

무탄소 연료의 가스터빈 적용 특성에 관한 연구

이재민 · 조은성[†]

두산에너지빌리티 GT Center

Study on Zero Carbon Fuels for Gas Turbine Application

Jaemin Lee and Eun-Seong Cho[†]

GT Center, Doosan Enerbility Co. Ltd.

(Received 28 February 2023, Received in revised form 6 March 2023, Accepted 4 April 2023)

ABSTRACT

This study examines the co-firing characteristics of a zero-carbon fuel based on methane gas (CH₄) with hydrogen (H₂) and ammonia (NH₃) by means of numerical simulation using ANSYS CHEMKIN-Pro and the performance analysis tool Epsilon. Four different co-firing conditions are analyzed, namely, pure H₂, pure NH₃, 100% NH₃ full cracking fuel (75% H₂ + 25% N₂), and partial (60%) NH₃ cracking fuels. Adhering to identical adiabatic flame temperature values across all co-firing conditions, we maintain the same TIT (Turbine Inlet Temperature) for calculation purposes. Notably, a slight increase in NH₃ fuel composition leads to elevated fuel NO_x, presenting an obstacle in applying premixed-type gas turbine combustion. Cycle analysis results demonstrate that power output and efficiency increase as the blending ratio is raised, with significant disparities among the blending fuels.

Key Words : Hydrogen, Ammonia, Cracking, Gas turbine, Flame speed, NO_x Emission

기 호 설 명

LHV : Lower Heating Value (MJ/kg)

TIT : Turbine Inlet Temperature (°C)

NG : Natural Gas

Φ : Equivalence Ratio (-)

AFT : Adiabatic Flame Temp. (°C)

IGV : Inlet Guide Vane

1. 서 론

지구온난화에 따라 기후변화에 대한 문제가 전 세계적으로 이슈화되면서 이에 대한 대응책을 찾기 위한 움직임이 활발하게 진행되고 있으며, 2015년 파리기후협정 이후 나라마다 온실가스 배출감축을 위한 장기계획을 수립하여 2050 Net-Zero를 위한 에너지정책을 발표하고 있다. 대한민국도 이에 발맞추어 2050 탄소중립을 위한 정책의 하나로 2021년 국가 온실가스 감축(NDC, Nationally Deter-

mined Contribution) 목표를 상향하여 2030년 국내 온실가스 배출량을 35% 이상(2018년 기준) 감축하는 방안을 발표하였다. 이를 위해 유류/석탄발전을 축소하고 신재생 에너지 발전을 확대하며 특히, 무탄소 연료인 수소, 암모니아 연료를 활용한 전원 구성 계획안을 제시하였다. 2022년 11월 발표한 10차 전력 수급 계획에 무탄소 전원은 2030년 2.1%, 2036년 7.1%로 설정되어 수소/암모니아를 사용하는 무탄소 발전량의 비중은 점차 증가할 추세이다[1].

무탄소 연료 중 수소는 가스터빈 분야에서 많은 연구가 진행되고 있으며 가스 복합화력의 CO₂ 배출량을 줄일 수 있도록 혼소발전을 시작으로 최종 수소 전소 발전을 준비하고 있다. 전 세계적으로 수많은 가스터빈을 공급하고 있는 OEM사인 GE, SIEMENS, MITSUBISHI 등도 자체 천

[†]Corresponding Author, eunseong.cho@doosan.com

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.

연가스 가스터빈 모델을 발전시켜 수소 터빈 개발을 진행하였으며 이를 활용한 실증프로젝트 진행 상황에 대하여 하나둘씩 실적을 홍보하고 있다. 국내의 경우 2020년 산업부 지원으로 에너지기술평가원을 통해 “대형 수소 혼소 및 소형 분산 발전 전소 가스터빈 연소기 개발”에 대한 과제가 착수되어 수소 터빈의 개발을 시작하였으며 현재 해외 OEM사와 대등한 기술을 선보이기 위한 연구개발 노력하고 있다[2-4].

효율적인 수소 사용을 위하여 수소 연료의 생산, 이송, 저장, 활용 등의 전주기 Value Chain에 관한 관심이 높아지면서 수소 Carrier 역할로 잘 알려진 암모니아의 직접 사용에 대한 화두가 일본을 필두로 제시되어 졌다. 암모니아는 비료 등에 사용되기 위한 유통이 진행됐으나 무탄소 연료원으로 액화가 쉬워 수소 생산 현지에서 암모니아로 합성하여 액화 상태로 활용지역으로 저비용 대용량 이송이 가능하며, 활용 현지에서 암모니아 분해 Cracking 공정 ($2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{N}_2$)을 통하여 수소로 활용하는 방법이 제안되고 있으며 장기적으로 Cracking 공정을 통한 비용 발생을 줄이기 위한 암모니아의 직접 연료로서의 연구가 진행되고 있다[5,6].

본 연구에서는, 무탄소 연료 가스터빈 개발을 위한 연구로써 기존의 천연가스 주성분인 메탄(CH_4) 연료를 기반으로 수소(H_2) 및 암모니아(NH_3)를 혼소하는 방법, 암모니아 Full Cracking을 통한 희석수소(H_2 75% + N_2 25%), Partial Cracking을 통한 암모니아 + 희석수소 연료의 혼소에 따른 가스터빈 적용에 대한 영향을 비교하여 무탄소 가스터빈 개발을 위한 기초자료로 활용하려고 한다.

2. 사용 연료 특성 및 수치해석 기법

2.1 사용 연료 특성

본 연구를 위해 사용된 연료는 메탄(CH_4), 수소(H_2), 암모니아(NH_3) 3가지로 각각의 연료 특성을 Table 1에 나타

Table 1. Gas characteristics of test fuels [7]

Fuel	CH_4	H_2	NH_3	Unit
Boiling Point @ 1 atm	-161	-253	-33.4	°C
LHV	50.0	120	18.6	MJ/kg
	8,574	2,573	3,390	kcal/Nm ³
Flame speed	0.37	2.91	0.07	m/s
Ignition Temp.	630	520	650	°C
AFT	1,950	2,110	1800	°C

내었다.

