

전자제어분사 방식 소형엔진의 1차원 성능 모델 개발

염경민¹, 박성영^{2*}
¹공주대학교 기계자동차공학부
²공주대학교 공과대학 생산기술연구소

One Dimensional Simulation Model Development of the EFI Small Engine

Kyoung-Min Yeom¹ and Sung-Young Park^{2*}

¹Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

²Industrial Technology Research Institute, College of Engineering, Kongju National University

요 약 본 연구에서는 전자제어 분사방식 소형엔진의 모델을 개발하기 위하여 기존 소형엔진의 제원을 바탕으로 1차원 모델을 구성하였다. 새롭게 구성된 모델의 성능해석을 수행하고 이를 실험결과와 분석하여 모델의 타당성을 확인하였다. 1차원 성능 모델의 토크 및 출력 해석결과는 실험결과와 3%이내의 오차를 보였으며, 소형엔진의 토크 및 출력 특성을 우수하게 예측하고 있다. 소형 엔진의 성능향상을 위해 엔진의 흡입성능에 미치는 성능인자의 영향력을 분석하였다.

Abstract One dimensional simulation model of an EFI small engine has been developed based on the commercial small engine. Newly developed simulation model has been evaluated comparing with the experimental results to check the validity. Simulation result shows very good agreement having margin of error of 3 percentage compared with experimental torque and power values. Also, to improve the small engine performance, the influence of the intake valve timing and duration on the engine performance has been analyzed using the simulation model.

Key Words : Small Engine, EFI, Simulation Model, Torque

1. 서론

1980년대 초 이후로 엔진기술이 발전함에 따라 대부분의 연료공급 장치는 기화기 방식을 대신하여 전자제어 연료분사 방식을 채택하였다. 하지만 범용 소형엔진 또는 특수한 목적으로 이용되는 산업용 엔진에서는 기화기 방식이 여전히 일반적인 구성 요소로 적용되고 있다[1]. 기화기 연료공급 방식은 정밀한 연료 공급과 미립화에 한계가 있기 때문에 연비와 배기가스성분에 악영향을 끼친다. 반면 전자제어분사 방식으로 연료공급이 이루어질 경우, 운전조건에 따른 연료량의 제어가 가능해지고, 연료보상을 통한 이론공연비 운전이 가능하다. 따라서 유해 배기가스 성분 중 미연탄화수소 성분을 저감시킬 수 있

을 뿐만 아니라 열효율의 증대로 인한 연료소비효율도 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

최근 환경 및 연비 규제가 강화됨에 따라, 범용 소형엔진도 연비향상과 배기저감을 위하여 전자제어분사 방식으로의 전환이 필요하게 되었다[2-4]. 국내에서도 400cc급 전자제어분사방식의 소형엔진 개발이 이루어지고 있으나[5], 소형엔진의 특성상 구조 변경이 난해하고, 성능변수 최적화에 상당한 어려움을 겪고 있다. 이러한 개발의 어려움을 극복하고, 개발기간을 단축하기 위하여 1차원 엔진성능해석의 도입이 필요하다. 1차원 해석은 3차원 해석 대비 비교적 짧은 시간에 전체 엔진 시스템에 대한 사이클 해석이 가능하고 다양한 운전조건에 따른 결과를 비교적 정확하게 얻을 수 있다는 장점이 있다. 일반

*교신저자 : 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 10년 12월 30일

수정일 (1차 11년 03월 13일, 2차 11년 03월 23일)

게재확정일 11년 04월 07일

적으로 프로토타입 엔진을 제작하기 전에 엔진의 컨셉 개발단계에서 1차원 해석 프로그램을 활용하여 엔진성능에 영향을 주는 다양한 변수들을 가상으로 시뮬레이션함으로써 개발기간 단축, 비용 절감 및 고효율 엔진 설계를 위한 최적화를 수행할 수 있다[6,7].

