultaneous decrease of NOx and SFOC (Specific Fuel Oil Consumption) of a 4-stroke Miller cycle. However, few have reported on the 2-stroke Miller cycle. We have reported the applicability of the Miller cycle on a 2-stroke marine diesel engine through an earlier study. This study reports the results of improvement of the Miller effect for a 2-stroke engine in order to satisfy the emission control rule. The Miller effect can be improved by using lower scavenge air temperature, higher efficiency T/C (Turbocharger) and improved scavenging. In this study, a sliding device with changeable port height is applied to the uniflow scavenge port of a 2-stroke engine and the results, applied simultaneously with the Miller cycle, are reported. Through higher efficiency T/C and lower scavenge air temperature, the Miller cycle can achieve 60% reduction of NO and 1.6% reduction of SFOC. In addition, the effect of reducing NO and SFOC can be further improved by the application of the sliding device.

Keywords: NOx, Miller cycle, Marine 2-stroke diesel engine, Scavenging port, Sliding device

Nomenclature

T_{max}	Maximum combustion temperature
$T_{scav.}$	Scavenge air temperature
κ	Specific heat ratio
β	Cut-off ratio
ε_c	Compression ratio
G_{air}	Air mass
$P_{scav.}$	Scavenge air pressure
R	Ideal gas constant
$\theta_{SPO}, \theta_{SPC}$	Angle of scavenge port open, close
$\theta_{EVO}, \theta_{EVC}$	Angle of exhaust valve open, close

1. 서론

IMO의 NOx 규제는 2016년 1월 이후 배출통제지역(ECA, Emission Control Area)을 입항하는 선박에 대해 Tier III를 만족하는 기관을 탑재할 것을 요구하고 있다. 원양수역을 항해하는 대형 선박의 경우 저속 2행정기관을 주기관으로 사용하고 있으며, 저속 2행정 기관을 제작하는 제작사에서는 Tier III 규제 만족을 위해 가스연료를 사용하는 기관과 EGR 혹은 SCR을 적용한 기관을 선보이고 있다[1]-[3]. 가스연료를 사용하는 기관은 크게 오토사이클을 따르는 저압

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1539-655X>): Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: khcho@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4252

1 Department of Marine Engineering, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, E-mail: woongengine@gmail.com, Tel: 051-620-5814

2 R.O.K Navy Headquarters, E-mail: jeapo2812@naver.com, Tel: 051-410-4262

3 Department of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jschoi@kmou.ac.kr, Tel: 051-620-4252

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분사방식과 디젤사이클을 따르는 고압분사방식의 두 가지 형태로 적용되고 있다[4][5]. 고압분사방식을 채택한 MDT사의 가스연료 기관은 CO₂ 20%, NO_x 25%를 저감할 수 있다고 보고되고 있다[5]. 따라서, MDT사의 고압분사방식 가스연료기관은 80%의 NO_x를 감축해야 하는 Tier III를 만족할 수 없기 때문에 EGR 혹은 SCR을 동시 적용하여야 하며 EGR 적용시 NO_x를 2.7[g/kW·h]까지 감축하여 Tier III를 만족할 수 있지만 가스연료와 EGR을 동시 적용 시 SFOC는 1.8[g/kW·h] 증가되는 것으로 보고된다. 16[bar] 이하의 가스연료 저압분사방식을 적용한 WIN-GD사의 X-DF 엔진은 예혼합 희박연소를 통해 연소 온도를 낮춰 NO_x를 크게 줄일 수 있다. 기존 대비 CO₂ 25%, NO_x 85%를 줄일 수 있어 부가적인 장치 없이 Tier III를 만족할 수 있는 것으로 보고된다[6][7]. EGR과 SCR의 경우 NO_x는 80% 이상을 저감할 수 있어 상당한 효과를 보이고 있다. 그러나 열효율은 감소하는 것으로 보고되고 있다[8][9].

배기가스 배출물에 대한 규제가 점차 강화됨에 따라 이를 만족하기 위해 앞서 소개한 여러 가지 기술들이 적용되고 있지만, 부가적인 장치를 사용해야 하며, 이러한 장치를 사용하지 않고 NO_x 배출 감소와 출력 증가의 효과를 동시에 얻을 수 있는 밀러사이클의 적용에 관한 많은 연구들이 보고되고 있다[10]. 밀러사이클은 4행정기관에서 흡기밸브를 이용하여 BDC이전에 밸브를 닫는 early Miller와 BDC 이후에 밸브를 닫는 late Miller로 구분하여 적용하고 있다. 밀러사이클은 밸브의 여단을 시기를 조정하여 압축비를 줄임으로서 압축온도를 감소시켜 최고연소온도를 낮출 수 있다. 낮은 연소온도는 NO_x의 배출을 저감시킨다. 밀러사이클의 디젤기관의 적용은 주로 4행정기관을 대상으로 한 연구들이며 선박용 저속 2행정기관에 대한 밀러사이클 적용에 관한 연구는 많이 보이지 않는다[11]-[13]. 2행정기관의 밀러사이클은 유니플로소기 방식을 채택하는 배기밸브를 가진 기관에서 배기밸브의 닫힘 시기를 지연시킴으로서 적용될 수 있다.

