

## 수소가 첨가된 천연가스의 비정상연소특성에 대한 수치해석적 연구

오태균\*<sup>†</sup>

\*동양미래대학교 기계공학과

A Numerical Study of Unsteady Combustion Characteristics of H<sub>2</sub> Enriched Natural GasTae-Kyun Oh\*<sup>†</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University

(Received 26 January 2023, Received in revised form 27 January 2023, Accepted 27 January 2023)

## ABSTRACT

The increase of 1.5°C global warming above the pre-industrial level has directly caused large risks of ecosystem and human life as well as severe changes in the climate. Electricity production in Korea is achieved in a large portion(44% as of 2020) by coal thermal power generation during which it discharges greenhouse gases, PM and nitric oxide responsible for photochemical smog in a crowded city. The hydrogen enriched LNG is a powerful alternative of coal as a fuel generation because it emits less pollutants and is considered a clean fuel for thermal power generation. In the present study, combustion analyses have been numerically done on various mixed fuels of methane, ethane and hydrogen as a model of hydrogen enriched natural gas in a gas turbine combustor. GRI3.0 kinetic mechanism which consists of 53 chemical species and 325 reaction steps has been used to calculate steady and unsteady combustion process of hydrogen enriched natural gas. Emissions, heat release rate and ignition delay time in a premixed flame have been numerically investigated through post-processing procedure to simulate gas turbine combustion in a thermal power station.

**Key Words** : Carbon neutrality, Hydrogen, Gas turbine, NO<sub>x</sub>, Ignition delay time

## 기 호 설 명

LNG	: liquefied natural gas	IT	: ignition temperature(°C)
NDC	: nationally determined contribution	FL	: flammability limit
$T_{max}$	: maximum temperature(K)	V	: axial velocity(cm/s)
LHW	: lower heating value(MJ/m <sup>3</sup> ) at 0°C, 1 atm	$\phi$	: equivalence ratio
MW	: molecular weight(g/mol)	$t$	: elapsed time(ms)

## 1. 서 론

에너지는 국가 산업화의 진전과 경제발전에 따라 사용량이 지속적으로 증가한다. 화석연료(fossil fuel)는 다른

에너지원에 비해 사용과 보관에 상대적으로 편리한 에너지이다. 석탄은 18세기 산업혁명 이후 사용되기 시작하였고 20세기 초부터 석유의 사용이 일상화되었다. 그러나 산업혁명 이후 지난 200여 년 동안 지구 각 지역의 도시화와 산업화에 따른 화석연료 사용량의 급증은 지구환경의 생태계를 크게 교란하는 주원인으로 지목되고 있다. 지구는 온난화에 따른 홍수, 가뭄, 태풍, 폭염 등의 이상 기후에 빈번하게 노출되고 있고 더불어 대기오염으로 인한 도시지역의 잦은 스모그와 미세먼지가 건강을 위협하기에 이르

<sup>†</sup>Corresponding Author, [tko@dongyang.ac.kr](mailto:tko@dongyang.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

렸다. 심화하는 대기오염과 지구온난화로 인한 각종 부작용으로 인해 선진국을 중심으로 편리하고 안정적인 화석 연료의 사용량을 의무적으로 제한·감축하도록 하고 친환경 에너지인 태양광, 풍력, 수력 등의 사용을 강력하게 권장하고 있다. 그러나 친환경에너지의 단점인 제한적 에너지의 취득 환경, 경제성 부족, 낮은 에너지 밀도 등의 문제가 우선 해결해야 할 과제로 부상하고 있다.

기존의 선진국에 더하여 인구 대국인 중국과 인도 등의 급속한 산업화는 지구온난화 문제를 더욱 심화시켰다. 이는 1997년 우선 선진국부터 온실가스의 감축 의무를 부과함으로써 온실가스의 주배출원인 화석연료의 사용을 제한하려는 교토의정서(Kyoto Protocol)의 채택으로 가시화되었다. 2015년 파리에서 선진국과 개발도상국을 포함한 196개국의 참여로 온실가스 감축안에 동참하는 파리협정(Paris Agreement)을 도출하였고 2016년 한국을 포함한 174개국이 이 협정서를 준수하기로 서명하였다. 파리협정의 주요 내용은 전 지구적 장기온도 목표로서 산업화 이전(pre-industrial, '1850년~1990년' 기간의 지구평균온도) 대비 지구 평균 기온 상승을 2°C보다 낮은 수준으로 유지하고 1.5°C 이하로 상승을 억제하려고 노력한다는 것이다[1]. 파리협정 이후 세계 각국은 2050년에 탄소의 순환배출량이 0이 되는 탄소중립사회(carbon neutrality)를 목표로 구체적인 달성연도를 선언하고 있다. 한국은 2020년 10월 대통령의 국회 시정연설에서 미국, EU, 일본 등의 선진국이 제시한 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 제시하였다. 또한 2021년에는 “국가결정 기여(nationally determined contribution, NDC)”를 상향하여 조정하였고 이의 핵심적 내용으로는 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년 배출량 대비 40% 감축시키고 또한 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위한 목표를 제시하였으며 현재 이 목표를 향해 가고 있다.

해방 이후 중공업 분야의 산업화를 통해 개발도상국에서 선진국으로 진입한 한국은 화석연료의 사용량이 세계의 어느 나라보다도 급속하게 증가하였다. 특히 전기를 생산하는 발전 분야에서는 2020년 기준으로 석탄발전 44%, 원자력발전 39%, 액화천연가스(LNG)발전 15%, 수력 1.7%로 화석연료를 주연료로 활용한 화력발전이 가장 높은 비중을 차지하고 있다[2]. 한편 선진국을 중심으로 활발하게 논의되고 있는 재생에너지(renewable energy)의 발전비율은 2019년 기준 한국은 2.4%로 집계되었는데 이는 OECD 국가인 이탈리아 18.2%, 독일 14.6%, 영국 12.5%, 프랑스 10.7%, 미국 7.9%, 일본 6.2% 등에 비해 현저하게 낮은 수준으로 미래 탄소배출을 제한하는 규제 조치에 부정적으로 작용할 전망이다[3].

