

가솔린 기관의 도시성능 예측을 위한 시뮬레이션: GT-POWER를 이용한 경우

최원정¹ · 류순필[†] · 윤건식²

(Received January 22, 2015 ; Revised April 22, 2015 ; Accepted April 30, 2015)

Simulation for the Prediction of Indicated Performances of a Gasoline Engine Using GT-POWER

Won-Jeong Choi¹ · Soon-Pil Ryu[†] · Keon-Sik Yoon²

요약: 향후 박용기관의 일정 부분은 LNG 또는 합성가스를 사용한 Gas Engine으로의 이행이 예상되고 있으며 이에 대한 선행연구로서 SI기관의 시뮬레이션에 대한 연구가 요구된다. SI기관의 도시성능 예측을 위하여 상용 성능해석 소프트웨어인 GT-POWER를 이용한 모델링을 시도하였다. 이를 위해 흡·배기 계통의 모델링은 기존 연구에서 최적화된 모델링을 적용하였다. 연소과정 모델링과 열전달과정 모델링에 있어서는 현장에서 가장 적용이 용이한 모델인 SI Wiebe 연소모델과 Modified Woschni 열전달 모델을 적용하였다. 여러 운전조건에서 크랭크 각에 따른 연소실 압력 변화와 최고압력 및 도시평균유효압력 등의 계산결과를 실험결과와 비교한 결과 양자가 잘 일치함을 확인하였다.

주제어: 스파크 점화기관, 시뮬레이션, GT-POWER, 도시성능, Wiebe Model

Abstract: As a preliminary study for the development of the gas fueled marine engine, prediction of indicated performances was carried out for a spark-ignition engine using commercial software, GT-POWER. The optimized models through a previous study were applied for the simulation of the intake and exhaust systems in a SI engine. The Spark-Ignition Wiebe model was used to calculate the burn rate in the cylinders and the modified Woschni model was used to calculate the heat transfer to the walls. The predicted performances, such as air delivery, cylinder pressures and indicated mean effective pressures under a range of operating conditions showed good agreement with the experiments.

Keywords: Spark-ignition engine, Simulation, GT-POWER, Indicated performance, Wiebe model

Acronyms

AA	Anchor Angle
BEC	Burned End Constant
BMC	Burned Midpoint Constant
BSC	Burned Start Constant
CE	Combustion Efficiency
D	Duration
E	Wiebe Exponent
IVC	Intake Valve Close
SOC	Start of Combustion
WC	Wiebe Constant

Nomenclature

x	Burnt Mass Fraction
θ	Crank Angle
c_m	Mean Piston Speed
c_u	Circumferential Velocity

p_c	Cylinder Pressure
T_c	Temperature in the Cylinder
V_D	Displacement Volume

1. 서론

선박 및 해양플랜트 구조물의 추진 또는 동력발생을 위하여 내연기관을 주로 사용하고 있으며, 그 중에서 디젤기관이 대부분을 차지하고 있다. 최근에는 연비절감과 환경규제의 차원에서 LNG 또는 합성가스를 이용한 Gas Engine을 적용하고자하는 시도가 이루어지고 있다. Gas Engine은 기존의 디젤기관과는 달리 스파크 점화(Spark Ignition) 방식을 사용한다. 주로 디젤기관을 생산해 왔던 기존 박용기관 제작사의 입장에서는 상대적으로 SI 기관 해석에 대한 기반 연구가 적어 이에 대한 연구 및 경험의 축적이 요구

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1124-9322>): Industrial-Academy Cooperation, Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 641-773, Korea, E-mail : ahruyu77@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-2993

1 Consolidated Maintenance Depot, Army, E-mail: 1652wjch@hanmail.net, Tel: 055-252-7355

2 Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University, E-mail: ice95@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3681

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.