본 연구의 목적은 전자제어 분사방식의 소형엔진 1차원 해석모델을 개발하고 검증하는데 있다. 소형엔진의 제원을 바탕으로 전자제어분사 방식 소형엔진의 1차원 해석모델을 구성하고, 해석된 결과를 기존에 발표된 실험결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하고자 한다. 또한 엔진의 성능 향상을 위한 성능인자를 본 연구를 통하여 개발된 해석모델에 적용하여 그 영향력을 분석하고자 한다.

2. 해석 모델

본 연구에서 적용된 엔진의 원형은 기화기 타입의 Mitsubishi GM 401 모델이다. 이 엔진을 기초로 하여 최근의 연비 및 배기저감 요구에 맞도록 전자제어연료분사 방식으로 엔진이 개조되었다[5]. 그림 1은 전자제어연료분사 방식으로 개조된 엔진을 보여주고 있으며, 엔진의 기본적인 제원은 표 1에 명시하였다.

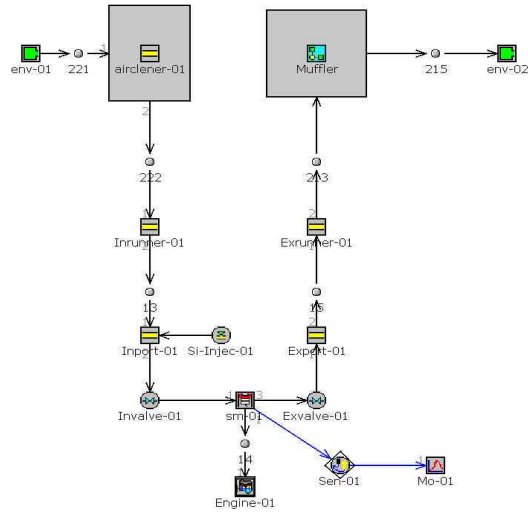


[그림 1] Mitsubishi GM 401

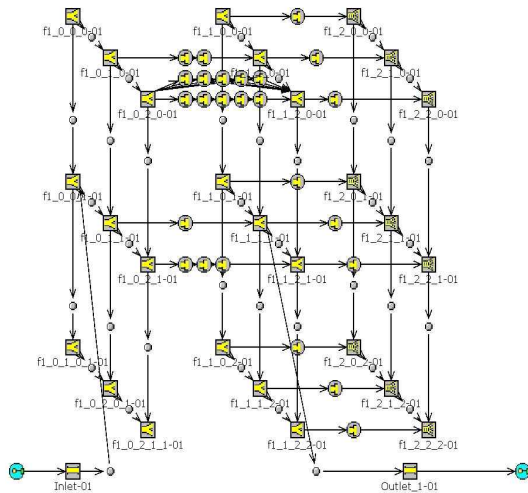
[표 1] 엔진의 기본 제원

Name	Unit	Specification
No. of cylinder	-	1
Bore×Stroke	mm×mm	89×63
Displacement	cc	391
Compression ratio	-	8:1
Maximum rpm	1/round	4000
No. of In/Ex valve	-	1/1
Dry weight	kg	35.0
Dimensions(L×W×H)	mm×mm×mm	462.5×463×466

1차원 엔진성능해석은 Gamma Technologies사의 상용 소프트웨어인 GT-Power[8]를 사용하였으며, 연속방정식, 모멘텀방정식 및 에너지방정식을 적용하여 엔진의 사이클 시뮬레이션을 수행하였다. 특히, 상기 소프트웨어는 시간에 따른 엔진연소특성을 반영할 수 있어 실제 엔진과의 연관성 확인이 용이하다.



