



1리터급 엔진을 이용한 암모니아-가솔린 혼소 성능 특성

장진영* · †우영민* · 윤형철* · 김종남* · 이영재* · 김정환**

*한국에너지기술연구원, **한국석유관리원

(2015년 11월 10일 접수, 2015년 12월 23일 수정, 2015년 12월 24일 채택)

Combustion Characteristics of Ammonia-Gasoline Dual-Fuel System in a One liter Engine

Jinyoung Jang* · †Youngmin Woo* · Hyung Chul Yoon*

Jong-Nam Kim* · Youngjae Lee* · Jeonghwan Kim**

*Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea

**Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution
Authority, 33, Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si,

Chungcheongbuk-do, 363-888, Korea

(Received November 10, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted December 24, 2015)

요 약

지구온난화와 화석연료 고갈 문제의 해결을 위하여 대체 연료 개발에 많은 노력을 하고 있다. 암모니아(NH₃)는 수소와 마찬가지로 탄소를 포함하고 있지 않으면서 대표적인 수소 캐리어이다. 또한, 상온에서 0.6 MPa 정도의 압력을 가하면 액상을 유지할 수 있어 LPG 충전인프라를 그대로 사용가능한 장점이 있다. 본 연구는 암모니아를 가솔린과 함께 혼소시켰으며, 혼소 비율에 따른 엔진 성능을 비교하였다. 암모니아와 가솔린의 혼소를 위하여 가솔린 인젝터와 암모니아용 인젝터를 각각 사용하였으며, 암모니아는 액상으로 분사시켰다. 암모니아-가솔린 혼소 엔진의 최대 장점은 가솔린 대체량에 비례하여 이산화탄소 배출량을 크게 감소시킬 수 있다는 것이다. 하지만 암모니아-가솔린 혼소율에 따라 연소가 불안정한 구간이 있었으며, 암모니아 혼소 비율 0.7 이상에서는 연소 불안정성 증가로 인해 토크와 NO_x 배출량이 감소하고, THC 배출량이 급증하였다.

Abstract - An ammonia fuel system is developed and applied to a 1 liter gasoline engine to use ammonia as primary fuel. Ammonia is injected separately into the intake manifold in liquid phase while gasoline is also injected as secondary fuel. As ammonia burns 1/6 time slower than gasoline, the spark ignition is needed to be advanced to have better combustion phasing. The test engine showed quite high variation in the power output to lead high increase in THC emission with large amount of ammonia, that is, higher than 0.7 ammonia-gasoline fuel ratios.

Key words : ammonia, dual fuel, ic engine, ammonia slip, ammonia combustion

1. 서 론

암모니아는 농업용 비료의 원료로 잘 알려진 화학

물질로 매년 1억5천만톤 이상 생산되고 있다. 암모니아 연료로서 고려되기 시작한 것은 1930년대부터로 Norway에서는 트럭용 연료로 사용하였다. 그 후 2차 세계대전과정에서 화석연료의 부족으로 인해 암모니아를 연료로 사용하는 것에 관심이 쏠리게 되었고, 1960년대에는 미국에서 전투기용 연료로 사용하였다.

†Corresponding author:ywoo@kier.re.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

그리고 2007년에는 미국에서 암모니아-가솔린 혼소 차량을 개발하였다[1~3].

암모니아를 연료로 사용하는 것에는 많은 장점이 있다. 우선, 암모니아의 연료 특성상 탄소를 포함하고 있지 않아 연소 후 배출가스에 이산화탄소, 즉 온실가스가 없어 친환경 연료라고 할 수 있다. 또한 분자구조에서 수소원자를 3개 가지고 있는 구조이기 때문에 보관과 이송이 어려운 수소를 암모니아로 합성하는 경우 수소 캐리어로 이용할 수 있다. 수소의 경우 고압가스의 형태로 보관하게 되지만 암모니아의 경우 상온에서 0.6 MPa 이상이던 LPG(liquified petroleum gas)와 같이 액상으로 변하게 되어 보관과 이송이 쉬워진다. 가격적으로는 암모니아를 생산하는데 드는 비용이 휘발유와 경유를 생산하는데 드는 비용보다 더 비싼 것으로 알려져 있으나, 국내의 경우 휘발유와 경유의 판매가격보다는 암모니아의 가격이 더 싼 것으로 알려져 있다. 그리고 더 값싼 방법으로 암모니아를 생산할 수 있다면 대체연료로서 충분한 가능성이 있다고 판단된다.

