



고고도 무인기용 수소연료엔진의 냉각수 온도변화에 따른 연소 특성

이의형 · 장형준 · [†]박철웅 · 김용래 · 최 영

한국기계연구원 그린동력연구실

(2017년 10월 25일 접수, 2018년 4월 11일 수정, 2018년 4월 12일 채택)

Characteristics of Combustion by Varying Different Coolant-temperature in a Hydrogen Engine for HALE UAV

Ui-Hyung Yi · Hyeong-Jun Jang · [†]Cheol-Woong Park · Yong-Rae Kim · Young Choi

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea

(Received October 25, 2017; Revised April 11, 2018; Accepted April 12, 2018)

요약

최근 무인기에 대한 관심과 수요가 높아지고 있는 가운데, 가동범위가 넓고 전략적으로 활용이 많은 고고도 장기체공 무인기의 동력원개발이 연구 목표로 검토되었다. 기존 왕복동 엔진에 수소 연료를 적용하는 기술은 현행으로써 적용성이 용이하고 경제적이다. 수소는 중량당 에너지 밀도가 높아서 한 번 충전으로 장시간 운항을 지속할 수 있고 환경적인 측면에서도 무공해 연료라는 긍정적인 부분이 존재하기 때문에 적합하다고 평가된다. 하지만 현재 수소연료를 왕복동 엔진에 적용한 개발사례가 적은 편이라 향후 기술적으로 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다. 항공기는 운항고도에 따라 공기밀도 저감으로 인한 냉각성능 저하 또는 복사열 감소에 의한 주변온도 강하로 과냉각이 될 수 있는 요인들이 존재한다. 따라서 본 실험은 냉각수온을 변화시켜서 이러한 주변온도 변화가 수소연료 엔진에 미치는 연소특성에 대해 살펴보았다.

역화에 의한 안정적인 운전 영역의 제한은 냉각수 온도변화에 의한 영향보다 공기과잉률에 의한 영향이 지배적으로 나타났으며, 냉각수 온도가 증가할 경우 충전효율이 감소하여 토크가 감소하고 냉각수 온도가 감소할 경우 열손실이 증가하여 열효율이 감소하였다.

Abstract - Using hydrogen fuel is expected to be suitable as a reciprocating internal combustion engine with heightened interest in HALE(High Altitude Long Endurance) UAV(Unmanned Aerial Vehicle). Hydrogen is highest energy density per mass so it can continue to charge for long periods of time and have positive part of the environmental effects. However, it is estimated that there is less research on hydrogen fuel engine currently applied, and many studies need to be done. Depending on the operation, there are factors that result in super-cooling due to reduced radiation or reduce cooling performance due to low air density. Therefore, the experiment was to change the temperature of the cooling water and investigate the effect on engine combustions.

The limitation of the stable operation range due to backfire is dominated by the excess air ratio rather than the effect of the cooling water temperature change. When the cooling water temperature increases, the volumetric efficiency decreases and the torque decreases. As the cooling water temperature decreases, the heat loss was increased and consequently the thermal efficiency was decreased.

Key words : UAV, Hydrogen, Spark ignition engine, Backfire, Air excess ratio, Coolant temperature

[†]Corresponding author:cwpark@kimm.re.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

항공 운송수단에 대한 관심과 수요가 지속적으로 증가하는 추세이다. 이런 환경 속에서 항법 제어 기술과 통신기술의 발전은 인간이 탑승할 필요가 없는 무인항공기의 개발로 분위기가 이어지고 있다. 무인항공기는 사람이 직접 탑승하지 않기 때문에 인명사고에 대한 우려가 없고 추가적인 안전장치 장치가 불필요하기 때문에 소형화, 경량화가 가능한 특징들이 있다. 또한, 이런 목적의 무인기들은 여러 가지의 크기와 형태로 제작이 가능하고 다양한 운항환경을 가질 수 있다는 장점을 지닌다.