2021년 10월 영국 글래스고에서 개최된 당사국총회(COP26)에서는 저감장치 없는 석탄발전소(unabated coal power)의 단계적 감축(phase down) 및 비효율적인 화석연료 보조금의 단계적 폐지를 위해 노력한다는 내용이 한 분야로 다루어졌다. 이런 시대적 조류에 맞춰 한국도 온실가스 배출량을 줄이기 위해 발전원 중 가장 비중이 높은 석탄 화력발전으로부터 시급히 탈피해야 한다. 이를 위해 저탄소 배출 화석연료인 LNG를 활용하거나 기존의 가스터빈 연소기에 탄소가 포함되지 않은 연료인 수소(H<sub>2</sub>) 또는 암모니아(NH<sub>3</sub>) 연료의 이른 도입이 필요하다. 현재 상대적으로 청정연료인 LNG 화력발전소에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위해서는 가스터빈의 효율을 향상하거나 탄소를 포함하지 않은 연료의 도입이 고려되고 있다. 그러나 가스터빈 효율의 향상은 이제 거의 한계에 도달했다는 분석을 고려하면 기존의 저탄소 배출 연료인 천연가스에 수소를 첨가하여 혼소하는 가스 화력발전 방식이 최근 강력한 대안으로 부상하고 있다. 현재 가스터빈 생산업체는 물론 가스터빈으로 발전을 하는 각국의 화력발전소의 연구원 및 학계에서도 천연가스에 수소를 첨가한 복합가스 화력발전용 가스터빈의 개발과 성능향상에 대한 연구개발에 인적, 물적 자원을 집중하고 있다[4].

탄소중립의 시대에 부응하기 위해 탄소를 배출하지 않는 청정연료인 수소는 수송용 연료로서도 주목받고 있으며 LNG용 가스터빈을 대체하기 위해 선진 가스터빈 생산업체에서도 2030년을 수소 전소 가스터빈 개발을 목표로 연구개발이 진행되고 있다. 수소는 천연가스의 주성분인 메탄에 비해 단위 체적당 발열량이 적다. 또한 화염온도가 높아 열적 질소산화물(thermal NO<sub>x</sub>)의 배출이 심하게 증가하며 화염전파속도가 매우 빠르므로 역화(flashback) 발생의 우려가 있어 보관 및 활용의 안정성에 특별히 주의해야 한다. 선진 산업체와 학계에서도 천연가스에 수소의 혼소비율을 증가시키면서 연소특성을 해석하는 연구가 진행되고 있다[4-7]. 본 연구에서는 메탄(CH<sub>4</sub>)과 에탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)으로 구성된 천연가스에 수소(H<sub>2</sub>)를 첨가한 연료를 대상으로 정상상태와 비정상상태에서의 연소특성 해석을 위해 수치계산을 수행하였다. 수소를 첨가하지 않은 천연가스에 대한 계산과 더불어 수소의 비율을 10%, 30%, 50%까지 증가시키면서 발생하는 예혼합화염의 온도와 점화가 발생하는 시기 및 질소산화물의 배출 경향을 살펴보았다. 전 세계적인 온실가스 저감과 대기오염물질 감축을 통해 탄소중립을 실현하려는 정부의 노력에 부응하고 국제협약의 이행에 효율적으로 대응하기 위한 연소해석 기초 자료로서 본 연구결과를 활용하고자 한다.

## 2. 가스터빈 고찰 및 수치해석 모델링

### 2.1 가스터빈의 구조와 열역학적 사이클

일반적으로 화염은 연소 직전에 연료와 산화제의 혼합 여부에 따라 예혼합화염과 확산화염으로 대별된다. 화력 발전 장치에서 주요 동력원인 가스터빈은 Fig. 1과 같이 연소기(combustor) 내부에서 압축된 공기와 연료의 혼합기를 연소시키고 이때 발생한 고온·고압의 연소가스를 터빈에서 팽창시켜 터빈 날개를 회전시킴으로써 발전을 한다.

열역학적으로 가스터빈은 정압과정과 가역단열과정으로 구성된 브레이튼 사이클(Brayton cycle)로 작동하는 것으로 해석한다. 가스터빈은 전기발전용으로 활용되므로 큰 추력과 1500℃ 이상의 고온을 견딜 수 있는 내구성, 높은 열효율 및 신뢰성과 편리한 정비성 등이 필수적으로 요구되고 있다. 지금까지 국내에 공급된 발전용 가스터빈은 160기 이상으로 전량 외국에서 수입해 화력발전소에 활용되고 있다. 국내에서는 2013년부터 두산에너지빌리티의 주도하에 학계, 전력회사, 연구기관 및 중소기업 등이 참여하여 270 MW급 발전용 가스터빈을 독자적으로 개발하여 2022년 김포 열병합발전소에 설치하였고 이 기간 내에 수소 전소용 가스터빈 기술 확보를 목표로 개발이 진행되고 있다[8].

### 2.2 가스터빈의 청정연료

지난 한 세기 이상 에너지원 중에서 가장 큰 비중을 차지했던 석유는 온실가스로 인한 지구온난화를 유발하였으며 석탄은 온실가스 배출은 물론 초미세먼지, 질소산화물, 황산화물 등 심각한 대기오염 배출의 주범으로 인식되고 있다. 파리협정을 준수하고 탄소중립을 실현할 에너지원으로는 전술한 바와 같이 수소 또는 암모니아가 강력하게 부상하고 있다[8]. 2021년 한국이 국제사회에 약속한 NDC를 지킬 경우 2050년까지 탄소중립을 실현할 그린뉴딜 정책을 완수할 수 있으며 이를 위해 화력발전원으로 현재 비중이 가장 높은 석탄의 비중이 대폭 축소되어야 한

다. LNG 발전은 석탄에 비해 탄소배출량을 최대 60%까지 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 앞으로 화력발전에서는 석탄의 발전비중을 점진적으로 줄이고 탄소배출량이 적은 순수 LNG 발전이나 LNG에 온실가스를 전혀 배출하지 않는 수소를 첨가한 복합가스 발전의 비중이 점차 증가할 것이다. 화력발전업체에서는 수소 혼소율 30%의 가스터빈 개발로 2035년을 목표로 설정하고 있다. 궁극적으로 화력발전 분야에서는 탄소중립이 완성되는 2050년 기존의 화석연료 대신 수소와 암모니아로 100%로 대체하는 것을 목표로 하고 있다.

