

AMESim을 이용한, GDI 엔진에서 연료의 분사조건 변화에 따른 분사량 변화 예측

신석신* · 송진근** · 박종호*†

Simulation Injection Mass with Variable Injection Condition in GDI Engine using AMESim

Suk Shin Shin, Jingeun Song and Jongho Park

Key Words: Gasoline direct injection(GDI), Injection mass(분사량), Injection rate(분사율), Injection duration(분사기간), AMESim

Abstract

In case of GDI engine, shape of injected fuel and injection mass are one of the most important factors for good fuel efficiency and power. But it should be too inefficient and difficult to acquire injection mass data by experiment because condition in engine vary with temperature, pressure, and so on. So, this paper suggests the AMESim (Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems) as simulation program to calculate injection mass. For both simulation and experiment, n-heptane is used as fuel. In AMESim, I modeled the GDI injector and simulated several cases. In experiment, I acquired the injection mass using Bosch method to apply ambient pressure. The AMESim show reasonable result in comparison with experimental data especially at injection pressure 15 MPa. Other conditions are also in good accord with experimental data but error is a little bit large because the injection mass is so low.

1. 서 론

자동차의 연비에 대한 연구는 시기를 막론하고 꾸준한 관심을 받고 있는 주제이다. 하지만 수많은 연구에도 불구하고 자동차 제원상의 표시연비보다 실제연비가 더 낮다는 운전자들의 불만은 끊이지 않고 있다. 이에 대응하여 지식경제부는 2011년 11월 23일 자동차의 에너지 소비효율 등급 표시에 관한 규정을 발표하고 2012년 1

월 1일부터 도심주행연비와 고속도로주행연비를 결합한 새로운 복합연비를 적용하고 있으며, 에너지관리공단에서는 이 규정에 따라 자동차들의 표시연비를 측정하여 그 리스트를 공개하고 있다. 운전자들의 불만과 새로운 연비표시 규정의 발표로 자동차 연비에 관한 관심은 그 어느 때 보다 높아져있으며, 새로운 연비가 자동차를 구입하려는 소비자들에게 중요한 지표로 작용할 것이라 예상된다.

연비 측면에서 볼 때 가솔린 엔진 관련 기술 중 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진은 가장 발전된 기술이라고 할 수 있다. 연료를 흡기 매니폴드에 분사하여 공기와 연료의 혼합기를 빨아들이는 MPI(Multi Point Injection) 엔진과 다르게 GDI는 실린더 내부에 직접 분사하기 때문에 연료를 성층화 시킬 수 있어 연비를 높일 수 있다. 또한, 연소실 내에 연료를 직접 분사하는 방

(2013년 2월 16일 접수 ~ 2013년 3월 18일 심사완료, 2013년 3월 19일 게재확정)

*충남대학교 기계공학과

**한양대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 충남대학교 기계공학과

E-mail : jhpark@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-7616

식은 주행모드에 따라서 연료의 분사 타이밍이나 분사량을 정밀하게 제어할 수 있어 출력과 배기배출의 측면에서도 우수하다.

GDI 엔진에서 연료의 연소에 영향을 미치는 분무특성은 분무형상과 분사량이다. 성층 혼합기를 스파크 플러그 주변에 형성하기 위해서는 분무도달거리와 다공형 GDI 인젝터로부터 분사된 분무의 단면 분포 등의 분무형상 정보가 필요하다. 이에 관한 연구는 Oh⁽¹⁾ 등이 연구한 바 있다. 분사량을 측정할 때는 일반적으로 인젝터에서 분사된 연료를 직접 받는 방식을 많이 사용한다. 하지만 실제 엔진에서 주행모드에 따라 변하는 연료의 온도, 실린더 내부 압력 등 다양한 조건에 대한 분사량의 변화를 실험을 통해 측정하기란 쉽지 않다.

본 연구에서는 다양한 조건에서의 분사량을 알기 위해 1D Simulation Program인 AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems)을 사용하여 분사압력, 분위기압력, 분사기간에 따른 GDI 인젝터의 분사량을 예측해보았다.

