

## 배기가스 내 산소 농도 기반 메탄-수소 연료 전환 제어 프로그램 개발

신은주 · 김영배<sup>†</sup>

고등기술연구원

### Development of Control Program for Methane-hydrogen Fuel Conversion Based on Oxygen Concentration in Exhaust Gas

EUNJU SHIN, YOUNG BAE KIM<sup>†</sup>

Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin 17180, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
ooship@iae.re.kr

Received 2 January, 2023  
Revised 3 February, 2023  
Accepted 3 February, 2023

**Abstract** >> Carbon neutrality policies have been strengthened to reduce emissions, and the importance of technology road maps has been emphasized. In the global industrial boiler market, carbon neutrality is implemented through fuel diversification of methane-hydrogen mixture gas. However, various problems such as flashback and flame instability arise. There is a limit to implementing the actual system as it remains in the early stage. Therefore, it is necessary to secure the source technology of methane-hydrogen hybrid combustion system applicable to industrial fields. In this study, control program for methane-hydrogen fuel conversion was developed to expect various parameters. After determining the hydrogen mixing ratio and the input air flow, the fuel conversion control algorithm was constructed to get the parameters that achieve the target oxygen concentration in the exhaust gas. LabVIEW program was used to derive correlations among hydrogen mixing rate, oxygen concentration in exhaust gas, input amount of air and heating value.

**Key words** : Combustion program(연소 프로그램), H<sub>2</sub> Blending(수소 혼합), Fuel conversion(연료 전환), Control algorithm(제어 알고리즘), Excess air flow(과잉 공기량)

## 1. 서 론

국제사회는 산업화 이전 대비 지구 평균 온도 상승을 1.5°C로 억제하기 위해 전 지구적인 탄소중립이 이루어져야 한다고 권고하고 있다<sup>1)</sup>. 세계 주요 선진국은 공식적으로 2050년 탄소중립을 선언하기 시

작하였고, 목표 이행을 구체화하기 위한 기본 로드맵을 제시하였다. 최근 우리나라 정부에서는 산업 및 에너지 분야의 탄소중립을 달성하기 위해 청정에너지 중심으로 에너지 시스템 혁신을 본격적으로 추진하고 있다. 특히 수소는 무탄소 연료로, 보일러, 발전기 등 기존 인프라를 활용하면서 온실가스를 감축

시켜 탄소중립을 달성할 수 있는 방안이다<sup>2)</sup>. 산업통상자원부의 계획에 따르면, 한국에서는 2028년까지 150 MW급 50.0% 혼소 실증을 완료하고, 2035년에는 30.0% 이상 혼소 상용화, 2040년에는 30-100% 혼소 또는 전소하는 것을 목표로 하고 있다. 미국에서는 바이든 정부가 1조 6,000억 원의 수소 기금 중 11.0%를 수소 터빈 발전 연구개발에 배정했고, 일본에서는 2050년 탄소중립 비전을 선언하면서 2050년 수소 소비 2,000만 톤을 목표로 하고 있으며, 유럽에서는 주요 기업들이 liquefied natural gas (LNG) 발전의 단계별 연료 전환과 수소 터빈 기술개발을 위해 노력하고 있다.

국내외에서 활발하게 진행되는 연구의 일환으로, Xie 등<sup>3)</sup>은 화염 안정성에 대한 수소 혼소율과 온도의 영향을 분석하였으며, Guo 등<sup>4)</sup>은 메탄/수소/공기 화염의 소멸거리와 수소혼입비율의 상관관계를 도출하였다. Kıymaz 등<sup>5)</sup>은 수치해석 관점에서 수소가 첨가된 메탄-공기 층류 화염의 역화 한계에 대해 다루었고, Liu 등<sup>6)</sup>은 가스레인지의 수소 혼소율 변화에 따른 화염의 온도 분포를 제시하였다. Liu 등<sup>7)</sup>은 ReaxFF-MD 시뮬레이션을 통해 메탄/수소 혼소 연소를 동역학적으로 해석하여 연소반응의 활성화에너지를 설명하였다. 최근 공기비의 불균형성, 화염 안정성, 연소 속도 등 메탄/수소 연소에 관한 다양한 이슈에 대한 연구가 진행되고 있으나<sup>8-14)</sup>, 예측 및 제어 프로그램에 대한 기반 데이터는 부족한 상황이다. 메탄의 수소 대체율을 향상시키고, 최종 단계인 전소를 달성하기 위해서는 연료로서 수소가 가지는 물리적, 화학적 특성으로 인한 문제를 보완할 수 있는 연소기 제어 시스템 개발이 중요하다<sup>15,16)</sup>. 그런데 수소의 연소 특성은 LNG의 주성분인 메탄(CH<sub>4</sub>)과는 많이 다르기 때문에 기존의 운용 시스템과 다를 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실험적, 경험적 데이터를 하이브리드 연소기에 적용하여 이론적으로 예측할 수 있는 알고리즘으로 구성하였다. 이후 메탄/수소 연료의 완전연소반응에 의한 파라미터를 중심으로 기본 자료를 확보할 수 있는 LabVIEW 프로그램을 설계하