된다. 일반적으로 기관 전 계통의 시뮬레이션은 흡·배기 계통에서의 시뮬레이션과 실린더 내의 과정에 대한 시뮬레이션으로 나누어진다. 먼저 흡·배기 과정에서의 시뮬레이션은 흡·배기 계통을 구성하고 있는 각각의 요소에서 열·유체역학적인 거동을 해석하는 것으로서 실린더 내로 유입되는 동작유체의 양과 상태량 계산을 위해 필요하다. 이 계산을 위하여 준정상 모델(Quasi-Steady Model), Filling and Emptying Model 및 압력과 유동해석 모델(Wave Action Model) 등을 사용한다[1][2]. 이 중 기관에서의 거동을 가장 잘 나타내는 압력과 유동해석 모델에서는 흡·배기관 내에서의 유동을 벽면과의 마찰, 단면적의 변화, 열전달 및 엔트로피의 변화를 갖는 1차원 비정상 압축성유동으로 가정하고 관내의 유동을 해석하기 위하여 연속방정식, 운동방정식, 에너지 방정식 등을 사용한다. 이 방정식들에 특성곡선법(Method of Characteristics)과 유한차분법(Finite Difference Method), 유한체적법(Finite Volume Method) 등을 적용하여 수치적인 해를 구한다[1]-[3]. 특히 최근에는 유한체적법을 이용하여 안정한 해를 구해주는 상용 소프트웨어를 많이 사용하고 있으며, 대표적인 것이 WAVE, BOOST 및 GT-POWER 등이다. 본 연구에서는 다중 연료분사방식의 가솔린기관을 대상으로 각 운전조건에서 기관 각부에서 일어나는 열·유체역학적 거동을 상용 성능해석 프로그램인 GT-POWER를 이용하여 계산하고 궁극적으로는 여러 운전조건에서 도시성능을 예측하여 이를 실제의 결과와 비교함으로써 4행정 사이클 가솔린기관의 각 요소를 모델링하는 기법을 정립하고자 하였다. 이를 통해 궁극적으로 Gas Engine의 최적의 설계사양을 도출하는 기술적 토대를 구축하고자 하는데 이 연구의 목적이 있다.

2. 이론 해석

흡·배기 계통에서의 시뮬레이션에 대한 상세한 이론적 내용은 저자들의 이전 논문[4]에서 설명하였기에 여기서는 실린더 내의 과정에 대한 시뮬레이션, 그 중에서도 연소과정 모델링과 열전달과정의 모델링에 대하여 설명한다.

2.1 연소과정의 모델링

GT-POWER에서 SI기관을 해석하기 위하여 제공하는 연소과정 모델링은 Spark-Ignition Wiebe Model, Spark-Ignition Turbulent Flame Model 및 Multi-Wiebe Model 등이 있다. 본 연구에서는 대상 기관의 연소특성을 시뮬레이션 하는데 있어서 상수를 가장 적게 포함하고 있어 현장에서 가장 사용하기에 용이한 Spark-Ignition Wiebe Model을 사용하였다. 이 모델에 대해서 간략히 살펴본다.

이 연소 모델은 Wiebe 함수를 사용하여 SI기관에서의 연소를 나타낸다. 이 모델에서 연소질량분(Burnt Mass Fraction)은 다음과 같이 표시된다[4][5].

$$x(\theta) = (CE) \left[1 - e^{-(WC)(\theta - SOC)^{(E+1)}} \right] \quad (1)$$

여기서 WC와 SOC는 다음 식과 같이 표시된다.

$$WC = \left[\frac{D}{BEC^{1/(E+1)} - BSC^{1/(E+1)}} \right]^{-(E+1)} \quad (2)$$

$$SOC = AA - \frac{(D)(BMC)^{1/(E+1)}}{BEC^{1/(E+1)} - BSC^{1/(E+1)}} \quad (3)$$

2.2 열전달과정의 모델링

실린더 내에서의 열전달을 계산하기 위하여 GT-POWER에서 제공되는 여러 열전달 모델 중 Modified Woschni Model [6]을 사용하였다.