보통 대기는 대류권의 상층부로 갈수록 복사에너지의 감소에 의해 온도가 하강하지만 공기 밀도의 감소도 같이 이뤄지기 때문에 엔진의 냉각 효율은 떨어진다. 이 때문에 동력장치로 사용되는 엔진은 지상부에서 작동될 때보다 쉽게 과열(過熱) 또는 과냉(過冷)상태가 될 수 있다. 고고도 무인항공기용으로 장착되는 엔진은 이러한 환경적인 영향과 사용되는 연료의 연소특성에 대한 연구가 필요로 하

게 된다. 한국항공우주연구원에서는 4행정 글로우 플러그 엔진을 장기체공용 무인기에 적용하기 위해 가솔린으로 개조하여 실험을 진행한 바 있다. [1,2]

내연기관에 사용되는 연료는 점차 강화되는 배기가스 규제와 한정된 자원의 매장량의 확보 등 어려움 때문에 다른 대체 에너지의 개발이 지속적으로 요구되고 있는 상황이다. 그 중 수소연료는 무한성에 가까운 매장량과 고에너지밀도의 특성을 가지고 있기 때문에 기존 화석연료에 비해 적합한 대체 에너지로 평가된다.[3] Table 1.은 가솔린과 수소의 연소적 특성을 나타낸다. 수소는 넓은 가연한계와 가솔린 대비 희박한 분위기에서 연소가 가능하기 때문에 높은 효율을 기대해 볼 수 있고, 점화에너지가 작고 옥탄가가 높아 높은 압축비 제어가 가능하다. 또한 어떠한 기후에서도 기체상태를 유지하기 때문에 낮은 주변온도에 대해 워밍업이나 냉간시동에 대한 우려가 적은 장점이 있다. 하지만 빠른 화염전파속도로 인한 안정적인 연소제어가 힘들고 단일화염온도가 가솔린 대비 높기 때문에 연소과정에서 NO_x가 더 발생하는 문제점도 존재한다.[4] 현재는 수소를 내연기관 적용하기 위해 지속적으로 기술 개발 중에 있으며 다양한 방안들이 시행되고 있다.[5~10] 수소엔진은 연료 공급방식에 따라 직접 분사식과 흡기 포트 분사식으로 나뉜다. BMW 그룹은 2000년도에 수소 및 가솔린의 듀얼모드로 운전되는 포트분사방식의 엔진을 적용한 차량을 공개한바 있다. 이후 역화방지를 위해 액체분사방식의 연료공급시스템을 적용하였으나 상용화되지는 않았다. Ford는 2003년 포트분사방식을 적용한 과급 수소엔진을 하이브리드 차량에 장착하여 실험한 결과를 발표하였다. 인도의 IIT에서는 수소연료를 점화 및 압축착화엔진에 적용하여 배출가스가 크게 개선될 수 있음을 보였다.

그중에서 흡기 포트 분사식의 수소엔진은 공기와 기상 수소연료가 혼합되는 시간이 충분하여 균일 혼합 연소가 이루어지는 장점이 있으나 흡기 대기관 쪽으로 연소실 내의 화염이 작용하여 이상연소를 일으키는 문제가 있다. 이를 역화(Back fire)현상이라 하는데 이는 엔진 연소 안정성을 떨어뜨리고 엔진 부품 내구성에도 많은 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[11,12]

직접분사식은 실린더 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 원리적으로는 역화발생의 근원적인 요인을 억제할 수 있으나 연료 분사계 부품들의 기밀성과 내구성 문제가 아직 극복해야 할 부분으로 남아 있다.[13]

역화는 주로 비교적 농후한 영역에서 잔여가스

Table 1. Comparison on Characteristics of hydrogen and gasoline (20°C, 1atm)

	Hydrogen (H ₂)	Gasoline (C _n H _{2n+2})
Specific gravity (in STP)	0.07	~ 4.0
Diffusion velocity (cm/s in Air)	~ 2	~ 0.34
Range of inflammability (Vol. %, in Air)	4 - 75	1 - 7.6
Range of explosion (Vol. %, in Air)	18.3 - 59	1.1 - 3.3
Minimum ignition energy (mJ, in Air)	0.02	0.24
Self ignition temperature (K)	858	501 - 744
Maximum rate of flame propagation (cm/s in Air)	278	37 - 43
Heating value (kcal/kg)	28,510	10,270