수소는 액화온도가 -253°C 이므로 극저온 냉각을 통한 액체 상태로 단일 용기에 저장하여 이송하게 되나, 저온 냉각을 위한 추가 에너지 필요에 따른 고비용, 저장 용기의 제한 및 수송 중의 Boil-off를 통한 손실량이 많은 등 상대적으로 이송에 대한 비용이 많이 들어 경제성이 떨어지는 문제가 있다.

암모니아는 상대적으로 높은 온도(-33.4°C)로 액화가 가능하며 기존의 LPG 설비를 활용한 저장 및 이송을 할 수 있어, 수소 연료의 공급을 쉽게 하는 Energy Carrier로서 수소의 장거리 이송에 유리하고 비용이 저렴하다는 특징을 통해 체계적인 연구가 일본을 필두로 진행되게 되었다. 그러나 암모니아를 직접 연소하기에는 화염의 전파속도 및 화염온도가 낮은 특성과 단위 중량 및 부피에 따른 발열량도 적어 자체 연소보다는 혼소 형태로 연소시키는 방법이 좋을 것으로 생각된다. 또한 암모니아는 연소할 때 공기 중의 N_2 가 고온에서 해리되어 O_2 와 결합하여 발생하는 thermal NO_x 뿐만 아니라 연료 자체에 N 성분을 포함하고 있어 fuel NO_x 발생이 높고 이를 효율적으로 제어하지 못하면 수천 ppm 이상의 고농도의 배기가스 발생 및 미연 NH_3 slip 발생이 가능하여 완전 연소 및 NO_x 발생 저감을 위한 연구가 동시에 진행되어야 가스터빈에 적용될 수 있을 것으로 생각된다. 일부 연구에서는 고효율 SCR (Selective Catalytic Reduction)을 활용한 후처리 NO_x 저감을 제시하고 있으나 연소 반응 상의 전처리로 최대한 NO_x 저감을 얻는 것이 운영 비용 저감 등에 효율적이라고 생각한다.

2.2 수치해석 기법

본 연구에 사용된 계산 프로그램은 상세 화학반응을 통한 다양한 연료의 연소 특성을 해석할 수 있는 ANSYS CHEMKIN-Pro Package[8]를 이용하였으며, 사용 Chemistry는 최근 암모니아 연소 관련 NO_x 예측을 위해 많이 사용되는 Okafor Mechanism[7]이 있으나 본 연구에서는 NO_x 발생 특성보다는 연소성을 우선 검토하기 위하여 다양한 연료에 대한 검증이 되어진 GRI-3.0 상세 반응 Mechanism[9]을 사용하였다. 가스터빈 화염온도 비교를 통한 TIT 예측을 위하여 단일 화염온도(Adiabatic Flame Temperature)를 계산하기 위해서 Equilibrium 코드를 사용하여 다양한 당량비 조건에서 혼합연료 온도를 비교하였다. 또한, PREMIX 코드를 사용하여 예혼합화염의 특성값인 Laminar Burning Velocity를 계산하였다. 또한 15% O_2 조건에서의 NO_x 계산값을 체류시간(Residence Time)에 따른 Thermal NO_x 증가 영향을 배제하기 위하여

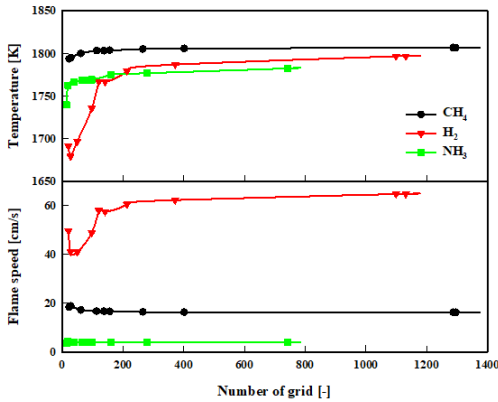


Fig. 1. Grid dependency of temperature and flame speed for CHEMKIN premixed code.

15 ms의 동일 조건에서 각각의 NO_x 발생 값을 비교하였다. 계산조건은 가스터빈 특징인 고온 고압 조건을 모사하기 위하여 공기 온도 400°C, 10bar 조건에서 모든 계산을 수행하였으며 당량비(ϕ , Equivalence ratio)를 변화시키면서 각각의 영향들을 확인하여 보았다.

특히 PREMIX 코드에서 계산 수렴 조건인 1-D Grid의 CURV, GRAD 값의 차이에 대한 변화를 확인하여 최대한 수렴되는 값을 얻도록 두 값을 확인하여 결과를 도출하였다.

Fig. 1은 CURV, GRAD 값의 차이에 따른 수렴 Grid 수에 따른 화염온도, 속도 값에 대한 추이를 나타낸 것으로 GRID 수 400 이상부터는 수렴된 값을 얻는 것을 확인하였으나 700 이상 충분한 Grid 수를 갖도록 두 변수를 조절하였다.

3. 계산 결과

3.1 대상 연료 조합 특성

대상 연료 중 천연가스(NG) 기본 연료인 CH₄을 기반으로 수소, 암모니아, 암모니아 100% Full Cracking (H₂ 75% + N₂ 25%), 암모니아 Partial Cracking [X% NH₃ + (100-X)% * (H₂ 75% + N₂ 25%)]을 대상 연료로 혼소율에 따른 특성을 파악하려 하였다. 이 중 Partial Cracking의 경우 Cracking 비율(X%)에 따른 특징 확인을 통하여 적정 Cracking 비율을 확인하였다. 100% Full Cracking 대비 Partial Cracking 100% 전환 시 귀금속 촉매 사용 등에 따라 전환비용이 높아 일정 부분의 잔류 암모니아를 유지하고 Cracking Process를 통해 적정 Cracking ratio를 확인하기 위하여 각 조건에서의 연소속도, 화염온도를 확인하여 보았다.

Fig. 2는 메탄과 Partial Cracking 연료의 연소 특성을 나

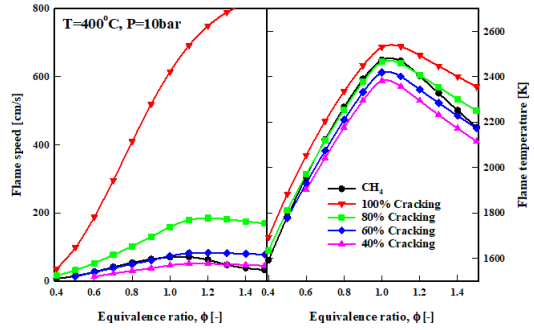


Fig. 2. Fuel combustion characteristics for cracking ratio.