2. AMESim 해석과 분사량 실험

2.1 AMESim을 이용한 인젝터 모델링

AMESim은 해석시간이 길고 높은 성능의 컴퓨터를 필요로 하는 3D Simulation에 비해, 간단하고 빠른 1D Simulation Program으로 유압, 전기, 진동 등 다양한 분야에 적용 가능하다. 또한, 이미 여러 논문에서 디젤엔진의 솔레노이드 인젝터를 모델링하여 신뢰성을 검증한

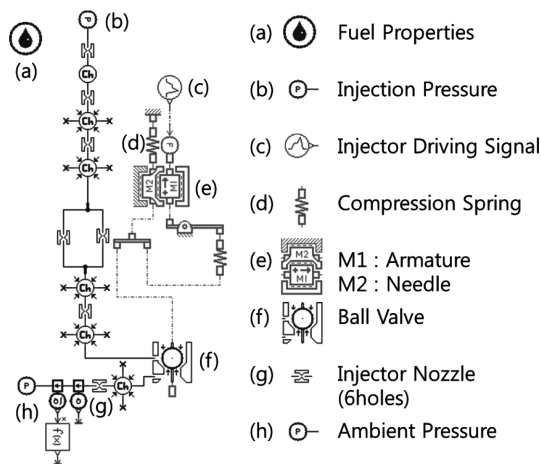


Fig. 1 GDI injector model

Table 1 Injector parameters

Needle	
Mass	4.018 g
Diameter of Needle Bar	2 mm
Diameter of Ball	3 mm

Orifice	
Number of Holes	6
Diameter of Holes	0.172 mm

Spring	
Spring Rate	18.00 N/mm

바 있다^(2,3).

본 연구에서 사용한 인젝터는 Bosch의 HDEV 5(6holes)이다. HDEV 5는 솔레노이드를 사용한 고압 직분사 장치로, 압력 차이를 이용하여 Needle을 들어 올리는 디젤 엔진의 솔레노이드 인젝터와 달리 솔레노이드로 Needle을 직접 들어 올리는 방식을 취한다. 솔레노이드 코일에 전기신호가 인가되면 솔레노이드 주변에 자기장이 생성되어 Armature를 들어 올리고, 이와 연결되어 있는 Needle이 함께 들어 올려지면 연료가 분사된다. 지정된 분사기간이 종료되어 전기신호가 사라지면 Armature에 작용하던 자력이 사라지고 스프링에 의해 복원된 Needle이 노즐을 막아 분사를 종료한다.

AMESim에서는 이와 같은 원리로 작동되는 GDI 인젝터를 Fig. 1과 같이 Hydraulic model과 Mechanical model, Signal model 등을 조합해 모델링할 수 있다. Fig. 1의 질량 모델 중 M1은 Armature이고 M2는 Needle을 나타낸다. Model의 상단에 있는 압력 (b)는 분사압력을, 하단에 있는 압력 (h)는 분위기압력을, 우상단의 전기신호 (c)는 분사기간을 각각 조절하여 다양한 조건에서의 분사를 관찰할 수 있다. 인젝터의 부품 중 연료 분사에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 노즐 (g)이다. 노즐에서 유량은 Bernoulli Equation으로부터 다음 식으로 계산된다.

$$Q = C_d A \sqrt{2\Delta P / \rho} \times N \quad (1)$$

식 (1)에서 C_d 는 유량계수로 약 0.8이고⁽⁴⁾, A 는 노즐의 단면적, ΔP 는 분사압력과 분위기압력의 차이, ρ 는 연료의 밀도, N 은 노즐의 수, Q 는 유량 즉, 분사량을 의

Table 2 Fuel properties

Fuel	n-heptane
Density	679.5kg/m ³
Bulk Modulus	946.1358MPa
Kinematic Viscosity	0.928cSt @ -17.8°C
	0.511cSt @ 37.8°C
Coefficient for temperature viscosity characteristic	0.7

Table 3 Variables of AMESim and experiment

Injection Pressure [MPa]	5, 10, 15
Ambient Pressure [MPa]	1, 2, 3
Injection Duration [ms]	0.5, 0.8, 1.2

미한다.

해석과 실험에 사용한 연료 (a)는 n-heptane이다. n-heptane은 가솔린과 유사한 분무특성을 지니며 순물질이기 때문에 물성이 일정하고 제조사에 따른 품질의 차이가 적어서 본 연구에서 사용하기 적합하다. AMESim에서 요구하는 연료의 입력요소는 다양하지만 결과에 큰 영향을 미치는 대표적인 요소는 Table 1과 같다.

