

## 가솔린엔진 흡기매니폴드의 흡기유량 및 분배특성

염경민<sup>1</sup>, 박성영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계자동차공학부  
<sup>2</sup>공주대학교 공과대학 생산기술연구소

# Intake-Air Flow and Distribution Characteristics of the Gasoline Engine Intake-Manifold

Kyoung-Min Yeom<sup>1</sup> and Sung-Young Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

<sup>2</sup>Industrial Technology Research Institute, College of Engineering, Kongju National University

**요약** 본 연구는 성능 해석을 통하여 1600cc급 흡기매니폴드의 흡기유량 및 분배특성에 대한 연구를 수행하였다. 일차원 엔진 성능해석 프로그램과 3차원 유동해석프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다. 흡기 매니폴드의 정상상태 유동해석을 수행한 결과, 일차원 유동해석과 3차원 유동해석의 유량계수 표준편차는 1% 미만으로 우수한 분배특성을 나타내었다. 일차원 해석 결과가 3차원 결과 대비 미소하게 증가된 결과를 보였지만 동등한 유량계수 경향성을 나타냈다. 비정상상태 해석은 분배특성 측면에서 정상상태 해석 결과와 유사한 결과를 보였으며, 정상상태 해석결과를 통한 비정상상태 분배특성의 예측이 가능함을 확인하였다.

**Abstract** Intake-air flow and distribution characteristics of the 1600cc gasoline engine intake manifold have been studied using the computer simulation. Simulation has been conducted using both one-dimensional performance simulation and three-dimensional CFD software. Steady state flow simulation result of the intake manifold shows good distribution characteristics that the standard deviation of flow coefficients is below 1.0 percentage for both one- and three-dimensional simulation. Even though one-dimensional simulation result slightly overestimates compared with three-dimensional simulation result, both results show very good agreement in flow coefficient trend. Also, unsteady state simulation result shows consistent distribution characteristics with that of steady state. It is shown that unsteady state distribution characteristics might be able to be predicted through the steady state mass distribution result.

**Key Words** : Intake-manifold, Intake-air distribution, Simulation model, Gasoline engine

### 1. 서론

세계적으로 환경오염 문제에 대한 관심이 집중되면서 대기오염의 원인이 되는 자동차 배기가스에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 강화된 배기가스 규제를 만족하기 위한 연구와 신기술 개발이 자동차 엔진분야에서 활발하게 진행되고 있다.

특히, 배기가스 중 HC, CO 및 PM(Particulate Material)은 연소기술 및 후처리기술등으로 저감이 비교적 용이하지

만, 질소산화물은 고온 연소 시 더욱 증가하는 특성으로 인하여 저감에 상당한 어려움을 겪고 있다. 질소산화물을 감소시키기 위하여 연소온도를 낮추게 되면 연소성능과 연비를 저하시키는 문제가 발생한다. 엔진의 연소성능과 연비 저하를 최소화 하면서 질소산화물을 저감시키기 위하여 도입된 기술이 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 기술이다[1].

EGR을 이용하면 연소 혼합기 중에 불활성 가스 비율이 상승하여 비열이 증가하고, 연소온도가 감소하게 된

\*교신저자: 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 11년 04월 06일

수정일 (1차 11년 09월 30일, 2차 11년 11월 03일)

게재확정일 11년 11월 10일

다. 이 연소온도의 감소는 연소온도에 지배적인 영향을 받는 질소산화물의 발생을 억제하는 효과가 크다.

질소산화물을 감소시키기 위하여 EGR율을 증가시키면 질소산화물은 감소하나, 과도한 EGR 유입으로 연소 특성에 악영향을 미치게 된다. 대부분 EGR 기술은 디젤 엔진에서 사용되어 왔으나 최근 들어 가솔린엔진의 노킹을 억제하고 연비를 향상시키는 기술로 각광받고 있다. EGR을 적용할 경우에 연소온도를 낮추어 질소산화물 발생량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 혼합기의 단위 질량당 에너지를 낮춤으로서 노킹을 방지할 수 있다. 또한 흡기 계통의 펌프손실을 저감하여 연비의 향상을 도모할 수 있다. 기존의 가솔린엔진에서는 연소불안정성 및 엔진 응답성 악화 등의 이유로 EGR 사용을 피해왔다. 하지만, 최근 하이브리드 차량에 탑재되는 가솔린엔진은 운전 범위와 부하변동이 축소되면서 EGR 시스템의 장점을 활용할 수 있게 되었다. 따라서 가솔린엔진 분야에서 EGR 시스템은 연비를 향상시키고 배기가스를 저감할 수 있는 중요기술로 부각되고 있다[2].