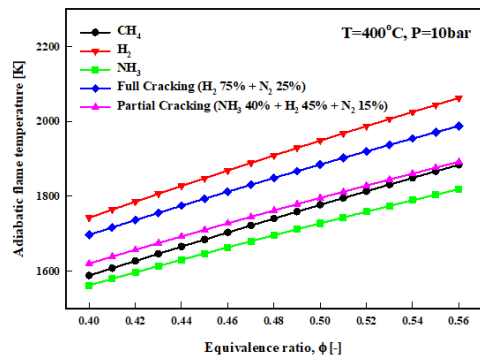


Fig. 3. Adiabatic flame temperature for various fuel operation.

타낸 것이고 그림 상에는 40~100% Cracking 조건과 메탄을 비교하였다. 100% Full Cracking의 경우 수소 특성이 나타나서 화염속도가 높게 보이고 있고, 기타 Partial Cracking 조건에서는 암모니아 연소속도가 낮은 특성을 수소의 연소속도가 높은 특성과 결합하여 60% Cracking 연료의 경우 메탄과 비슷한 연소속도를 보여 연소성은 메탄과 같은 성향을 보일 것으로 예상되어진다. 당량비 1 이상의 과농한 연료 조건에서는 메탄과 차이를 보이는데 이는 수소 연료가 높은 당량비에서도 연소속도 상승특성을 나타내는 것으로 보이나 통상 가스터빈의 운전영역이 희박 예혼합 조건에서는 메탄과 비슷한 특성이라고 볼 수 있다. 화염온도의 경우 80% Cracking 조건이 비슷한 온도 분포를 보이는 것을 볼 수 있는데 화염속도의 편차가 높아 메탄과 비슷한 특성을 갖는 적정 Cracking ratio는 60% 조건을 대표 성분으로 선정하였다.

향후 본 논문에서 Full Cracking은 암모니아가 100% 분해된 25% N₂ 희석된 H₂ 연료라고 정의하며, Partial Cracking은 40% NH₃가 잔류하는 60% Cracking 혼합가스라고 정의하고 본문의 모든 비율(%)는 부피비(Volume)를 말한다.

Fig. 3은 각각의 연료에 대하여 당량비에 따른 단열 화염 온도를 Equilibrium Code를 이용하여 계산하였다.

모든 연료에 대하여 당량비가 높을수록 화염온도는 선형적으로 증가하는 특성을 보이고 있고 화염온도는 수소 > Full Cracking > Partial Cracking > 메탄 > 암모니아순으로 화염온도를 보인다. 가스터빈 연소기의 TIT를 동일 온도를 유지하는 것을 설정할 때 동일 화염온도를 갖는 당량비를 구하여 비교하면 그 특성을 확인할 수 있을 것으로 생각하여 동일 온도를 갖는 당량비를 각 연료비 조건에서 구하였다.

Table 2는 메탄을 기반으로 수소, 암모니아, Full Cracking, Partial Cracking의 혼소율에 따른 동일 화염온도를 갖는 당량비를 구한 값을 표시하였다. 1,800 K 동일 화염 온도(H-class TIT 모사)를 기준으로 각 조건의 당량비는 보간법을 통해 예측하였다.

3.2 동일 온도 조건 특성

Fig. 4는 동일 화염온도를 갖는 혼소율에 따른 당량비 조건을 각 연료 조건에서 나타낸 것이다.

Partial Cracking의 경우 메탄과 비슷한 연소 특성을 보이므로 혼소율에 따라서도 그 차이는 크지 않고 선형적으로 보이며 수소의 경우 동일 당량비에서 화염온도가 메탄에 비해 높아서 혼소율에 따라 당량비는 낮아지는 경향을 유지하며 Full Cracking 연료의 경우 N₂ 희석된 수소 연료이므로 당량비가 낮아지는 경향은 같으나 그 기울기는 더 완만함을 알 수 있다. 암모니아 혼소의 경우 반대로 혼소율 증가에 따라 당량비를 높여야 동일 화염온도를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

각각의 당량비 조건에서 Table 3의 연료조성을 이용한 Premix 계산을 통해 메탄을 기반으로 각 연료의 혼소율에

Table 2. Adiabatic flame temperature comparison with equivalence ratio

Hydrogen (H ₂) Blending						Ammonia (NH ₃) Blending					
Φ	CH ₄	20%	40%	60%	80%	H ₂	20%	40%	60%	80%	NH ₃
0.55	1867	1878	1894	1918	1959	2044	1861	1853	1843	1828	1804
0.54	1849	1860	1876	1900	1941	2025	1843	1836	1826	1812	1789
0.53	1831	1842	1858	1882	1922	2007	1826	1819	1809	1795	1774
0.52	1813	1824	1840	1863	1904	1987	1808	1801	1792	1779	1759
0.51	1795	1806	1822	1845	1885	1968	1790	1784	1775	1763	1743
0.50	1777	1788	1803	1826	1866	1949	1772	1766	1758	1746	1728
0.49	1759	1770	1785	1808	1847	1929	1754	1749	1741	1730	1712
0.48	1740	1751	1766	1789	1828	1909	1736	1731	1723	1713	1696
0.47	1722	1732	1747	1770	1808	1889	1718	1713	1706	1696	1680
0.46	1703	1713	1728	1750	1789	1869	1699	1695	1688	1678	1664
0.43	1646	1656	1670	1692	1729	1807	1643	1639	1634	1626	1614
0.42	1627	1637	1651	1672	1709	1786	1624	1621	1615	1608	1597
Φ @ 1800K	0.513	0.507	0.499	0.486	0.466	0.427	0.516	0.519	0.525	0.533	0.547