(a) 엔진 모델



(b) 머플러 모델

[그림 2] 소형엔진의 1차원 해석 모델

그림 2(a)는 그림 1의 소형엔진을 GT-Power를 이용하여 모델링한 모습이다. 각각의 구성요소가 기능적으로 연계되어 있으며, 각 요소 내부에 각종 설계 수치와 조건들이 적용되어 있다. 주된 구성은 연소실, 흡기계, 배기계, 머플러 및 연료공급계통이다. 인젝터는 포트분사식 전자

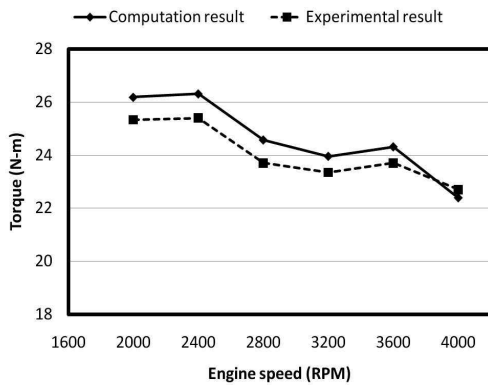
제어 인젝터가 적용되었으며, 연소모델은 Wiebe 모델을 사용하였다[8]. 그림 2(b)는 소형엔진의 머플러를 GT-Power로 구성한 모습이다. 3차원 효과를 최대한 반영하기 위하여, GT-Power에서 제공하는 GEM3D를 이용하여 3차원 모델링을 수행한 후 이를 작은 체적 요소로 나누어 1차원 모델로 변환하였다. 소형엔진의 성능해석을 위한 경계조건으로, 엔진의 부하를 전부하(Wide Open Throttle) 조건으로 설정하였으며, 연료분사시기는 BTDC(Before Top Dead Center) 10°로 설정하였다. 공연비(AFR)는 13.5:1을 적용하였다.

3. 베이스모델 해석결과

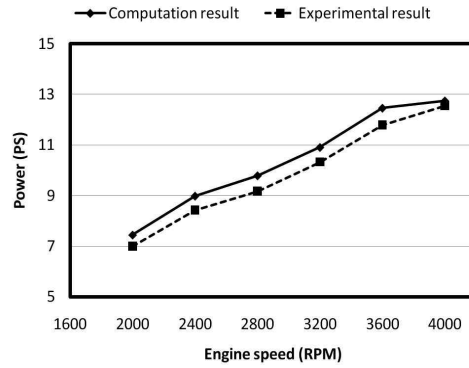
그림 3 및 4는 GT-Power로 해석을 수행하여 얻은 엔진 회전수별 토크(Torque)와 출력(Power)을 기준에 보고된 실험결과[5]와 비교하여 보여주고 있다. 최대 토크는 26.18N-m로 2400RPM에서 발생하였으며, 해석결과의 최대 출력은 12.75Ps로 4000RPM에서 발생하였다. 최대 토크와 최대출력이 발생하는 엔진회전수는 실험결과와 일치하였다. 문헌의 실험결과 대비, 토크성능 및 출력성능의 해석 오차는 각각 3% 및 1.5% 이내로 전체적인 경향성을 우수하게 반영하고 있다.

그림 5는 연료소모율(BSFC) 해석결과를 보여주고 있다. 엔진 회전수 2000RPM을 제외하면, 전반적으로 실험치 대비 평균 8% 정도 낮은 값을 예측하고 있으며, 최대 오차는 2000RPM에서 14%를 나타내고 있다.

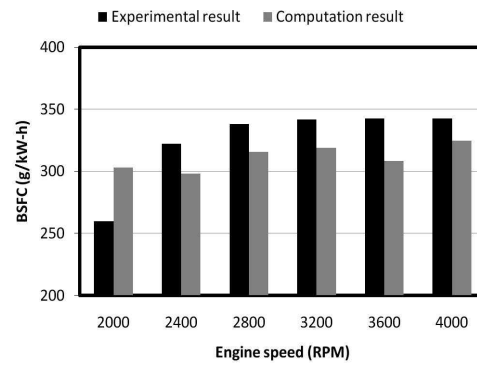
결과적으로 본 연구에서 개발된 1차원 소형엔진 해석 모델의 토크 및 출력성능 예측은 우수하나 연료소모율 예측은 아직 실험치와 상당한 차이가 있어 지속적인 개선이 필요할 것으로 판단된다.