흡기매니폴드에 고른 분배특성을 확보하기 위한 실험적 접근 방법은 적지 않은 시간동안 많은 비용과 노력이 소요되고, 형상분석이 용이하지 않아 많은 부담으로 작용하게 된다. 최근의 연구에서는 이러한 점을 해결하기 위해 성능해석 프로그램을 이용하여 분배특성을 예측하고 실험적 개발에 소모되는 시간과 비용을 절감하고 있다[3].

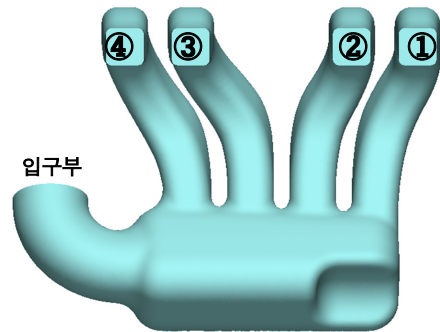
본 연구에서는 해석을 통하여 하이브리드 차량에 적용되는 1600cc급 가솔린엔진 흡기매니폴드의 유량 및 분배특성을 예측하고자 한다. 성능 해석은 일차원 성능해석 프로그램인 GT-Power를 사용하였다[4]. GT-Power를 통하여 획득된 흡기매니폴드의 일차원 정상유동 결과를 3차원 해석결과와 비교하였다. 비정상상태의 흡기유동 및 EGR 분배특성을 예측하기 위하여 일차원 가솔린엔진 모델을 개발하였으며, 개발된 모델을 활용하여 비정상상태의 EGR 분배특성을 분석하였다. 이러한 정상 및 비정상상태의 분석을 통하여 정상상태 모델의 유용성을 확인하고자 하였다.

## 2. 해석 모델

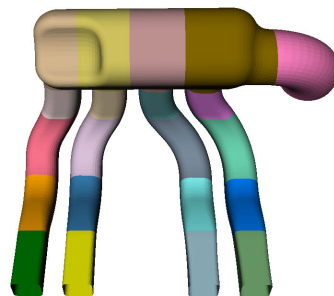
일차원 성능해석 모델에서는 연속방정식, 모멘텀 방정식 및 에너지 방정식을 이용하여 유동을 해석하게 된다. 일차원 해석기법은 3차원 해석기법 대비 상대적으로 짧은 시간에 전체 시스템에 대한 사이클 시뮬레이션이 가능하다는 장점이 있다[5]. 하지만 일차원 해석을 위한 모델링 부분은 세심한 주의를 필요로 한다. 이는 일차원해

석이 ‘유동 방향에 수직인 단면에서는 동일한 값을 갖는다’는 가정하에 모델링되었기 때문이다. 파이프 형상 부품의 모델링은 전체길이, 입구 및 출구의 지름과 각도를 고려하게 되며, 파이프의 단면적이 급격하게 변하거나 단차가 있는 부분은 오리피스 형상으로 모델링한다. 체적을 고려해야 하는 부분에서는 입구 및 출구의 각도, 체적내로 유입되는 유동의 확장지름, 체적 내에서 유동이 진행하는 길이 등을 모델링한다.

