가솔린 엔진에서 가솔린-암모니아 혼합 연료의 연소 및 배기 특성

유 경 현*

군산대학교 기계자동차공학부

Combustion Characteristics and Exhaust Emissions in Spark-ignition Engine Using Gasoline-ammonia

Kyunghyun Ryu*

School of Mechanical & Automotive Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

(Received 5 April 2013 / Revised 9 May 2013 / Accepted 14 May 2013)

Abstract : The effect of gaseous ammonia direct injection on the engine performance and exhaust emissions in gasoline-ammonia dual fueled spark-ignition engine was investigated in this study. Results show that based on the gasoline contribution engine power increases as the ammonia injection timing and duration is advanced and increased, respectively. However, as the initial amount of gasoline is increased the maximum power output contribution from ammonia is reduced. For gasoline-ammonia, the appropriate injection timing is found to range from 320 BTDC at low loads to 370 BTDC at high loads and the peak pressures are slightly lower than that for gasoline due to the slow flame speed of ammonia, resulting in the reduction of combustion efficiency. The brake specific energy consumption (BSEC) for gasoline-ammonia has little difference compared to the BSEC for gasoline only. Ammonia direct injection causes slight reduction of CO₂ and CO for all presented loads but significantly increases HC due to the low combustion efficiency of ammonia. Also, ammonia direct injection results in both increased ammonia and NO_x in the exhaust due to formation of fuel NO_x and ammonia slip.

Key words : Ammonia(암모니아), Spark ignition(불꽃 점화), Exhaust emissions(배기가스), NO_x(질소산화물), CO(일산화탄소), Alternative fuel(대체연료)

Nomenclature

ATDC : after top-dead-center
BMEP : brake mean effective pressure
BSEC : brake specific energy consumption
BTDC : before top-dead-center
CFR : co-operative fuel research
SCR : selective catalytic reduction

1. 서론

대기환경 문제와 에너지 고갈에 따른 문제 해결을 위해 다양한 대체연료를 연구하는 것이 중요한 상황에서 탄소배출을 줄일 수 있는 바이오연료와 같이 재생가능한 대체연료의 이용에 관한 연구가 각광을 받고 있다. 이에 따라 최근까지 바이오매스 연료들을 사용하는 내연기관에 관한 연구가 꾸준히 증가되어 왔다. 또한 바이오디젤과 에탄올과 같은 전통적 바이오연료들을 비롯하여 도심지역에서 온실가스의 하나인 이산화탄소 배출을 줄일 수 있는 무탄소 연료에 관한 연구를 촉진하여 왔다. 수소

*Corresponding author, E-mail: khryu@kunsan.ac.kr

(H₂)와 같이 탄소가 없는 연료들은 충분히 관심을 끌기에 충분하여 많은 다양한 분야에서 연구되어 왔다.¹⁻³⁾ 그러나 수송분야에서 수소를 사용하는 것에는 생산, 수송 및 저장 등과 같은 다양한 기반시설 문제에 직면하고 있는 실정이다.

암모니아(NH₃)는 탄소가 포함되지 않은 연료(carbon-free fuel)로서 내연기관에서 연소시 이산화탄소를 생성하지 않는다. 더군다나 암모니아는 세계에서 가장 잘 합성된 화합물의 하나이고 수소에 비하여 기존에 존재하는 기반시설을 이용하여 저장 및 배송하거나 취급하기 쉬운 특징을 가지고 있다. 암모니아는 약 10 bar의 압력에서 상온하에서 쉽게 액화하여 저장될 수 있기 때문에 효과적인 운송 연료로서 사용가능하다. 암모니아는 고전적인 Haber-Bosch process⁴⁾를 이용하여 태양열, 풍력, 지열, 및 해양에너지와 같은 재생원료로부터⁵⁾ 또는 폐열, 바이오매스로부터^{6,7)} 생산될 수 있다. 또한 암모니아의 가격은 에너지를 기준으로 경유의 가격과 경쟁할 수 있어 내연기관의 대체연료로서 매력적인 측면을 갖고 있다.