필자들은 4행정기관의 배기배출물 저감을 위해 적용되는 밀러사이클을 저속 2행정 기관에 적용하여 출력과 NO_x의 동시 개선이 가능하다는 연구 결과를 보고하였다[13].

본 연구에서는 성능예측프로그램을 이용하여 선박용 저속 2행정 기관에 밀러사이클을 적용하고 그 효과의 향상방안에 대한 연구 결과를 보고하고자 한다.

2. 선박용 2행정기관의 밀러사이클 성능 인자

2.1 과급기(T/C) 효율

T/C의 효율은 연소가스가 팽창하여 피스톤을 이동시키기 위해 사용되고 남은 배기가스의 에너지를 이용하여 터빈의 동력을 생산하고 그 동력이 압축기로 전달되면서 얼마나 많은 양의 공기를 압축할 수 있는가에 의해 결정된다. 2행정 기관의 밀러사이클은 배기밸브의 닫힘 시기를 지

연시켜 유효압축비를 감소시킴으로써 연소온도를 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 감소된 유효압축비를 보상하기 위해선 초과급이 필요하며 여기에는 필연적으로 고효율의 T/C를 적용하여야 한다. 고효율 T/C와 함께 밀러사이클의 적용으로 NO_x의 감소와 Pmi의 증가효과를 얻을 수 있다[13].

2.2 소기냉각

연소온도가 200[K] 낮아지면 NO_x는 1/10로 감소한다[14]. 밀러사이클을 통해 유효압축비를 감소시켜 연소온도를 낮출 수 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 냉각을 통해 소기온도(T_{scav})가 낮아지면 연소최고온도(T_{max})를 낮출 수 있다. 실린더에 공급되는 공기의 질량은 식 (2)와 같이 소기압력이 높거나 실린더의 행정체적이 큰 경우 그리고 소기 온도가 낮을 경우에 증가한다. 사이클의 압축시작온도가 15[K] 감소하면 기관의 열효율은 1% 증가하며, 대략 1[g/kW·h]의 NO_x가 감소한다[15]. 또한, 문헌에 의하면 소기의 냉각을 통해 약 14%까지 NO_x의 질감이 가능하다고 보고되고 있다[9].

$$T_{max} = T_{scav} \cdot \beta \cdot \varepsilon_c^{(\kappa-1)} \quad (1)$$

$$G_{air} = \frac{P_{scav} \cdot V}{RT_{scav}} \quad (2)$$

여기서, β 는 차단비, ε_c 는 압축비를 의미한다.

2.3 소기과정

2행정 기관의 소기과정은 가스교환 과정 시 소기가 실린더로 유입되면서 배기가스를 밀어내는 과정이다. 소기과정에서는 연소 후 배기가스를 제거하고 신선한 공기를 충전하는 과정이 동시에 일어나며, 배기와 소기 매니폴드의 압력차에 의해 소기효율이 좌우된다[16].

과급효율에 따라 실린더의 소기과정에 영향을 미치며, 실린더내로 공급되는 소기가 부족하면 잔류가스량을 증가시키게 되어 소기효율이 감소된다. 실린더내에 잔류하는 고온가스의 높은 비열 때문에 압축일이 증가하게 된다. 이것은 실린더의 열부하의 증가와 열효율 감소의 원인이 된다[17][18].

Figure 1은 2행정기관의 소기포트에 슬라이딩 기구를 채택하여 소기포트의 유효높이를 가변할 수 있는 개념의 개략도이다. 현재 2행정 디젤기관에 사용되는 소기포트는 포트의 여단히는 시기가 고정되어 있지만, 슬라이딩 기구를 그림과 같이 적용하면 밸브의 위치에 의해 소기포트의 유효높이를 변경시킬 수 있다. 슬라이딩 기구는 선박용 저속 2행정기관의 VIT기구와 같이 부하에 따라 높이를 가변하는 개념이다. 따라서, 빠른 스피드로 움직이지 않기 때문에 기계적인 마모가 크지 않으며, 실린더 압력의 저압부인 BDC 근처에서 움직이기 때문에 실린더 압력이 낮아 기밀문제가 충분히 해결될 수 있다. 그림과 같이 간단한 기어장치를 통

해서 간단하게 슬라이딩 기구를 구현할 수 있다. 슬라이딩 기구의 위치에 의해 포트의 높이가 가변되면 소기과정이 길어지면 실린더내의 신선한 공기의 충전이 개선되어 소기 효율을 높일 수 있다.