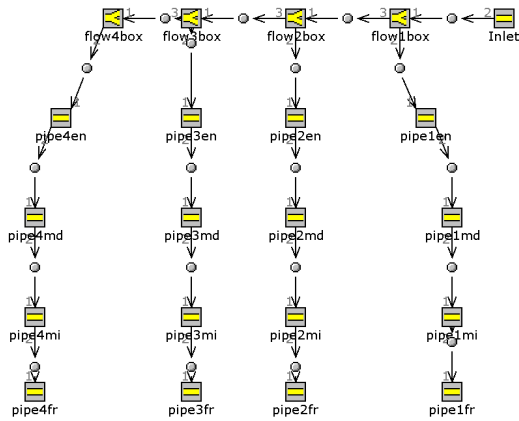
본 연구에서 개발된 GT-Power 모델은 배기량 1600cc급 직렬 4기통 가솔린 엔진과 엔진에 적용되는 자연흡기 방식의 흡기매니폴드이다. 형상은 그림 1과 같이 트로틀 밸브가 장착되는 입구부와 각각의 흡기포트로 연결되는 네 개의 러너로 구성되어 있다. 여기서 입구부와 러너의 중간에는 서지탱크가 공간을 형성하고 있다. 입구부에서 가장 먼 것이 1번 러너이며 가장 가까운 것이 4번 러너이다. GT-Power에서 제공하는 3차원 Discretizer는 흡기매니폴드와 같이 공간을 차지하는 부품을 체적 부분과 파이프 부분으로 분리시켜 일차원으로 변환시키는 보조 프로그램이다. GT-Power에서 제공하는 3차원 Discretizer를 사용하여 흡기매니폴드를 재구성하면, 그림 2와 같이 요소별로 구성된 일차원 GT-Power 모델을 얻을 수 있다.



[그림 1] 흡기매니폴드 모델  
[Fig. 1] Intake manifold model



(a) 3D-Discretization 모델링  
(a) 3D-Discretization modeling



(b) 일차원 모델

(b) One dimensional model

[그림 2] 흡기매니폴드의 일차원 모델링

[Fig. 2] One dimensional modeling of intake manifold

2.1 정상상태 해석모델

정상상태 해석은 실제 양산차 업체에서 수행하는 흡기 매니폴드 시험조건과 동일한 조건으로 수행하였다. 정상상태 시험조건은 플로우 테스트리그에서 4개의 러너 중에서 대상이 되는 하나의 러너 출구만을 개방한 상태에서 일정 압력조건을 적용하여 수행된다. 유동이 흐르지 않은 러너는 막힌 벽면으로 설정하였다. 본 연구에서는 표 1에 표기한 바와 같이, 흡기매니폴드 입구압력과 출구 압력의 차이를 절대압력기준 2.5 kPa로 설정하였다.

[표 1] 흡기매니폴드 정상상태 해석조건

[Table 1] Steady-state simulation condition of intake manifold

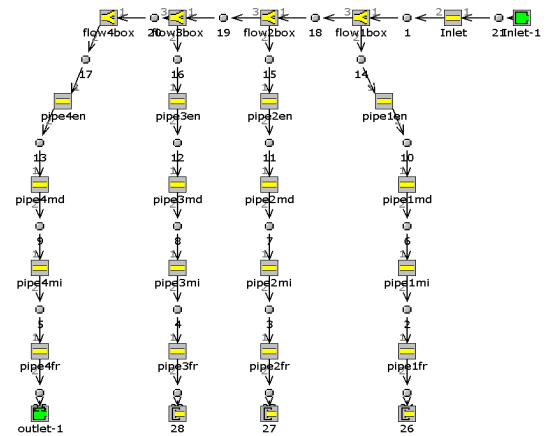
Conditions	Unit	Value
Inlet Pressure	kPa	100
Exit Pressure	kPa	97.5
Inlet Temperature	K	300

각 러너의 성능은 흡기유량계수( $C_f$ )로 표시되며, 러너를 통과하는 실질 질량유량과 이상적인 질량유량의 비로서 정의된다.