유정의 지하에서 채굴하는 천연가스(LNG)는 주성분으로 메탄( $\text{CH}_4$ )이 90% 이상이고 그 외에 에탄( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), 프로판( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), 부탄( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), 펜탄( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) 등의 탄화수소 계열의 성분이 섞여 있다. 천연가스 생산지(카타르, 호주, 미국 등)의 위치에 따라 그 성분은 조금씩 상이하다. 아래 Table 1에 메탄, 에탄, 액화천연가스( $\text{CH}_4$  90%,  $\text{C}_2\text{H}_6$  7%,  $\text{C}_3\text{H}_8$  2% 등) 및 수소( $\text{H}_2$ )의 대략적인 연료특성이 표시되어 있다. 온실가스를 줄이기 위해 수소를 첨가한 천연가스 화력 발전에서는 연료로서의 수소의 연소특성을 파악하고 이를 가스터빈 설계에 반영해야 한다. 수소는 천연가스에 비해 가벼워 확산이 빠르고 동일 체적당 발열량이 1/3 이하로 낮기 때문에 많은 체적의 연료가 필요하다. 또한 수소는 LNG에 비해 화염전파속도가 8~10배 빠르기 때문에 역화(flashback)가 발생할 수 있고 이는 가스터빈의 연료 노즐 등을 파손시킬 수 있다. 따라서 기존의 천연가스용 가스터빈의 연소기 설계의 변경을 통해 역화 발생에 대한 대비책을 수립해야 한다. 한편 수소는 LNG에 비해 공기 혼합물 비율(%)인 가연범위(flammability limits)가 넓고 단열화염온도가 높은 것으로 알려져 있다. 이것은 높은 화염온도로 인한 질소산화물(thermal  $\text{NO}_x$ )의 배출이 더욱 증가한다는 것을 의미한다. 그러나 연료로서 수소의 청정성 및 넓은 가연범위 이외에 수소의 강한 화학반응성은 저부하 상태의 가스터빈 운전에서도 안정성을 확보할 수 있는 장점을 갖고 있다[4].

2015년 파리협정 이후 국내에서 2021년 제시된 NDC를 만족시키기 위해서는 석탄발전 대신에 LNG 발전의 확대

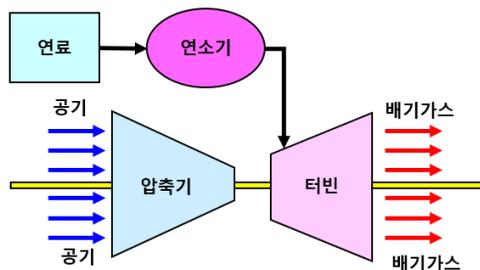


Fig. 1. Gas turbine configuration.

Table 1. Fuel characteristics for thermal power generation

Fuel type	MW(g/mol)	IT(°C)	LHV(MJ/m <sup>3</sup> )	FL(%)
H <sub>2</sub>	2	500	10.8	4~75
CH <sub>4</sub>	16	595	35.9	5~15
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	515	64.4	3~13
LNG	17.4	-	40.0	-

및 수소의 혼소비율 확대에 따른 천연가스 발전의 선행연구와 개발이 시급하게 진행되어야 한다. 이를 통해 연료의 급속한 변경에 따른 가스터빈 연소기의 재설계 및 신규 설계가 효율적으로 이어져야 한다.

### 2.3 예혼합화염과 수치해석을 위한 모델링

화력발전용 가스터빈에서의 연소모델인 예혼합화염은 연료와 산화제가 화염에 도달되기 이전에 분자적으로 잘 혼합된 형태의 화염이다. 화염전파속도는 열과 물질의 확산과 화학반응물에 의해 결정되는데 화학반응물의 유한성이 해석상의 어려움으로 작용한다. 가스터빈에서 연료의 점화는 극히 짧은 시간 내에 이루어진다. 연소현상의 해석을 위해서는 점화로부터 시작되는 연소 이전에 큰 영향을 미치는 유동장의 해석이 선행되어야 한다. 또한 수십 개의 화학종과 수백 개의 화학반응단계로 구성된 연소해석의 복잡성과 화학반응에 수반되는 Arrhenius의 형태의 비선형성은 연소현상의 해석을 어렵게 만든다. 보통 유동장을 포함한 다차원 화염에 대한 모델링과 이를 수치적으로 계산하기 위해서는 많은 시간과 고성능 컴퓨터의 연산이 필요하다. 한편 2차원 유동장에 상사변수를 도입하여 1차원 유동장으로 근사할 경우 연소현상을 집중적으로 해석할 수 있는 효율적인 방법이 일찍부터 적용되었다[9]. 본 연구에서는 가스터빈에 수소를 첨가한 천연가스의 연소특성을 다루기 위해 적절한 가정과 상사변수를 도입하여 2차원 유동을 1차원으로 단순화시킨 축대칭 대향류 유동장(axisymmetric counterflow flow field)으로 모델링하여 계산하였다. 이에 대한 지배방정식과 경계조건은 1차원 대향류 유동장의 일반적인 조건을 따른다[10].