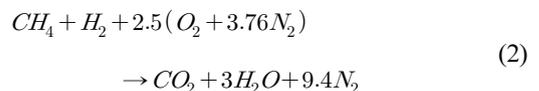
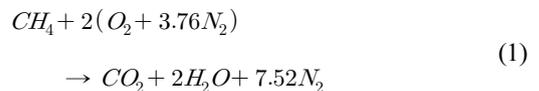
였다. LabVIEW 프로그램에서는 목표 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%를 고정값으로 설정하고 연소기에서 측정되는 배기가스 내 산소 농도를 이용자 인터페이스에 입력하면 해당 값에 대한 수소 혼소율 및 투입 공기량 예측이 가능하다.

## 2. 메탄-수소 연료 전환 제어 프로그램의 설계 방법 및 조건

### 2.1 메탄-수소 혼합가스의 연소반응

통상적으로 1몰의 메탄은 2몰의 산소와 완전연소 반응하여 1몰의 이산화탄소와 2몰의 물을 생성한다. 실제 연소기에서 반응하는 산소는 공기 불배가스 형태로 공급되며 질소는 연소반응에 참여하지 않는다. 평균 공기 구성비는 산소 약 21.0 mol%, 질소 약 79.0 mol%로 연소반응 시 동일한 기체 조성으로 공급된다. 공기 중 산소와 질소는 3.76배의 조성차를 나타내고 식 (1), 식 (2)와 같은 완전연소반응식에 이를 반영하였다.

메탄을 연료로 사용하였을 때 완전연소반응식은 식 (1)과 같고, 메탄 1몰에 수소 1몰을 혼소시킨 가스를 연료로 사용하였을 때 완전연소반응식은 식 (2)와 같다. 본 연구에서는 메탄에 수소를 혼소시킨 연료의 완전연소반응을 기준으로 설계하였다.



실제 연소기에서는 메탄/수소 혼소용 연료의 조성을 조절하여 연소시킬 수 있으며 반응물 조성에 따라 생성물의 조성은 변화한다. 메탄/수소 혼소용 연료 조성 변화에 대응 가능하도록 설계한 완전연소반응식은 식 (3)과 같다. 연료의 메탄혼입비율과 수소

혼입비율을 식 (4)과 식 (5)와 같이 몰분율로 표현하여 계산을 용이하게 하고자 하였다<sup>17)</sup>. x는 0보다 크거나 같고 1보다 작거나 같은 실수이다. 식 (3)에서 반응물 O<sub>2</sub>와 생성물 H<sub>2</sub>O의 계수는 미지수 y, z로 표현하였다.

$$\begin{aligned} xCH_4 + (1-x)H_2 + yO_2 + 3.76yN_2 \\ \rightarrow xCO_2 + zH_2O + 3.76yN_2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta CH_4 : x \quad (4)$$

$$\Delta H_2 : 1-x \quad (5)$$

식 (3)의 반응물과 생성물의 원자 수는 동일하므로 미정계수법을 이용하여 화학방정식의 계수를 구할 수 있다. 탄소의 반응물과 생성물에 대한 원자 수는 식 (6)의 좌변과 우변에 각각 나타내었고, 수소의 반응물과 생성물에 대한 원자 수는 식(7)의 좌변과 우변에 각각 나타내었다. 또한 산소의 반응물과 생성물에 대한 원자 수는 식 (8)의 좌변과 우변에 각각 나타내었다.

$$C: x = x \quad (6)$$

$$H: 4x + 2(1-x) = 2z \quad (7)$$

$$O: 2y = 2x + z \quad (8)$$

식 (6), 식 (7), 식 (8)과 같은 연립방정식을 풀어 미지수 y와 z를 x에 대한 함수로 나타내었다. 식 (9)와 식 (10)은 각각 반응물 O<sub>2</sub>와 생성물 H<sub>2</sub>O의 계수이다.

$$y = x + \frac{1}{2}z = 1.5x + 0.5 \quad (9)$$

$$z = x + 1 \quad (10)$$

따라서 식 (3)의 완전연소반응식의 계수를 x에 대한 함수로 간단하게 정리할 수 있다. 미지수 y와 z를 소거한 완전연소반응식은 식 (11)이다.

$$\begin{aligned} xCH_4 + (1-x)H_2 + (1.5x + 0.5)O_2 \\ + 3.76(1.5x + 0.5)N_2 \\ \rightarrow xCO_2 + (x+1)H_2O + 3.76(1.5x + 0.5)N_2 \end{aligned} \quad (11)$$

실제로는 이론 공기량보다 과량의 공기를 공급하여 완전연소반응을 시키며, 과잉 공기량 개념을 식 (11)에 적용하고자 한다. 공기비 k는 실제 공기량을 이론 공기량으로 나눈 값으로 1보다 큰 실수로 설정하였다. 과잉 공기량은 이론 공기량과 k의 곱으로 나타낼 수 있다.