이 모델은 일반적으로 잘 알려진 Woschni Model에서 흡기밸브와 배기밸브를 통한 가스교환과정 동안의 열전달 계산을 개선한 모델이며, 열전달 계수는 고압 사이클 부분과 가스교환과정에 있어 서로 다른 계수를 사용한다. 고압 사이클 부분의 열전달 계수 α_w 는 아래의 식으로 표현된다.

$$\alpha_w = 130D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} \left(C_1 \cdot c_m + C_2 \cdot \frac{V_D \cdot T_{c,IVC}}{p_{c,IVC} \cdot V_{c,IVC}} \cdot (p_c - p_{c,0}) \right)^{0.8} \quad (4)$$

여기서 $C_2 = 0.00324$ (직접분사식)

$$C_1 = 2.28 + 0.308 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (5)$$

$$C_3 = 6.18 + 0.417 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (6)$$

그리고 가스교환과정에 있어서의 열전달 계수는 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_w = 130D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} (C_3 \cdot c_m)^{0.8} \quad (7)$$

3. 기관 모델링

Figure 1은 본 연구에서 해석의 대상이 되는 소형 다중 연료분사식 가솔린기관의 구성을 나타내고 있다. 이 기관은 3개의 실린더를 가지고 있는 소형 가솔린기관으로서 서지탱크, 스로틀 바디, 플레넘 체임버, 흡기 러너, 인젝터, 배기 매니폴드, 촉매 변환기 및 소음기로 구성되어 있다.

Kim et al. [4]은 SI 기관의 흡·배기 계통을 효과적으로 모델링하기 위해 플레넘 체임버, 소음기 및 매니폴드 등에 대해 적용 가능한 여러 가지 모델링들을 시험한 바 있다. 본 연구에서는 흡·배기 모델링에 있어서 Kim et al. [4]의 연구결과를 참조하였다.

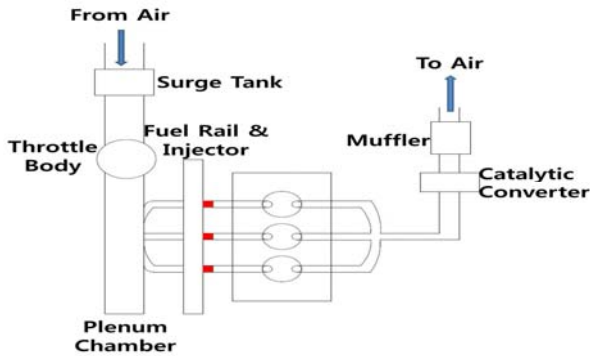


Figure 1: Schematic Diagram of Test Engine.

3.1 플레넘 체임버 및 흡기 러너의 모델링

플레넘 체임버와 흡기 러너를 모델링 하는 방법에는 플레넘 체임버와 각각의 흡기 러너가 연결되는 지점을 “Y”자 모양의 유동관으로 하고 이들이 직관 파이프로서 연결되는 것으로 간주하여 모델링하는 방법과 플레넘 체임버와 각각의 흡기 러너가 연결되는 지점을 하나의 파이프가 다른 두 개의 파이프에 직각으로 연결되는 “T”자 모양의 유동관과 직관 파이프를 연결하여 조합하여 모델링하는 방법, 마지막으로 위의 두 모델링을 조합하여 모델링하는 방법이 있다. 본 연구에서는 Kim 등[4]의 연구에서 가장 결과가 좋았던 “Y”자 모양의 유동관과 직관 파이프를 연결하여 모델링한 방법을 적용하였다.

3.2 소음기 모델링

소음기는 일정한 체적을 가진 통 안에 배기관과 칸막이(Baffle)가 복잡하게 배치되어 있으며, 소음기 내로 확장되어 있는 배기관은 배출된 배기가스가 복잡한 통로를 빠져 나오면서 소음이 흡수되는 구조로 설계되어 있다. 시뮬레이션을 위해 소음기를 모델링 하는 경우 소음기 자체를 하나의 관으로 생각하여 모델링 하는 방법과 일정한 체적을 갖는 탱크로 생각하여 모델링하는 방법이 있다. 본 연구에서는 Kim et al. [4]의 연구 결과를 따라 소음기를 하나의 관으로 취급하여 모델링하는 방법을 적용하였다.