$$C_f = \frac{\dot{m}_{ACTUAL}}{\dot{m}_{IDEAL}} \quad (1)$$

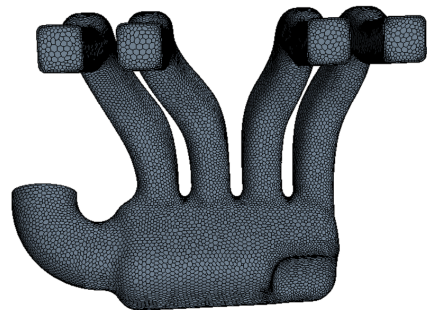
흡기유량계수의 값이 크고, 각 러너간 흡기유량계수의 편차가 작을수록 잘 설계된 흡기 매니폴드라 할 수 있다. 일반적으로 러너별 질량유량의 표준편차가 2%이내이면 양호한 분배성을 가지고 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 일차원 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 3차원 상용 해석프로그램인 CD-adapco사의 Star-CD를 활용하여 동일한 모델 및 조건에서 정상상태 유동해석을 수행하였다. 러너별 질량유량의 분배특성을 고찰하기 위하여 공기만을 작동유체로 적용하였다. 정상상태 해석을 위한 GT-Power 일차원 모델과 Star-CD 3차원 모델은 각각 그림 3 및 4와 같다. 그림 3은 그림 2의 흡기매니폴드 모델에서 입구부와 1번 러너를 출구부로 정의하고 출구가 아닌 타 러너들의 출구를 봉쇄한 모델이다. 이러한 모델은 각 러너별로 별도로 제작되어 해석에 적용된다. 그림 4는 3차원 유동해석을 위하여 계산격자를 형성한 그림을 보여주고 있다. 총 계산격자의 수는 약 25만개이며, 벽면 근처의 해석 정밀도 향상을 위하여 다수의 prism-layer를 비선형으로 적용하였다. 난류모델은 Standard k-ε 모델을 사용하였으며, 벽면은 단열조건을 적용하였다.



[그림 3] 일차원 정상상태 흡기매니폴드 모델

[Fig. 3] One dimensional steady-state simulation model of intake manifold



[그림 4] 3차원 정상상태 해석용 계산 격자

[Fig. 4] Computational nodes for 3 dimensional steady-state simulation

### 2.2 비정상상태 해석모델

정상상태의 흡기 유량계수는 흡기매니폴드들의 성능을 비교할 수 있는 유용한 무차원 계수이나, 엔진에 장착되어서 작동할 때의 비정상상태의 성능특성을 대표하지는 못한다. 흡기매니폴드가 엔진에 장착되면 공기의 관성효과, 맥동효과 및 공명효과가 종합적으로 작용하기 때문이다. 따라서 엔진운전 상태의 성능 파악을 위해서는 흡기 및 배기밸브가 열리고 닫히는 효과를 적용할 수 있는 비정상상태의 엔진 모델이 필요하다.

비정상상태의 유동해석은 EGR이 공급되는 경우와 공급되지 않는 경우에 대하여 해석을 수행하였다[6]. 두 경우 모두, 해석 조건은 엔진 회전수 2000RPM, 공연비 12.5 및 압축비 10.5를 적용하여 해석을 수행하였다. EGR을 적용한 비정상상태 해석조건은 EGR율 10%를 적용하였다. 이때 EGR율은 한 사이클에 흡입된 배기가스 질량( $m_{EGR}$ )과 흡입총질량( $m_{IN}$ )의 비로 정의된다[7].

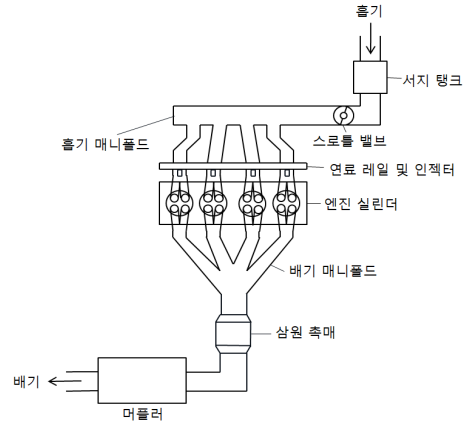
$$EGR(\%) = \left( \frac{m_{EGR}}{m_{IN}} \right) \times 100 \quad (2)$$

그림 5(a)는 정상상태 해석을 위한 가솔린엔진의 개략도를 보여주고 있으며, 이를 일차원 모델로 전환한 GT-Power모델을 그림 5(b)에 보여주고 있다. 해석의 대상이 되는 엔진은 4개의 실린더를 가지는 1600cc급 가솔린엔진이다. 전자식 포트 연료분사방식을 적용하고 있으며, 트로틀 밸브에 의해 공기량이 제어된다. 해석을 위한 연소모델은 범용적인 가솔린엔진의 연소모델인 Spark-Ignition Wiebe 모델을 사용하였다[4]. 해석에 사용된 가솔린 엔진의 제원은 표 2에 나타내었다.