NH ₃ Cracking Blending						NH ₃ Partial (60%) Cracking Blending					
Φ	CH ₄	20%	40%	60%	80%	H ₂ /N ₂	20%	40%	60%	80%	H ₂ /N ₂ /NH ₃
0.52	1813	1819	1827	1839	1862	1920	1814	1816	1818	1822	1828
0.51	1795	1801	1809	1821	1844	1902	1796	1798	1800	1804	1812
0.50	1777	1783	1790	1803	1826	1885	1778	1780	1783	1787	1796
0.49	1759	1764	1772	1785	1808	1867	1760	1762	1765	1770	1779
0.48	1740	1746	1754	1766	1790	1849	1742	1744	1747	1752	1762
0.46	1703	1709	1717	1729	1753	1812	1705	1707	1711	1716	1728
0.45	1684	1690	1698	1710	1734	1794	1686	1689	1692	1698	1710
Φ @ 1800K	0.513	0.510	0.506	0.499	0.486	0.454	0.512	0.511	0.510	0.508	0.503

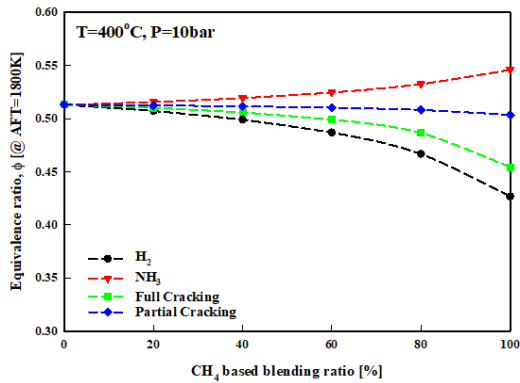


Fig. 4. Equivalence ratio trends of same adiabatic temperature for various fuels' blending ratio.

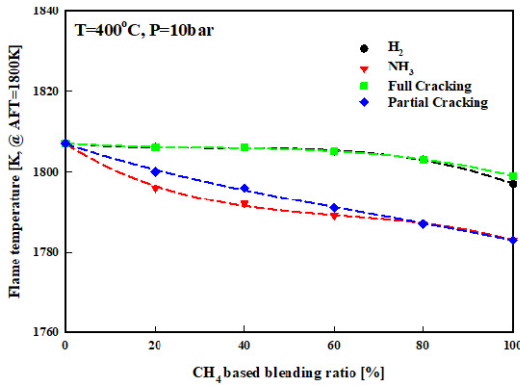


Fig. 5. Flame temperature trends of same adiabatic temperature for various fuels' blending ratio.

따른 특성을 파악하였다.

앞서 Equilibrium code를 통한 열역학적 반응을 통한 동일 Adiabatic Temperature를 갖는 당량비 조건을 이용하여 유동이 있는 1-D Premixed Code를 통한 화염온도를 확인하여 보았는데 Fig. 5에서 보는 것과 같이 수소 및 Partial Cracking 조건에서는 온도편차가 크지 않았으나 암모니아 및 Full Cracking 조건에서는 화염온도가 조금 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 이론적으로 Premix 계산을 단일 조건에서 진행하며 열역학적인 Adiabatic Flame Temperature를 갖는 것이 타당할 것으로 생각되나 1-D 유동 계산의 경우 Thermodynamic 데이터베이스 및 Transport 데이터베이스의 계수를 사용함에 따른 다소 손실이 보이는 것으로 예상된다. 초기 계산에서 이 편차는 조금 더 나타났으나 Fig. 1에서 보여준 것과 같이 계산 Grid를 늘려 수렴되는 값을 도출하면 그 차는 주는 것을 알 수 있었다.

이러한 동일 온도를 갖는 각 혼합연료의 화염 속도 특성을 Fig. 6에서 살펴보면 이 또한 Partial Cracking 연료는 일정한 연소속도를 유지하고 수소와 수소 성분이 주된 Full Cracking 연료는 혼소율에 따라 화염속도가 증가하는 특성, 암모니아는 혼소율에 따라 속도가 느려지는 특성을 보인다.

Fig. 7은 다양한 혼합연료의 혼소율 변화에 따른 이론적 NO_x 발생 특성을 보여주고 있다. NO_x 발생 현상은 암모니아 성분의 유무에 따라 그 발생량이 확연한 차이를 보여 암모니아 성분이 없는 수소와 Full Cracking 연료는 Thermal NO_x만 발생한다고 볼 수 있는데 혼소율에 따라 다소 NO_x가 상승하는 특성을 보이나 그 발생량은 미비하며, 반면에 암모니아 및 Partial Cracking 연료는 Fuel NO_x 발생 메커

Table 3. Gas composition of carbon free test fuels for blending ratio (volume %)

Case	CH ₄	H ₂	N ₂	NH ₃	Case	CH ₄	H ₂	N ₂	NH ₃
H ₂ Blend	100	-	-	-	NH ₃ Cracking	100	-	-	-
	80	20	-	-		80	15	5	-
	60	40	-	-		60	30	10	-
	40	60	-	-		40	45	15	-
	20	80	-	-		20	60	20	-
	0	100	-	-		0	75	25	-
NH ₃ Blend	100	-	-	-	NH ₃ Partial (60%) Cracking	100	-	-	-
	80	-	-	20		80	9	3	8
	60	-	-	40		60	18	6	16
	40	-	-	60		40	27	9	24
	20	-	-	80		20	36	12	32
	0	-	-	100		-	45	15	40

니즘이 활발하여 NO_x 발생량이 수천 ppm 정도로 매우 높게 나타나고 있다. Partial Cracking 연료 혼소의 경우가 직접 암모니아를 혼합하였을 때 더욱 낮게 나타나 그 차이는 크지 않고 혼소율에 따라 Fuel NO_x 발생량이 배수로 증가하지 않는 것을 통해 함유량에 따른 전환율이 존재함을 알 수 있다[10].

본 계산은 예혼합 연소의 NO_x 발생 특성을 보여주는 것이므로 연료의 N 성분이 분해되어 NO_x로 변환 발생하여 매우 높은 수치를 나타내고 있으나 실제 연소시 발생 NO_x는 이론적인 값보다는 낮을 것으로 예상되나, 실제 다른 연구자들의 예혼합화염의 실험적 연구 결과를 살펴보다라도 NO_x 발생이 1,000 ppm 수준으로 매우 높게 나타나는 것을 알 수 있어 fuel NO_x를 줄이는 메커니즘(eg. Staging Combustion)을 적용하여야 가스터빈의 연료로서 직접 적용이 가능할 것으로 생각된다[11].

본 연구에서는 연료 중 NH₃ 유무에 따라 fuel NO_x 발생이 확연히 차이가 크게 나는 것을 확인할 수 있었으며 향후

NO_x 발생 특성을 고려한 연구의 경우 Okafor 메커니즘 등을 활용한 연구를 진행할 예정이다.