### 3. 수치해석 방법

미분방정식 형태로 표시된 지배방정식은 유한차분법(finite difference method)을 통해 대수방정식으로 구성한 후 시간적분과 Newton 반복계산(Newton iteration)으로 온도, 화학종, 라디칼, 소염이 발생하는 스트레인을, 반응을 등을 구한다. 본 연구에서는 정상상태와 비정상상태의 해를 구하기 위해 Sandia 국립연구소에서 개발한 정상 수치해석 코드인 OPPST와 비정상 수치해석 코드인 OPUS를 본 연구에 적합하도록 수정하여 사용하였다[11]. 비정상상태의 해를 구할 때 천이문제의 시간적분에서 발생하는 경직성(stiffness)을 해결하기 위해 DASPCK 패키지를 활용하였다[12].

에너지 방정식, 화학종 방정식 및 반경방향 운동량 방정식의 확산항은 2차 중심 차분화(central differencing) 방식

으로 계산하고 대류항은 1차 상류방식(upwind)을 채택하였다. 화학반응 메카니즘의  $k$ -단계 반응의 비반응물 상수는 Arrhenius의 형태로 다음과 같이 표시된다.

$$k_k = A_k T^{n_k} \exp(-E_k/RT)$$

위에서  $A_k$ ,  $n_k$  및  $E_k$ 는 각각  $k$ -단계 화학 반응에 대한 pre-exponential factor, 온도지수 및 활성화 에너지(activation energy)를 나타내며,  $i$ -화학종의 생성물인  $\omega_i$ 는 그 화학종을 포함하고 있는 모든 반응 단계에서의 반응물의 합으로부터 구한다. 상기 화학반응식은 지수함수적인 강한 비선형성으로 인해 초기 추정값의 설정이 중요하다. 가스터빈 연소기에서 비정상상태 거동을 보이는 점화 과정은 짧은 시간에 순간적으로 발생한다. 이를 추적하기 위해 우선 구하고자 하는 비정상상태와 동일한 조건에서 화학반응을 무시한 상태에서의 정상상태의 동결해(frozen solution)를 OPPST를 이용하여 구한다. 이 동결해는 동일한 조건에서 비정상상태의 초기조건으로 사용된다[10].

일반적으로 탄화수소 연료일 경우 전체 유동장에서 연소가 진행되는 지역은 상당히 좁은 영역에 국한되는데 등간격 격자계(equidistributed grid system)를 사용할 경우 해의 수렴성이 떨어지게 되어 정확한 해를 구하기가 어렵다. 한편 격자 간의 간격을 지나치게 조밀하게 구성할 경우 해를 구하는데 많은 시간이 필요로 한다. 본 연구에서는 화염과 밀접한 상관관계를 갖는 온도의 변화에 따라 가중함수(weighting function)를 이용하여 격자를 적응재배치(adaptive redistribution)하는 방식으로 격자계를 구성하였다. 그러나 비정상상태의 해를 구할 때는 화염지역을 알고 있으므로 효율적인 계산을 위해 적응격자계(adaptive grid system)를 배제하고 정상상태의 동결해의 격자를 그대로 활용하였다.

화학반응과 열역학적 물성치 및 상태방정식의 계산에는 Chemkin 패키지와 Transport 패키지를 사용하였다. 또한 수소가 첨가된 천연가스의 비정상상태 점화과정을 관찰하기 위해 탄화수소 연료 중에서  $C_3$ 까지 계산이 가능하고  $NO_x$ 의 거동을 살펴볼 수 있는 GRI-Mech 3.0을 사용하였다. 메탄이나 에탄 등의 연료에 널리 활용되는 이 화학반응 메카니즘은 53개의 화학종과 325 단계의 화학반응으로 구성되어 있다.

### 4. 결과 및 분석

Fig. 2는 대향류 유동장에서 축방향 속도를 표시한 그림이다. 수소가 첨가된 천연가스의 예혼합기체( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,

$H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ )과 기연가스층( $CO_2$ ,  $H_2O$  등)으로부터 초기조건으로 노즐 출구 속도를 각각 50 cm/s로 동일하게 공급한 경우에 계산된 속도이다. 이때 예혼합기의 당량비  $\phi = 0.5$ 로 공급된다. 축방향에서 질량 관점의 운동량이 평형을 이루는 곳에 정체점(stagnation point)이 형성된다. 경계조건에서의 온도는 예혼합기의 경우 일반적인 가스터빈 운전 조건인 800 K로 설정했고 기연가스층은 노즐 출구속도가 증가해도 안정적으로 점화(ignition)가 발생하는 온도인 1300 K로 놓고 계산을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 천연가스의 조성비율이 원산지마다 상이하기 때문에 일반적인 메탄과 에탄 비율의 천연가스를 모델링하여 메탄 90%, 에탄 10%의 조성비로 하여 계산을 수행하였다. 이런 천연가스의 기본 조성비에 수소의 첨가 비율을 체적비로 10%, 30%, 50%까지 변화시키면서 연소과정의 거동을 관찰하였다. 참고로 수소가 첨가된 천연가스의 문제점인 역화(flashback) 현상을 간략하게 살펴보기 위해 수소 혼소비율 70%와 100%(수소만 공급)까지 혼소하면서 계산하였다.

Table 2는 공급된 예혼합기의 당량비  $\phi = 0.5$  일 경우에 계산에 활용한 수소 혼소 연료의 체적비를 나타낸 표이다.

Fig. 3은 LNG 화력발전의 주된 성분인 메탄과 에탄에

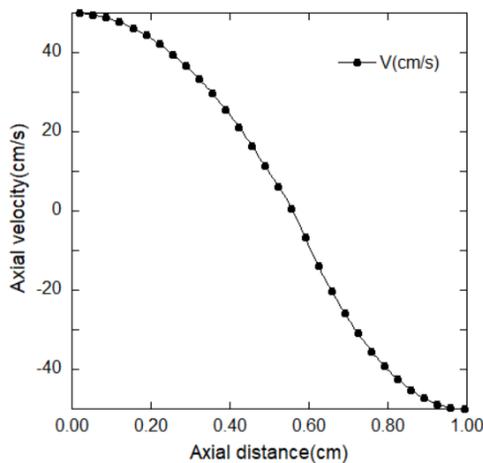


Fig. 2. Axial velocity distribution.