암모니아는 1942년 제2차 세계대전시 연료의 부족으로 인해 벨기에(Belgium)에서 버스의 연료로 사용한 이래,⁸⁾ 1960년대에 미국 육군이 내연기관의 대체연료로서 암모니아의 이용가능성에 대해 이론적 및 실험적 연구를 수행하였으나, 그 이후로 최근까지 내연기관 연료로서 암모니아에 대한 연구가 미진하였다.

몇몇 연구자들이 높은 옥탄가를 갖고 있는 암모니아를 전기점화엔진에 적용하려고 시도하였고,^{9,10)} SI 엔진에서 무수 암모니아를 연소시키기 위해서는 암모니아가 기체로 공급되어 부분적으로나마 수소와 질소로 분해되어야 한다는 결과를 보고하였다. 또한 CFR엔진을 이용한 연구 결과에서는 아이들 조건에서는 100%의 가솔린이 요구되지만, 자연흡기 교축상태에서는 에너지 기준으로 70%의 암모니아와 30%의 가솔린으로도 엔진이 구동될 수 있다고 보고하였다.

한편 Gray 등¹¹⁾은 압축착화CFR엔진을 이용한 암모니아 연구를 통하여, 파일럿 연료로 세탄가가 53인 경유를 사용하여 암모니아를 예혼합 연소시켰을

경우 흡기온도 150°C의 조건에서 35의 압축비가 요구된다고 보고하였으나 또 다른 연구¹²⁾에서는 30 이하의 압축비에서는 연소시킬 수 없었다고 보고하기도 하였다. 이는 자발화 온도가 높은 암모니아가 디젤엔진에서 직면한 문제임에는 틀림없다.¹³⁾

최근 암모니아는 잠재적인 연료로서 인식되고 있고, 관련된 시범 연구가 이루어져 왔고,¹⁴⁻¹⁷⁾ 경제적인 관점에서도 암모니아는 잘 구성된 기반 시설들을 이용하면 연료로서 이용 가능성이 충분한 실정이나,¹⁸⁾ 국내에서는 암모니아에 대한 연구가 대부분 후처리 장치로 사용되고 있는 SCR시스템에서의 환원제에 대한 특성에 국한되어 있고,¹⁹⁻²¹⁾ 연료로서 암모니아에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 내연기관의 대체연료로서 암모니아를 가솔린 기관에 적용할 경우 가솔린-암모니아 혼합 연료 연소시 암모니아의 공급량에 따른 연소 특성을 고찰하고, 가솔린-암모니아 혼합 연소에 따른 엔진 성능 및 배기배출물 특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 엔진

본 연구에서는 암모니아의 연소 및 성능을 고찰하기 위해 연료의 연구에 전문적으로 사용하는 단기통, 수냉, 과급기 방식의 가솔린 CFR(co-operative fuel research) 엔진을 사용하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 엔진의 제원을 나타낸 것으로, 일반적인 가솔린 엔진의 압축비를 고려하여 압축비를 10으로

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Engine manufacturer	Waukesha Motor Company
Engine model	CFR-48
Bore and stroke [mm]	82.5 × 114.3
Displacement [L]	0.611
Compression ratio	10
Piston type	Flat
Aspiration	Supercharged
Fuel system	Manifold injection
Fuel injector	Bosch
Spark timing [deg BTDC]	30
Engine speed [rpm]	1800

설정하였고, 흡입공기는 서지탱크 가압방식을 이용하여 교축밸브가 없는 상태에서 일정한 압력으로 공급하였으며, Bosch형 분사펌프와 인젝터를 이용하여 주 연료인 가솔린을 흡입행정 중에 흡기관으로 분사하였다. CFR 엔진의 회전속도와 부하는 유도형 동력계(HDM-365, Harnischfeger Corporation, USA)를 이용해 1800 rpm의 일정한 속도에서 엔진 부하를 제어하고 엔진 출력을 측정하였다.

2.2 연료 및 연료공급시스템

2.2.1 연료

Table 2는 본 연구에서 사용된 가솔린과 암모니아의 물성치를 나타낸 것이다. 암모니아는 옥탄가가 130으로 매우 높아 높은 압축비에서도 노킹의 발생의 억제할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 발열량이 18.8 MJ/kg으로 가솔린의 발열량의 44% 정도로 낮고, 자발화 온도가 낮아 점화시키기 어려운 단점을 갖고 있다. 또한, 공연비가 6.05로 낮으며 증발잠열 일 1,371 kJ/kg으로 매우 높아 기화시에 주변 공기의 온도저하를 초래하며, 화염속도가 가솔린에 비하여 상대적으로 느린 특성을 갖고 있다.