연료로서 암모니아는 별도의 부취제를 섞지 않아도 10 ppm 정도만 누설되어도 금방 인지할 수 있어 안전한 상태를 확인하기 용이하여 안전하게 사용할 수 있다. 하지만 연소속도가 느리고 발열량이 낮아 사용환경이 제한될 수밖에 없는데, 특히 엔진에 사용할 경우 엔진회전속도에 제한을 가져오게 된다. 또한 암모니아 연료 누출시 독성문제가 있기 때문에 연료 누설이 없도록 신경을 써야한다.

암모니아를 엔진의 연료로 사용하기 위한 연구에는 암모니아의 느린 연소속도를 보상하기 위해 수소를 함께 사용하는 연구가 있었다[4]. 수소를 공급하는 데는 직접 수소를 공급하는 방법도 있지만 암모니아를 분해하여 수소를 공급하는 방식도 있었다. 그리고 암모니아와 가솔린을 혼소하는 경우에 두 연료를 미리 섞은 후에 엔진에 공급하여 사용함으로써 연료의 균일도를 향상시켜 연소를 안정시키고자 하는 연구도 있었다[3~7].

본 연구에서는 인젝터를 사용한 액상분사방식으로 암모니아와 가솔린을 분사할 수 있는 시스템을 이용하여 1 리터급 가솔린 엔진에서 암모니아와 가솔린을 혼소할 경우 나타나는 연소와 배출가스 특성을 확인하여, 암모니아를 연료로 사용하는 엔진 개발에 기여하고자 하였다.

II. 시험장치 및 방법

2.1. 시험엔진

암모니아-가솔린 혼소 엔진 시험을 하기 위하여

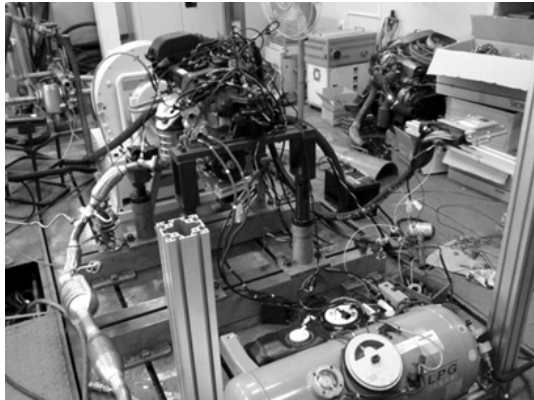


Fig. 1. Test engine setup.

Table 1. Test engine specification

| | |
|--------------------|-------------|
| Number of cylinder | 3 |
| Bore × Stroke (mm) | 71.0 × 84.0 |
| Displacement (l) | 0.998 |
| Compression ratio | 10.5:1 |

LPG와 가솔린을 선택적으로 사용할 수 있도록 LPG 연료공급시스템과 가솔린 연료공급시스템이 모두 장착된 1리터급 엔진을 사용하였다(Fig. 1). Table 1은 대상엔진의 주요제원을 나타내고 있는데, 3기통엔진으로 압축비는 10.5:1이며, 행정체적은 0.998 L이다.

실험을 위하여 LPG 연료공급시스템을 암모니아 연료공급시스템으로 수정하였다. 또한 암모니아와 가솔린을 동시에 사용할 수 있도록 엔진제어장치를 교체하였다.

2.2. 암모니아 연료 및 연료공급 장치

암모니아를 연료로 사용하기 위해서는 물성을 알아야하는데, Table 2는 암모니아와 다른 연료들의 물성을 비교하여 나타낸 표이다. 암모니아의 끓는 점이 낮아 상온에서는 기체로 존재하기 때문에 가압을 해서 액상을 유지해야하는데, 상온에서 0.6 MPa 이상이 되면 액상을 유지할 수 있다.