3.3 혼소율에 따른 가스터빈 엔진 특성변화

혼소율에 따른 동일 화염온도를 유지하는 당량비를 Table 2를 통해 구하였으며, 이를 기준으로 각 연료의 혼소율에 따른 당량비 조건을 기준으로 공기량, 연료량, 배기 가스량의 연소계산을 통해 구하여 가스터빈의 구성품인 압축기/연소기/터빈에 대한 영향을 각각 계산하여 보았다.

각각의 혼소율에 따른 연료 조성의 발열량을 계산하여 동일 열용량(Heat Input)을 갖는 연료 유량을 계산하였으며, 각 연료 조성에 따른 연소계산을 통해 단위 연료 부피당 필요 공기량/연소 가스량/배기가스량을 얻어 가스터빈의 운전조건을 예측하였다.

Table 4는 메탄/암모니아 혼소 조건의 연료 조성을 이용한 연소계산을 통하여 단위 부피당의 저위발열량을 구하고 동일 화염온도를 갖는 당량비를 적용한 연료 단위 부피당 필요 공기량, 연료량, 배기가스량을 계산한 값을 나타내고 있다.

기본 연소계산을 통한 값을 이용하여, 동일 Heat Input을 내기 위한 연료량을 계산하였으며, 이를 통해 Fig. 4에 나타난 동일 화염온도를 갖는 당량비를 기준으로 필요 공기량, 배기가스량 등을 각 연료를 기반으로 혼소율에 따라 특성값을 도출하였다.

수소와 암모니아 연료의 경우 단위 부피당 발열량이 적어 메탄과 비교하여 동일 입영량을 얻기 위해서는 연료량 상승이 필요하며, 암모니아의 경우 2.5배의 연료(부피비) 수소의 경우 3.3배 연료 상승이 필요하다. Partial Cracking의 경우 수소 혼소와 비슷한 값을 가지나 Full Cracking 연료의 경우 수소 연료에 25% N₂가 혼합되어 연료량 상승률은 4.4배에 달하는 것을 알 수 있다.

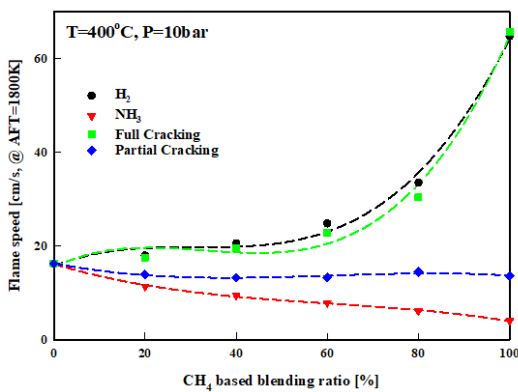


Fig. 6. Flame speed trends of same adiabatic temperature for various fuels' blending ratio.

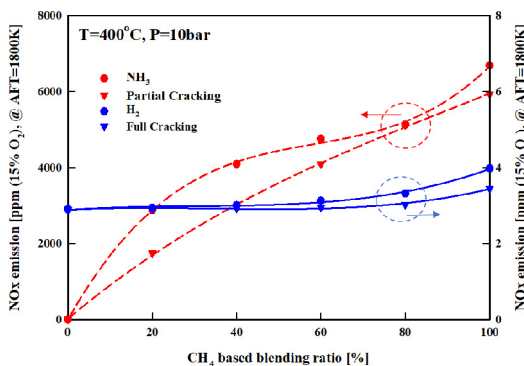


Fig. 7. NO_x emission trends of same adiabatic temperature for various fuels' blending ratio.

Table 4. Combustion calculation of ammonia blending ratio

Blending (%)	NH ₃ LHV kcal/Nm ³	Φ	Air	Fuel	Mixture	Fluegas
20%	7,537	0.516	18.38	1.138	19.52	19.57
40%	6,500	0.519	18.14	1.319	19.45	19.59
60%	5,464	0.525	17.80	1.569	19.37	19.61
80%	4,427	0.533	17.32	1.937	19.25	19.64
100%	3,390	0.546	16.54	2.529	19.07	19.70

Fig. 9는 다양한 연료 혼소율의 증가에 따른 필요 공기량 (Compressor), 연소실 공급 혼합기량(Combustor), 배기가스 유량(Turbine)에 대한 특성을 나타내었다.

Fig. 9(a)의 각 연료의 혼소율 증가에 따른 필요 공기량을 살펴보면 수소 혼소의 경우 혼소율에 따른 공기량 변화가 거의 나타나지 않아 압축기 운전상에 변화는 없는 것으로 보인다. 암모니아를 이용한 연료는 혼소율에 따라 점차

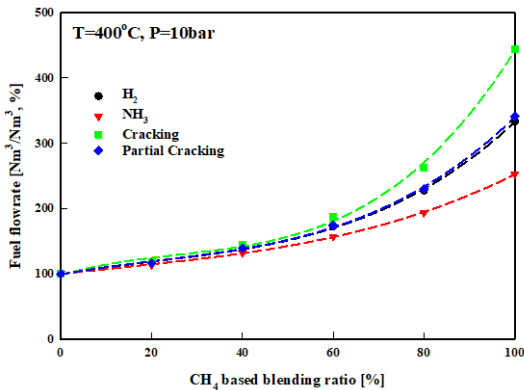


Fig. 8. Fuel flowrate trends of same TIT for various fuels' blending ratio.

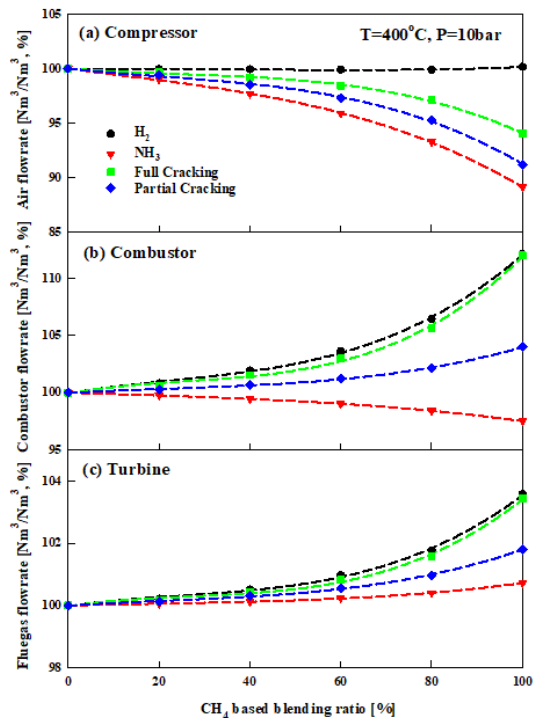


Fig. 9. Gas turbine gas flowrate trends of same TIT for various fuels' blending ratio.