Table 2 Properties of fuel

Property \ Fuel	Gasoline	Ammonia
Molecule	C ₇ H ₁₇	NH ₃
Boiling point [°C]	-	-33.5
Storage temperature [°C]	25	25
Storage pressure [kPa]	101.3	1030
(Air/Fuel)s	15.29	6.05
Latent heat of vaporization [kJ/kg]	310	1370
LHV [MJ/kg]	42.5	18.8
Approximate AKI* Octane rating	87-93	130
Autoignition temperature [°C]	370	651
Flame speed [m/s]	0.58	0.015

*Anti-Knock Index, (RON+MON)/2

2.2.2 연료공급시스템

암모니아는 자발화 온도가 매우 높고 발열량이 낮아 암모니아만 전소시켜 엔진 출력을 확보하기에는 아직 해결해야할 문제점이 많다. 따라서 본 연구에서는 암모니아의 연소특성을 고찰하기 위해 암모니아를 점화시킬 수 있도록 착화연료로 가솔린을

Fig. 1 Top view of cylinder

사용하였다. 착화 연료인 가솔린을 공급하기 위하여 CFR 엔진에 장착된 가솔린 분사펌프와 Bosch형 인젝터를 그대로 사용하였으며, 소비된 연료는 전자저울을 이용하여 측정하도록 시스템을 구성하였다. 점화플러그가 흡기 매니폴드와 90°C 각도의 위치에 설치된 CFR 엔진의 구조로 인해 암모니아 인젝터는 Fig. 1에서와 같이 점화플러그와의 반대방향에 위치하도록 하였다. 따라서 가솔린의 공급방향은 연소실내에 설치된 점화플러그, 그리고 암모니아 인젝터와 각각 90°C의 각도가 형성되었다.

암모니아는 액체 분사시 발생하는 증발 잠열로 인해 연소실내 온도저하가 발생하므로, 본 연구에서는 기체 분사 방식을 고려하였다. Fig. 2에서와 같이 암모니아를 액체 상태에서 기화시키기 위한 연료통과 연료라인을 설치하고, 기체상태의 암모니아를 1.24 MPa의 압력으로 분사하기 위하여 암모니아 연료통을 전기가열기를 이용하여 약 45°C로 가열하였으며, 연료라인내의 암모니아가 액화되지 않도록 히팅테이프를 이용하여 연료라인을 가열하였다. 또한, 전자저울을 이용하여 2분동안 소비된 암모니아 무게를 측정하여 에너지소비율을 계산하였다. 암모니아는 5 MPa의 압력까지 분사할 수 있는 암모니아 전용 기체 인젝터(parker사)를 사용하여 분사하였고, 분사시기 및 분사폭은 Compact-RIO real-time controller(NI cRIO-9022, NI instrument)를 사용하여 제어하였다.

2.3 실험 방법

본 연구에서 가솔린-암모니아 혼합연료의 연소 특성을 고찰하기 위해 암모니아의 착화 연료로 사

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

용하는 가솔린은 CFR 엔진에 부착된 분사펌프와 인젝터를 이용하여 8.2 MPa의 압력으로 흡기 행정 중 50°CA ATDC에서 흡기관으로 분사하였으며, 점화시기는 폭발행정 전 30 deg BTDC로 고정하였다.

엔진 효율이 낮은 CFR엔진의 특성을 고려하여 가솔린의 공급량은 가솔린에서 얻어진 엔진 부하를 기준으로 설정하였으며, 기본 엔진부하(base BMEP)를 0.65, 1.55, 2.52, 3.32 bar로 설정하고 각 기본 엔진 부하 조건에서 암모니아의 공급량에 따른 특성을 분석하였다. 또한, 암모니아 기여도가 가장 좋은 기본 엔진부하 조건에서 최적의 암모니아 분사시기를 적용한 가솔린-암모니아 혼합연료의 성능 실험을 엔진 부하 변화(1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.7 bar)에 따라 실시하였다.