2.2 AMESim해석 및 실험조건

디젤엔진의 경우 분사압력을 200 MPa까지 올리기 때문에 연료 분사 시 실린더 내부 압력이 3 MPa까지 올라가더라도 분위기압력이 분사압력에 미치는 영향이 미미해 분사량에 큰 영향을 주지 않는다. 하지만 GDI 엔진의 경우 분사압력이 12~20 MPa이기 때문에 실린더 내부의 압력이 2 MPa정도로 올라간다면 분위기압력과 분사압력간의 차이가 대기압 상태에 비해 약 10% 감소하기 때문에 분사량이 줄어들 것으로 예상된다.

다양한 조건에서 AMESim 해석결과와 실험결과를 비교하기 위해 Table 2와 같이 해석 및 실험조건을 정했다. 분사압력, 분위기압력, 분사시간에 대하여 각 3가지 경우를 설정하여 총 27가지 조건에 대하여 해석과 실험을 수행했다. 본 연구에서 분사시간은 인젝터 구동신호의 길이로 정의한다.

2.3 분사량 측정 실험

분사량 측정 실험은 AMESim 해석조건과 같은 27가지 조건에 대하여 수행했으며 분위기압력을 가하기 위

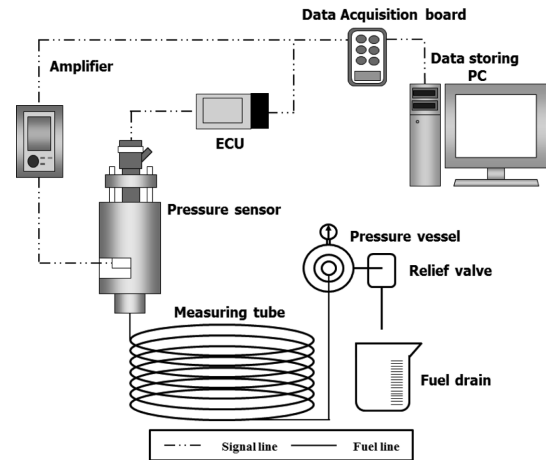


Fig. 2 Injection mass measuring apparatus

해 Fig. 2와 같이 Bosch 분사율 측정장치를 사용했다⁽⁶⁾.

Bosch 분사율 측정장치에서는 분사된 연료가 야기하는 압력증가를 측정하여 분사율을 측정한다. 연료로 채워진 measuring tube에 연료를 분사하면 그로 인하여 발생한 충격파가 음속으로 전달된다. 분사된 연료의 속도는 압력증가의 크기와 비례하며 그 관계식은 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$dP = \rho c du \tag{1}$$

dP 는 압력 변화, ρ 는 연료의 밀도, c 는 연료 내에서의 음속, du 는 분사되는 연료의 속도이다. 이와 같이 분사되는 연료의 속도와 압력의 변화가 비례하기 때문에 압력을 측정하여 분사율로 변환할 수 있다. 한편, measuring tube를 통해 전파된 충격파는 tube의 끝에서 반사되어 다시 pressure sensor로 돌아온다. 분사율을 측정하는 동안에는 반사파가 돌아오지 않아야 하기 때문에 충분한 길이의 measuring tube를 사용해야 한다.

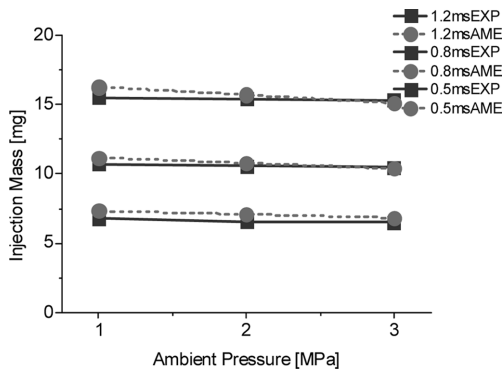
분사된 연료에 의해 증가한 압력은 measuring tube 끝단에 연결된 relief valve에 의해 제거되어 관 내부 압력은 일정하게 유지된다. 연료를 분사하여도 내부 압력이 일정하게 유지된다는 것은 분사한 연료와 동일한 양의 연료가 relief valve를 통해 빠져나오기 때문이다. 따라서, 분사량은 relief valve에서 나오는 연료의 질량이라고 할 수 있다. 본 실험에서는 measuring tube 내부의 압력을 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa로 변경하며 분위기압력을 가했고, relief valve에서 나오는 연료를 받아 분사량을 측정했다.