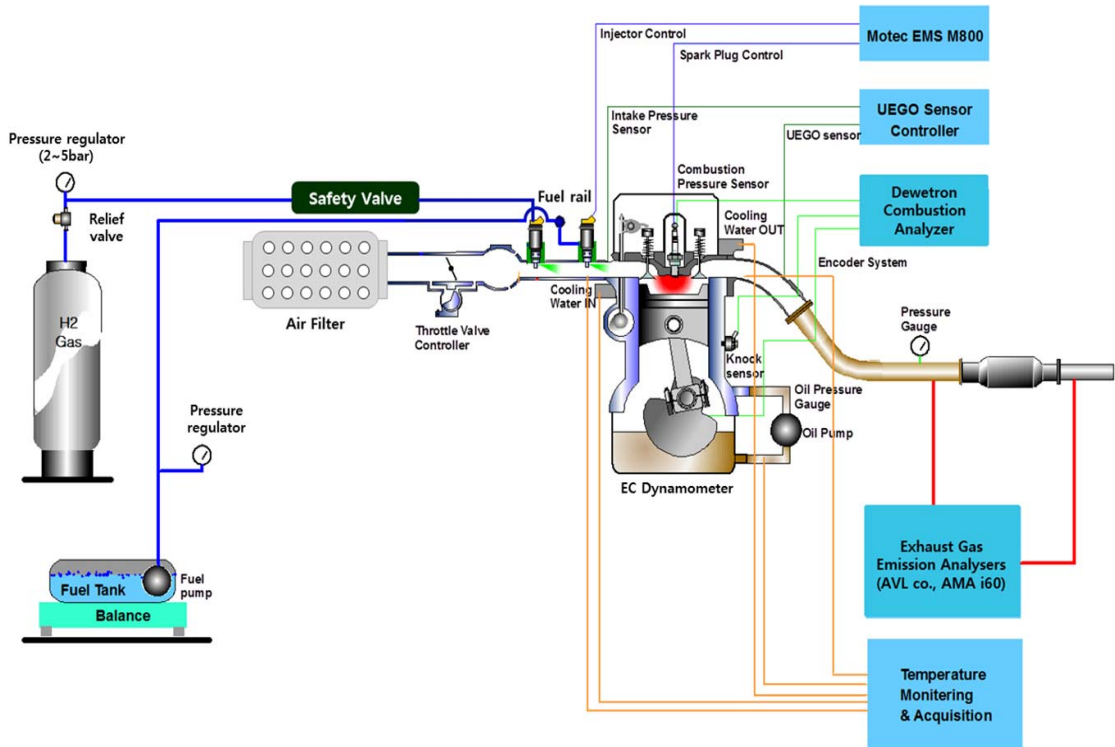


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

등에 대한 열원이 화염으로 진전되어 밸브오버랩 기간에 흡기관 내로 역류하는 현상이다. 역화를 억제하기 위해 밸브오버랩 기간을 줄이거나 흡기밸브 열림 시기를 조절하고 연료와 신기의 충분한 혼합 시간을 위해 연료시기 제어 등의 연구들이 진행되어 왔다.[14] 또한 근원적으로 열점 형성을 억제하기 위해 연소온도의 저감, 밸브 및 피스톤의 냉각, EGR 적용 등의 방법도 연구되고 있다.[15-18] 이러한 연구들은 자동차용 수소엔진 개발과 적용을 위해 오래전부터 진행되어 왔지만 수소연료의 기밀과 안정성 문제 때문에 상용화가 늦어지고 있다.[19,20]

본 연구에서는 고고도에서 장시간 임무를 수행할 수 있는 (HALE; High Altitude Long Endurance) 무인항공기(UAV; Unmanned Aerial Vehicle)의 동력원 기술 개발을 핵심 연구항목으로 삼고 기존 내연기관 왕복동 엔진에 수소연료를 적용하고자 하여, 발현되는 현상과 연소특성을 살펴보고, 안정적인 출력조건 구현과 최적화를 진행하였다. 또한, 냉각수 온도 변화에 따른 연소 특성을 살펴보고, 엔진의 이상연소 발생 경계조건을 확인하고자 하였다.