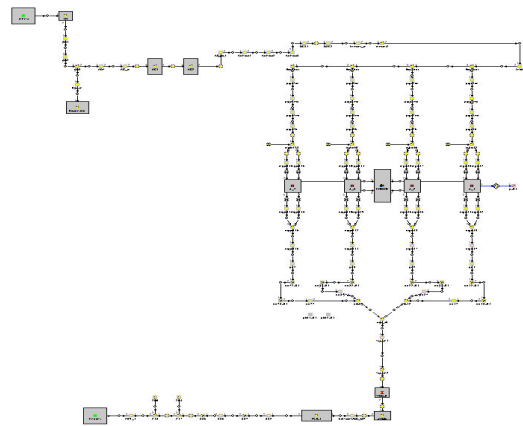
EGR 컨트롤러는 트로틀 밸브 후단에서의 흡입되는 공기량을 전달받아 EGR량을 결정하는 역할을 수행한다. 결정된 EGR량은 액추에이터를 통해 흡기매니폴드로 재순환하게 되어 배기가스재순환이 이루어지게 된다. 그림 6은 GT-Power 모델에 적용되어 EGR율을 제어하는 컨트롤러의 일차원 모델이다.

본 연구에서는 초기값을 시작으로 수렴 될 때까지 반복 계산을 진행하는 방식의 수렴조건을 사용하였다. 해석을 수행할 때에는 각 사이클에서의 변화를 세밀히 관찰하여 수렴의 여부를 결정 하여야 한다. 해석결과와 수렴 조건으로는 엔진의 사이클을 기본단위로 하여 최대 및 최소 엔진 사이클 수를 지정하였다. 여러 가지 상태량 계산을 모두 수렴시키기 위해 최소 10사이클, 최대 200사이클로 수렴조건을 부여하였으며, 엔진의 운전상태가 정상상태(Steady state)로 진입하여 오차가  $1.0 \times 10^{-4}$ 이내의 범위에 들어오도록 총괄적인 수렴조건을 설정하였다. 이때

의 수렴성은 유동, 열적 및 기계적 조건에 의해 제한되며, 예로 질량유동율에 대한 수렴조건은 0.01%이내를 수렴 조건으로 설정하였다.

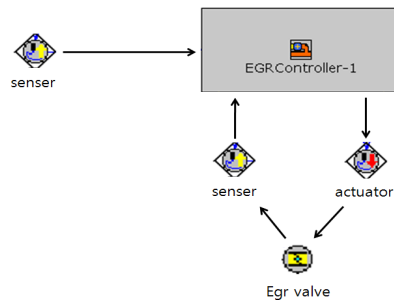


(a) 엔진의 개략도  
(a) Engine schematic diagram



(b) GT-Power 엔진모델  
(b) GT-Power engine model

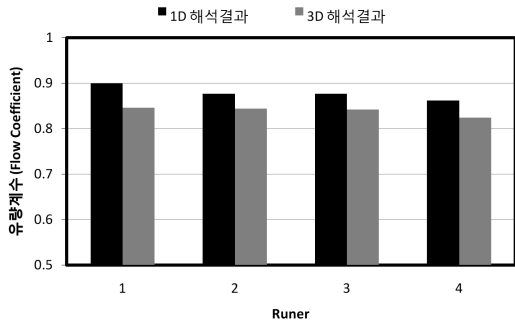
[그림 5] 비정상상태 해석을 위한 가솔린 엔진  
[Fig. 5] Gasoline engine for unsteady state simulation