과잉 공기량은 생성물 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 계수에 영향을 주지 않으므로 식 (11)의 계수와 동일하다. N<sub>2</sub>는 실제 반응에 참여하지 않으므로 N<sub>2</sub>의 계수 역시 식 (11)의 계수와 동일하다. 반응하지 않은 과잉반응물 O<sub>2</sub>는 과잉 산소량에서 이론 산소량을 뺀 값이며, 식 (12)와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} k(1.5x + 0.5)O_2 - (1.5x + 0.5)O_2 \\ = (k-1)(1.5x + 0.5)O_2 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 과량의 공기 투입 시 완전연소반응식은 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} xCH_4 + (1-x)H_2 + k(1.5x + 0.5)O_2 \\ + 3.76k(1.5x + 0.5)N_2 \\ \rightarrow xCO_2 + (x+1)H_2O + 3.76k(1.5x + 0.5)N_2 \\ + (k-1)(1.5x + 0.5)O_2 \end{aligned} \quad (13)$$

이론 공기량 투입 시 완전연소반응식과 과잉 공기량 투입 시 완전연소반응식을 각각 식 (11)과 식 (13)과 같이 x의 상관관계식으로 표현하였다.

## 2.2 LabVIEW 프로그램의 설계 및 활용방안

### 2.2.1 LabVIEW 프로그램의 알고리즘

식 (13)에서 나타낸 x의 상관관계식을 바탕으로 배기가스 내 산소 농도를 활용한 메탄/수소 혼합 가스의 연료 전환 시스템을 제어하는 프로그램을 구성

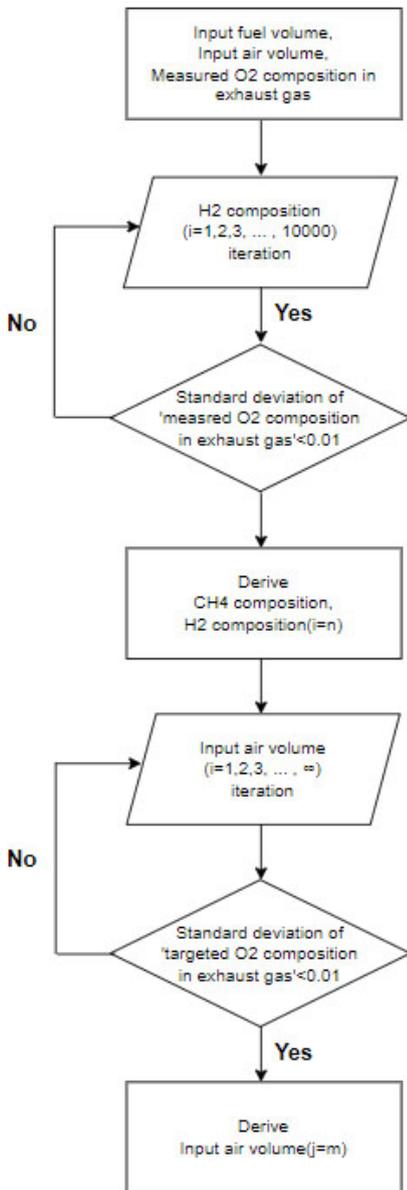


Fig. 1. Program algorithm

하고자 한다. 그래픽 기반의 프로그래밍 언어인 LabVIEW 프로그램(National Instruments Corporation, Austin, TX, USA)을 활용하였으며 문제 해결 논리와 일련의 절차를 Fig. 1과 같은 알고리즘으로 구성하였다. LabVIEW 프로그램에서 연속된 2개의 For문을 구성하여 입력된 정수 N횟수만큼 명령을 반복하였고, 특정 조건을 만족하면 For문을 종료하도록 설계하였다. 첫 번째 For루프의 입력값으로부터 연산에 착수하여 결과를 도출하고, 도출한 결과는 두 번째 For루프의 새로운 입력값으로 적용된다.

첫 번째 For루프에서 수소혼입비율을 반복 터미널로 설정하여 0부터 100까지 0.01 간격으로 반복 수행하도록 명령하였다. 수소혼입비율  $i=1$  ( $=0.00$  vol.%)로부터 연산을 시작하여 메탄혼입비율, 이론 공기량, 공기비, 고위발열량, 저위발열량, 배기가스 조성 등이 순차적으로 계산된다. 반복연산 과정에서 계산된 배기가스 내 산소 농도와 입력값으로 설정한 측정 배기가스 내 산소 농도의 표준편차가 0.01보다 크거나 같으면 수소혼입비율  $i=2$  ( $=0.01$  vol.%) 계산을 수행한다. 최종적으로 계산된 배기가스 내 산소 농도와 측정 배기가스 내 산소 농도의 표준편차가 0.01보다 작아질 때 첫 번째 For루프 명령이 종료된다. 종료 시점에서 도출한 수소혼입비율은 두 번째 For루프의 입력값으로 연계된다.