Table 2. Mole fraction of each fuel composition according to  $H_2$  addition at  $\phi = 0.5$

$H_2$ enriched(%)	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$\phi = 0.5$
$H_2$ 0%	0.0	0.450	0.050	
$H_2$ 10%	0.050	0.405	0.045	
$H_2$ 30%	0.150	0.315	0.035	
$H_2$ 50%	0.250	0.225	0.025	

수소를 첨가한 경우 유동장 내에서의 화염의 최고온도를 시간에 따라 도시한 그림이다. 점화에 의한 비정상 연소과정은 전술한 바와 같이 정상상태의 동결해를 구한 후 이를 초기값으로 하여 시간의 진행과정에 따라 화염의 거동을 관찰하였다. Fig. 3에서 화염지역에서의 화염최대온도는 수소가 첨가되지 않은 천연가스의 경우 대략 1530 K, 수소의 체적비율이 10~50%일 경우 1900 K 내외(1890~1928 K)로 큰 차이를 보이지 않는다. Fig. 3에서 혼소비율이 70%, 100%일 경우 역화 현상이 관찰되고 있다. 시간에 따른 최대 온도분포에서 2단 연소처럼 보이는 것은 노즐 출구속도를 비교적 낮은 50 cm/s로 놓고 계산한 결과로 연료층의 경계온도를 1300 K로 설정했기 때문이다. 역화 현상이 관찰되는 연소지역에서의 화염최대온도는 두 경우 모두 2418 K까지 상승하는 것을 알 수 있다. 수소가 첨가된 천연가스 연료를 활용하는 경우 혼소비율이 어느 한계를 넘거나 노즐 출구속도가 낮을수록 화염전파속도의 증가에 따른 역화 발생 가능성이 증가한다. 안전한 가스터빈 운전을 위해서는 역화 현상을 철저히 억제해야만 연료 공급계통에서 안정성을 확보할 수 있다.

Fig. 4는 공급되는 연료가 모두 수소로 구성된 경우(혼소비율 100%)로 기존의 노즐 출구속도 50 cm/s의 경우와 역화 현상이 억제되도록 노즐 출구속도를 200 cm/s로 증가시킨 경우에 대한 화염최고온도를 보여주고 있다. 노즐 출구속도에 관계없이 점화는 매우 빠른 시기에 발생하며 노즐출구속도 50 cm/s와 200 cm/s에서 화염의 최고온도는 각각 2418 K, 2093 K로 나타났다. 노즐 출구속도의 증가는 유동장에서 대류로 전달되는 열손실이 크다는 것을 의미하고 이것이 화염최고온도의 감소로 나타난다. Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 고려하면 공급되는 연료의 조성비율에

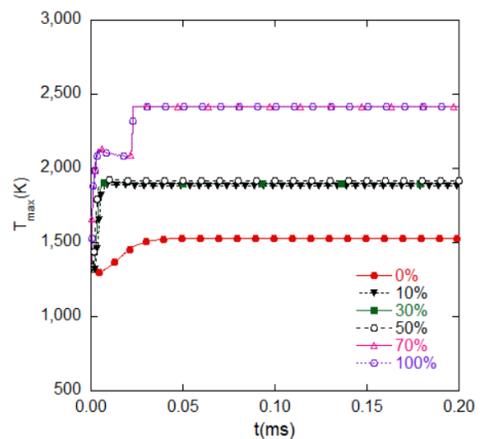


Fig. 3. Maximum temperature behavior as a function of time with  $H_2$  enriched natural gas.

서 수소의 체적농도가 50%보다 크게 설정된 혼합 연료의 경우 연료공급 계통에 역화방지를 위한 메쉬(mesh)를 설치하거나 연료 공급속도의 증가 등의 대책이 반드시 필요하다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 노즐 출구속도 50 cm/s일 경우 연료 중에서 수소가 30%의 체적비로 첨가된 연료의 연소과정을 도시한 그림이다. 본 연구에서는 300 ms의 기간 동안 연소추이를 살펴보기 위해 수치계산을 수행하였다. 수소 첨가의 영향으로 초기에 빠른 연소과정이 전개되며 10 ms 정도의 짧은 시간 동안에 최고온도 근처에 이르는 것을 확인할 수 있다. 대략 30 ms의 시간이 흐르면 더 이상의 연소과정의 변화를 보이지 않고 정상상태에 이른다는 것을 알 수 있다. 이렇게 정상상태에 이르는 시간은 Fig. 3을 살펴볼 경우 연료 중에서 수소의 혼소비율이 10%를 넘을 경우 대략 50%의 수소의 혼소비율까지는 연소영역에서 화염최고

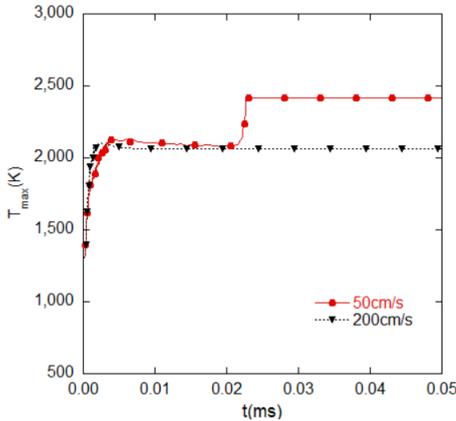


Fig. 4. Maximum temperature behavior at a nozzle velocity of both 50 cm/s and 200 cm/s.