암모니아의 이론 공연비가 다른 연료보다 낮아 같은 공기량에서 더 많은 연료가 필요하며, 증발잠열이 크고 열량이 가솔린의 약 40% 수준이어서 동일한 연료를 공급하는 경우에 낮은 출력을 낼 수밖에 없다. 하지만 이론공연비로 운전하는 경우에는 다른 연료와 비슷한 열량을 가지므로 엔진의 출력을 유지할 수 있다.

Table 2. Fuel properties

| | Ammonia | Gasoline | Diesel | Methanol | Ethanol |
|--|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Molecule | NH ₃ | C ₇ H ₁₇ | C _{14.4} H _{24.9} | CH ₃ OH | C ₂ H ₅ OH |
| Boiling Point (oC) | -33.5 | - | - | 64.7 | 78.4 |
| (Air/Fuel)s | 6.0456 | 15.291 | 14.3217 | 6.435 | 8.953 |
| Latent Heat (kJ/kg) | 1371 | 310 | 230 | 1203 | 850 |
| Energy Content (MJ/kg) | 18.6103 | 44 | 42.38 | 20 | 26.9 |
| Energy Content at stoichiometric mixture (MJ/kg) | 2.6414 | 2.5781 | 2.7660 | 2.6900 | 2.7027 |

암모니아는 강한 부식성을 가지고 있어 고무와 플라스틱은 물론이고 구리, 알루미늄도 산화시킬 수 있다. 따라서 LPG 연료시스템에 사용되고 있는 부품재질에 대하여 암모니아와의 반응성을 확인한 후 문제가 되는 부품에 대하여 교체하였다. 대표적으로 LPG 연료 누설을 막기 위해 사용된 고무 O-ring의 경우 모두 암모니아와 반응하여 녹거나 탄성을 잃어버려 더 이상 연료 누설을 막을 수 없는 상태가 되었다. Fig. 2는 암모니아와 반응하여 형태를 잃어버린 O-ring의 모습을 나타내고 있다. 오른쪽이 암모니아와 반응하기 전의 모습이고, 왼쪽이 암모니아와 반응 후 변형된 모습이다.

연료공급시스템에서 가장 중요한 인젝터와 연료펌프의 경우 기존의 LPG 인젝터와 연료펌프를 사용할 경우 O-ring과 마찬가지로 고무류들이 암모니아와 반응을 하여 본래의 기능을 할 수 없게 만들었다. 연료펌프의 경우 LPG의 경우 연료 탱크 내부에 연료 펌프를 위치하여 사용하였으나, 암모니아의 경우에는 펌프를 연료 탱크 외부에 위치하여 암모니아와의 접촉을 최소화 하였다. Fig. 3은 외장형으로 사용된 암모니아 연료 펌프이다.

인젝터의 경우 Fig. 4에서 나타낸 것 과 같이 LPG 인젝터에서 문제가 될 수 있는 고무 O-ring을 Kalrez 재질의 O-ring으로 교체하여 사용하였다.

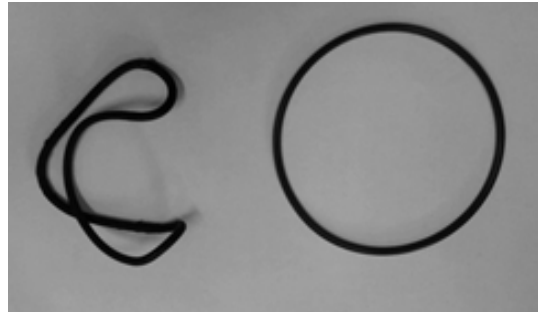


Fig. 2. Deformation of O-ring with ammonia.

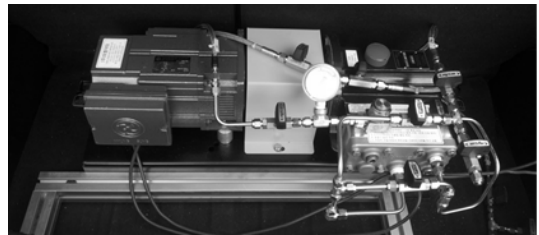


Fig. 3. Fuel pump for ammonia.