3.3 매니폴드 모델링

배기 매니폴드는 연결관 사이의 길이에 따른 단면의 변화가 다양하게 이루어지기 때문에 시뮬레이션을 위한 모델링을 하기가 어려운 부분이다. 배기 매니폴드 모델링을 위해서는 각 관들이 접속하는 부분을 하나의 체적으로서 단순화 시키는 방법과 실제 단면 변화를 최대한 적용하여 모델링 하는 방법이 있다. 전자의 경우는 모델링이 단순하고 계산 시간이 적게 걸리는 장점이 있으며, 후자의 경우는 모델링이 복잡하고 계산 시간이 증가하나 관의 형상을 실제와 가깝게 모델링할 수 있는 장점이 있다. Kim et al. [4]의 연구에서는 후자의 경우가 더 좋은 계산결과를 보이는 것을 나타냈으며 본 연구에서는 이 방법을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 시뮬레이션의 예측의 정확도를 검토하기 위하여 동일한 기관을 대상으로 한 선행 실험 연구와 비교 검토하였다. 실험과 시뮬레이션의 비교를 위한 인자로 신기의 질량유량, 실린더 내의 순간 압력변화와 실린더 내 최고압력, 도시평균유효압력을 선정하였으며, 이 값들을 전부하(W.O.T.)와 흡기관 압력 -100mmHg 및 -200mmHg인 조건에서 기관 회전속도를 1500rpm ~ 4000rpm까지 변화하여 운전한 결과를 비교하였다.

4.1 신기의 질량유량

Figure 2 ~ 4는 전부하와 흡기관 압력 -100mmHg 및 -200mmHg 상태에서 회전속도 1500~4000rpm으로 운전하였을 경우 신기의 질량유량의 예측값을 실험값과 비교하여 도시한 것이다. 모든 조건에 대하여 신기의 질량유량은 운전조건에 따른 변화경향을 잘 예측하고 있으며, 정상적으로도 실험값과 예측값이 대부분 5%이내의 오차를 보이고 있다. 이는 실용적인 목적에서 수용이 가능한 오차 범위 내에 있는 것으로 판단한다. 이 결과는 흡·배기 계통에 적용한 각 모델링 방법이 흡·배기 계통을 구성하는 각 장치에서의 유동 현상을 적절하게 반영하고 있음을 뒷받침하는 것으로 판단된다.

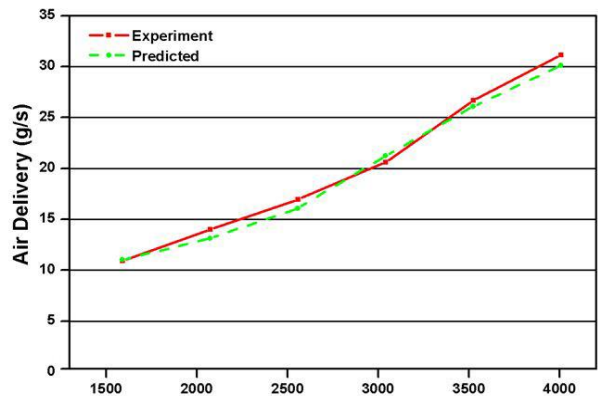


Figure 2: Air Delivery(W.O.T.)

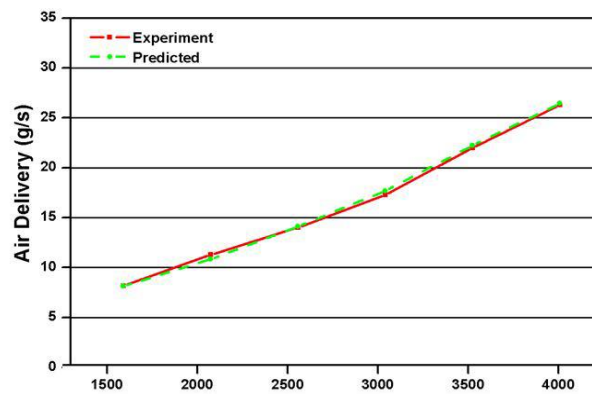


Figure 3: Air Delivery(-100mmHg)