필요 공기량이 적어지는 것으로 보이는데 이는 압축기 운전 조정을 통해 (e.g. IGV 변동) 공기량 조절이 필요해 보이며 그 저감 순서는 Full Cracking 연료, Partial Cracking 연료, 암모니아 연료 순으로 필요 공기량이 적어지는 경향을 보인다. 필요 공기량이 적어지면 압축일이 낮아 엔진 효율이 증대될 가능성이 있으며 이는 시스템 해석을 통해 확인할 수 있으리라 생각된다.

가스터빈의 경우 희박 예혼합 조건을 위해 다량의 산화제가 공급되는 조건이므로 연료량 대비 사용 공기량이 수배 이상 많아서 실질적으로 연소실에 부하 되는 공기와 연료의 혼합기 상승 비율은 높지 않아 연소기 체적 변경을 요하는 정도는 아니라고 생각된다. Fig. 9(b)에서 암모니아의 경우 발열량이 적어 필요 연료량은 증가하지만 반대로 필요 공기량은 줄어드는 특징을 가지고 있어 혼소율에 따른 연소실로 공급되는 연료+산화제의 총량은 줄어드는 특성을 보인다. 수소 및 Full Cracking, Partial Cracking의 경우 혼소율에 따라 연소실 혼합기의 양이 증가하는 형태이며 최대 12% 정도 상승하는 양을 나타내고 있다. 연소실 유량 증가에 따른 압력 손실이 다소 증가할 것으로 보이어나 이러한 영향은 전체 효율에 대한 변화를 통해 확인할 수 있으리라 생각된다.

Fig. 9(c) 터빈에 영향을 주는 배기가스량을 살펴보면 수소의 경우 전소 때 3% 정도 상승하는 특징을 보이고 있으며 암모니아의 경우 상대적으로 낮아 1% 정도의 배기가스 상승을 보여주고 있다. 동일 TIT 조건에서 터빈 유량이 증가하면 효율 상승 요인이 되나 배기가스 성분에 대한 영향 등을 고려하여 최종 효율 예측이 가능할 것으로 보인다. 혼소율에 따라 배기가스 성분 중 CO₂가 감소하고 H₂O가 증가함에 따라 상대적으로 C_p 값이 큰 H₂O 특성에 따라 터빈 효율 상승은 예측되어 진다[12].

지금까지 연소계산을 통해 동일 Heat Input을 갖는 조건의 동일 화염온도(TIT) 조건에 대해 메탄을 기반으로 수소, 암모니아, Full Cracking, Partial Cracking 연료의 혼소율에 따른 터빈 영향에 대해 알아보았다. 추가로 각 조건에 대한 엔진 사이클 해석을 통해 부가적인 특징을 확인하도록 하겠다.

4. 사이클 해석 결과

상기 연소계산을 통하여 해석한 각 연료별 혼소비율 변화에 대한 영향을 사이클 해석을 통하여 비교하였다. 사이클 해석은 EBSILON[13] 프로그램을 사용하였으며, 해석 모델은 아래 Fig. 10과 같이 모델링을 구성하였다. 이때 연료 및 혼소 비율 변화 시 압축기 입구 질량유량과 터빈 입

구 온도는 고정하여 검토를 수행하였다.

사이클 해석 결과, 터빈 출력은 Fig. 11(a)와 같으며, 혼소 비율이 높아질수록 출력은 증가한다. 수소 혼소 시에는 터빈 입구로 유입되는 연소 가스의 체적유량이 증가하게 되며, 이로 인해 터빈 입구 압력과 엔탈피가 증가되어 터빈 입출구 엔탈피 차가 증가한다. 수소 혼소의 경우 연료 유량 감소로 인하여 연소 가스의 질량 유량은 감소하나, 입출구 엔탈피 차 증가로 인하여 출력이 증가한다.

암모니아 혼소, Full Cracking, Partial Cracking의 혼소 비율 증가 시 동일 TIT를 유지하기 위한 연료 질량 유량이 증가하게 되고 이는 연소 가스의 유량을 증가시키게 된

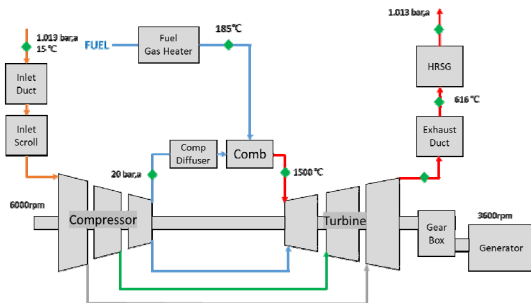


Fig. 10. Gas turbine cycle analysis modeling.

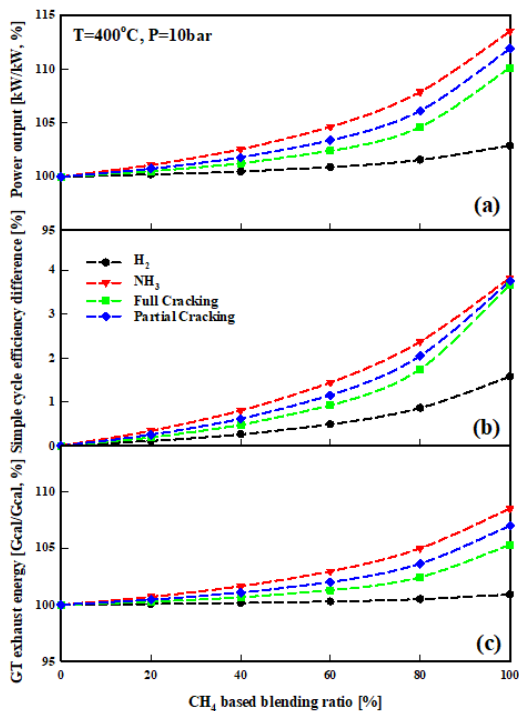


Fig. 11. GT characteristics trends of same TIT for various fuels' blending ratio.