암모니아 분사압력은 1.24 MPa이었으며, 암모니아의 분사시기는 밸브오버랩이 30° 임을 감안하여 흡기 행정 전 10° (폭발행정 TDC 기준 370° BTDC), 흡기행정 후 40° (폭발행정 TDC 기준 320° BTDC), 흡기 행정 후 90° (폭발행정 TDC 기준 270° BTDC)로 50° 간격으로 설정하였고, 분사 지속시간은 각 분사시기 조건에서 10 ms, 14 ms, 18 ms, 22 ms, 26 ms로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

실린더 압력 및 열발생율은 실린더 헤드에 삽입된 압력센서(Kistler 6052CU20)로부터 취득한 증폭기(Kistler 5010)를 거쳐 DAQ 보드(NI PCI-6259)를 통해 컴퓨터에 저장한 후 분석하였다. 배기다기관 2 m 후단 배기가스 파이프에 배기가스 샘플링 튜브를 삽입하고 배기가스 분석기(DeJEEYE Technologies)를 이용하여 CO, NH₃, CO₂, NO_x, HC 등의 배출가스를 측정하였다. 교축밸브 제어에 한계가 있는 CFR 엔진의 특성으로 전개스로틀로 운전하였으며, 공연비는 Fig. 2에서와 같이 2단 서지탱크 사이에 장착된 차압계를 이용하여 측정된 흡입공기량과 연료소비량을 이용하여 계산하였다. 모든 실험은 1800 rpm의 일정한 엔진 회전속도에서 수행하였으며, 암모니아가 미치는 엔진 성능, 연소 및 배기가스 특성은 기준 연료인 가솔린만을 사용한 경우와 비교하여 분석 및 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔진 성능

가솔린-암모니아 혼합연소의 효과를 규명하기 위해 먼저 기본 엔진 부하에 따라 암모니아가 엔진 출력에 미치는 영향을 고찰하였고, 엔진 출력에 대

한 암모니아의 기여도가 가장 큰 기본 엔진 부하를 기준으로 최적의 암모니아 분사시기와 분사량을 적용한 가솔린-암모니아 혼합연료의 엔진 성능 특성을 가솔린만을 사용한 경우와 비교하여 보았다.

Fig. 3은 가솔린의 공급량에 따른 기본 엔진 부하의 변화에 따라서 암모니아의 분사시기와 분사량에

(a) at SOI of 370 °BTDC

(b) at SOI of 320 °BTDC

(c) at SOI of 270 °BTDC

Fig. 3 Engine power versus injection duration of ammonia according to the variation of based engine load

따른 엔진 출력 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에서 살펴볼 수 있는 것처럼 암모니아의 분사시기가 빠른 370 °BTDC의 경우, 기본 엔진 부하가 적은 경우에 암모니아의 분사량이 증가할수록 엔진 출력의 증가가 크게 나타났으며, 기본 엔진 부하가 증가할수록 암모니아의 공급분사량이 증가하여도 엔진 출력의 증대는 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 CFR 엔진 특성상 전개쓰로틀 상태로 운전되기 때문에 연료량의 변화에 따른 연료-공기비의 변화에 기인한 것으로, Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼 암모니아의 분사량이 증가할수록 실제 공연비가 점점 감소하여 공급된 연료량에 대한 이론적 공연비에 근접해 연소를 촉진시켰기 때문으로 분석된다. 그러나 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 기본 엔진 부하가 증가할수록 실제 공연비가 이론적 공연비보다 오히려 낮아 농후한 혼합기를 형성함으로써 공기의 이용율이 작아져

(a) AF ratio versus injection amount of ammonia

(b) AF ratio versus based engine load

Fig. 4 Air/fuel ratio versus based engine load and injection amount of ammonia

서 충분한 연소가 이루어지지 못하여 출력 증가가 미미했던 것으로 분석된다. 이러한 현상은 암모니아의 분사시기가 320 °BTDC의 경우에도 동일하게 나타났으나, 분사시기가 270 °BTDC로 지각된 경우에는 약간 다른 양상을 보였다. 기본 엔진 부하가 3.32 bar인 경우를 제외하고는 체적효율이 증가했음에도 불구하고 암모니아의 증가에 따라 엔진 출력의 증가 기울기가 현저히 떨어졌다. 이는 암모니아의 분사시기가 가솔린의 분사시기보다 늦은 경우 연료와 공기간의 혼합이 약해지기 때문으로 사료되며, 기본 엔진 부하가 증가하면 체적효율의 증가에 따른 공기의 이용율 증가와 연료와 공기간의 난류 혼합이 촉진되어 연소율을 향상시켰기 때문으로 분석된다.