[그림 3] 전부하 토크성능 비교



[그림 4] 전부하 출력성능 비교[5]



[그림 5] 연료소모율 비교[5]

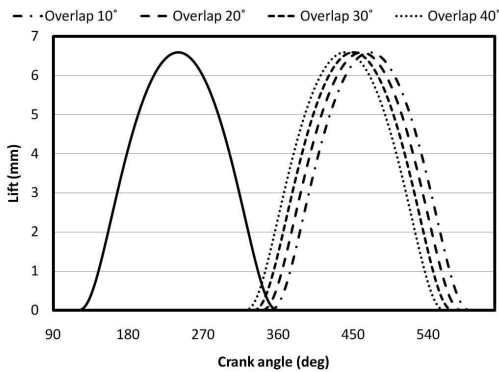
4. 성능향상을 위한 밸브 설계인자

엔진의 성능개발에서 흡배기 밸브의 밸브타이밍과 밸브열림구간은 엔진성능에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 성능인자들이다. 이들의 성능은 흡입되는 공기량 및 배기 가스량에 관계되며 엔진의 토크성능 및 출력성능에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. 하지만 이러한 성능실험을 수행하는 것은 관련 부품 제작 및 실험에 상당한 시간과 노력이 필요하다. 따라서 이러한 개발기간과 노력을 최소화하기 위하여 해석적인 접근이 개념개발단계에서 사용된다. 본 연구에서는 1차원 해석적 접근을 통하여 밸브의 설계인자가 엔진의 성능에 미치는 영향과 원인을 분석하고자 한다.

4.1 밸브오버랩의 영향

밸브타이밍의 개발에 있어서는 엔진성능에 영향이 지배적인 흡기밸브의 타이밍을 위주로 그 영향력을 해석하였다. 흡기밸브 타이밍만의 효과를 고찰하기위하여 배기

밸브 타이밍을 고정시키고 흡기밸브의 타이밍을 그림 6과 같이 네가지로 변경하면서 각각의 밸브오버랩이 엔진 성능에 미치는 영향력을 분석하였다. 일반적으로 일정 밸브오버랩이 존재해야 연소실내의 배기가스 배출이 용이하게 되지만 밸브오버랩을 과도하게 크게하면 연소실내로 유입된 신기의 흡입이 방해받아 오히려 엔진의 출력저하를 가져올 수 있다. 본 연구에서 적용된 소형엔진의 경우 흡기밸브 열림시기(IVO: Intake Valve Open)는 크랭크각 기준 350°CA이며, 배기밸브 닫힘시기(EVC: Exhaust Valve Close)는 360°CA로, 오버랩 구간은 10°CA이다. 크랭크 각을 기준으로 밸브오버랩을 20°, 30° 및 40°CA가 되도록 그림 6과 같이 흡기밸브 타이밍을 진각하였다.

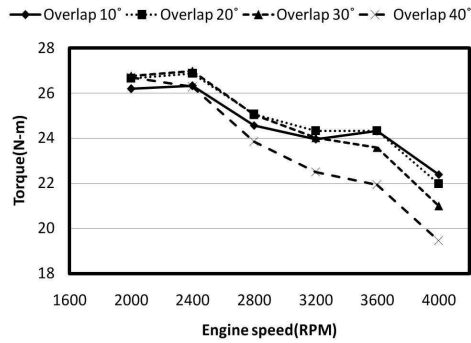


[그림 6] 흡기 및 배기밸브 타이밍 (Max. Lift = 6.6mm)