Fig. 4. Replacement of injector O-ring.

2.3. 시험방법

엔진동력계를 이용하여 엔진회전속도와 부하를 제어하면서 실험을 하였다. 암모니아는 연소속도가 가솔린의 1/6 정도 느려 엔진회전수가 높은 경우에 사용

Table 3. Test conditions for basic test

| | |
|-------------------------|------------|
| Engine speed (rpm) | 1,400 |
| Load (N.m) | 20, 40, 60 |
| Ammonia:Gasoline | 3:7, 5:5 |
| Spark timing (CAD BTDC) | 15 ~ 40 |

Table 4. Test conditions for full-load test

| | |
|-------------------------|-----------|
| Engine speed (rpm) | 1,400 |
| Load (N.m) | Full-load |
| Ammonia mixture ratio | 0 ~ 0.8 |
| Spark timing (CAD BTDC) | 15 ~ 40 |

하기 어렵고, 그에 따라 암모니아와 가솔린의 혼소 특성을 확인하기 어렵기 때문에 Table 3에 나타난 것 과 같이 1,400 rpm 운전조건에서 실험을 진행하였으며, 저·중·고 부하를 대표할 수 있는 20, 40, 60 N·m 운전 조건에서 암모니아와 가솔린의 혼소비율을 3:7, 5:5 로 하여 실험을 진행하면서 연소특성을 확인하였다. 이때 혼소비율은 공급된 연료의 발열량 비율을 나타낸다. 그리고 이혼합비에서 연소가 되도록 암모니아와 가솔린 분사량을 제어하였다.

앞서 설명한 바와 같이 암모니아의 연소속도가 느리기 때문에 기존의 가솔린 또는 LPG 연소를 위한 스파크 점화시기와 맞지 않기 때문에 15 ~ 40 CAD BTDC 사이로 바꾸어 가면서 실험을 진행하였다. 그리고 Table 4와 같은 조건에서 전부하 조건에서 최대 혼소 비율에 대한 성능실험을 실시하였다. 이때 점화시기는 MBT(maximum brake torque) 조건으로 하였다.

III. 실험 결과

3.1. 암모니아-가솔린 혼소 특성

암모니아와 가솔린을 혼소하였을 때 어떠한 연소 특성을 보이는지 확인하기 위하여 스파크플러그 타입의 압전소자형 압력센서를 사용하여 연소압력을 측정하였다. Fig. 5는 동일한 점화시기에서 가솔린 단독연소와 암모니아-가솔린 혼소의 연소압력을 비교한 결과이다. 운전조건은 1,400 rpm, 40 N.m, 암모니아:가솔린=3:7, 점화시기 20 CAD BTDC 이다. 그래프에서 보이는 것처럼 최대 연소압력 발생지점이 늦게 나타나고 연소 또한 더 오래 지속되고 있음을 확인 할 수 있다.

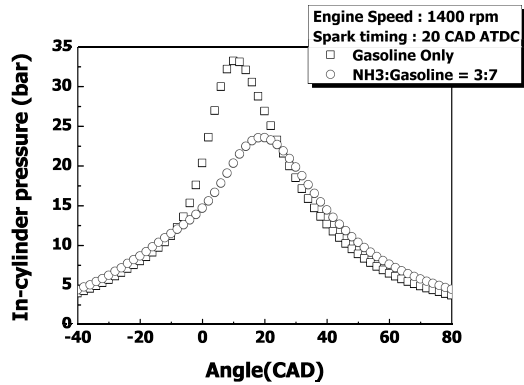


Fig. 5. In-cylinder pressure result comparing gasoline and ammonia-gasoline combustion.