Fig. 5는 Fig. 3을 통해서 나타난 엔진 출력에 미치는 암모니아의 기여도를 고찰한 것으로, 기본 엔진 부하 조건의 변화에 따른 최대 엔진출력을 나타낸 것이다. 기본 엔진 부하가 작을 때 가솔린 출력대비 가장 큰 엔진출력 증가율을 보였으나 기본 엔진 부하가 증가할수록, 즉 가솔린의 양이 증가할수록 엔진 출력에 대한 암모니아의 기여도가 약간씩 감소함을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 것처럼 엔진부하가 증가할수록 전개쓰로틀로 운전되는 CFR 엔진 특성상 기본 부하가 높은 경우 충전효율이 작아져 공기의 이용율이 충분하지 못하였기 때문으로 분석된다. 따라서, 가솔린-암모니아를 사용할 경우 최고의 엔진 출력을 위해서는 적절한 공연비 제어가 필요하다고 판단된다.

한편, 이론 공연비에 가깝고 엔진 출력에 대한 암모니아 효과가 큰 0.65 bar의 기본 엔진부하 조건에서 최적의 암모니아 분사시기 및 분사량을 이용하여 가솔린-암모니아 연소시 엔진성능을 가솔린만 사용한 경우와 비교하여 보았다.

Fig. 6은 0.65 bar의 기본 엔진 부하조건에서 최적의 암모니아 분사시기를 적용한 가솔린-암모니아 연소시의 제동에너지소비율(BSEC)을 가솔린의 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 가솔린만을 사용한 경우와 비교하였을 때, 가솔린-암모니아 혼합 연소시에 엔진부하 변화에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있어, 가솔린에 상당하는

Fig. 5 Effect of NH₃ contribution to engine power

Fig. 6 ESEC of gasoline mod and gasoline-NH₃ mode

Fig. 7 Exhaust temperature of gasoline mode and gasoline-NH₃ mode

에너지가 암모니아로부터 공급되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 가솔린-암모니아 연소시의 배기가스 온도를 가솔린의 경우와 비교하여 나타낸 것으로, 가솔린만을 사용한 경우 엔진부하가 증가할수록 배기가스 온도가 약간씩 감소하는 경향을 보이거나 가솔

Fig. 8 Combustion efficiency of gasoline mode and gasoline- NH_3 mode

린-암모니아 혼합연소시에는 큰 변동이 없거나 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 연소 특성에서도 살펴보겠지만 가솔린만을 연소시킨 경우 엔진부하가 증가함에 따라 연소실내 혼합가스의 에너지밀도가 높아져 연소기간이 짧아져 연소가 일찍 종료되었지만 가솔린-암모니아 혼합연소시에는 연소속도가 느린 암모니아의 존재로 연소가 늦게까지 지속되었기 때문으로 분석된다. 이러한 결과로 Fig. 8에 나타난 것처럼, 가솔린-암모니아 혼합연소의 연소효율이 가솔린의 경우보다 낮게 나타났고, 엔진부하가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

3.2 연소 특성

Fig. 9는 0.65 bar의 기본 엔진부하에서 분사시기 변화와 분사율에 따른 연소실 압력과 열발생율을 나타낸 것이다. 분사시기가 이른 Fig. 9(a)의 경우 암모니아의 분사량이 증가할수록 연소실 압력과 열발생율 피크가 증가하면서 연소기간이 짧아지는 특성을 보이거나 분사율이 22ms 이상으로 증가할 경우에는 압력 피크가 증가하지 않고 연소기간도 더 이상 짧아지지 않음을 알 수 있다. 이는 전개쓰로틀로 운전되는 엔진 특성상 기본 엔진부하가 작은 상태에서는 암모니아가 증가하면서 두 연료와 공기간의 혼합이 잘 촉진되고 무엇보다도 이론 혼합기에 더 근접하기 때문에 연소가 촉진되었으나 Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼 26ms 이상으로의 과도한 분사량 증가는 오히려 이론 혼합기에서 떨어져 농후한 혼합기를 초래했기 때문으로 분석된다. 그러나 Fig. 9(b)