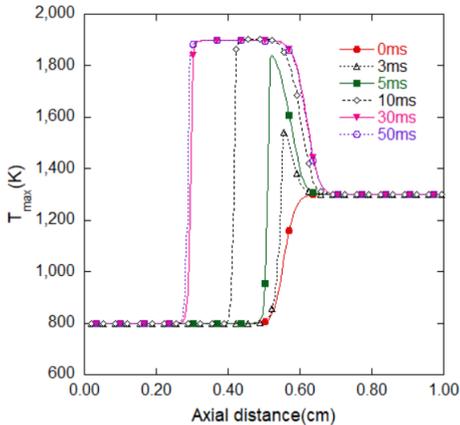


Fig. 5. Combustion evolution with axial distance as a function of time

온도의 변화가 크지 않고 점화지연시간이 크게 단축되지 않는 것을 확인할 수 있다.

수소를 첨가할 경우 가스터빈의 연소생성물로는 미연 탄화수소, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 수증기 등이 주로 배출된다. 이 중에서도 본 연구에서는 대기오염에 직접적인 영향을 미치는 질소산화물의 대부분을 차지하는 NO와 CO의 배출경향을 살펴보았다. NO의 생성은 화염의 전면에서 빠른 반응에 의해 발생하는 순간 NO(prompt NO)와 화염의 후면에서 고온으로 인한 공기 중의 질소와 산소의 반응에 의해 발생하는 열적 NO(thermal NO)로 크게 분류된다. 열적 NO의 생성은 일반적으로 잘 알려진 아래의 Zeldovich 반응 메카니즘으로 잘 설명되고 있다[13].

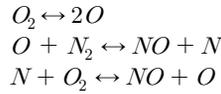


Fig. 6은 연료 중에서 수소의 혼소 체적비율을 0에서 50%까지 증가시켰을 때 시간 경과에 따른 NO의 발생량을 도시한 그림이다. 수소를 첨가한 천연가스의 경우 수소의 단열화염온도가 높기 때문에 연료 중 수소의 체적비율이 높을수록 화염면의 온도가 높아지고 온도에 따라 열적 NO의 생성이 증가하는 일반적인 특성을 보여주고 있다. 일반적으로 열적 NO는 주로 공기 중의 질소와 산소가 화염지역의 고온으로부터 열을 흡수하여 1800 K 이상의 온도에서 급속하게 발생하는 것으로 알려져 있다. 수소를 전혀 섞지 않은 천연가스의 경우 NO는 거의 발생하지 않는다. 그러나 수소를 천연가스에 10% 첨가할 경우 화염최고 온도가 1890 K까지 상승하고 이에 따라 NO의 생성이 크게 증가한다. 수소의 혼소 체적비가 증가할수록 화염최고

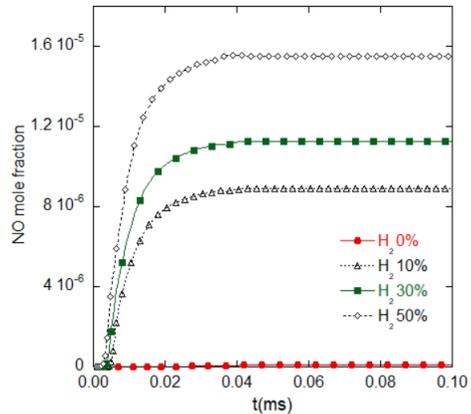


Fig. 6. NO production behavior as a function of time with H<sub>2</sub> enriched natural gas.

온도가 증가하면서 이에 따라 NO의 생성도 증가하는 것을 알 수 있다. 대략적으로 40 ms 정도의 시간이 경과하면 NO의 생성은 일정한 몰비를 유지한다. NO의 생성에 큰 영향을 주는 인자로는 화염최고온도, 당량비  $\phi$ , 노즐 출구속도 등이 주로 거론되고 있다. 열적 NO의 생성은 화염의 온도가 1800 K 이상의 온도에서 활발하게 생성되기 시작되며 화염최고온도가 높을수록 배출량이 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 7은 당량비  $\phi = 0.5$  에서 수소를 30% 첨가한 천연가스에서 10 ms 경과한 시점에 축방향에서의 화염의 온도와 NO 몰비를 도시한 그림이다. 화염이 형성되어 온도가 1800 K 이상이 된 경우 NO의 생성도 최대치에 이르고 축방향으로 온도가 낮아질수록 NO의 생성은 급격히 감소한다. 즉 NO의 생성을 위한 임계 활성화 온도값 이하에서는 급격히 하락하는 것을 보여주고 있다. 예혼합화염에서 당량비 역시 NO의 생성에 큰 영향을 미치는데 이론당량비(stoichiometric equivalent ratio)보다 희박한 상태에서 활발하게 생성된다. 수소가 첨가된 천연가스의 경우 당량비를 적절하게 공급하여 화염최고온도를 낮출 경우 NO의 생성을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.

한편 CO는 보통 짧은 연소과정으로 인한 불완전연소에 의해 발생한다. Fig. 8은 Fig. 6과 동일한 조건에서 수소의 혼소비율을 변화시키면서 시간경과에 따라 CO의 거동을 살펴본 그림이다. 초기 연소가 시작될 때 수소의 첨가로 인해 CO 생성의 변동이 매우 크지만 대략 40 ms 이후에는 안정적인 CO 생성 몰비를 보인다. 공급되는 연료 중에서 수소의 혼소비율이 증가함에 따라 탄화수소계열 연료인 메탄과 에탄의 비율은 감소하므로 정상상태로 수렴할 경우 생성되는 CO의 비율은 낮아지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 천연가스에 첨가한 수소의 혼소비율에 따른 열

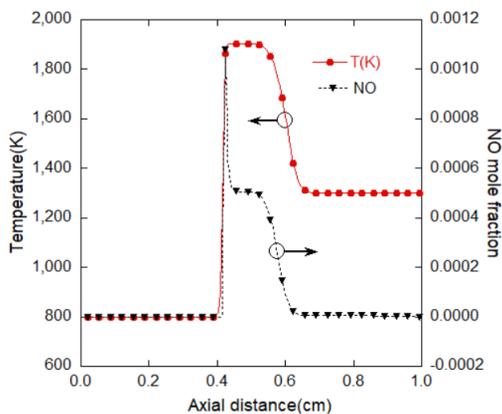


Fig. 7. NO production behavior according to the flame temperature change.