첫 번째 For루프의 알고리즘이 정지되면 이어서 두 번째 For루프의 알고리즘을 처리한다. 두 번째 For루프에서 공기 투입량을 반복 터미널로 설정하여 0부터 무한대( $\infty$ )까지 0.01 간격으로 반복 수행하도록 설계하였다. 공기투입량  $i=1$  ( $=0.00$  vol.%)로부터 연산을 시작하여 이론 공기량, 공기비, 배기가스 내 산소 농도 등이 순차적으로 계산된다. 반복연산 과정에서 계산된 배기가스 내 산소 농도와 고정값으로 설정한 목표 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%의 표준편차가 0.01보다 크거나 같으면 수소혼입비율  $i=2$  ( $=0.01$  vol.%) 계산을 수행한다. 최종적으로 계산된 배기가스 내 산소 농도와 목표 배기가스 내 산소 농도의 표준편차가 0.01보다 작아질 때 두 번째 For루프 명령이 종료된다. 두 번째 For루프 정지 시점에서

배기가스 내 산소 농도를 도출하면 알고리즘이 종료 된다.

### 2.2.2 LabVIEW 프로그램의 블록다이어그램과 프런트패널 설계

Fig. 1의 순서도를 LabVIEW 프로그램에 도입하였다. LabVIEW 프로그램은 Fig. 2, Fig. 3과 같이 와이어링 방식의 코드로 구성된 블록다이어그램과 Fig. 4와 같이 사용자 인터페이스 형식의 프런트패널로 구성되어 있다. 첫 번째 For루프는 Fig. 2와 같은 블록다이어그램으로 나타내었고, Fig. 4의 좌측 패널에 해당된다. 두 번째 For루프는 Fig. 3과 같은 블록다이어그램으로 나타내었고, Fig. 4의 우측 패널에 해당된다.

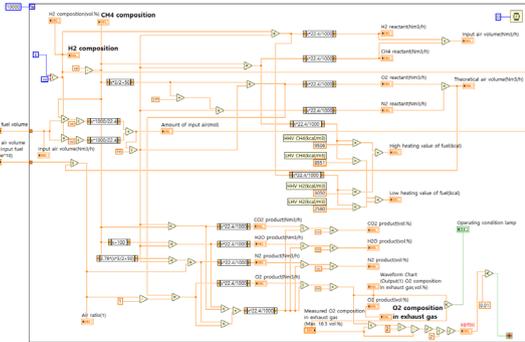


Fig. 2. First loop block diagram

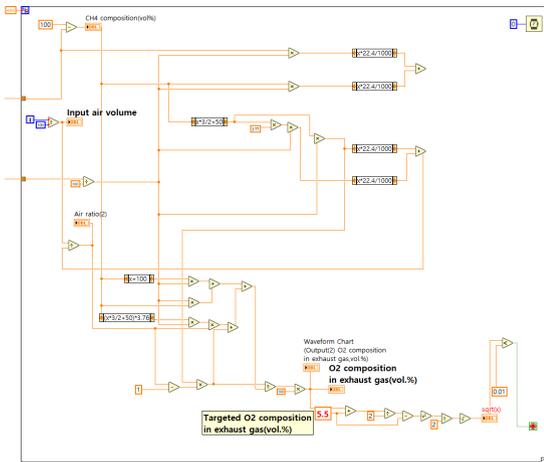


Fig. 3. Second loop block diagram

첫 번째 For루프에서 측정 배기가스 내 산소 농도를 기반으로 수소혼입비율을 최종적으로 도출하고자 한다. Fig. 2의 블록다이어그램에서 설계한 연산 구조에 따라 초기값인 수소혼입비율 0.0 vol.%로부터 계산을 시작하여 반응물과 생성물의 농도, 고위발열량, 저위발열량, 배기가스 내 산소 농도 등을 도출한다. 계산된 배기가스 내 산소 농도와 입력값인 측정 배기가스 내 산소 농도의 표준편차가 0.01 미만인 조건에 대해 참인 경우 연산을 정지한다. 단, 연료 투입량에 비해 공기 투입량이 과다하여 공기비가 비이상적으로 높을 경우 작동이 정지된다. 계산된 배기가스 내 산소 농도가 측정된 배기가스 내 산소 농도보다 작을 때만 정상 작동한다.

두 번째 For루프에서 배기가스 내 산소 농도 기반으로 공기 투입량을 최종적으로 도출하고자 한다. 첫 번째 For루프의 연산 종료 후, Fig. 3의 블록다이어그램에서 설계한 연산 구조에 따라 초기값인 공기 투입량 0.0 m<sup>3</sup>/hr로부터 계산을 시작하여 공기 투입량, 배기가스 내 산소 농도 등을 도출한다. 계산된 배기가스 내 산소 농도와 고정값인 목표 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%의 표준편차가 0.01 미만인 조건에 대해 참인 경우 연산을 정지한다.