(a) at SOI of ammonia of 370 °BTDC

(b) at SOI of ammonia of 270 °BTDC

Fig. 9 In-cylinder pressure and HRR at base BMEP of 0.65 bar

에서 볼 수 있는 것처럼 암모니아의 분사시기가 늦어진 경우에는 암모니아의 분사량이 증가하여도 연소실 압력과 열발생율의 피크 증가가 둔화되었다.

Fig. 10과 11은 2.7 bar의 BMEP에서 가솔린-암모니아 혼합연소와 가솔린 연소시의 연소실 압력과 열발생율, 그리고 질량연소율을 비교하여 나타낸 것이다. 0.65 bar의 가솔린 기본 엔진 부하조건에서 암모니아를 370 °BTDC의 분사시기에서 17ms를 분사한 가솔린-암모니아 혼합연소의 경우, 가솔린만을 연소시킨 경우보다 연소시작 시기는 동일하였으나 연소실 압력 피크와 열발생율 피크가 낮게 나타났으며 연소기간이 약간 길게 나타났다. 또한 질량연소율(Fig. 11)도 가솔린만을 사용한 경우보다 약간 늦게 발달함을 알 수 있다. 이는 암모니아의 특성

Fig. 10 Comparison of in-cylinder pressure and HRR at BMEP of 2.7 bar

Fig. 11 Comparison of mass burning rate at BMEP of 2.7 bar

상 Table 2에서 볼 수 있는 것처럼 연소속도가 늦기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 배기 특성

Figs. 12-15는 가솔린-암모니아 혼합연소시 기본 엔진부하 변화에서 암모니아의 분사량 증가에 따른 NH_3 , NO_x , CO 및 HC의 배출특성을 각각 나타낸 것이다. NH_3 의 경우(Fig. 12), 기본 엔진부하가 작은 경우에는 암모니아의 배출량이 암모니아의 분사량 증가와 무관하게 일정하게 배출되나 기본 엔진부하가 증가함에 따라 암모니아 배출량도 증가하고 암모니아의 분사량이 증가함에 따라서도 배기되는 암모니아도 약간씩 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 기본 엔진부하가 작을 때에

Fig. 12 NH_3 emissions versus injection duration of ammonia with variations of based engine load

Fig. 13 NO_x emissions versus injection duration of ammonia with variations of based engine load

Fig. 14 CO emissions versus injection duration of ammonia with variations of based engine load

는 연소가 활발하여 공급된 암모니아의 연소율이 컸으나 기본 엔진부하가 증가함에 따라 암모니아의 연소율이 떨어져 암모니아 슬립(slip)이 증가하였기 때문으로 분석된다.

Fig. 15 HC emissions versus injection duration of ammonia with variations of based engine load

NO_x의 경우(Fig. 13), 가솔린-암모니아 혼합연소의 경우가 가솔린만을 사용한 경우보다 전체적으로 증가하였다. 이는 암모니아가 질소를 함유하고 있기 때문에 암모니아의 연소로 인해 NO_x가 증가한 것으로 분석된다. 한편, 기본 엔진 부하가 증가함에 따라 NH₃의 경우와는 정반대로 NO_x가 감소하는 특성을 보였다. 이는 연소효율이 좋은 영역에서 질소를 함유하고 있는 암모니아의 연소가 활발해져 NO_x의 생성을 촉진시켰기 때문으로 분석된다. CO의 경우(Fig. 14) 연소효율이 좋은 영역인 10 ms의 분사량에서 감소하는 특성을 보였으나 암모니아의 분사량이 증가함에 따라 연소효율의 감소로 인해 다시 증가하는 특성을 보였다. 한편, HC의 경우(Fig. 15)는 기본 엔진 부하가 증가함에 따라 전체적으로 HC이 증가하는 경향을 보였다.