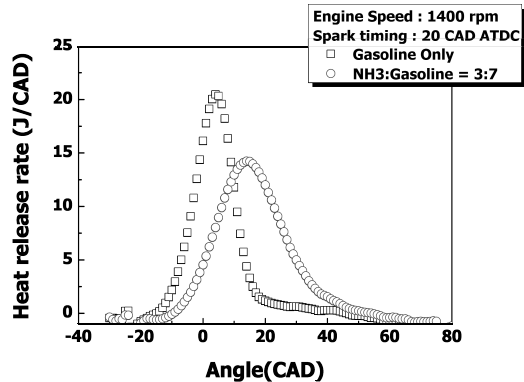


Fig. 6. Heat release rate result comparing gasoline and ammonia-gasoline combustion.

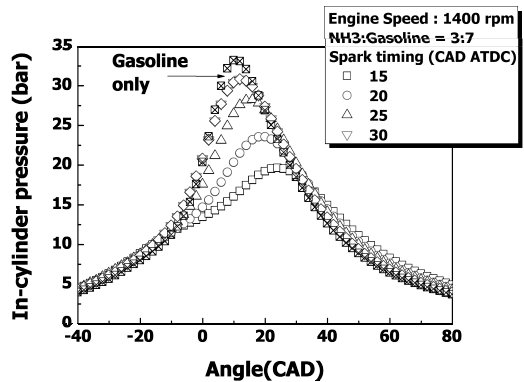


Fig. 7. In-cylinder pressure result as spark ignition timing changes.

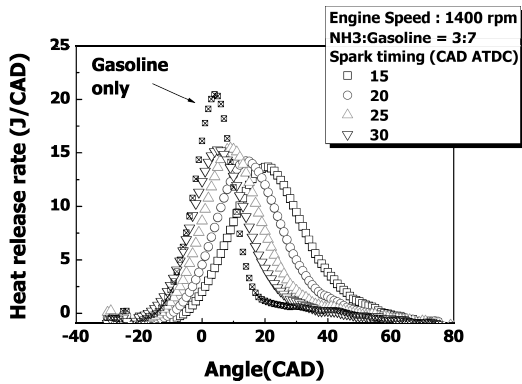


Fig. 8. Heat release rate result as spark ignition timing changes.

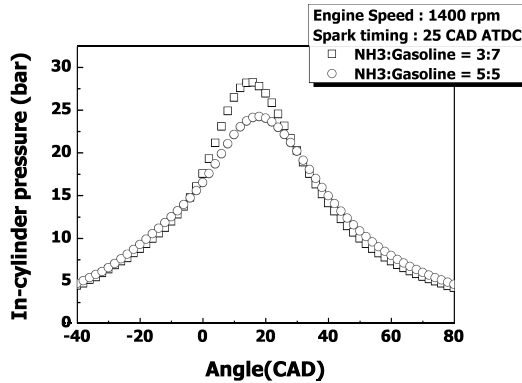


Fig. 9. In-cylinder pressure result comparing as dual fuel ratio.

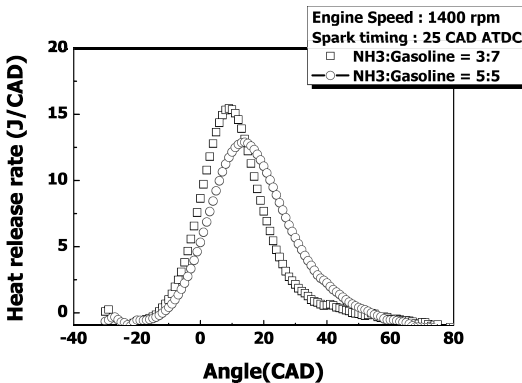


Fig. 10. Heat release rate result comparing as dual fuel ratio.