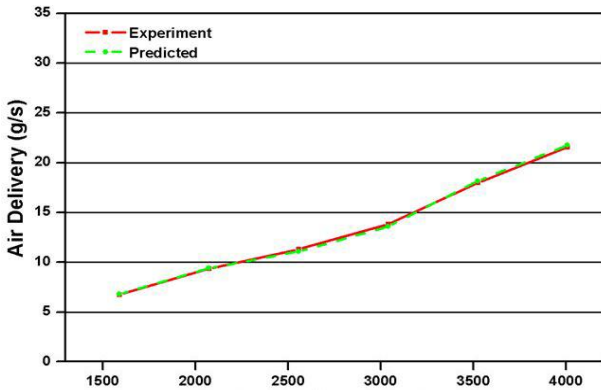


Figure 4: Air Delivery(-200mmHg)

4.2 실린더 내의 순간 압력변화

Figure 5 ~ Figure 8는 전부하와 흡기관 압력 -200mmHg 인 상태에서 기관회전속도 2000rpm과 4000rpm에서의 크랭크 각에 따른 실린더 내 압력변화를 실험값과 예측값을 비교하여 도시한 것이다. 모든 조건에 대하여 최고 압력점 이후의 팽창과정은 잘 예측되고 있다. 하지만 압축 과정에 있어서 압력의 상승이 실험값보다 조금 빠르게 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 압축과정에 있어서의 이와 같은 오차는 그림에서 보는 바와 같이 이후 과정의 계산에 큰 영향을 미치지 않는다고 있다. 압축 및 팽창과정과 함께 눈금을 확대하여 따로 도시한 흡·배기 과정에서의 압력변화도 실험에서 나타난 경향을 잘 예측하고 있다. 흡·배기 과정 중의 실린더 내 압력변화의 예측값이 실험에서 보다 다소 높은 것으로 나타나고 있으나 압력 눈금이 크게 확대되어 있음을 감안할 때 우려 할 만한 차이는 아닌 것으로 판단된다.

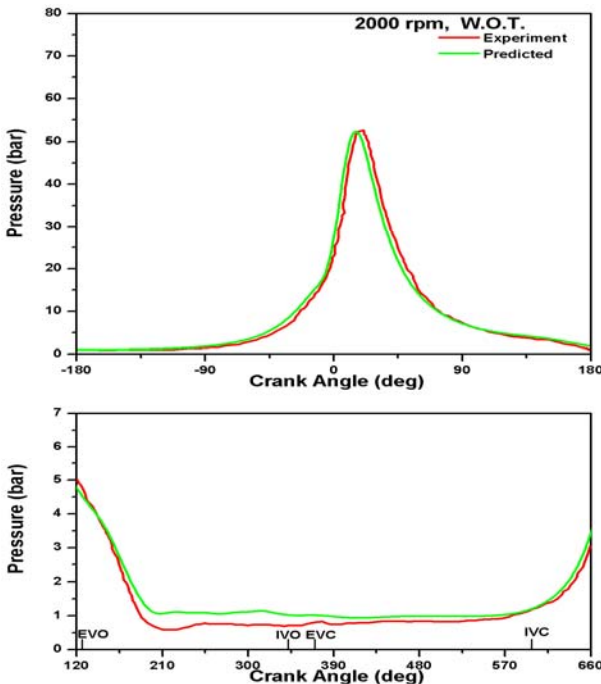


Figure 5: The Variation of Cylinder Pressure(2000rpm,W.O.T.)

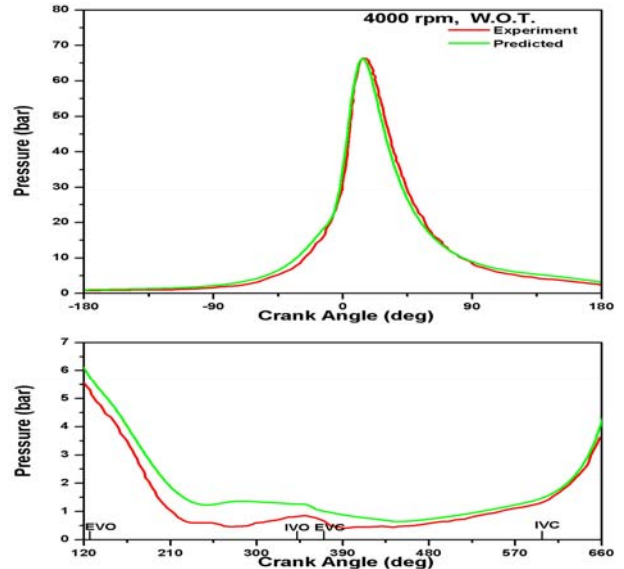


Figure 6: The Variation of Cylinder Pressure(4000rpm,W.O.T.)