II. 실험장치 및 방법

실험 대상엔진은 무인항공기 성능 구현을 위해 150마력 이상의 출력을 기대할 수 있는 2.4리터 가솔린엔진으로 선정하였다. 수소연료의 공급은 흡기포트 분사(MPI) 방식으로 하였고 자세한 제원은 Table. 2에 기재하였다. 흡기포트분사식 엔진은 수소연료의 높은 발열량(2.8배)에도 불구하고 가스상으로 공급되는 특성 때문에 비체적이 크고, 역화 발생가능성을 낮추기 위해 희박연소를 구현하기 때문에 같은 제원의 가솔린엔진 대비 출력이 낮다. 실험에서는 기존 가솔린 엔진 맵핑 값을 참고하여 수소엔진의 실험 조건에 대한 최적화를 진행하였다. 실험 장치와 구성에 대한 정보는 Fig. 1에 나타내었다. 실험엔진은 EC 엔진동력계와 연결하여 엔진속력을 제어하였으며 각각의 부하에 따른 분사조건과 점화 제어 값은 범용 ECU(M800, Motec)를 통해 이뤄졌다. 냉각수는 기본적으로 80℃로 구동되었으며 20℃ 차이로 과냉 조건 60℃와 과열 조건 100℃로 구분하였다. 냉각수 컨트롤러의 오차범위는 약 5℃ 내외이다. 수소연료

Table 2. Specifications of the test engine

Model	Hyundai Theta II	
Number of Cylinder	4	
Intake Air	Naturally Aspirated	
Fuel Injection	MPI (Mulit Point Injection)	
Displacement	2,359 cc	
Bore x Stroke	88 mm x 97 mm	
Compression ratio	10.5 : 1	
Max Power	178 ps / 6,000 rpm	
Max Torque	23.3kgm / 4,000 rpm	
Intake CAM timing [CAD]	Open	ATDC 7 ~ BTDC 38
	Close	ABDC 67 ~ 22
Exhaust CAM timing [CAD]	Open	BBDC 44 ~ 4
	Close	ATDC 0 ~ 40

공급시스템은 가스 안전 법에 따라 실험실로부터 떨어진 수소저장고에 약 100 bar 용기에 저장, 엔진 실험실까지 수소연료라인을 설치하여 공급하였고 누수에 의한 사고를 방지하기 위해 가스 누출 감지기 및 자동 배관 차단장치를 구축하였다. 수소연료 라인 초입부와 말단부에는 레귤레이터를 설치하여 가스를 단계적으로 감압하였다. 흡기 기관에는 기존 가솔린 인젝터를 대신하여 천연가스용 인젝터 (NGI2, Bosch)를 사용하였다. 아직 수소연료용으로 완벽하게 개발이 완료된 인젝터가 없기 때문에 위 천연가스 제품으로 대체하였다. 다만 수소는 취성 (Brittleness) 때문에 장시간 접촉 시 오링이나 기타 부품에서 취화에 의한 누출(Embrittlement)이 발생할 수 있기 때문에 실험 전후 공급라인의 이상유무 확인과 정기적인 누설 점검을 수행하였다. 본 실험은 상용화 수준의 수소엔진개발을 위해 안정적인 연료공급시스템 구축과 관리에 보다 집중하였다.

각 운전조건별 엔진의 상태 등을 수록하기 위해 각종 온도센서와 압력센서들을 설치하였다. 특히 역화 발생에 대한 정확한 관찰을 위해 흡기 매니폴드 쪽에 압력센서를 설치하여 각각의 운전조건에서 모니터링 하였다. 역화 발생 여부는 우선 청각과 토크변화를 확인 후 흡기매니폴드 압력파형과 각 기

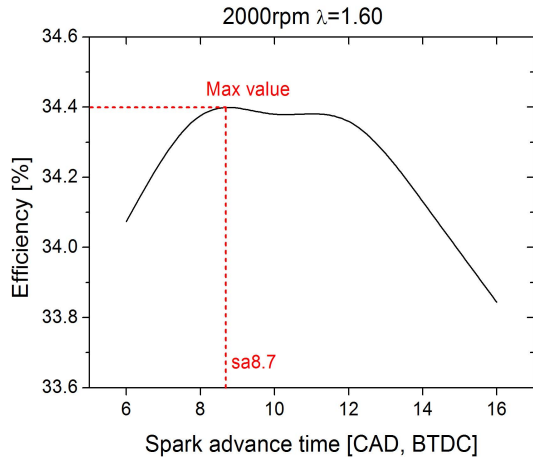


Fig. 2. Optimum ignition timing of CA50.