[그림 6] EGR 컨트롤러  
[Fig. 6] EGR controller





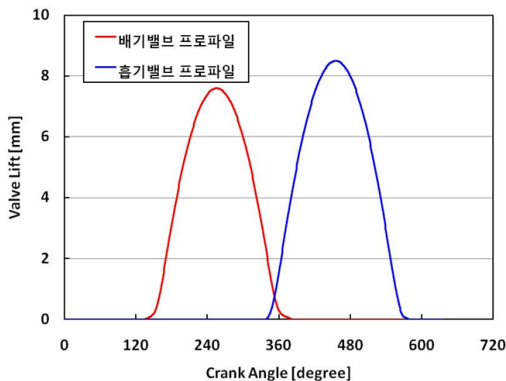


[그림 9] 러너별 유량계수  
[Fig. 9] Flow coefficient for each runner

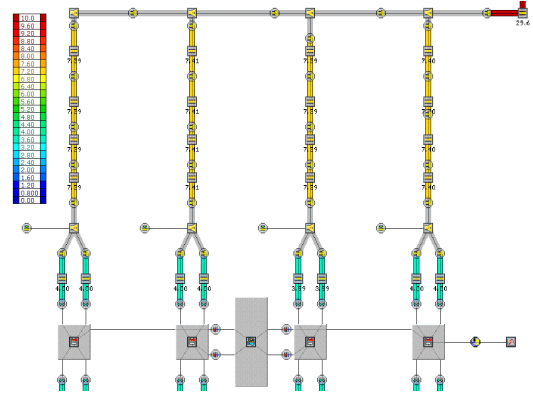
### 3.2 비정상상태 해석결과

비정상상태의 엔진작동을 해석하기 위해서는 비정상상태를 유발시키는 흡기 및 배기밸브의 프로파일 및 열림구간이 필요하게 된다. 그림 10은 본 연구에 사용된 흡기 및 배기밸브의 프로파일이다. 배기밸브는 최대 7.85mm의 밸브리프트와 248°C의 열림구간을 가지며, 흡기밸브는 8.85mm의 최대 밸브리프트와 242°C의 열림구간을 가진다. 또한 기통의 점화순서는 일반적인 inline 4기통 엔진에서 적용되는 1-3-4-2순으로 연소가 진행되도록 하였으며 부하조건은 전부하(Wide Open Throttle)조건을 사용하였다.

비정상상태의 해석 중 먼저 EGR을 적용하지 않은 결과를 그림 11에 나타내었다. 해석결과를 러너별 질량유량으로 정리하면 표 3과 같다. 러너별 분배율의 표준편차는 1.2% 였으며, 엔진 적용에 문제없는 수준이다. 특히 정상상태 해석에서 가장 열세였던 4번 러너로의 흡기공기량이 비정상상태의 엔진 구동에서는 양호하게 나타났다.



[그림 10] 흡기 및 배기밸브 프로파일  
[Fig. 10] Intake and exhaust valve profile

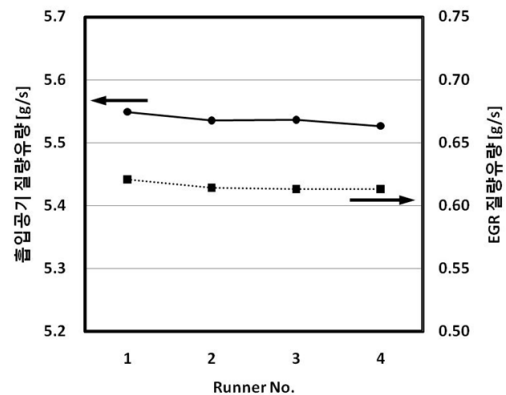


[그림 11] 비정상상태 해석결과(2000RPM)  
(Velocity, unit=m/sec)  
[Fig. 11] Unsteady state simulation result(2000RPM)  
(Velocity, unit=m/sec)

[표 3] 비정상상태 러너별 흡입공기의 질량유량과 분배율(EGR=0%)

[Table 3] Unsteady state air mass flow rate and distribution rate for each runner. (EGR=0%)

Runner	질량유량 [g/s]	분배율 [%]
1	7.39	24.98
2	7.41	25.04
3	7.39	24.98
4	7.40	25.00



[그림 12] 비정상상태 흡기 및 EGR 질량유량 비교 (2000RPM)  
[Fig. 12] Intake and EGR mass flow rate comparison for unsteady state (2000RPM)

EGR가스 분배성을 예측하기 위한 10% EGR을 적용한 비정상상태 해석결과는 그림 12 및 표 4와 같다. 흡기 및 EGR의 분배율에 대한 표준편차는 각각 1.6% 및 0.6%

로 양호한 분배특성을 보이고 있다. 특히 정상상태의 해석에서 나타난 분배특성 특성이 비정상상태의 흡입공기와 EGR에서 유사하게 나타나고 있다. 정상상태와 유사하게 1번 러너에서 증가된 흡기유량이 계산되고 있으며 4번 러너가 미소하지만 적은 유량을 나타내고 있다. 여기서 EGR의 질량유량은 흡입되는 공기의 유량에 의해 유도되기 때문에 흡입공기의 분배특성과 유사한 경향을 보이고 있다.