블록다이어그램의 데이터만 배열하여 확인할 수 있는 사용자 인터페이스는 Fig. 4의 프런트패널과 같다. 본 프런트패널은 인터페이스의 주요 기능인 입력값, 출력값, 웹브폼 차트 출력을 통해 데이터를 실시간으로 확인할 수 있어 사용자 친화적이다. 블록다이어그램의 컨트롤과 인디케이터는 프런트패

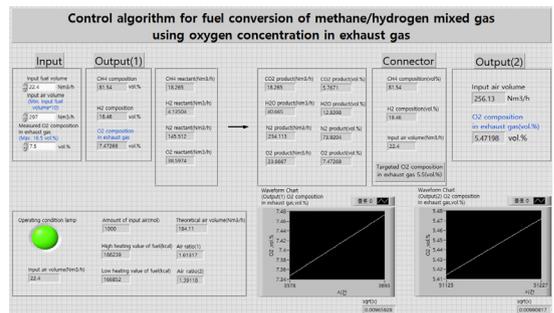


Fig. 4. Front panel

널의 데이터로 구현하였다. 첫 번째 For루프와 두 번째 For루프에서 계산된 배기가스 내 산소 농도는 웨이브폼 차트로 나타내었다.

프린트패널에서 연료 투입량, 공기 투입량, 측정 배기가스 내 산소 농도는 input으로 분류하였고, 메탄혼입비율, 수소혼입비율, 배기가스 내 산소 농도는 첫 번째 For루프의 output (1)으로 도출하였다.

연료투입량, 메탄혼입비율, 수소혼입비율, 목표 배기가스 내 산소 농도는 두 루프에서 공유되는 값으로서 connector로 분류하여 두 번째 루프의 입력값으로 적용시켰다. 최종적으로 공기 투입량과 배기가스 내 산소 농도를 두 번째 루프의 output (2)으로 도출하였다.

사전 실험으로 연료 투입량 22.4 Nm<sup>3</sup>/h, 메탄혼입비율 100.0 vol.%, 수소혼입비율 0.0 vol.%일 때 목표 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%를 달성하는 다양한 파라미터를 구하였고, 이를 통해 공기비 1.3892, 공기 투입량 297.0 Nm<sup>3</sup>/h, 고위발열량 212,934.0 kcal, 저위발열량 191,542.0 kcal, 이론 공기량 214.0 Nm<sup>3</sup>/h를 도출하였다. 따라서 설계한 프린트패널의 input에 연료 투입량 22.4 Nm<sup>3</sup>/h, 공기 투입량 297.0 Nm<sup>3</sup>/h, 측정된 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%를 입력하면 output (1)의 메탄혼입비율 100.0 vol.%, 수소혼입비율 0.0 vol.%를 도출하고 output (2)의 실제 공기 투입량과 실제 배기가스 내 산소 농도는 각각 297.0

Nm<sup>3</sup>/h, 약 5.5 vol.%를 도출한다. 동일한 조건에서 input의 측정 배기가스 내 산소 농도가 5.5 vol.%에서 벗어난다면 output (1)과 output (2)의 초기 결과와 다른 결과를 도출하게 된다. 실제 연소기의 운전 조건인 연료 투입량, 공기 투입량, 측정 배기가스 산소 농도를 프로그램에 적용하면 다양한 파라미터를 예측할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수소혼입비율별 주요 파라미터의 경향성

##### 3.1.1 수소혼입비율별 연료의 고위발열량과 저위발열량

연소기에 공급되는 메탄/수소연료는 수소 원소를 포함하는 탄화수소계열로 연소반응을 통해 물 분자를 생성한다. 통상적으로 물 분자의 증발잠열의 여부에 따라 고위발열량과 저위발열량을 구분한다. 메탄과 수소의 고위발열량은 각각 8,550.7 kcal/Nm<sup>3</sup>, 3,050.0 kcal/Nm<sup>3</sup>이다. 메탄과 수소의 저위발열량은 각각 8,550.7 kcal/Nm<sup>3</sup>, 2,580.0 kcal/Nm<sup>3</sup>이다. 프린트패널에서 초기 입력값으로 연료 투입량 22.4 Nm<sup>3</sup>/hr, 공기 투입량 297.0 Nm<sup>3</sup>/hr, 측정 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%를 적용하였고 수소혼입비율에 따라 변화하는 총 발열량을 Fig. 5와 같이 나타내었다. 배기가스 내 산소 농도가 최소 5.5 vol.%에서 최대 16.6 vol.%까지 증가함에 따라 수소혼입비율이 0.0 vol.%에서 99.9 vol.%까지 증가하였고, 연료의 고위발열량과 저위발열량은 급격히 감소하였다.