발생률을 도시한 그림이다. 천연가스일 경우는 정상상태에서 열발생률이  $4.081 \times 10^{10}$  erg/cm<sup>3</sup>·s의 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 한편 수소의 혼소비율이 증가할수록 열발생률은 증가하

면서 40 ms 정도의 짧은 시간 내에서 정상상태의 값으로 수렴한다. 수소가 50% 첨가된 경우 정상상태가 도달했을 때의 열발생률은  $3.527 \times 10^{11}$  erg/cm<sup>3</sup>·s로 천연가스 연료일 때에 비해 대략 8.6배 증가한 값을 보인다. 수소가 첨가된 경우 초기 수소의 폭발현상에 의해 열발생률의 변동이 매우 심하게 관찰되지만 짧은 시간 내에 안정화된 후 정상상태에 이르는 것을 관찰하였다. 초기 천이구간에서 변동률도 수소의 혼소비율이 높을수록 심한 모습을 보인다.

Fig. 10은 노즐 출구속도 50 cm/s 에서 천연가스에 수소의 혼소비율을 변화시킨 경우의 점화지연시간(ignition delay time)을 도시한 그림이다. 일반적으로 점화개시 시

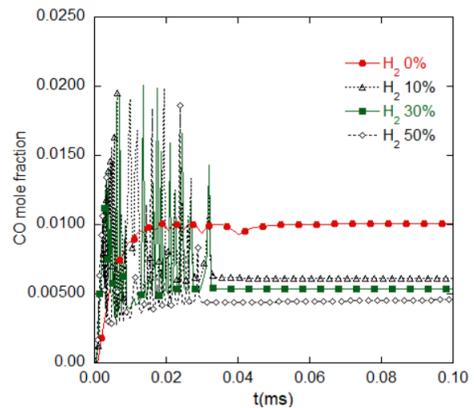


Fig. 8. CO production behavior as a function of time with H<sub>2</sub> enriched natural gas.

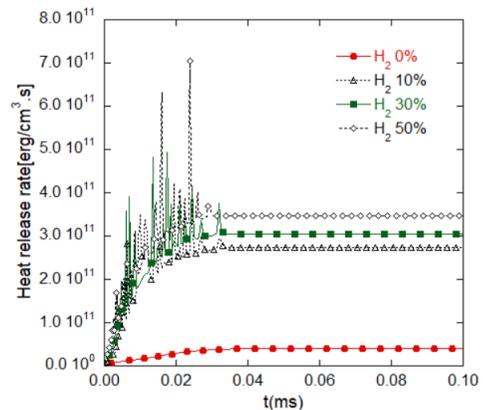


Fig. 9. Heat release rate as a function of time with H<sub>2</sub> enriched natural gas.

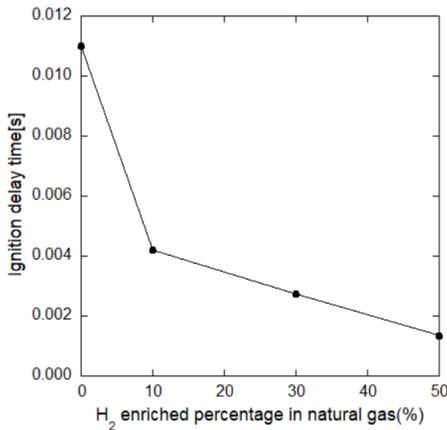


Fig. 10. Ignition delay time as a function of H<sub>2</sub> enriched percentage in natural gas.

점은 시간에 따른 화염커널의 온도를 관찰했을 경우 화염 온도의 증가율이 최대인 시점( $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = 0$ )으로 정한다. 보통 이런 방식으로 계산된 점화지연 시간은 점화에 의한 급격한 화학반응으로 인해 열발생률이 최대점이 발생하는 시점과 일치하는 것으로 알려져 있다[14]. 한편 수소가 첨가된 경우 초기연소 과정에서 수소로 인한 열발생률의 심한 변동성 때문에 점화 시점을 최대 열발생률로 판정하기 어려웠다. Fig. 10에서 점화가 일어나는 시기는 수소의 혼소비율이 높을수록 수소의 확산속도와 반응의 폭발성으로 인해 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 수소가 첨가되지 않은 천연가스의 경우 점화지연시간은 11 ms이지만 수소를 10% 첨가한 경우 4.21 ms로 천연가스 연료에 비해 61% 짧은 결과를 보인다. 수소의 혼소비율을 30%, 50%로 증가시킬 경우 감소되는 비율은 작으나 선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 수소의 반응성이 메탄이나 에탄보다 높기 때문인 것으로 보인다.

## 5. 결론

온실가스의 주요 배출원인 화석연료의 사용을 제한하는 교토의정서의 채택으로 대부분 국가에서는 온실가스 감축 방안의 의무적으로 동참하여야 한다. 한국의 경우 온실가스 중 상당량이 배출하는 발전 분야에서는 2020년 기준 화석연료인 석탄과 LNG의 사용량 비중이 59%에 이르고 있다. 발전 분야에서 온실가스를 줄이기 위해서는 화석연료 대신 수소(H<sub>2</sub>) 또는 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 사용하는 방안이 가까운 미래에 유력하게 적용될 것으로 예상하고 있다. 본 연구에서는 탄소중립의 시대에 부응하기 위해 화석연료 중에서 저탄소배출 발전연료인 천연가스에 수소의 혼

소비율을 변화시킨 연료를 대상으로 비정상상태 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

당량비  $\phi = 0.5$ 의 천연가스에서 수소의 체적비율을 0~50%까지 증가시킬 경우 순수 천연가스의 화염최고온도는 대략 1530 K이고 수소의 체적비율이 10%, 30%, 50% 첨가된 천연가스일 경우 1900 K 내외에서 큰 차이를 보이지 않는다. 한편 혼소 연료 중에서 수소의 체적비율이 50%보다 더 많게 공급했을 경우 화염지역에서의 화염최고온도는 2418 K까지 급상승하고 이에 따라 화염전파속도가 상승하면서 역화(flashback)의 발생을 관찰할 수 있었다. 역화를 억제하여 안전한 연료공급을 하기 위해서는 연료라인계통에 메쉬를 설치하거나 연료의 분출속도를 상승시켜 공급하여야 한다.