또한 동일 운전 조건에서 열방출률을 나타내고 있는 Fig. 6에서도 확인 할 수 있다. 열방출률 그래프를 통해서 연소시작시기 또한 가솔린 단독연소에 비해 늦어지고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이렇게 암모니아-가솔린 연소가 늦고 느리게 진행되는 것은 암모니아의 연소속도가 느리기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 7은 1,400 rpm, 40 N.m, 암모니아:가솔린=3:7 운전조건에서 점화시기를 15 ~ 30 CAD BTDC로 바꾸어가며 실험한 결과이다. 결과에서 나타나고 있듯이 점화시기를 진각시키게 되면 연소 시작이 빨라져 최대연소압력이 나타나는 시기가 진각된다. 같은 조건에서 열방출률을 나타내는 Fig. 8을 보면, 점화시기를 진각에 따라 연소시작점이 가솔린 단독연소 보다 더 빨라지면서 연소기간은 점점 줄어드는 모습을 보이고 있다. 이때 가솔린 점화시기는 20 CAD BTDC였다. 하지만 암모니아의 연소속도가 느리기 때문에 열방출률 최대 값이 가솔린 단독 연소와 같은 수준으로 나타나지는 않고 있다.

Fig. 9는 암모니아-가솔린 혼소비율 3:7과 5:5 일 때 연소압력을 비교한 그래프이다. 운전조건은 1,400rpm, 40N.m 이며, 점화시기는 25 CAD BTDC이다. 암모니아의 혼소 비율이 높은 경우에 최고연소압력이 낮으며, 연소기간도 긴 것을 알 수 있다. Fig. 10과 같이 연소 특성에 대하여 좀 더 분석하기 위하여 열방출률을 비교해 본 결과, 연소시작 시기는 비슷하지만 연소기간이 더 긴 것을 확인 할 수 있고, 그에 따라 열방출률 최대값이 낮아진 것을 확인 할 수 있다. 이러한 연소 형태는 역시 암모니아의 느린 연소속도에 기인한 것이다.

3.2. 암모니아 혼소 비율 실험

1,400 rpm, 60 N.m 운전 조건에서 암모니아 혼소 비율을 증가시켜 가면서 최대 암모니아 혼소비율을 확인 하여 보았다. 이때 점화시기는 MBT 조건으로 하였다.

Fig. 11 은 암모니아 혼소 비율이 증가할 때 토크와 MBT 점화시기의 변화를 나타낸 그래프이다. 토크의 경우 혼소 비율을 0~0.8 까지 변화시켜 가면서 실험한 결과, 혼소 비율 0.7 이상에서 급격한 토크 감소를 보이고 있다. 또한 암모니아 혼소 비율이 높아지면서 점화시기도 점점 더 진각되고 있다. 암모니아의 연소속도가 느려 점화시기를 진각 시켜 연소상을 가솔린 단독 연소와 비슷하게 만들어 토크를 유지할 수 있었으나, 암모니아 혼소 비율 0.7 이상에서는 그 한계를 벗어난 것으로 판단된다.

NOx의 발생량과 미연 암모니아량을 나타내는 Fig. 12와 이산화탄소와 탄화수소 배출량을 나타내는 Fig. 13에서 암모니아 혼소율 증가에 따른 연소 불안정성 증가를 다시 한번 확인 할 수 있다. NOx의 경우 연소가

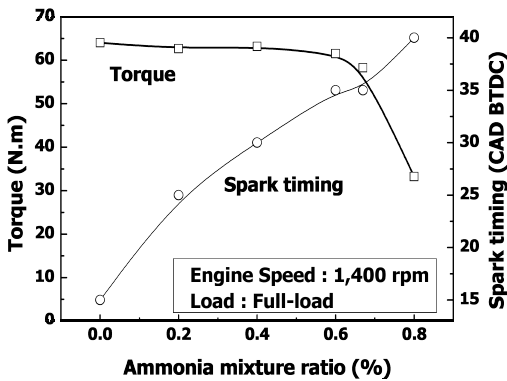


Fig. 11. Torque and spark timing at 1,400 rpm condition as ammonia mixture ratio increases.

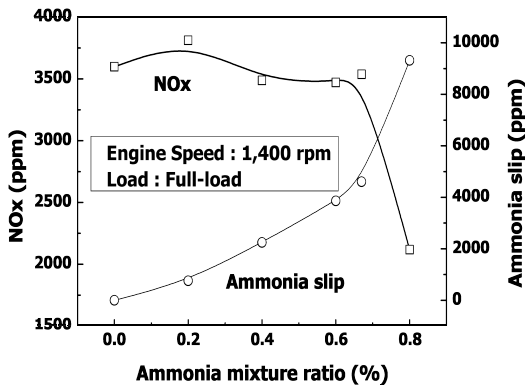


Fig. 12. NOx and ammonia slip at 1,400 rpm condition as ammonia mixture ratio increases.