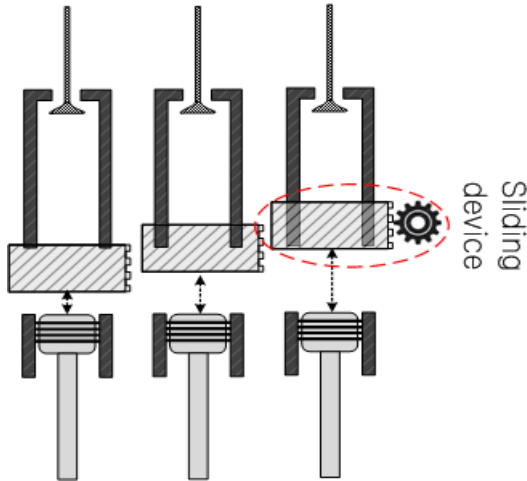


Figure 1: Schematic concept of scavenge air port with sliding device for 2-stroke cylinder liner

3. 시뮬레이션 결과의 고찰

Table 1은 연구 대상이 된 기관의 제원을 보여주고 있다. 대상 기관은 H대학의 실습선의 주기관으로 소기포트와 배기밸브를 가지는 유니플로우 소기방식의 저속2행정 기관이다. 대상기관은 유효압축비가 14.4이며 고정피치추진기를 사용한다. 대상기관의 시뮬레이션에 사용된 연료의 제원은 디젤연료 화합물의 평균조성비인 $C_{14.4}H_{24.9}$ 를 사용하였다.

Table 1: Specification of model engine

Item	Specification
Engine type	6L42MC/ME
Number of cylinders	6
Cylinder bore	420 [mm]
Piston stroke	1,380 [mm]
Connection rod length	1,638 [mm]
Compression ratio	14.4
Max. continuous output	8,123 BHP / 176 [rpm]
Normal continuous output	6,908 BHP / 167 [rpm]
Valve timing for open & close of Exh. valve	Opening angle : 108° [deg. CA] Closing angle : 261° [deg. CA]
Port timing for open & close of scavenge port	Opening angle : 137° [deg. CA] Closing angle : 223° [deg. CA]
Propeller type	Fixed pitch propeller
Fuel type	MDO ($C_{14.4}H_{24.9}$)

본 연구에서는 성능예측프로그램을 통해 밀러사이클 효과의 향상인자에 관하여 분석 고찰하였다.

본 연구에 사용된 성능예측프로그램에 관하여는 필자들의 연구논문[19][20]에서 이미 보고되었다.

3.1 T/C 효율과 소기냉각의 효과

본 절에서는 Table 2와 같이 T/C 효율과 소기온도에 따른 밀러사이클의 효과에 대해 고찰한다. Case 1과 Case 2는 T/C 효율이 65%로 같고 소기온도가 다른 경우이다. Case 1은 냉각기의 온도효율에 따라 소기온도가 변화하는 조건의 경우이고, Case 2는 소기온도가 298[K]으로 일정한 경우이다. 또한, Case 3과 Case 4는 T/C 효율이 75%로 같고, 소기온도가 다른 경우이다. Case 3은 냉각기의 온도효율에 따라 소기온도가 변화하는 조건이고 Case 4는 소기온도가 298[K]으로 일정한 경우이다. 소기온도를 298[K]으로 한 것은 IMO에서는 NOx technical Code[21]를 통해 NOx 측정의 검사 조건을 해수온도 25[°C]로 규정하고 있기 때문이다.

Table 2: Various cases for simulation to apply Miller cycle

	T/C efficiency	Scav. air temp. (MA00 ~ MA58)
Case 1	65%	Variation(311~321[K])
Case 2		Constant (298[K])
Case 3	75%	Variation(311~322[K])
Case 4		Constant (298[K])

Figure 2과 Figure 3는 Table 2에서 보여진 각 Case들의 소기유량과 NO, SFOC의 결과값을 보여주고 있다. 여기서 MA00은 밀러각도(Miller angle)를 의미하며 배기밸브가 닫히는 크랭크 각도와 소기포트가 닫히는 크랭크 각도의 차로 정의하였다[13]. 즉, MA00은 디젤사이클을 의미하며 MA58은 디젤사이클에서 배기밸브의 닫힘시기(θ_{EVC})가 소기포트가 닫히는 시기(θ_{SPC})보다 58[deg.CA] 지연되어 있음을 의미한다(Figure 8 참조).

Figure 2에서 소기의 유량은 같은 밀러각도에서 소기온도가 낮을수록 T/C 효율이 높을수록 증가함을 알 수 있다. 그리고 모든 Case에서 밀러각도가 커질수록 소기유량이 증가하다 감소하고 있다. 소기유량이 최대가 되는 밀러각도는 T/C효율이 증가할수록 커지고 있다.

Figure 3에서 Case 1과 Case 2를 비교하면 T/C 효율이 동일한 조건에서 소기온도가 298[K]으로 낮을 때 즉, Case 2의 경우가 밀러효과가 더 큰 것을 알 수 있다. Case 2와 Case 4의 비교는 소기온도를 동일하게 하였을 때 T/C효율의 증가에 따라 밀러의 효과가 크게 향상될 수 있다는 것을 보여준다. 즉, NO와 SFOC가 동시에 감소하는 밀러효과는 소기의 냉각과 T/C효율에 의해 더욱 향상될 수 있음을 보여준다.