Figs. 16-19는 암모니아의 기여도가 가장 높은 0.65 bar의 기본 엔진 부하조건에서 최적의 암모니아 분사시기를 적용한 가솔린-암모니아 혼합연소 시 엔진부하 변화에 따른 배기가스 배출특성을 가솔린만을 사용한 경우와 비교하여 나타낸 것이다. NH₃의 경우(Fig. 16), 가솔린만을 사용한 경우보다 가솔린-암모니아 혼합연소시기가 전체적으로 NO_x를 높게 배출하였다. 이는 암모니아가 함유하고 있는 질소가 암모니아의 연소로 인해 NO_x로 전화되었기 때문으로 사료된다. 또한, Fig. 8에서 살펴본 것처럼 엔진 부하가 증가할수록 연소효율이 떨어지기 때문에 NO_x의 배출도 약간씩 감소된 것으로 분석된다.

그러나 CO의 경우, Fig. 17에서 살펴볼 수 있는 것

Fig. 16 Comparison of NO_x emissions at performance modes

Fig. 17 Comparison of CO emissions at performance modes

Fig. 18 Comparison of CO₂ emissions at performance modes

처럼 가솔린만을 사용한 것보다 감소하는 특성을 보였다. 이는 동일 엔진출력대비 탄소를 함유한 가솔린대신 암모니아를 사용하였기 때문에 저감된 것으로 사료된다. CO₂의 배출(Fig. 18) 또한, 가솔린만을 사용한 경우보다 약간 감소하는 특성을 보여 탄소를 함유하지 않은 연료를 사용하는 궁극적인 목적이 암모니아를 통해 달성될 수 있음을 알 수 있으

Fig. 19 Comparison of HC emissions at performance modes

나, CO₂의 감소가 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 가솔린-암모니아 혼합연소시에 사용된 가솔린의 소비량(27 g/min)이 가솔린만을 사용한 경우의 소비량(30.9 g/min)과 큰 차이가 없었음을 통해 알 수 있듯이 마찰마력이 큰 CFR 엔진의 특성상 기본 부하(0.65bar)를 형성하는데 많은 에너지가 요구되었기 때문으로 사료된다. 따라서, 마찰마력이 작은 엔진에서 가솔린-암모니아 혼합연료가 적절한 공연비로 운전된다면 더 큰 CO₂ 감소가 이루어질 것으로 판단된다.

그러나, HC의 경우(Fig. 19) Fig. 8에서 살펴본 것처럼 연소효율의 저하로 가솔린만을 사용한 경우보다 높게 배출하였고, 엔진부하가 증가함에 따라 HC가 감소하는 가솔린과는 달리 동일하거나 증가하는 특성을 보여 HC를 저감시키기 위해서는 연소효율을 증가시킬 수 있는 대책이 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

가솔린 기관에서 가솔린-암모니아 혼합연료를 적용할 경우 암모니아가 연소 및 배출가스 특성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가솔린-암모니아 혼합연소시 가솔린에 의한 기본 엔진부하조건에서 암모니아의 분사시기가 진각되고 분사량이 증가할수록 엔진 출력은 증가하였으나, 가솔린에 의한 기본 엔진부하가 증가함에 따라 암모니아로 인한 최대 엔진 출력에 대한 기여도는 감소하였다.

- 2) 최대 출력을 얻기 위한 가솔린-암모니아 혼합연료의 최적 분사시기는 저부하 영역에서 320 °CA BTDC, 고부하영역에서 370 °CA BTDC로 나타났다.
- 3) 엔진 출력에 대한 암모니아의 기여도가 가장 높은 0.65 bar의 기본 엔진부하 조건에서 가솔린-암모니아 혼합연료의 연소효율은 가솔린만을 사용한 경우보다 약간 떨어지고 엔진부하가 증가함에 따라 감소하였으나, 제동에너지소비율(BSEC)은 가솔린만을 사용한 경우와 비슷하게 나타났다.
- 4) 가솔린-암모니아 혼합 연료의 연소시 가솔린에 의한 기본 엔진 부하가 증가함에 따라 NH₃, CO, HC의 배출은 증가하였고, NO_x는 감소하였다.
- 5) 가솔린-암모니아 혼합 연료의 출력 모드시 엔진 부하가 증가함에 따라 가솔린만을 사용한 경우와 비교하여 NO_x와 HC의 배출은 증가하였으나 CO와 CO₂는 감소하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 군산대학교 교수장기국외연구경비의 지원에 의해 수행된 것이며, 연구장비를 제공한 미국 Iowa State University의 Song-Chang Kong교수에게 감사를 드립니다.