3. AMESim과 실험 결과 및 고찰

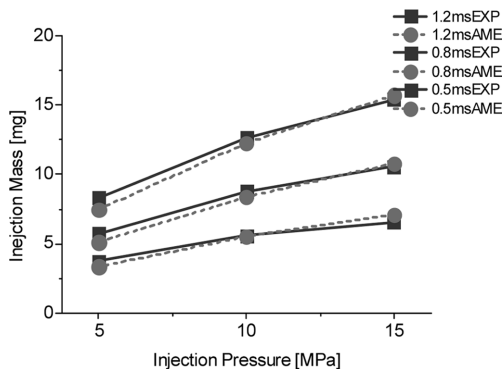
Fig. 3(a)는 실제 GDI 인젝터의 분사압력 범위에 해당하는 15MPa에서의 AMESim 해석결과와 실험결과를 함께 나타낸 그래프이며, Fig. 3(b)는 실제 가솔린 엔진의 실린더압력 범위에 해당하는 2 MPa에서의 결과를 나타낸 그래프이다.⁽⁷⁾

Fig. 3(a)를 보면, 분사압력이 15 MPa인 경우, 분위기압력의 증가에 따라 분사량이 약간씩 감소하는 경향이 실험과 AMESim에서 동일하게 관찰된다. Fig. 3(b)에서도 역시 실험과 AMESim이 동일한 경향을 관찰할 수 있으며, 특히, 그래프 기울기의 변화도 반영하고 있다.

Table 4에서는 Fig. 3(a)의 내용에 추가하여 분사압력이 5 MPa인 경우에 대하여도 결과를 확인할 수 있다. 분사압력이 5 MPa인 경우에는 15 MPa인 경우에 비하여 분위기압력의 변화에 따른 분사량의 변화가 크다. 이는 식 (1)에서 분사량 Q가 분사압력과 분위기압력 간의 차이 ΔP에 비례하기 때문에 이와 같은 결과가 나오는



(a) Injection Pressure 15MPa



(b) Ambient pressure 2MPa

Fig. 3 Injection Mass Comparison between Experiment and AMESim Results

Table 4 Injection Mass Reduction Ratio as Increasing Ambient Pressure

Injection Pressure [MPa]	5		15	
Injection Duration [ms]	0.5		0.5	
Ambient Pressure [MPa]	1	3	1	3
Injection Mass [mg]	4.072	2.926	6.794	6.504
Reduction Ratio [%]	28.14		4.27	

Table 5 Error of AMESim and Experiment

Injection Duration	Ambient Pressure		
	10 bar	20 bar	30 bar
0.5 ms	7.61%	7.50%	4.92%
0.8 ms	4.23%	2.10%	0.95%
1.2 ms	4.81%	2.04%	1.34%

것이라고 볼 수 있다. 20 MPa 이상의 고압분사로 발전해가는 GDI 인젝터의 추세는 우수한 미립화 특성에 더불어 분사기간동안 변화하는 실린더 내부 압력에도 안정적인 분사 제어가 가능하게 할 것으로 판단된다.

Table 5는 Fig. 3(a)의 오차율을 계산한 결과이다. 오차율을 산출한 방법은 다음과 같다.

$$Error = |A - B| / (A + B) \times 2 \times 100 \quad (2)$$

A는 AMESim 결과, B는 실험 결과값이다. 결과에 따르면 평균 4%의 낮은 오차율을 보인다. 분사기간 0.5 ms에서는 다른 기간에 비하여 큰 오차율을 보이는데, 이는 분사량이 가장 적기 때문에 약간의 오차에도 오차율이 크게 나올 뿐, 오차의 절대값은 약 0.5 mg으로 큰 차이가 아니다. 또한, Bosch에서 제공하는 HDEV 5의 Datasheet에 의하면 분사압력 200 bar, 분사기간 1.5 ms에서 Flow Tolerance는 6%이므로 이에 비하면 AMESim 해석 결과는 오히려 더 정확하다고 할 수 있다.

Fig. 4는 분사시작을 0 ms로 설정하고 분사기간을 1.2 ms로 설정한 분사율 실험결과와 AMESim 결과를 비교한 그래프이다. 여기에서 분사기간은 인젝터 구동신호의 길이를 말하며, 실제 분사기간은 이보다 약간 늘어난다. 인젝터 구동신호의 길이와 실제 분사기간 사이에 차이가 발생하는 이유는 Needle이 올라갔다 내려오는 동안에도 계속 분사가 이루어지고 있기 때문이다. 분사 초기에 가장 높은 분사율을 보인 이후 안정된 분사율을 보이는 공통된 경향도 관찰할 수 있다. 이와 같은 경향