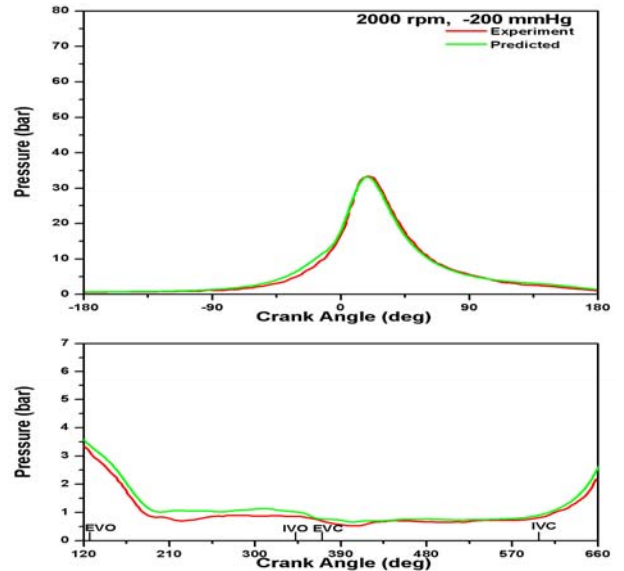


Figure 7: The Variation of Cylinder Pressure(2000rpm,-200mmHg)

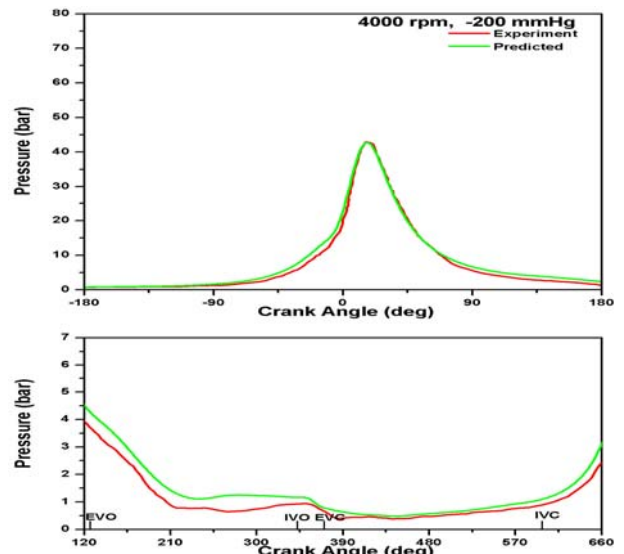


Figure 8: The Variation of Cylinder Pressure(4000rpm,-200mmHg)

4.3 실린더 내 최고압력

Figure 9 ~ Figure 11는 전부하와 흡기관 압력 -100mmHg 및 -200mmHg인 운전조건에서 회전속도를 1500~4000rpm으로 변화시켰을 경우 실린더 내 최고압력의 변화를 실험값과 예측값을 비교하여 도시한 것이다. 모든 조건에 대하여 실린더 내 최고압력을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 정량적으로는 상대오차 2%의 범위 내에서 예측하고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 Spark-Ignition Wiebe Model은 그 단순성에도 불구하고 실용적인 관점에서 적절함을 알 수 있다.