Figure 3에서 MA00은 디젤사이클이고 밀러각도가 클수록 배기밸브의 닫힘 시기(θ_{EVC})가 지연된다. 모든 케이스에

서 디젤사이클인 MA00로부터 밀러각도가 커질수록 NO와 SFOC가 감소하다 일정 밀러각도에서 다시 증가하는 것을 알 수 있다. T/C 효율이 65%인 Case 1과 2에서는 MA29에서 SFOC가 증가하고 MA38에서 NO가 증가함을 보인다. T/C효율 75%인 Case 3과 4는 MA38에서 SFOC가 증가하고 MA49까지 NO는 약간 감소하다 유지가 됨을 알 수 있다. 그림에서 밀러효과가 최대로 나타나는 밀러각도가 존재한다는 것을 알 수 있다. 또한, Figure 2의 검토를 통해 최적의 밀러각도는 소기유량이 가장 많을 때이고 이는 T/C효율에 따라 변화하는 것을 알 수 있다.

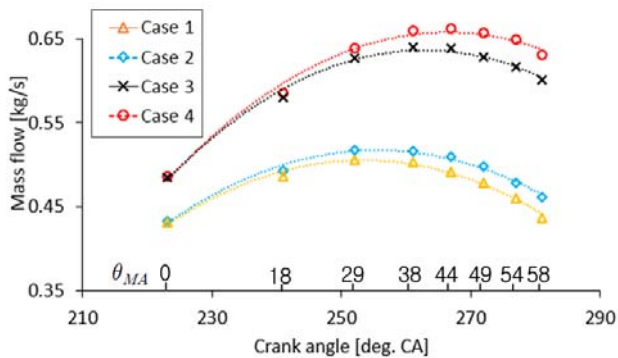


Figure 2: Mass flow according to scav. air temp. and T/C efficiency at constant speed 150rpm

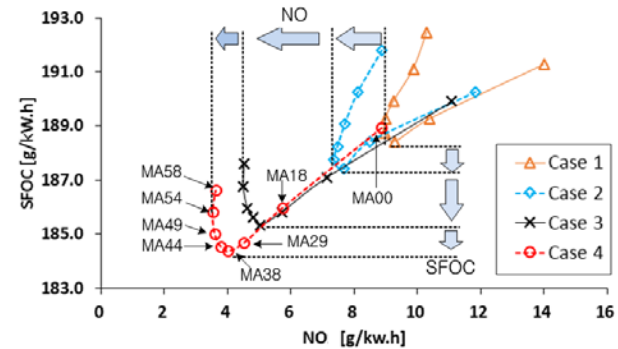


Figure 3: The simulation results of two parameters according to scav. air temp. and T/C efficiency at constant speed 150 rpm

3.2 가변 소기포트의 적용효과

Figure 4는 슬라이딩 기구를 이용하였을 때 소기 포트의 높이와 포트의 개폐시기(θ_{SPO} , θ_{SPC})를 나타내고 있다. 또한, 배기밸브의 양정(lift)과 개폐시기(θ_{EVO} , θ_{EVC})를 함께 나타내고 있다. 2행정기관의 소기는 포트가 피스톤의 운동에 의해 개폐가 이루어지기 때문에 포트의 열리고 닫히는 시기는 대칭으로 나타난다. 포트의 높이가 높아질수록 포트의 SPO시기는 빨라지고 SPC시기는 늦어진다. 대상엔진의 포트높이(Reference)로 부터 최대 $\pm 50\%$ 까지 포트높이를 증감시켜 얻을 수 있는 결과에 대하여 고찰하였다.

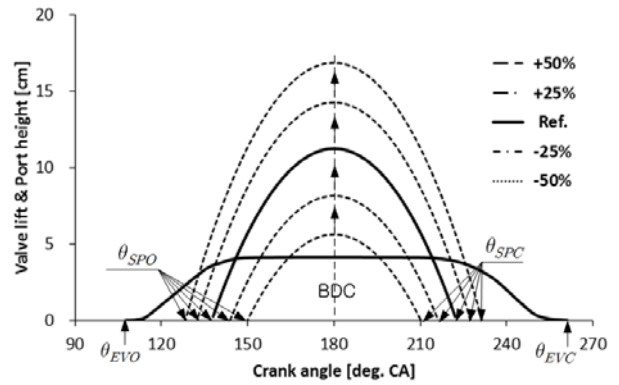


Figure 4: Various port height by sliding device position

Figure 5는 동일한 소기압력과 연소기간이 동일한 조건에서 소기포트 높이의 증감에 따라 한 사이클 동안 포트를 통과하는 공기의 유량 변화와 그 때의 T/C 효율을 보여주고 있다. 여기서 T/C 효율의 계산결과는 각 포트 높이에서 시뮬레이션 결과를 달성하기 위해 요구되는 값을 의미한다. 포트가 높아질수록 동일한 소기압력에서 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 포트높이의 증가는 소기 기간의 증가로 이어져 소기와 배기가 혼합하는 기간이 길어진다. 이는 배기가스 온도를 낮추어 터빈 동력의 감소 원인이 된다. 따라서, 소기 압력을 유지하기 위해서 고효율의 T/C가 필요하다. 종합하면 공기유량의 증가는 연소 사이클의 공기량을 많게 하여 연소실 압력은 증가된다. 그러나 소기기간의 증가로 인해 압축 시작 시 압축온도의 감소로 연소온도는 낮아지게 된다. 따라서, 밀러효과의 향상을 꾀할 수 있다.