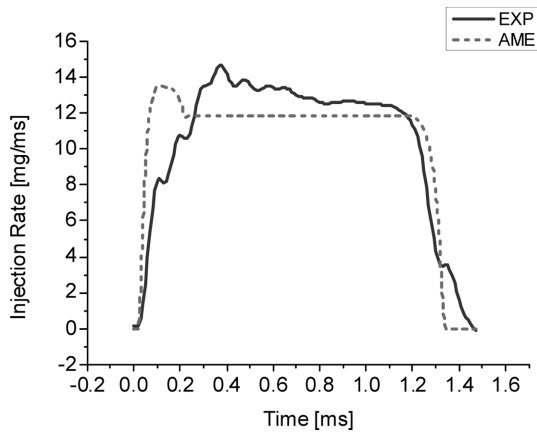


Fig. 4 Injection Rate Comparison between Experiment and AMESim Results at Injection Pressure 15MPa, Ambient Pressure 3 MPa

을 보이는 이유는 분사 초기에는 분사압력을 온전히 가지고 있다가 연료가 분사됨에 따라 최초의 분사압력을 유지하지 못하고 약간 떨어지기 때문이라고 판단된다. 다만, 분사 초기에 그래프의 기울기가 다르게 나타나는데, 그 이유는 AMESim의 모델에서 빠른 계산을 위해 인젝터 구동전류 대신 솔레노이드에 의해 발생하는 자기력을 직접 입력해주었기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 GDI 엔진에서 다양한 주행모드에서 분사량을 정밀하게 제어하기 위한 방법으로 AMESim을 통한 계산을 제안하고 있으며, Bosch 분사율 측정장치를 이용한 분사량 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험과 AMESim에서 모두 분위기압력의 증가에 따라 분사량이 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며 오차를 8% 이내에서 두 결과를 일치시킬 수 있었다. 오차를 8%이라면 높다고 볼 수 있지만, 결과에서도 밝혔듯 실제 인젝터에서의 오차율도 6%으로, 인젝터 간 편차는 최대 약 12%까지도 날 수 있다. 따라서 오차율 8%는 큰 오차가 아니며, 분사량을 계산하기 위한 간단한 모델

링만으로도 AMESim의 계산 결과를 통해 다양한 운전 조건에서의 분사전략을 결정할 수 있음을 확인했다.

AMESim을 통한 계산은 3D CFD를 통한 계산에 비하여 속도가 월등히 빠르기 때문에 다양한 조건에서의 분사량을 취득하는데 효율적이다. 본 연구에서는 실제 엔진에서 발생할 수 있는 다양한 조건 중 일부만 선택하여 실험과 계산을 수행했지만, 실험 결과와 validation을 완료한 모델에 대하여 추가적인 조건에서의 결과를 얻어내는 일은 어려운 일이 아니다.

이와 같이, AMESim을 사용하여 분사량을 계산하는 것은 결과의 정확성과 경향성의 측면에서도 적절할 뿐 아니라 실험하기 어려운 조건에서도 쉽게 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한, 결과를 얻어내는데 소요되는 시간의 측면에서도 실험이나 3D CFD에 비해 적게 걸리기 때문에 더욱 효율적인 방법이라고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) 오윤중, 김태훈, 김대식, 전문수, 박성욱, “연료 분사 압력 및 분위기압력이 다공형 GDI 인젝터의 분무특성에 미치는 영향 모델링”, 액체미립화학회 학술강연회논문집, 2012, pp. 31~32.
- (2) O. Chiavola and F. Palmieri, “Modeling Needle Motion Influence on Nozzle Flow in High Pressure Injection System”, SAE Paper No. 2007-01-0250.
- (3) O. Chiavola and P. Giulianelli, “Modeling and Simulation of Common Rail Systems”, SAE Paper No. 2001-01-3183.
- (4) 맹주성, “유체역학”, 병진출판사, 2003, pp. 223~225.
- (5) Glenn R. Bower and David E. Foster, “A Comparison of the Bosch and Zuech Rate of Injection Meters”, SAE Paper No. 910724.
- (6) 강진석, 최욱, 배충식, “가시화 분사율 측정을 통한 비정상 디젤분무의 분석”, 한국자동차공학회논문집 제 12권 제 5호, 2004, pp. 12~18.
- (7) 박형철, 김미로, 조남효, “가솔린 직접분사 엔진의 흡기과급에 따른 성층화 연소에 미치는 영향”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집 2002, pp. 66~73.