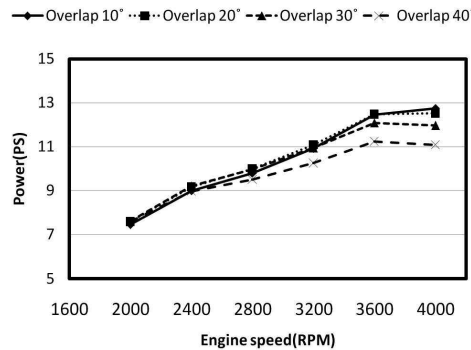
이러한 밸브타이밍과 밸브오버랩을 본 연구에서 개발된 1차원 엔진 해석모델에 적용하여 토크 및 출력을 획득하였으며, 획득된 결과는 그림 7 및 8에 각각 나타내었다. 그림 7의 토크성능에서, 밸브오버랩이 30°인 모델이 가장 높은 토크 값(27N·m)을 나타냈으며, 밸브오버랩 40°는 엔진 회전수가 증감함에 따라 성능의 저하가 급격하였다. 그림 8의 출력성능에서, 오버랩 40° 모델이 가장 열세한 출력을 보였다. 최대 출력을 가지는 경우는 밸브오버랩 10°로 최대출력은 12.8Ps이다. 오버랩 변화에 따른 연료소모율 결과를 그림 9에 나타내었다. 베이스모델 대비 평균 0.3%이내의 연료소모율 변화를 보이고 있으며, 오버랩의 변화가 연료소모율에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

밸브오버랩의 변화가 흡입유량에 미치는 영향을 분석하기 위해 4000RPM에서 흡기밸브의 크랭크각도 변화별 흡입유량을 그림 10에 나타내었다. 네가지 경우 모두에서 흡기밸브가 열리면서 연소실내의 배기가스가 흡기포

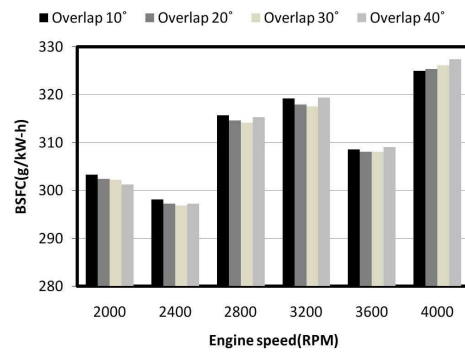
트로 일부 역류됨을 볼 수 있다. 이는 배기가스의 압력이 잔류하고 있기 때문이다. 이러한 연소실의 배기가스 잔압을 없애기 위해서는 추가적인 흡배기밸브의 타이밍 최적화가 필요하다. 전체적으로 흡입유량을 비교하면 밸브오버랩 40°는 타 경우 대비 CA 440° 부근에서 흡입되는 공기량이 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이러한 공기량 감소는 충전효율 저하를 의미하고, 엔진의 토크 및 출력성을 감소시키는 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 이러한 출력의 감소는 그림 7 및 8의 결과로도 확인될 수 있다.



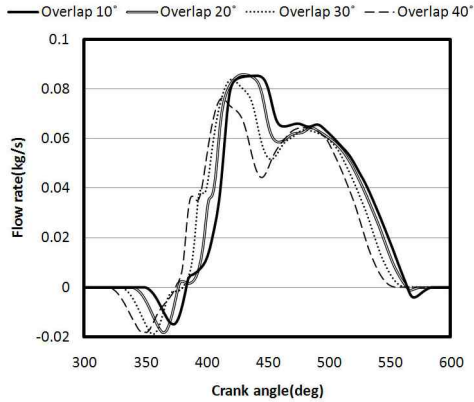
[그림 7] 엔진 회전수별 토크변화



[그림 8] 엔진 회전수별 출력변화



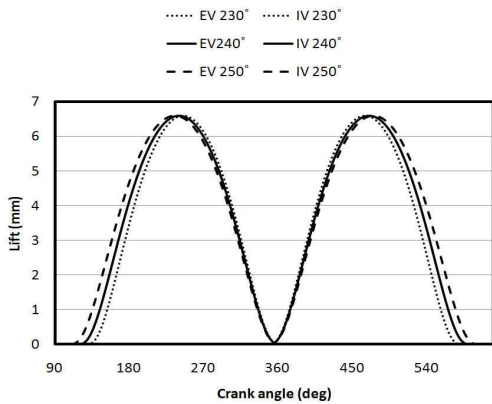
[그림 9] RPM별 각 모델의 BSFC



[그림 10] 흡기밸브의 흡입유량 (RPM=4000)