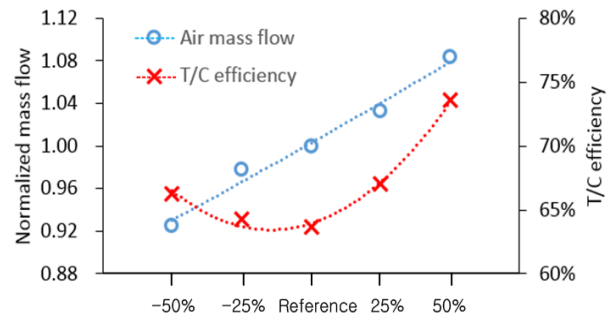


Figure 5: Normalized mass flow of scav. air and required T/C efficiency according to various port height at constant speed 150rpm

Figure 6은 대상기관의 여러 부하에서 포트의 높이를 슬라이딩 기구에 의해 가변시켜 얻은 NO와 SFOC의 시뮬레이션 결과이다. 포트의 높이가 높아질수록 NO와 SFOC가 동시에 감소한다. 100% 부하에서 포트 높이가 증가할수록 NO와 SFOC의 감소가 가장 큰 것을 알 수 있다. -50% 포트 대비 +50% 포트높이에서 SFOC는 약 7[g/kW·h], NO는 약 9[g/kW·h]이 감소한다. 단, 이는 Figure 5에서 보이는 바와 같이 과급기 효율이 74%인 경우의 결과이다.

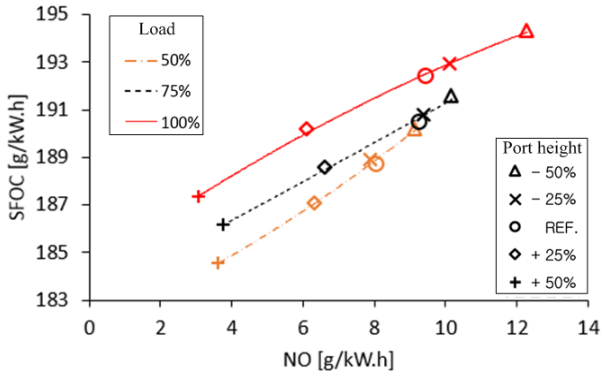


Figure 6: Effect of port height according to various engine load

Figure 7은 Figure 6의 결과에 따라 요구되는 T/C 효율을 보여주고 있다. 포트의 유효높이가 높아질수록 T/C 효율이 증가하여야 한다. 또한, 각 부하에서 포트의 높이가 REF.보다 +50% 증가하였을 때 요구되는 T/C 효율이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 Figure 6에서 알 수 있듯이 각 부하에서 포트의 유효 높이가 +50%일 때 SFOC와 NO의 최저치를 나타내며 이때 고효율의 T/C가 요구되는 것을 의미한다. 이러한 효과를 얻기 위해서 T/C의 효율은 약 10% 개선되어야 한다. 고과급 고효율을 달성하기 위해 2단과급에 대한 방법이 연구되고 있다[22]. 1단 과급의 효율이 최대 65%에서 2단 과급 적용 시 최대 75%까지 달성 가능한 것으로 보고되고 있다. 따라서, 소기 포트에 의한 SFOC와 NO의 감소 효과 향상을 위해 2단 과급의 적용 검토가 필요한 것으로 판단된다.

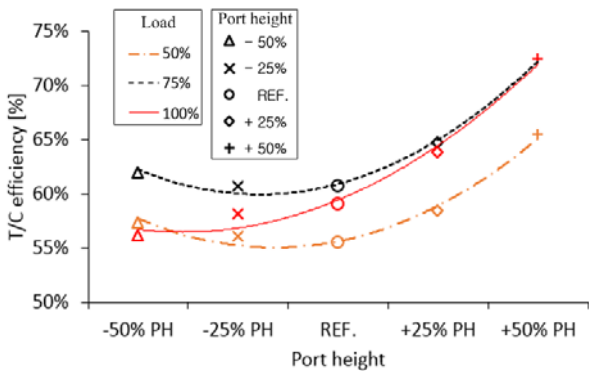


Figure 7: Required T/C efficiency for various port heights at each engine load

3.3. 가변소기포트에 의한 밀러사이클 효과의 향상

본 절에서는 슬라이딩 기구를 통해 소기포트의 유효높이를 변화시키고 동시에 밀러사이클을 적용하여 도출된 결과에 대하여 고찰한다. Figure 8은 슬라이딩 기구의 위치에 따른 포트의 여닫히는 시기와 높이 그리고 밸브의 닫힘 시기와 밸브 행정을 함께 표시하고 있다. 3.2절에서 포트에 의한 소기효율 개선의 효과는 포트의 높이가 증가하였을 때

나타나기 때문에 대상엔진의 포트 높이보다 10%, 25%, 50% 증가시켰을 때 각각 밀러사이클을 동시에 적용하여 얻어진 SFOC와 NO의 결과값을 고찰한다.