##### 3.1.2 수소혼입비율별 공기량과 배기가스 조성

앞서 연료의 메탄혼입비율 x를 기준으로 이론 공기량 투입 시 완전연소반응식과 과잉 공기량 투입 시 완전연소반응식을 식 (11)과 식 (13)과 같이 구하였다. 이 상관관계식을 바탕으로 Fig. 6에서 수소혼입비율별 과잉 공기량과 이론 공기량을 비교하였다. 초기 조건은 연료 투입량 22.4 Nm<sup>3</sup>/h, 공기 투입량 297.0 Nm<sup>3</sup>/h, 측정 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%을 적용하였고 연료 투입량은 22.4 Nm<sup>3</sup>/h로 일정하다. 수

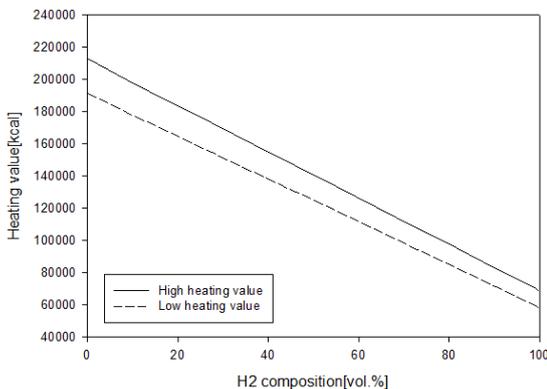


Fig. 5. High heating value and low heating value according to hydrogen composition in fuel

수소혼입비율 0.0 vol.%와 100 vol.% 사이의 조건에서 배기가스 내 산소 농도가 5.5 vol.%가 되도록 제어했을 때 과잉 공기 투입량을 Fig. 6에 나타내었다. 수소혼입비율이 0.0 vol.%에서 100.0 vol.%까지 증가함에 따라 과잉 공기 투입량은 297.0 Nm<sup>3</sup>/h에서 76.0 Nm<sup>3</sup>/h로 급격히 감소하였으며, 공기비는 1.39에서 1.43으로 약간 증가하였다.

수소혼입비율 0.0 vol.%와 100 vol.% 사이의 조건에서 배기가스 내 산소 농도가 5.5 vol.%가 되도록 제어했을 때 이론 공기 투입량을 Fig. 6에 나타내었다. 수소혼입비율이 0.0 vol.%에서 100.0 vol.%까지 증가함에 따라 이론 공기 투입량은 214.0 Nm<sup>3</sup>/h에서

53.0 Nm<sup>3</sup>/h으로 감소하였으며, 공기비는 1로 일정하다.

반면, 수소혼입비율 0.0 vol.%와 100 vol.% 사이의 조건에서 배기가스 내 산소 농도를 제어하지 않으면 과잉 공기 투입량은 Fig. 6의 그래프와 같다. 수소혼입비율이 0.0 vol.%에서 100 vol.%까지 증가함에 따라 과잉 공기 투입량은 297.0 Nm<sup>3</sup>/h로 일정하며, 공기비는 1.39에서 5.56으로 급격히 증가하였다. 따라서 과잉 공기 투입량이 급격히 증가하는 현상을 방지하기 위해 배기가스 내 산소 농도를 제어할 시스템이 필요하다.

Fig. 6에서 수소혼입비율이 100.0 vol.%일 때, 배기가스 내 산소 농도를 제어하기 전과 후의 과잉 공기 투입량 차이의 절댓값은 221.0 Nm<sup>3</sup>/h이다. 수소혼입비율 100.0 vol.%일 때, 배기가스 내 산소 농도를 제어하지 않은 과잉 공기 투입량과 배기가스 내 산소 농도를 제어한 이론 공기 투입량 차이의 절댓값은 244.0 Nm<sup>3</sup>/h이다. 결론적으로 연소기에서 목표 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.% 기준으로 제어해야 할 공기 투입량을 도출하였다.

동일한 초기 조건에서 연료 투입량이 22.4 Nm<sup>3</sup>/h로 일정할 때, 배기가스 내 산소 농도가 5.5 vol.%이 되도록 제어하면 배기가스의 조성 변화는 Fig. 7과 같다. 과잉 공기 투입 시 배기가스의 화학종은 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>이다. 수소혼입비율이 증가함에 따라 배기가스 내 질소와 이산화탄소 조성은 감소하였고, 배기가스 내 수분 조성은 증가하였다.