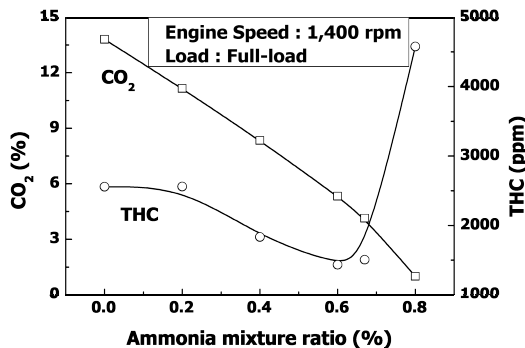


Fig. 13. CO₂ and THC at 1,400 rpm condition as ammonia mixture ratio increases.

잘 일어나는 경우 연소온도가 높아 배출량이 증가하게 되는데 암모니아 혼소 비율 0.7 이상에서는 연소불안정성이 증가하여 NOx가 감소하며, 그 때 미연되는 암모니아량도 혼소율 증가에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그리고 암모니아는 탄소원자를 포함하고 있지 않은 무탄소연료이므로 혼소율이 증가할수록 이산화탄소 발생량이 감소하는 것을 알 수 있고(Fig. 13), 또한 가솔린 사용량 감소에 따라 탄화수소 배출가스의 감소 또한 확인할 수 있다. 하지만 암모니아 혼소율 0.7 이상에서는 연소불안정성 증가로 인해 탄화수소 배출량이 급증하는 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

1리터급 가솔린 엔진에서 암모니아와 가솔린을 혼소 시킬 수 있도록 연료시스템 및 제어시스템을 구성하였다. 이를 이용하여 암모니아-가솔린 혼소에 따른 연소특성을 1,400 rpm 조건에서 연구하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 암모니아 연료시스템 구성시 암모니아의 부식성을 고려하여 변형이 일어나는 부품은 교체해야 한다.
- (2) 암모니아-가솔린 혼소시 암모니아의 느린연소 특성으로 인해 가솔린 단독연소 보다 점화시기를 전각시켜줘야 한다. 암모니아 혼소 비율 증가에 따라 점화시기는 전각되어야 한다.
- (3) 암모니아 혼소 비율이 증가하면 암모니아의 연료특성에 의해 이산화탄소 배출량이 감소하나, 암모니아 혼소 비율 0.7 이상에서는 연소불안정성 증가로 인해 토크와 NOx 배출량이 감소하고, THC 배출량이 급증한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업의 지원을 받아 수행하였습니다(B3-2423-05, B5-2447). 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

REFERENCES

- [1] Zamfirescu, C., Dincer, I., "Using ammonia as a sustainable fuel", Journal of Power Sources, Vol. 185, pp. 459-465, (2008)
- [2] NH3 fuel association website, <http://www.nh3fuelassociation.org/introduction/>
- [3] Grannell, S., *The Operating Features of a Stoichio-*

- metric, Ammonia and Gasoline Dual Fueled Spark Ignition Engine*, PhD Dissertation, The Univ. of Michigan, (2008)
- [4] Morch, C. S., Bjerre, A., Gottrup, M. P., Sorenson, S. C., Schramm, J., "Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system", *Fuel*, vol 90, pp. 854-864, (2011)
- [5] Li, J., Huang, H, Kobayashi, N, He, Z, Nagai, Y, "Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NOx formation", *Intl. J. of Energy Res.* online version. (2014)
- [6] Reiter, A. J., Kong, S-C, "Combustion and emissions characteristics of compression- ignition engine using dual ammonia-diesel fuel", *Fuel*, vol 90, pp. 87-97, (2011)
- [7] Frigo, S., Gentili, R., "Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen", *Jntl. J. of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 1607-1615, (2013)