4.2 밸브 열림구간의 영향

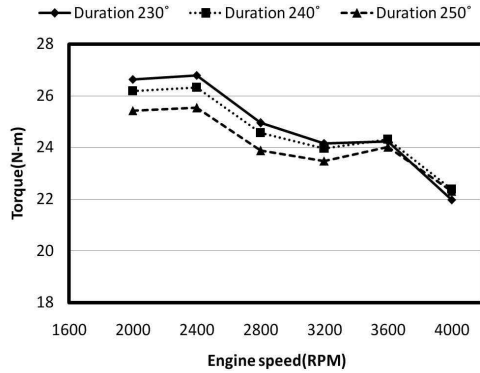
본 연구에서 개발된 1차원 해석모델의 경우 흡기밸브 및 배기밸브 열림구간은 크랭크각 기준으로 240°이다. 밸브 열림구간의 변화가 엔진의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 오버랩을 10°로 고정시키고 흡기밸브와 배기밸브의 열림구간을 그림 11과 같이 동시에 변화시켰다. 밸브리프트 높이는 6.6mm로 고정하였다.



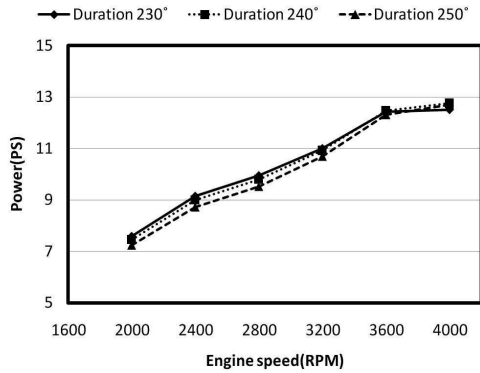
[그림 11] 밸브 열림구간 변화 (Lift=6.6mm)

밸브 열림구간을 변화시켜 해석한 토크 및 출력성능 결과를 그림 12 및 13에 나타내었다. 최대 토크는 열림구간이 230° 일 때, 26.8N·m로 2400RPM 구간에서 발생하였으며, 베이스모델 대비 2%상승하였다. 그림 13에서 최대 출력을 나타내는 모델은 밸브 열림구간 240° 모델이며 최대 출력은 12.8Ps이다. 최대 출력을 가지는 모델은 열림구간 240° 모델이나, 대부분의 구간에서 출력이 우수한 성능을 나타낸 모델은 열림구간 230° 모델임을 확인할 수 있다. 그림 14는 연료소모율 결과를 보여주고 있다. 밸브

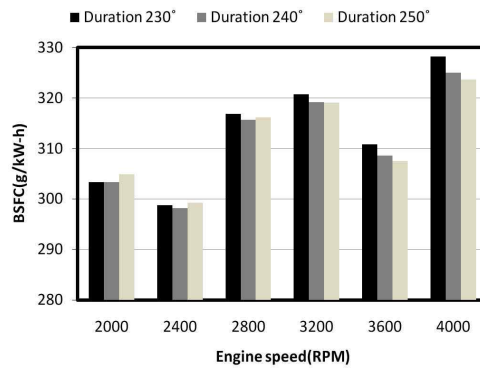
열림구간 230° 모델의 연료소모율 대비, 240° 모델의 연료소모율이 평균 0.5% 우수하나 이는 미미한 수준이다.



[그림 12] RPM별 각 모델의 토크



[그림 13] RPM별 각 모델의 출력

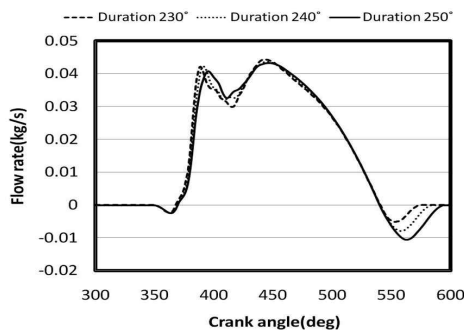


[그림 14] RPM별 각 모델의 연료소모율

밸브 열림구간의 변화가 순간 흡입유량에 미치는 영향력을 분석하기 위해 2000RPM에서 흡입유량을 그림 15

에 나타내었다. 열림구간 230° 모델의 흡기밸브 닫힘 시기에 역류현상이 다른 두 모델에 비해 현격히 적음을 확인할 수 있다. 이로 인한 체적효율 증가가 저속에서의 토크성능향상의 원인으로 판단된다. 하지만 이러한 저속성능의 향상은 엔진의 고속부분의 출력성능을 저하할 수 있으므로 개발시 주의가 필요하다.