**[표 4]** 비정상상태 러너별 흡기 및 EGR의 질량유량과 분배율(EGR=10%)

**[Table 4]** Mass flow rate and distribution rate of intake air and EGR for each runner(EGR=10%)

Runner	질량유량 [g/s]		분배율 [%]	
	흡기공기	EGR	흡기공기	EGR
1	5.55	0.62	22.55	2.52
2	5.54	0.61	22.49	2.50
3	5.54	0.61	22.50	2.49
4	5.53	0.61	22.46	2.49
소계	22.15	2.46	90.0	10.0

표 4에 나타난 공기와 EGR의 총 질량유량이 표 3의 공기유량 대비 감소한 것은 EGR 가스의 온도가 흡입공기보다 높기 때문이다. 온도가 상승하면 밀도가 감소하고 체적이 증가하므로 총 흡입질량은 감소한다. 하지만, 이러한 온도상승은 흡기매니폴드의 압력을 상승시켜 펌핑 손실을 일부 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[2].

이상과 같이 정상상태와 비정상상태의 분배특성분석 결과를 종합하면, 정상상태의 분배특성 예측 결과가 비정상상태의 예측결과와 경향성 측면과 기통별 분배율 면에서 상당히 유사한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 단순한 정상유동의 해석으로도 비정상유동의 분배특성에 대한 예측이 가능할 수 있음을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 일차원 엔진 성능해석 프로그램과 3차원 유동해석프로그램을 이용하여 흡기매니폴드의 분배특성 및 EGR 분배특성을 파악하였다. 흡기 매니폴드의 정상상태 유동해석을 수행한 결과, 일차원해석에서 유량계수의 표준편차는 0.7%이며, 3차원해석에서 유량계수의 표준편차는 0.4%로 우수한 분배특성을 나타내었다. 일차원 해석 결과가 3차원 결과 대비 약 5%정도 과도한 결과를 보였지만 유사한 유량 분배 경향을 나타냈다. 미소하지만 1번 러너의 유량계수가 가장 우수하였으며, 4번 러너가 상대

적으로 가장 열세였다. 4번 러너의 유량계수가 열세인 이유는 트로틀 밸브 입구부에서 러너 입구부로 이어지는 유동의 곡률이 매우 급격하기 때문이다.

비정상상태 유동을 분석한 결과, 유동의 분배율은 표준편차 2% 미만의 양호한 분배특성을 보였다. 비정상상태 및 정상상태의 결과는 경향성과 기통별 편차에서 유사한 결과를 예측하고 있으며, 정상상태의 해석결과를 통한 비정상상태의 분배특성 예측의 가능성을 보여주고 있다.

#### References

- [1] J. Kim, et al., "The Flow and Distribution Characteristics for Various Configurations of Individual EGR Supply System", KSAE 2005 Fall, KSAE05-F0003, pp.15-21, 2005.
- [2] C. Park, et al., "A Study on Application of On/Off Type EGR and Optimal EGR Rate for Gasoline-Hybrid Engine", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 4, pp.143-150, 2008.
- [3] C. Kim, et al., "A Study for Distribution of Gasoline Engine Using CFD", KSAE 2006 Fall, KSAE06-F0016, pp.106-111, 2006.
- [4] Gamma Technologies, "GT-Power User's Manual version 7.0", 2010.
- [5] Y. Kang, et al., "Shape Optimization of Intake Manifold for Improving the EGR Distribution by Using Computational Fluid Dynamics in Diesel Engine", KSAE 2008, KSAE08-S0067, pp.410-415, 2008.
- [6] N. Park, et al., "Coupled 1-D/3-D Analysis of Cylinder-to-Cylinder EGR Distribution of Intake Manifolds in a HSDI Diesel Engine", KSAE 2004 Spring, KSAE04-S0071, pp.441-446, 2004.
- [7] J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw Hill, 1988.

**염 경 민**(Kyoum-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