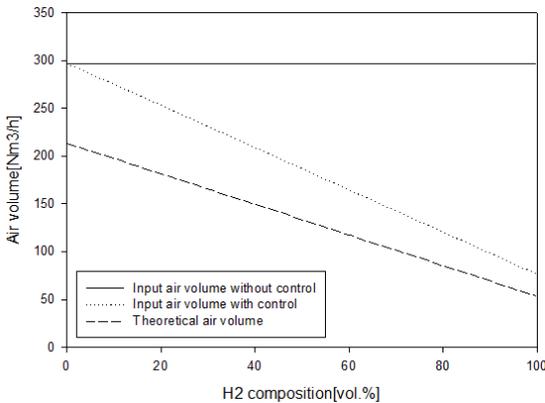


Fig. 6. Comparison of air volume with and without control according to hydrogen composition in fuel

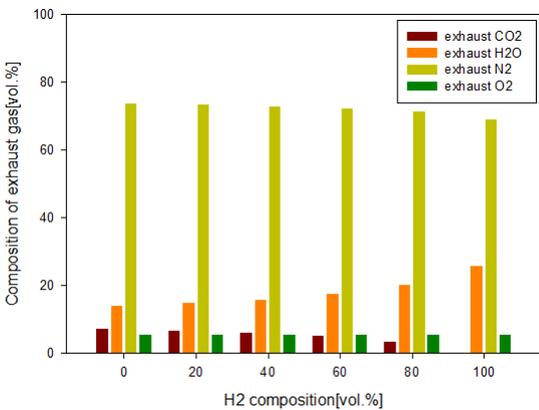


Fig. 7. Composition of exhaust gas according to hydrogen composition in fuel

### 3.2 프런트패널 입력값에 따른 결과물 도출

프런트패널 input의 초기값으로 연료 투입량 22.4 Nm<sup>3</sup>/h, 공기투입량 297 Nm<sup>3</sup>/h, 배기가스 내 산소 농도 5.5 vol.%를 입력했을 때, 메탄혼입비율 100.0 vol.%, 수소혼입비율 0.0 vol.%를 도출한다. 연료 투입량과 공기 투입량이 일정할 때, 측정 배기가스 내 산소 농도에 따른 output (1)과 output (2)의 결과값을 Table 1에 나타내었다. 연소기에서 측정된 배기가스 내 산소 농도, 첫 번째 For루프에서 도출한 메

**Table 1.** Value of input, output (1) and output (2) according to the measured oxygen composition in exhaust gas

Measured O <sub>2</sub> composition in exhaust gas (vol.%)	Calculated CH <sub>4</sub> composition (vol.%)	Calculated H <sub>2</sub> composition (vol.%)	Calculated input air volume (Nm <sup>3</sup> /h)
5.5	100.00	0.00	297.00
6.5	91.08	8.92	277.39
7.5	81.80	18.20	256.89
8.5	72.59	27.41	236.56
9.5	63.10	36.90	215.60
10.5	54.03	45.97	195.57
11.5	45.02	54.98	175.67
12.5	36.07	63.98	155.91
13.5	27.18	72.82	136.28
14.5	18.34	81.66	116.75
15.5	9.56	90.44	97.36
16.5	0.84	99.16	78.11

탄혼입비율과 수소혼입비율, 두 번째 For루프에서 도출한 배기가스 내 산소 농도 결과값을 나타낸다. 측정 배기가스 내 산소 농도가 증가함에 따라 메탄 혼입비율과 공기 투입량은 감소하였고, 수소혼입비율은 증가하였다.

표준온도압력(standard temperature and pressure) 조건에서 프런트패널 input의 연료 투입량이나 공기 투입량이 변화하면 이에 상응하는 측정 배기가스 내 산소 농도 범위가 달라진다. 단, 첫 번째 For루프에서 측정 배기가스 내 산소 농도가 계산된 배기가스 내 산소 농도보다 작을 때만 정상작동램프가 참으로 인식한다. 따라서 input의 다양한 조건에 대해 output (1)과 output (2)를 새롭게 도출할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 메탄연료를 수소로 단계적인 전환을 하였을 때, 연소 알고리즘을 제어하는 시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위해 측정 배기가스 내 산소 농도를 기반으로 실제 메탄혼입비율, 수소혼입비율, 배기가스 내 산소 농도 등을 예측하는

프로그램을 구성하였다. 입력값에 따라 변화하는 다양한 파라미터를 중심으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이론 공기량 투입 시 메탄/수소 혼소용 연료의 완전연소반응식과 과잉 공기량 투입 시 메탄/수소 혼소용 연료의 완전연소반응식을 제시하였다.

2) LabVIEW 프로그램을 활용하여 메탄/수소 혼합 가스의 연료 전환 시스템을 설계하였고, 연속된 2개의 For문을 구성하여 조건부 반복 계산하였다.

3) 첫 번째 For루프에서 수소혼입비율을 반복 터미널로 설정하였고, 두 번째 For루프에서 공기 투입량을 반복 터미널로 설정하여 목표 배기가스 내 산소농도 5.5 vol.%에 근접할 때까지 반복 계산하도록 설계하였다.

4) 배기가스 내 산소 농도가 증가함에 따라 수소 혼입비율은 감소하였고, 연료의 고위발열량과 저위 발열량은 급격히 감소하였다.