다. 연소 가스의 유량 증가로 인해 터빈 입구의 압력과 엔탈피는 증가하고, 입출구 엔탈피 차도 증가하여 출력이 증가한다.

Simple Cycle의 효율은 Fig. 11(b)와 같으며 해석 조건에서 TIT를 고정하였기 때문에 연료에서 공급받는 열량은 동일하고 터빈 출력이 증가하기 때문에 혼소 비율 증가 시 효율이 향상된다.

Bottoming Cycle로 공급되는 열량인, 터빈 Exhaust Energy는 Fig. 11(c)와 같다. 수소 혼소 시에는 터빈 입구 엔탈피 증가에 따른 출구 엔탈피 증가로 인해 Exhaust Energy가 증가하게 되고, 암모니아, Full Cracking, Partial Cracking 시에는 연소 가스 질량 유량과 출구 엔탈피가 모두 증가하여 Exhaust Energy가 증가한다.

5. 배기가스 성능 표준 제안

무탄소 연료의 사용에 따른 배기가스 성분이 달라지며 특히 100% 전소의 경우 CO₂ 성분이 제로(0)가 되며 이에 따라 H₂O 성분이 늘어나는 것으로 볼 수 있다[14].

Table 5는 수소 혼소율에 따른 동일 온도 조건에서의 배기가스 성분을 수분(H₂O)를 포함한 wet gas 성분과 수분을 제외한 dry gas로 나타내었다.

Fig. 12는 wet gas 조건에서 각 배기가스 성분을 혼소율에 따라 표시하였는데 앞서 설명한 것과 같이 CO₂는 혼소율에 따라 0으로 수렴하며, H₂O 성분비가 증가하는 것을 볼 수 있으며 O₂ 성분은 조금 상승하고, N₂는 조금 감소하는 경향을 볼 수 있다.

가스터빈의 경우 15% O₂ 조건에서 배기가스값을 보정 (correction)해서 표시하게 되는데 아래와 같은 식 (1)을 사용하게 된다.

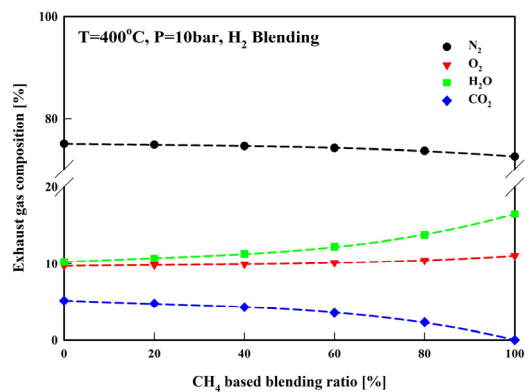


Fig. 12. Exhaust wet gas composition trends for hydrogen blending ratio.

Table 5. Combustion calculation of hydrogen blending ratio

H ₂ %	Φ	Wer Gas (%)				Dry Gas (%)		
		N ₂	O ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂	O ₂	CO ₂
0	0.513	74.96	9.70	10.22	5.11	83.50	10.81	5.69
20	0.507	74.78	9.80	10.68	4.74	83.72	10.97	5.31
40	0.499	74.54	9.93	11.30	4.24	84.03	11.19	4.78
60	0.487	74.17	10.12	12.22	3.49	84.50	11.52	3.98
80	0.467	73.59	10.43	13.70	2.28	85.27	12.09	2.65
100	0.427	72.50	11.05	16.45	0.00	86.78	13.22	0.00

Table 6. Emission correction factor change for hydrogen blending ratio

H ₂ %	Φ	Wer (21% - 15%) / (21% - O ₂ %)	Dry	Wet	Dry
0	0.513	0.531	0.589	100%	100%
20	0.507	0.536	0.598	101%	102%
40	0.499	0.542	0.612	102%	104%
60	0.487	0.551	0.633	104%	108%
80	0.467	0.568	0.673	107%	114%
100	0.427	0.603	0.772	114%	131%

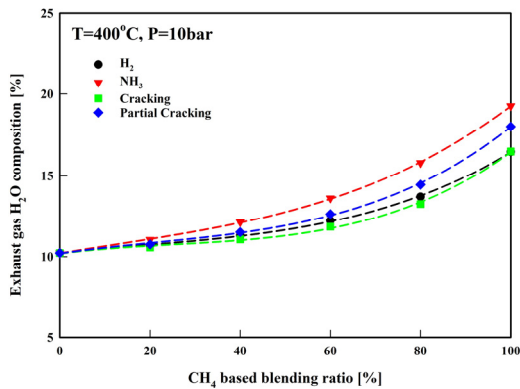


Fig. 13. Exhaust gas composition trends for blending ratio.

$$Corrected\ NO_x = \frac{(21\% - 15\%)}{(21\% - O_2\%)} * Measured\ NO_x \quad (1)$$

수소 혼소율에 따라 Table 6과 같이 Correction factor 값이 증가되는 것을 볼 수 있고, 특히 보통 day 배기가스를 비교하는 경우 correction 값의 상승률은 높아지는 것을 알 수 있다. 즉, 동일한 NO_x 배출값이라도 reference O₂%로

배기가스값을 보정할 경우 상대적으로 높은 NO_x 값으로 제시되고, Dry 배기가스 조성으로 보정할 경우 동일한 NO_x 배출조건에서 메탄에 비해 수소 전소의 경우가 31% 이상 NO_x 발생이 높은 것으로 보일 수 있다.

Fig. 13은 수소뿐만 아니라 모든 무탄소 연료의 혼소율에 따른 배기가스의 수분(H₂O) 증가하는 것을 보여주는 데 각 연료 조성에 따른 수분 증가율에 따른 배기가스 자연 증가분에 대한 고려를 통해 전반적인 배기가스 규제 기준 (Emission Regulation Standard) 값을 수정할 필요가 있다.