통별 산소센서를 통한 공연비 변화 등을 추가적으로 확인하여 판단하였다. 연소실에는 스파크플러그 일체형 압력센서(6118BFD35, Kistler)를 장착 후 연소해석기(DEWE-800-CA, Dewetron)를 통해 엔코더와 동기화 후 연소안정성(IMEPnet coefficient of variation)과 연소압력, CA50 등의 요소들을 확인하였다. 여기서 CA50은 총 누적 열방출량 기준 50%의 값을 갖는 크랭크 각도를 의미한다. 통상적으로 SI 엔진은 ATDC 10 CAD 이후에 위 값이 형성되어야 안정적이고 효율적인 연소결과로 보는데, 수소엔진의 경우 그 연료와 연소 특성 등의 차이가 있기 때문에 최적의 조건을 먼저 찾아보아야 한다. Fig. 2 과 같이 선행 실험을 통해 2000rpm 공기과잉률 1.60 기준 CA50 값이 ATDC 8.7 CAD에 위치 할 때 안정적으로 높은 출력을 내는 것을 확인하였다.

연료의 농후한 정도는 역화 발생 가능성을 높이는 요인 중 주된 이유 중 한가지로 사료되어, 공기과잉률의 차이를 1.60, 1.55, 1.50으로 나누어 실험조건을 수립하였다.

보통 가솔린 엔진의 부분부하영역에서는 밸브오버랩 기간을 두어 효율적인 연소가스의 배출과 공기의 유입을 돕는다. 하지만 수소 엔진에서는 밸브오버랩 기간이 길면 이상연소의 주된 요인으로 작용하기 때문에 본 연구에서는 밸브오버랩을 최소화하는 밸브타이밍을 적용하였다. 흡기 스토폴은 모두 개방한 상태(WOT; Wide Open Throttle)에서 연료분사시기는 BTDC 240 CAD, 캠 밸브 타이밍은 흡기캠 IVO BTDC 3 CAD, 배기캠 EVC ATDC 40 CAD의 값을 갖는다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 점화시기 변화에 따른 출력 특성

최대 출력에 대한 점화시기는 일정조건에서 엔진의 성능을 알아볼 수 있는 지표로, Fig. 3에 나타난 것과 같이 각 점화시기 조건을 2 CAD 간격으로 나누어 BTDC 6 CAD에서 BTDC 14 CAD까지 진행하였다. 다른 운전조건을 일정하게 하고 공기과잉률을 감소시킬 때, 역화가 발생하지 않고 정상적인 운전이 가능한 농후한 운전조건은 공기과잉률 1.50으로 제한되었다. 이때 각각의 냉각수 온도를 80℃ 기준으로 냉각조건인 60℃와 과열조건인 100℃로 나누어 비교하였다. Fig. 3.를 보면 공기과잉률 λ 1.60, λ 1.55, λ 1.50 조건 모두 각각의 최대출력을 보이는 최적 점화시기는 냉각수 온도 변화에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 볼 수 있다.[21] λ 1.60의 경우 대략 BTDC 10 CAD, λ 1.55의 경우 BTDC 8 CAD, λ 1.50의 경우 BTDC 8 CAD보다 조금 지각된 점화시기를 갖는데 최대출력에 영향을 미치는 인자로서 냉각수의 온도보다는 공기과잉률에 따른 혼합기의 농후함이 더 크다는 것으로 판단된다. 동일 공기과잉률 조건에서도 각각의 냉각수 온도에 따라 최적 점화시기에 따른 최대 출력에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 공기과잉률 λ 1.50에서 각각의 냉각수 온도별 열방출률 비교 곡선이다. 열방출률 곡선의 폭이 좁고 최고점이 위로 길게 형성될수록 빠른 연소속도를 갖는다고 볼 수 있다. 하지만 세조건 모두 곡선 형태가 거의 일치하기 때문에 실제 냉각수 온도는 연소속도에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

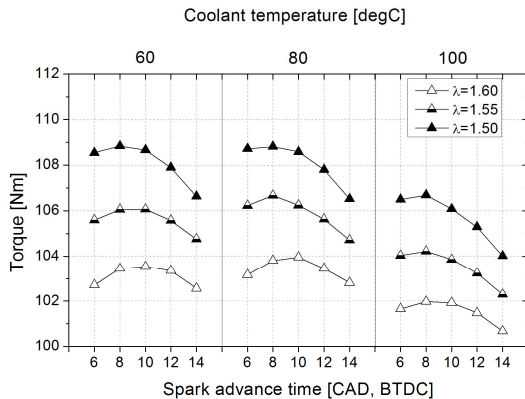


Fig. 3. Full load torque of each coolant temperature conditions.