5) 연소기의 연료 투입량과 목표 배기가스 내 산소 농도를 제어했을 때, LabVIEW 프로그램을 활용하여 수소혼입비율에 따른 과잉 공기 투입량을 도출할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 산업기술 평가관리원의 지원에 의한 연구입니다(No.20018190).

#### References

1. Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth, "2050 Carbon Neutrality Scenario", Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth, 2021. Retrieved from <https://2050cnc.go.kr/base/contents/view?contentsNo=10&menuLevel=2&menuNo=12>.
2. J. Y. Kim, "Utilization of new carbon-free sources for carbon-neutral implementation", World Energy Market Insight, Vol. 22, No. 2, 2022, pp. 1-12. Retrieved from [http://www.keei.re.kr/insight?open&p=%2Fweb\\_energy\\_new%2Finsight.nsf%2F0%2FC5D4DEB271F05E87492588D3004554DA&s=%3FOpenDocument%26is\\_popup%3D1](http://www.keei.re.kr/insight?open&p=%2Fweb_energy_new%2Finsight.nsf%2F0%2FC5D4DEB271F05E87492588D3004554DA&s=%3FOpenDocument%26is_popup%3D1).
3. Y. Xie, C. Qin, Z. Chen, P. Duan, and S. Guo, "The impact of hydrogen addition to natural gas on flame stability",

- International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 84, 2022, pp. 35851-35863, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.137>.
4. L. Guo, M. Zhai, S. Xu, Q. Shen, P. Dong, and X. S. Bai, "Flame characteristics of methane/air with hydrogen addition in the micro confined combustion space", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 44, 2022, pp. 19319-19337, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.091>.
  5. T. B. Kıymaz, E. Bönücü, D. Güleriyüz, M. Karaca, B. Yılmaz, C. Allouis, and İ. Gökalg, "Numerical investigations on flashback dynamics of premixed methane-hydrogen-air laminar flames", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 59, 2022, pp. 25022-25033, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.230>.
  6. X. Liu, G. Zhu, T. Asim, and R. Mishra, "Combustion characterization of hybrid methane-hydrogen gas in domestic swirl stoves", Fuel, Vol. 333, Pt. 2, 2023, pp. 126413, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126413>.
  7. X. Liu, M. Zhao, M. Feng, and Y. Zhu, "Study on mechanisms of methane/hydrogen blended combustion using reactive molecular dynamics simulation", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, No. 4, 2022, pp. 1625-1635, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.050>.
  8. O. Tuncer, S. Acharya, and J. H. Uhm, "Dynamics, NO<sub>x</sub> and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 1, 2009, pp. 496-506, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.075>.
  9. H. de Vries and H. B. Levinsky, "Flashback, burning velocities and hydrogen admixture: domestic appliance approval, gas regulation and appliance development", Applied Energy, Vol. 259, 2020, pp. 114116, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114116>.
  10. B. Alabaş, G. Tuñç, M. Taştan, and I. Yılmaz, "Experimental investigation of the emission behaviour and flame stability of the oxygen and hydrogen enriched methane under acoustic enforcement", Fuel, Vol. 290, 2021, pp. 120047, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120047>.
  11. Z. Liu, Y. Xiong, Z. Zhu, Z. Zhang, and Y. Liu, "Effects of hydrogen addition on combustion characteristics of a methane fueled MILD model combustor", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 36, 2022, pp. 16309-16320, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.132>.
  12. J. Lai, U. Ahmed, M. Klein, and N. Chakraborty, "A comparison between head-on quenching of stoichiometric methane-air and hydrogen-air premixed flames using Direct Numerical Simulations", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 93, 2022, pp. 108896, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108896>.
  13. Q. Peng, Y. Wu, J. E. W. Yang, H. Xu, and Z. Li, "Combustion characteristics and thermal performance of premixed hydrogen-air in a two-rearward-step micro tube", Applied Energy, Vol. 242, 2019, pp. 424-438, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.137>.
  14. S. J. An, J. J. Park, Y. S. Bae, and Y. J. Lee, "Simulation analysis of MILD combustion and NO<sub>x</sub> formation for methane-hydrogen mixture using 0D model", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 4, 2022, pp. 400-412, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.400>.
  15. Y. S. Song, "Hydrogen mixture turbine conversion using gas turbine retrofit", Journal of the KSME, Vol. 62, No. 3, 2022, pp. 38-42. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11056410>.
  16. Y. J. Joo, M. Y. Kim, J. K. Park, S. I. Park, and J. G. Shin, "Hydrogen enriched gas turbine: core technologies and R&D trend", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 351-362, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.351>.
  17. J. S. Seo, Y. J. Kim, J. K. Park, and C. E. Lee, "A study on the thermal and pollution performances of the heating boilers with NG-H<sub>2</sub> mixture ratio", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 573-584, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.573>.