6. 결론

메탄 연료를 기반으로 수소, 암모니아, Full Cracking, Partial Cracking 등 무탄소 연료의 혼소/전소 연소 특성을 상세 화학반응 Mechanism(GRI-3.0) 이용한 ANSYS CHEMKIN-Pro 프로그램을 이용하여 고온 고압의 가스 터빈 운전조건인 400°C, 10 bar 조건에서 계산하였다.

H-class 기준의 동일 TIT를 모사하기 위하여 각 조건의 단열 화염온도 1,800 K를 갖는 당량비 조건에서 계산을 수행하였으며 모든 값이 수렴될 수 있도록 수치 해석적 기준 값을 조정하였다.

4가지 연료 조성의 혼소율에 따른 특징을 살펴보면 100% Full Cracking 연료는 수소 특성을 따라가며, 60% Partial Cracking은 암모니아 영향으로 NO_x 발생은 높으나 연소 특성은 CH₄와 비슷한 특성을 보인다.

수소 혼소의 경우 혼소율에 따른 필요 공기량의 차이는 없는데, 기타 연료의 경우 혼소율에 따라 필요 공기량이 적어지는 특성을 보이는데 이는 엔진 효율 관련 압축일을 낮추어 전체 효율은 높아지는 특성으로 나타날 것으로 보인다.

혼소율에 따라 모든 연료 조건에서 배기가스량이 증가하는 것을 확인하여 터빈 효율이 상승할 것으로 예측되었다. 이는 사이클 해석을 통한 해석에서도 암모니아 >

Partial Cracking > Full Cracking > 수소 순으로 Power Output, 효율이 높아짐을 확인하였다.

무탄소 연료의 혼소율에 따라 배기가스 중의 수분(H_2O) 비율이 높아지면서 배기가스 계측시 dry gas 기준으로 제시할 때 전체 배기가스양이 감소하므로 상대적으로 NO_x 값 발생이 높은 것으로 생각할 수 있다. 무탄소 연료의 사용 시 Emission Index 등의 방법으로 단위 발열량당 발생 NO_x (eg. NO_x ppm / kg fuel) 등의 기준 개선이 필요할 것으로 보이며, 효율을 표시할 때도 저위발열량(LHV) 대비 고위발열량(HHV) 기준으로 표현할 때 무탄소 연료의 배기가스 중 수분이 많아 잠열 차이가 높은 특성에 따른 상대적 효율 저하를 시스템 효율이 낮은 것으로 오해할 수 있어 이 경우도 새로운 기준 제시가 필요할 것으로 보인다.

무탄소 연료 혼소율에 따라 연소기 개발에 집중되고 있고 시스템 전체에 관해 연구가 아직은 많이 연구되지 않았지만, 실증을 위해서는 엔진 전체에 대한 특성 평가가 필요하며, 특히 터빈의 경우 배기가스 수소/수증기에 따른 재료 및 코팅 특성, 가스 성분 및 유량 차이에 따른 유동 특성, 수분 증가에 따른 열전달 특성 등 다양한 고려가 필요할 것으로 보이며 이를 바탕으로 엔진 수명에 관련된 적절한 운전조건에 대한 고찰이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20206710100060, 분산발전 가스터빈용 수소 전소 저 NO_x 연소기 개발).

References

- [1] (산업통상자원부 공고 2023-036호) 제10차 전력수급 기본계획(2022~2036).
- [2] H. Kim et. al., A review of carbon neutral gas turbine combustion technology, J. Korean Soc. Combust., 27(2) (2022) 14-38.
- [3] E.-S. Cho, H. Jeong, J. Hwang, M. Kim, A novel 100% hydrogen gas turbine combustor development for industrial use, Proceedings of ASME Turbo Expo 2022, GT2022-80619.
- [4] Y. Shin, E.-S. Cho, Numerical study on H_2 enriched NG lean premixed combustion, J. Korean Soc. Combust., 26(1) (2021) 51-58.
- [5] H. Lee, Y. Woo, MJ Lee, The needs for R&D of ammonia combustion technology for carbon neutrality - Part I Background and economic feasibility of expanding the supply of fuel ammonia, J. Korean Soc. Combust., 26(1) (2021) 59-83.
- [6] H. Lee, Y. Woo, M.J. Lee, The needs for R&D of ammonia combustion technology for carbon neutrality - Part II R&D trends and technical feasibility analysis, J. Korean Soc. Combust., 26(1) (2021) 84-106.
- [7] H. Kobayashi et. al., Science and technology of ammonia combustion, Proc. Combust. Inst., 37 (2019) 109-133.
- [8] The ANSYS, Inc., CHEMKIN-PRO, Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-chemkin-pro>.
- [9] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner Jr., V.V. Lissianski, Z. Qin, GRI-mech 3.0, Available at: <http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/>, 1999.
- [10] M. Ditaranto, I. Saanum, J. Larfeldt, Experimental study on combustion of methane/ammonia blends for gas turbine application, Proceedings of ASME Turbo Expo 2022, GT2022-83039.
- [11] M. Kovaleva, A. Hayakawa, S. Colson, E.C. Okafor, T. Kudo, A. Valera-Medina, H. Kobayashi, Numerical and experimental study of product gas characteristics in premixed ammonia/methane/air laminar flames stabilised in a stagnation flow, Fuel Communications, 10 (2022) 100054.
- [12] P. Chiesa, G. Lozza, L. Mazzocchi, Using hydrogen as gas turbine fuel, J. Eng. Gas Turbines Power, 127(1) (2005) 73-80.
- [13] EBSILON® Professional, Available at: <https://www.ebsilon.com/en/modules/ebsilonrprofessional-base-module>.
- [14] C.M. Douglas, S.L. Shaw, T.D. Martz, R.C. Steele, D.R. Noble, B.L. Emerson, T.C. Lieuwen, Pollutant emission reporting and performance considerations for hydrogen-hydrocarbon fuels in gas turbines, ASME J. Eng. Gas Turbine Power, 144(9) (2022) 091003.

저자정보



이재민

이재민은 두산에너지빌리티 GT 개발팀의 수석연구원이며, 관심 분야는 가스터빈 이차 유로 해석, 엔진 성능 및 온도 해석에 관한 연구이다.



조은성

조은성은 두산에너지빌리티 GT 연소기개발팀의 수석연구원이며, 관심 분야는 가정용, 산업용, 가스터빈 연소기 등 산업/발전 분야의 공해물질 및 탄소 저감 연소법에 관한 연구이다.