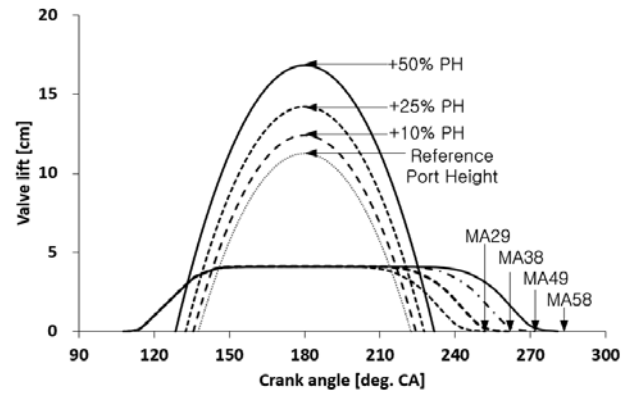


Figure 8: Various port height & valve closing

Figure 9와 Figure 10은 T/C 효율이 75%를 달성할 수 있다는 가정으로 슬라이딩 기구에 의한 포트높이 변화와 밀러사이클을 동시에 적용하여 얻은 SFOC와 NO에 대한 결과 그래프이다. 대상기관에서 밀러사이클만 적용한 경우가 A이며, 여기에 밀러효과를 향상시키기 위하여 포트의 높이를 +10%, +25%, +50%로 변경하였다.

Figure 9에서 모든 경우에 밀러각도가 증가함에 따라 SFOC가 감소하다 밀러각도 MA38 이후 증가함을 알 수 있다. 밀러사이클만 적용한 A보다 밀러사이클과 가변포트를 동시에 적용한 B와 C의 경우에 SFOC는 전체 밀러각도에서 낮게 나타난다. 밀러사이클과 +50% 포트 높이를 적용한 D의 경우 SFOC는 밀러각도가 증가할수록 가변포트를 적용하지 않은 A보다 높아진다.

Figure 10에서 모든 경우에 밀러각도가 증가함에 따라 NO는 감소하고 있다. 밀러각도가 낮을 때 가변포트를 적용한 B, C, D의 경우 밀러사이클만 적용한 A 경우보다 NO감소가 크다. 하지만, 밀러각도가 증가할수록 NO의 감소는 A 경우와 비슷하다. 하지만, +50% 포트 높이가 적용된 D 경우 NO의 발생은 A보다 높은 것을 알 수 있다.

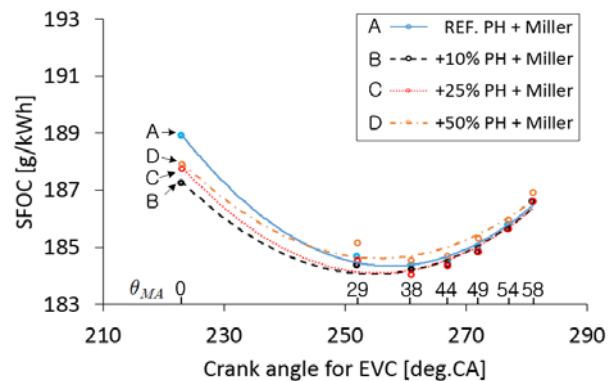


Figure 9: The results of SFOC to apply Miller cycle with various port height at constant speed 150 rpm

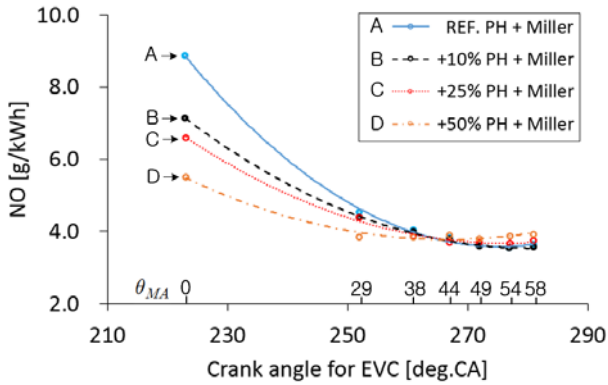


Figure 10: The results of NO to apply Miller cycle with various port height at constant speed 150rpm