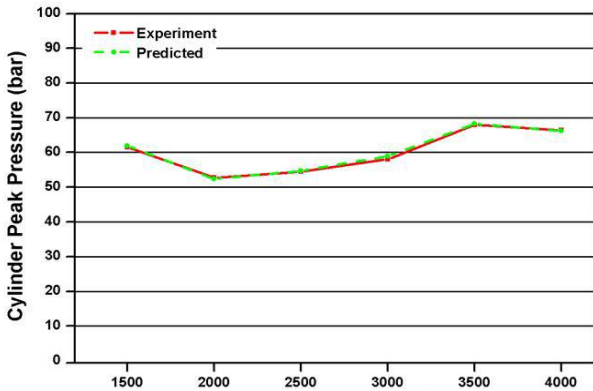


Figure 9: Cylinder Peak Pressure (W.O.T.)

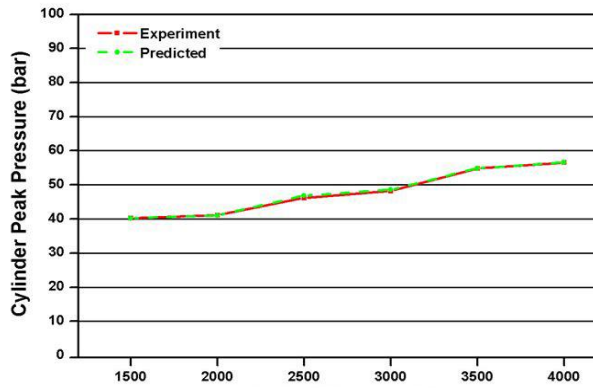


Figure 10: Cylinder Peak Pressure (-100mmHg)

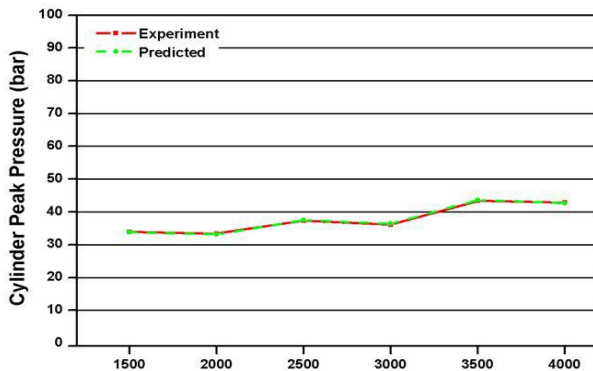


Figure 11: Cylinder Peak Pressure (-200mmHg)

4.4 도시평균유효압력

Figure 12 ~ Figure 14는 전부하와 흡기관 압력 -100mmHg 및 -200mmHg 상태에서 회전속도 1500~4000rpm으로 운전하였을 경우 도시평균유효압력의 실험값과 예측값을 비교하여 도시한 것이다. 일부 저속 운전 조건에 대하여 도시평균유효압력의 예측값이 5% 내외의 오차율을 보이는 것을 제외하면, 대부분의 운전조건에서 3% 이내의 오차로 도시평균유효압력을 예측하고 있다. 일반적으로 도시평균유효압력의 계산에 크게 영향을 미치는 요소는 연소 압력과 더불어 실린더 열전달량의 계산상의 정확도로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 Modified Woschni 모델은 대상기관의 열전달 해석에 적절한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 적용한 모델들은 기관의 출력 변화를 비교적 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

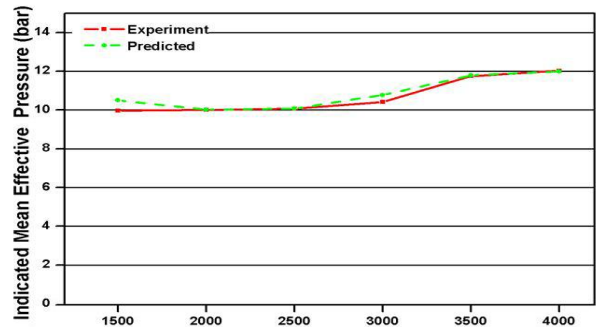


Figure 12: Indicated Mean Effective Pressure (W.O.T.)