고속에서의 흡기유량 특성을 나타내는 그림 10과 저속에서의 흡기유량 특성을 나타내는 15를 비교하면 본 연구에 적용된 소형엔진에서 추가적인 개발이 필요한 요소를 도출할 수 있다. 고속성능 향상을 위하여 흡기밸브 타이밍을 밸브 열림시기에 역류를 방지하도록 조절하고, 흡기밸브 열림구간 중 공기량 감소로 인한 손실을 방지하도록 타이밍을 설정해야 한다. 그리고 저속 성능향상을 위하여 흡기밸브 닫힘시기에 토출되는 공기량을 최소화하도록 밸브타이밍을 조절해야 한다. 하지만 이러한 고속과 저속 성능은 서로 상관관계를 가지고 연계되어 있으므로 중요시되는 운전속도 조건에 맞도록 최적화해야 한다.



[그림 15] 흡기밸브의 흡입유량 (RPM=2000)

5. 결론

본 연구에서는 전자제어 분사방식 소형엔진의 성능을 개선하기 위하여 성능해석 모델을 개발하였다. 상용 엔진 해석프로그램인 GT-Power를 통하여 전자 연료분사식의 소형엔진의 1차원 성능 모델을 구성하였으며, 실험 결과와 비교 및 검증을 통해 모델의 타당성을 확인하였다. 1차원 성능 모델의 토크 및 출력 해석결과는 실험결과와 3%이내의 오차를 보였으며, 소형엔진의 토크 및 출력 특성을 우수하게 예측하고 있다.

소형 엔진 성능의 향상을 위하여, 엔진의 흡입성능에 영향을 미치는 성능인자들의 영향력을 분석하였다. 오버랩을 증가시킬수록 저속구간에서는 엔진성능이 향상되었

으나, 고속구간의 성능에는 악영향을 미쳤다. 저속에서 밸브 열림구간 230° 모델의 토크성능이 베이스모델 대비 2% 상승하였다. 이는 흡기밸브 닫힘 시기가 빠르게 진행되어 역류량이 감소하고 이로 인해 체적효율이 증가하였기 때문이다.

참고문헌

- [1] W.A. Schuster, "Small Engine Technology", Delmar Publishers, 1999.
- [2] T. Tokui and J. Shirahata, "Small Engine Catalyst for US Emission Regulations", SAE 2002-32-1837, 2002.
- [3] J. Bin, L. Manqun, Y. Xicheng and Sun Yaqin, "Emission Control Strategy and Technologies on Chinese-Made Four-stroke Non-Road Small Spark-Ignition Engines", SAE 2005-32-0052, 2005.
- [4] P. Stuecke, C. Egbers and W. Geyer, "A Two-Stroke Chain Saw Engine to Fulfil Current Tier Emission Levels", SAE 2005-32-0101, 2005.
- [5] 박성영, "Performance Development of the 400cc EFI Small Engine," 한국산학기술학회논문지, 제12권 제4호, 2011.
- [6] 노종원, 김충식, 민선기, 이중구, "GT-Power를 이용한 흡기 매니폴드 및 밸브 타이밍 최적화에 관한 연구", KSAE 부분종합 학술대회, 2009.
- [7] 노종원, 이재욱, 민선기, 김승기, "1D Simulation을 이용한 엔진 저속성능 개선에 관한 연구", KSAE 부분종합 학술대회, 2010.
- [8] Gamma Technologies, "GT-Power User's Manual version 6.2", 2006.

염 경 민(Kyoun-Min Yeom)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 재학

<관심분야>

열 및 유체 유동해석

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 부교수

<관심분야>

열유체 유동해석, 내연기관 성능개발