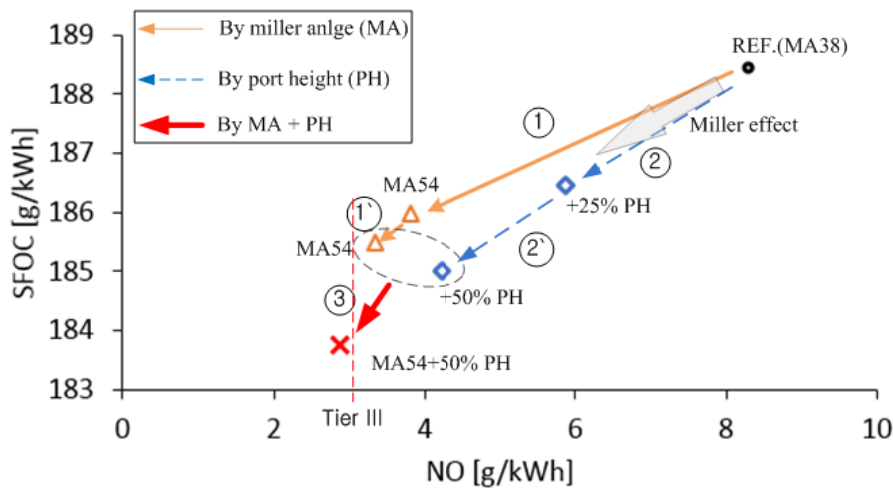
Figure 9와 Figure 10의 결과를 종합하면, 밀러사이클에 가변포트를 적용하면 밀러효과에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만, 포트의 높이가 너무 높으면 SFOC는 도리어 악화되는 경향을 보이고 NO는 포트 높이가 증가할수록 악화되지 않지만 그 효과는 줄어든다. 따라서, 가변포트를 이용하면 밀러효과를 극대화할 수 있는 것으로 판단된다.

3.4 선박용 2행정기관의 밀러사이클 효과 강화

이상의 검토결과로부터 선박용 2행정기관의 NO와 SFOC 감소의 요구를 동시에 만족시킬 수 있는 가능성이 확인되었다. 이에 관계하는 인자는 T/C효율, 소기온도, θ_{EVC} 및 θ_{SPO} 이다. 이들 인자를 이용하여 밀러사이클의 효과를 강화할 수 있는 방안에 대해 고찰하였다.

Figure 11은 밀러사이클의 효과를 강화하기 위해 관계하는 인자들을 이용하여 밀러효과를 향상시킨 과정을 보여주고 있다. 그림에서 주황색 실선(Δ)의 흐름은 REF.에서 밀러사이클만 적용하여 밀러효과를 향상시킨 경우이다. 파란색 점선(\diamond)의 흐름은 REF.에서 가변포트를 적용하여 밀러효과를 향상시킨 경우이다. 그림에서 REF.는 MA38이며 T/C 효율은 약 64%이다. ①의 과정은 REF.에서 밀러각도를 더 크게 하여 얻어진 밀러효과이며 이때 T/C 효율은 75%이다. ①의 과정은 소기온도를 298[K]까지 낮췄을 때 얻어진 밀러효과이다. ②의 과정은 REF.에서 가변포트를 적용하여 포트의 유효 높이를 높여 얻어진 결과이며 이 때, T/C효율은 65%이다. ②의 과정은 포트의 유효 높이를 50% 높여 얻어진 결과이며 T/C 효율은 75%이다. ③의 과정은 ①과 ②의 과정을 통해 얻어진 밀러효과를 강화시키기 위해 밀러사이클과 가변포트를 동시에 적용하여 얻은 결과이다. 이 때 T/C효율은 약 78%이다.

그림을 통해 밀러사이클은 T/C효율, 소기온도, θ_{EVC} 및 θ_{SPO} 에 의해 밀러효과가 향상될 수 있음을 알 수 있다. T/C 효율이 같은 조건에서 밀러사이클만 적용하여 효과를 향상시킨 경우와 가변포트만 적용하여 밀러효과를 향상시킨 경우를 비교하면 NO감소에는 밀러사이클이 유리하며, SFOC 감소에는 가변포트가 유리한 것으로 판단된다. 이를 동시에 적용시키면 밀러효과는 더 향상될 수 있다. 단, T/C효율은 더 높게 달성되어야 가능하며, 밀러각도와 가변포트 높이의 최적조건이 존재한다고 판단된다.



- ① With higher MA and T/C eff. 75%
- ①' With lower scav. Air temperature + ①
- ② With +25% PH and T/C eff. 65%
- ②' With +50% PH and T/C eff. 75%
- ③ With higher MA, PH and T/C eff. 78%

Figure 11: The results according to strengthening of miller effect at constant speed 150 rpm

4. 결 론

선박용 저속 2행정기관의 사이클 시뮬레이션을 통하여 밀러사이클의 효과를 향상시킬 수 있는 방법을 검토하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 선박용 저속 2행정기관에의 밀러효과를 향상시키기 위해 T/C효율과 소기의 냉각효과를 검토하였으며, T/C효율 75%와 소기냉각으로 NO는 약 60% 감소하였고 SFOC는 약 1.6% 감소하였다. 고효율 T/C의 적용과 소기의 냉각에 의해 밀러효과는 더욱 향상될 수 있다.
- 2) 2행정기관의 소기포트 높이를 증가시키면 소기공기량의 증가에 의해 소기효율이 개선되어 NO와 SFOC의 동시 감소를 꾀할 수 있다. 가변포트에 고효율 T/C와 소기의 냉각을 통해 NO는 약 49% 감소하였고, SFOC는 1.8% 감소하였다.
- 3) 밀러사이클과 가변 소기포트를 동시 적용하면 밀러효과를 강화시킬 수 있으며, 이에는 최적의 조건이 존재한다고 판단된다.
- 4) 밀러사이클과 가변 소기포트의 동시 적용으로 Tier III를 만족할 수 있는 것으로 판단된다. 하지만, 이는 시뮬레이션 계산을 통한 이론적인 수치이기 때문에 실험을 통해 결과를 검증할 수 있는 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