3.2. 냉각수온 변화에 따른 효율 특성 분석

Fig. 3에서 냉각수 온도 80℃에서 가장 높은 토크 값을 갖고, 60℃와 100℃ 모두 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그 중 60℃보다 100℃에서 더 큰 출력의 감소를 볼 수 있다. 이는 냉각수 온도가 연소에 미치는 영향으로 볼 수 있으며, 연소해석기를 통한 열방출률을 비교해 보았다. 다른 영향인자로서 충전효율(Charging efficiency)과 열효율(Thermal efficiency)의 실험 결과를 분석해 보기로 하였다.

냉각수 온도가 80℃보다 낮을 때 최대 출력이 감소하는 이유는 연소실에서 발생하는 연소열이 실린

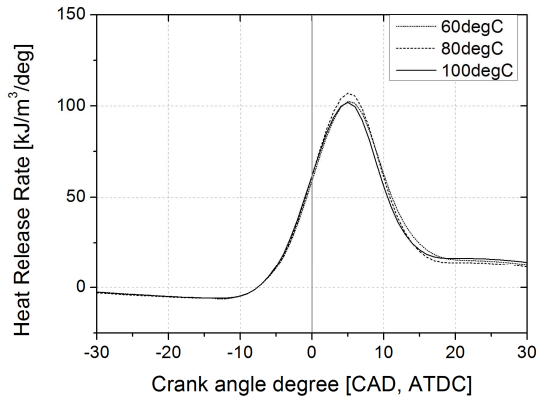


Fig. 4. Heat release rate of each coolant conditions.

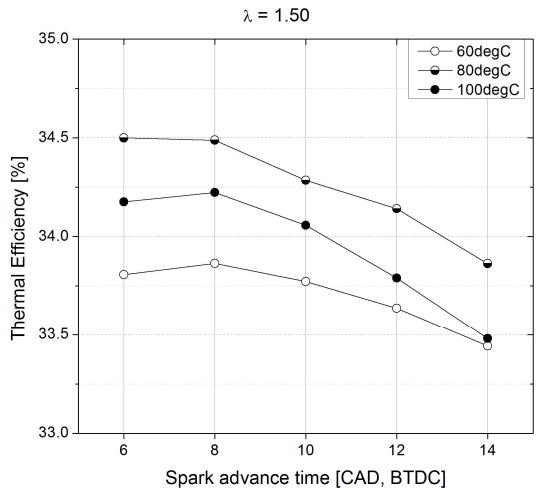


Fig. 5. Thermal efficiency of each coolant conditions.

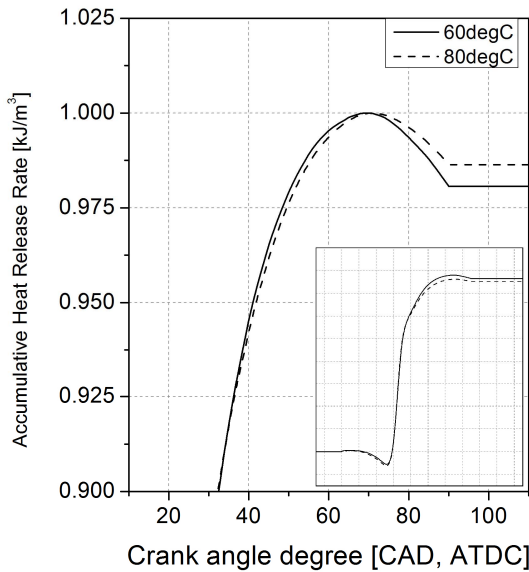


Fig. 6. Normalized heat release rate with each coolant temperature.