수소가 첨가된 천연가스를 활용한 가스터빈 연소에서는 대략 40 ms의 시간이 흐르면 연소과정의 변화가 없는 정상상태에 이른다. 수소의 혼소비율이 10%를 넘을 경우 50%의 혼소비율까지 연소영역의 최고온도는 큰 변화가 없고 점화지연시간도 크게 단축되지 않는 것을 확인하였다.

배기가스를 살펴보기 위해 천연가스에 수소를 첨가할 경우 연소최고온도가 높아지기 때문에 질소산화물이 증가한다. 수소가 첨가되지 않은 순수 천연가스의 경우 열적 NO는 거의 발생하지 않는다. 수소의 혼소비율이 높아질수록 화염최고온도가 상승하면서 열적 NO의 생성도 증가하는 것을 관찰하였다. 초기 연소기간에서는 NO가 급속히 증가하지만 혼소비율에 큰 영향을 받지 않고 대략 40 ms의 시간이 흐르면 열적 NO의 생성은 일정한 물비를 유지하게 된다. 또한 NO의 발생은 화염지역의 연소최고온도 부근에서 집중적으로 생성되는 것을 확인하였다. 한편 CO의 배출은 수소의 혼소비율이 증가할 경우 탄화수소의 비중이 작아지므로 감소하는 결과를 보인다.

열발생율은 수소의 혼소비율 증가에 따라 상승하는 결과를 보인다. 연소 초기의 천이구간에서는 수소의 혼소비율이 높을수록 열발생률의 변동성이 매우 심하게 나타난다.

점화지연시간은 수소의 혼소비율이 높을수록 수소의 확산속도와 농도의 증가에 따른 빠른 반응으로 인해 짧아지는 것을 확인하였다. 수소의 첨가가 없는 천연가스의 경우 점화지연시간은 11 ms이지만 수소를 10% 첨가한 경우 4.21 ms로 크게 단축되며 이후 수소의 혼소비율이 증가할수록 완만하게 단축되는 것을 관찰하였다. 온실가스의 저감과 대기오염을 방지하기 위해 수소를 혼소한 천연가스를 발전연료로 사용할 경우 혼소 비율은 온실가스의 저감과 질소산화물의 증가에 대한 상각관계를 고려하여 적절한 혼합비율과 당량비를 선정하여 적용되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 2022년도 동양미래대학교 산업체 현장 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

## References

- [1] IPCC, Global Warming of 1.5°C(<https://www.ipcc.ch>), An IPCC Special Report (2018).
- [2] Korea Energy Economics Institute, 2021 Yearbook of Energy Statistics, <http://www.keei.re.kr> (2021).
- [3] OECD, OECD Green Growth Indicators, <https://stats.oecd.org>, Renewable energy supply (2021).
- [4] Y. Shin, E.-S. Cho, Numerical Study of H<sub>2</sub> Enriched NG Lean Premixed Combustion, J. Korean Soc. Combust. 26(1) (2021) 51-58.
- [5] T. Klatzer, U. Bachhiesl, S. Wogrin, State-of-the-art expansion planning of integrated power, natural gas, and hydrogen systems, International Journal of Hydrogen Energy, 47 (2022) 20585-20603.
- [6] Zhengli Lim, Jingxuan Li, Aimee S. Morgans, The effect of hydrogen enrichment on the forced response of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Air laminar flames, International Journal of Hydrogen Energy, 46 (2021) 23943-23953.
- [7] Taib Iskandar Mohamad, Hazim Moria, Performance and emissions of a hydrogen-enriched natural gas spark ignition engine with a dynamic-homogeneous mixer, Energy Prodedia, 158 (2019) 1924-1929.
- [8] H. Kim, U. Jin, Y. Go, M. Choi, I. Gu, M. Baek, K.T. Kim, D.-H. Shin, A Review of Carbon Neutral Gas Turbine Combustion Technology, J. Korean Soc. Combust. 27(2) (2022) 14-38.
- [9] M.D. Smooke, Solutions of Burner-Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods, Journal of Computational Physics, 48 (1982) 72-105.
- [10] T.K. Oh, S.R. Lee, Unsteady Analysis for Combustion Characteristics of PRF75 Fuel under HCCI Conditions, J. Korean Soc. Combust. 18(4) (2013) 21-28.
- [11] H.G. Im, L.L. Raja, R.J. Kee, A.E. Lutz, L.R. Petzold, OPUS : A Fortran Program for Unsteady Opposed-Flowed Flames, SANDIA REPORT SAND 2000-8211, (2000).
- [12] S. Li, L.R. Petzold, Design New DASPCK for Sensitivity Analysis, Technical Report of Computer Science Department(TRCS99-23), University of

California, 1999.

- [13] Forman A. Williams, Combustion Theory, The Benjamin/Comming Publishing Company Inc, 1985.
- [14] Gaurav Bansal, Hong G. Im, and Su-Ryong Lee, Autoignition of Non-premixed n-heptane/air Counterflow Subjected to Unsteady Scalar Dissipation Rate, Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 1083-1090.

## 저자정보

### 오태균



현대자동차 중앙연구소에 근무한 후 현재 동양미래대학교 기계공학과 교수로 재직 중이며 화염의 소염 해석, 화염 상호작용, 저배기가스 엔진개발, HCCI 관련 연구를 진행하고 있다.