References

- [1] M. Ott, 2-Stroke DF Technology Development, Technology Review, Winterthur Gas & Diesel, Licensees Conference, 2015.
- [2] S. B. Jakobsen, "Service experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engines," International Council on Combustion Engines(CIMAC), Helsinki, Paper no. 34, 2016.
- [3] A. Doring, "The MAN SCR System - More Than Just Fulfilling IMO Tier III," International Council on Combustion Engines(CIMAC), Helsinki, Paper no. 26, 2016.
- [4] S. Kindt, "MAN B&W Two-stroke Engines Latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels," International Council on Combustion Engines(CIMAC), Helsinki, Paper no. 116, 2016.
- [5] DNV-GL, DNV GL Maritime <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/index.html>, Accessed September 4, 2017.
- [6] R. Wettstein, Wartsila low speed engines NOx-Emission-Tier III solutions, Winterthur Gas & Diesel, Athens, 2015.
- [7] M. Ott, "The 2-stroke Low-Pressure Dual-Fuel Technology: From Concept to Reality," CIMAC Congress, Helsinki, Paper no. 233, 2016.
- [8] Y. Murayama, T. Tagai, T. Mimura, and S. Goto, "Demonstration of emission control technology for IMO NOx Tier III," Journal of the International Council on Combustion Engines, Shanghai, Paper no. 127, 2013.
- [9] S. I. Raptosias, N. F. Sakellariadis, R. G. Papagiannakis, and D. T. Hountalas, "Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR," Journal of Applied Energy, vol. 157, pp. 814-823, 2015.
- [10] G. Gonca, B. Sahin, A. Parlak, V. Ayhan, I. Cesur, and S. Koksak, "Application of the Miller cycle and turbocharging into a diesel engine to improve performance and decrease NO emissions," Journal of Energy, vol. 93, pp. 795-800, 2015.
- [11] S. Zhou, R. Gao, Y. Feng, and Y. Zhu, "Evaluation of Miller cycle and fuel injection direction strategies for low NOx emission in marine two-stroke engine," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, NO. 31, PP. 20351-20360, 2017.
- [12] F. Liyan, T. Jiangping, L. Wuqiang, G. Weixin, D. Baoquo, L. Dan, and C. Lei, "Decreasing NOx of a low-speed two-stroke marine diesel engine by using in cylinder emission control measures," Journal of Energies, vol. 9, no. 304, PP. 1-16, 2016.
- [13] J. W. Lee, H. M. Beak, K. Y. Han, B. S. Rho, and J. S. Choi, "Application of Miller cycle for two-stroke marine diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 41, no. 6, pp. 523-528, 2017 (in Korean).
- [14] K. Sugiura, K. Shinada, K. Takasaki, and K. Okazaki, "Theoretical and Experimental Study on Measures to minimize the NOx-SFC trade off," International Council on Combustion Engines (CIMAC), Bergen, Paper no. 205, 2010.
- [15] E. Codan, C. Mathey, and A. Rettig "2-Stage Turbocharging-Flexibility for Engine Optimisation," International Council on Combustion Engines (CIMAC), Bergen, Paper no. 293, 2010.
- [16] L. Lily (Ed), Diesel Engine Reference Book. U.S.A: Saint Louis Publisher, 1984.
- [17] P. Schuermann, M. Hubacher, C. Christen, R. Ryser, and E. Codan, "Contribution of turbocharging solutions towards improved fuel efficiency of two-stroke

- low speed engines,” International Council on Combustion Engines(CIMAC), Shanghai, no. 209, 2013.
- [18] C. Mathey and A. Multer, “Power2-is 2-stage turbo-charging interesting for 2-stroke engines?,” International Council on Combustion Engines (CIMAC), Helsinki, no. 281, 2016.
- [19] J. S. Choi, C. H. Jeong, K. H. Cho, J. U. Lee, T. B. Ha, and H. S. Kim, “Development of simulation program of two-stroke marine diesel engines,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 1, pp. 62-68, 2010 (in Korean).
- [20] C. H. Jung, B. S. Rho, J. W. Lee, and J. S. Choi, “Predictions of the deteriorating performance for the marine diesel engines,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 1, pp. 47-52, 2013 (in Korean).
- [21] IMO, NOx Technical Code 2017, Chapter 5.
- [22] C. Trapp, A. Birgel, N. Spyra, H. Kopeck, and D. Chvaltal, “GE’s all new J920 gas engine-a smart accretion of two-stage turbocharging, ultra lean combustion concept and intelligent controls,” International Council on Combustion Engines (CIMAC), Shanghai, no. 289, 2013.