더 벽면으로도 전달되는데 주변냉각효과가 커지면 열손실이 증가하는 것으로 사료된다.[22] 60℃ 냉각수 온도 조건의 경우에도 이러한 열손실로 발생하는 부분 때문에 출력의 감소가 일어난 것으로 판단된다. 냉각수온도가 감소하면 연소실 온도저감에 의한 역화 가능성의 감소로 보다 농후한 혼합기 조건에서 연소가 가능할 것으로 예측하였으나, 공기과잉률이 1.50이하로 농후하게 되면 역화가 발생하였다.

Fig. 5는 각 냉각수 온도별로 점화시기, 공기 과잉률을 1.50을 일정하게 하였을 때, 열효율을 나타낸 그래프이다. 냉각수 온도가 60℃ 조건은 모든 점화시기 조건에서 낮은 열효율을 보여주고 있다. 앞선 효율 값이 단순한 출력에 따른 연료 발열량 계산에 의한 것이기 때문에 실린더 내의 연소과정을 확인해 보았다. Fig. 6은 세 온도조건의 누적 열방출률 최대치를 일치시켜 정형화 한 그래프이다. 최대 피크 이후 감소되는 행정을 갖는데 이 부분의 감소폭이 많을수록 열 손실이 많이 일어난다고 볼 수 있다. 위 그래프에서도 80℃에 비해 60℃의 경우가 더 감소하는 경향을 볼 수 있다.

반대로 냉각수 온도가 증가하면 연소실 및 흡기 매니폴드의 온도가 증가하여 1.50의 공기과잉률 조건에서도 역화발생에 의해서 안정적인 연소가 어려울 것으로 예상하였으나, 냉각수 온도의 상승이 공기과잉률에 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 100℃ 냉각수

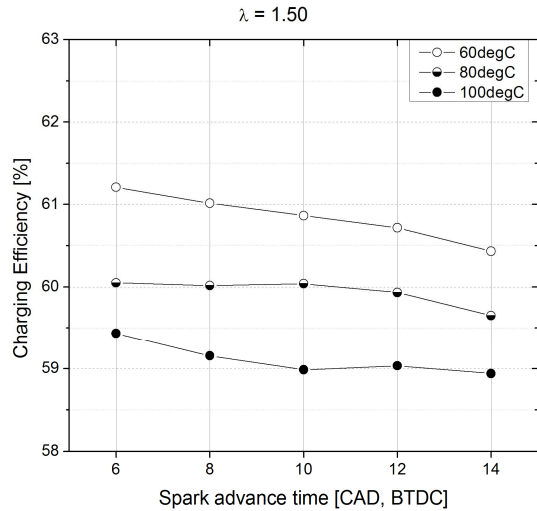


Fig. 7. Charging efficiency of each coolant conditions.

온도 조건의 경우도 낮은 효율을 보여주는데, 고온의 온도가 흡기다기관과 전체적인 연소실의 온도를 높여줌으로써 충전효율을 저감 시켜 출력이 감소한 것으로 판단된다. 이러한 충전효율의 저감은 결국 온도에 따른 기체의 체적 변화와 밀접하기 때문에 가스연료를 사용하는 엔진에서 더 큰 현상을 보인다. Fig. 7은 냉각수 온도별로 각각의 조건에 맞게 충전효율을 나타낸 것이다. 냉각수 온도 100℃ 조건이 가장 낮은 충전효율을 보여준다. 동일 최대출력 조건일 경우 과냉에 의한 열효율 감소와 출력손실 보다는 과열에 의한 충전효율 감소와 출력손실이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다.

위와 같이 본 연구에서 냉각수 온도의 변화가 수소연료 엔진에 미치는 출력감소 현상 그리고 연소 특성은 고고도 무인기용 엔진의 연료로서 상용화가 되기 위해서 앞으로도 다양하게 연구되어야 할 것으로 보았다. 또한 더 넓은 온도조건에 대해서 최적화가 이뤄져야 할 것으로 판단되고 이상연소의 해결책이 무엇보다 필요한 것으로 생각된다.

V. 결론

2.4 리터의 흡기포트 분사형 엔진에 수소연료를 사용하여 냉각수 온도 변화에 따른 연소 특성을 실험해 본 결과 다음과 같이 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 역화에 의한 안정적인 운전 영역의 제한은 냉

각수 온도변화에 의한 영향보다 공기과잉률에 지배적으로 영향을 받는다.