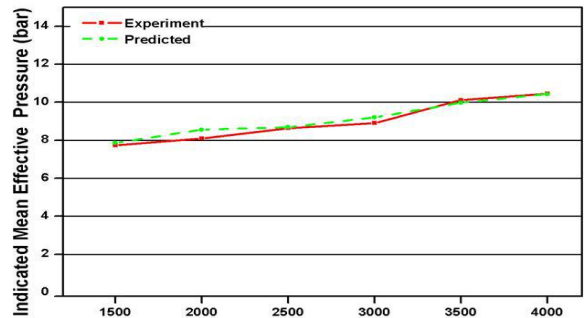


Figure 13: Indicated Mean Effective Pressure (-100mmHg)

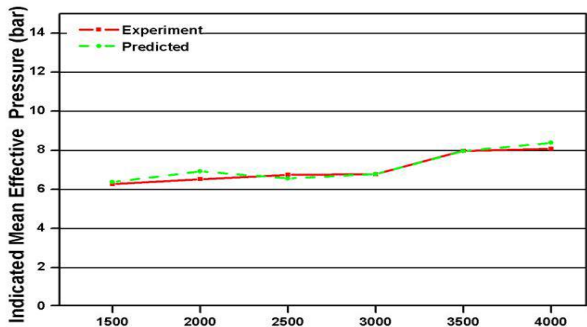


Figure 14: Indicated Mean Effective Pressure (-200mmHg)

5. 결 론

LNG 또는 합성가스를 연료로 하는 Gas Engine에 대한 선행 연구로서 SI 가솔린 기관의 시뮬레이션에 관한 연구를 수행하였다. 다중 연료 분사식 가솔린 기관을 상용 성능 해석 소프트웨어인 GT-POWER를 이용하여 시뮬레이션하기 위해 기관 각 부분의 모델링에 가장 적합한 모델을 적용하였으며 이의 실용적 가치를 판단하였다.

1. 흡·배기 계통의 모델링에 있어서 플레넘 체임버와 흡기 러너는 “Y”자 모양의 유동관과 직관 파이프를 연결한 모델링을 적용하고, 소음기는 하나의 관으로 모델링 하였으며, 매니폴드에 대해서는 실제 단면 변화를 그대로 적용하였다. 신기의 질량유량을 검토한 결과 이 모델링들은 대상 기관의 흡·배기 계통에서의 유동 현상을 적절하게 반영하고 있는 것으로 판단된다.

2. 실린더 내 연소과정을 해석하기 위하여 가장 단순하고 상수의 결정이 용이한 Spark-Ignition Wiebe 모델을 적용하였다. 크랭크 각에 따른 실린더 압력 변화 및 최고 압력의 변화 양상을 계산한 결과를 볼 때 이 모델은 실용적인 목적으로 용이하게 사용할 수 있는 모델로 판단된다.

3. 실린더 내 열전달을 계산하기 위해 Modified Woschni 모델을 적용하였다. 실린더 압력과 도시평균유효압력의 계산 결과를 볼 때 이 모델 역시 충분한 정확도를 가지고 현장에서 용이하게 적용할 수 있는 모델로 판단된다.

후 기

이 논문은 2013-2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

[1] R. S. Benson, W. J. D. Annand, and P. C. Baruah, “A simulation model including intake and exhaust system for a single cylinder 4-stroke cycle S.I. engine,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 17, no. 2, pp. 97-124, 1975.

[2] R. S. Benson, *The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engine*, Clarendon Press, vol. 1, pp. 424-457, 479-570, 1982.

[3] Gamma Technologies, *GT-POWER User's Manual version 6.2*, Gamma Technologies, pp. 24-27, 56-57, 59-60, 2006.

[4] J. S. Kim, K. S. Yoon, and S. K. Woo, “Study on the modeling of the intake and exhaust systems of an SI engine using GT-POWER,” *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 6, pp.

779-785, 2011.

[5] I. Wiebe. *Semi-empirical formula for the burn rate in fuel supply and burning in diesel engine*, Springer-Publisher, 1964 (in German).

[6] G. Woschni. “A universal applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine,” *SAE 670931*, 1967.

[7] S. K. Woo, *A Study on the Simulation of the 4-Stroke Cycle Spark Ignition Engine*, Ph. D. Dissertation, Changwon National University, Korea, 2001.