References

- 1) N. Saravanan and G. Nagarajan, "Performance and Emission Studies on Port Injection of Hydrogen with Varied Flow Rates with Diesel as an Ignition Source," Applied Energy, Vol.87, No.7, pp.2218-2229, 2010.
- 2) D. J. Brodrecht and J. J. Rusek, "Aluminum-hydrogen Peroxide Fuel-cell Studies," Applied Energy, Vol.74, Issues 1-2, pp.113-124, 2003.
- 3) S. Sukuraman and S. C. Kong, "Numerical Study on Mixture Formation Characteristics in a Direct-injection Hydrogen Engine," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.35, Issue 15, pp.7991-8007, 2010.
- 4) J. M. Modak, "Haber Process for Ammonia Synthesis," Resonance, Vol.7, pp.69-77, 2002.
- 5) D. Richards and R. W. Henderson, "OTEC

- Produced Ammonia - An Alternative Fuel,” 8th Ocean Energy Conference, pp.665-673, 1981.
- 6) M. Appl, Ammonia - Principles and Industrial Practice, Wiley-VCH, Germany, 1999.
- 7) R. G. Grimes, “Energy Depot Fuel Production and Utilization,” SAE 650051, 1965.
- 8) E. Kroch, “Ammonia - A Fuel for Motor Buses,” Journal of the Institute of Petroleum, Vol.31, pp.213-223, 1945.
- 9) E. S. Starkman, H. K. Newhall, R. Sutton, T. Maguire and L. Farbar, “Ammonia as a Spark Ignition Engine Fuel: Theory and Application,” SAE 660155, 1966.
- 10) S. M. Grannell, D. N. Assanis, S. V. Bohac and D. E. Gillespie, “The Fuel Mix Limits and Efficiency of a Stoichiometric, Ammonia, and Gasoline Dual Fueled Spark Ignition Engine,” ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.130, No.4, pp.1-8, 2008.
- 11) J. T. Gray, E. Dimitroff, N. T. Meckel and R. D. Quillian, “Ammonia Fuel - Engine Compatibility and Combustion,” SAE 660156, 1966.
- 12) T. J. Pearsall and C. G. Garabedian, “Combustion of Anhydrous Ammonia in Diesel Engines,” SAE 670947, 1967.
- 13) K. Bro and P. S. Pederson, “An Experimental Investigation of Methanol, Ethanol, Methane and Ammonia in a D.I. Diesel Engine with Pilot Injection,” SAE 770794, 1977.
- 14) Iowa Energy Center, <http://www.energy.iastate.edu/Renewable/ammonia/index.htm>, 2012.
- 15) A. J. Reiter and S. C. Kong, “Demonstration of Compression-ignition Engine Combustion Using Ammonia in Reducing Greenhouse Gas Emissions,” Energy & Fuels, Vol.22, pp.2963-2971, 2008.
- 16) K. H. Ryu, G. Zacharakis-Jutz and S.-C. Kong, “Effect of Fuel Compositions on Diesel Engine Performance Using Ammonia-DME Mixtures,” SAE 2013-01-1133, 2013.
- 17) R. Liu, D. S. K. Ting and M. D. Checkel, “Ammonia as a Fuel for SI Engine,” SAE 2003-01-3095, 2003.
- 18) J. R. Bartels, A Feasibility Study of Implementing an Ammonia Economy, M. S. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 2008.
- 19) J. Jang, Y. Woo, Y. Lee and J. Kim, “The Examination on Corrosiveness of Vehicle Fuel System by Ammonia,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.669-673, 2012.
- 20) Y.-D. Kim, S.-J. Jeong and W.-S. Kim, “Effect of Water on the Kinetics of Nitric Oxides Reduction by Ammonia over V-based Catalyst,” Transactions of KSAE, Vol.20, No.6, pp.73-82, 2012.
- 21) M.-F. Hsieh and J. Wang, “Sliding-mode Observer for Urea-selective Catalytic Reduction (SCR) Mid-catalyst Ammonia Concentration Estimation,” Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.3, pp.321-329, 2011.