(2) 수소엔진에서 냉각수 온도가 높아질수록 기상연료의 특성 때문에 충전효율 감소가 커지고 이에 따라 출력은 감소하지만 역화는 발생하지 않는다.

(3) 수소엔진에서 냉각수 온도가 낮아지더라도 농후한 혼합기 조건에서 역화가 발생하고, 연소실 벽면으로 전달되는 열손실이 증가하여 열효율이 감소한다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 협동연구사업 및 한국기계연구원의 자체사업 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Shin, Y., Chang, S., Koo, S., "Test and Simulation of an Engine for Long Endurance Miniature UAVs", J. of KASS, 5, 99-105, (2005)
- [2] Lim, B., Rhee, D., "Research and Development Trends of High Altitude Long Endurance UAV using Hydrogen Reciprocating Engine", Current Industrial and Technology Trends in Aerospace, 13(1), 179-186, (2015)
- [3] Bae, C. S., "Hydrogen Internal Combustion Engine Technology", Auto-journal, 44, 44-52, (2006)
- [4] Lee, J. H., "A Study on the Hydrogen Engine Combustion Characteristics", Auto-journal, 28, 26-33, (2006)
- [5] Swain, M. R., "Hydrogen-fueled automotive engine experimental testing to provide an initial design-data base", SAE paper 810350, (1981)
- [6] Das, L. M., "Exhaust emission characterization of hydrogen-operated engine system: Nature of pollutants and their control techniques", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 11, pp. 765-775, (1991)
- [7] Dunn, S., "Hydrogen futures: towards a sustainable energy system", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 27, pp. 235-264, (2002)
- [8] Eichlseder, H., "The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario", SAE paper 2003-01-2267, (2003)
- [9] Berckmuller M., "Potentials of a charged SI-hydrogen engine", SAE paper 2003-01-3210, (2003)
- [10] Verhelst, S., Sierens, R., and Verstraeten, S., "A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines", SAE Paper 2006-01-0430, (2006)
- [11] Kim, J. M., Kim, Y. T., Lee, J. T., Lee, S. Y., "Performance characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System", SAE paper 952488, (1995)
- [12] Lee, J. T., Kim, Y. Y., Lee, C. W., "Investigation of a Cause of Backfire and its Control due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", ASME 34-3, (2000)
- [13] Wimmer, A., Wallner, T., Ringler, J., Gerbig, F., "H2-Direct Injection - A Highly Promising Combustion Concept." SAE Paper 2005-01-0108, (2005)
- [14] Lee, K. J., Thanh, C. H., Kang, J. K., Lee, J. T., "Back-Fire Control of a Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture by Using Intake Valve Opening Timing", KSAE Annual Autumn Conference, pp. 600-605, (2008)
- [15] White, C. M., "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 31, pp. 1292-1305, (2006)
- [16] Choi, Y., "A study on the improvement of combustion and emission performance in an EGR-assisted gasoline engine in dual-fueled with hydrogen", KSAE 30th anniversary conference, (2008)
- [17] Verhelst, S. and Wallner, T., "Hydrogen-fueled internal combustion engines", Prog Energy Combust Sci, Vol. 35, No. 6, pp. 490~527, (2009)
- [18] Lim, G. H., Lee, S. W., Park, C. W., Choi, Y. and Kim C. G., "Effect of ignition timing retard strategy on NOx reduction in hydrogen-compressed natural gas blend engine with increased compression ratio", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 39, pp. 2399-2408, (2014)
- [19] Metz, N. (BMW Group), "Hydrogen - The Alternative Fuel for Future Powertrain", FISITA 2002, World Automotive Congress, Helsinki, June 4, (2002)
- [20] Tang, X., "Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development", SAE paper 2002-01-

0242, (2002)

- [21] Brussovansky, S., Heywood, J. B., Keck, J. C.,
“Predicting the Effects of Air and Coolant
Temperature, Deposits, Spark Timing and
Speed on Knock in Spark Ignition Engines”,

SAE paper 922324, (1992)

- [22] Yoo, I.K., Simpson, K., Bell, M., Majkowski,
M., “An Engine Coolant Temperature Model
and Application for Cooling System Diagno-
sis”, SAE paper 2000-01-0939, (2000)