

# 내연기관에서의 암모니아 연소 영역 조건에 기초한 예혼합 난류 화염 전파 특성

원 현우\*

대진대학교 공과대학 IT기계공학과

## Character of Ammonia Combustion on Internal Combustion Engines Based on Asymptotic Zone Conditional Transport in Turbulent Premixed Combustion

Hyun-Woo Won\*

Department of Mechanical Engineering, Dae-Jin University, Gyeonggi 11159, Korea

(Received 9 July 2025 / Revised 4 August 2025 / Accepted 6 August 2025)

**Abstract** : The energy transition driven by climate change is inspiring industries and scientists to collaborate on developing zero-CO<sub>2</sub>-emission solutions for the transport sector. Ammonia, with the formula NH<sub>3</sub>, is a well-known chemical and a promising energy carrier and carbon-free combustible fuel. Previous studies have revealed the potential and challenges of burning pure premixed hydrogen or ammonia in a spark ignition engine using simulation and experimental activities on a single-cylinder engine. Accordingly, this study focused on the character of ammonia on internal combustion engines based on asymptotic zone condition transport in turbulent premixed combustion. This study enhanced a combustion model, based on the flame surface density equation, with a model for the stretched laminar burning speed, and flame thickness, turbulent intensity, and turbulent flame wrinkling are calculated by computational fluid dynamics (CFD) simulation. The numerical results are validated with the experimental results, which are used to address the character of ammonia turbulent premixed combustion on the Borghi-Peters diagram.

**Key words** : Alternative fuels(대체연료), Carbon-free fuels(무탄소연료), Premixed combustion(예혼합연소), Turbulent flame(난류화염), Turbulent intensity(난류강도)

### Subscripts

- AFR : air fuel ratio
- CA : crank angle
- CFD : computational fluid dynamics
- CI : compression ignition
- GWP : global warming potential
- IMEP : indicated mean effective pressure
- LBV : laminar burning velocity
- LFT : laminar Flame Thickness
- PTC : premixed turbulent combustion
- SI : spark ignition
- SIT : spark ignition time
- TLS : turbulent length scale
- TI : turbulent intensity

### 1. 서론

수송분야에 있어서 환경 오염과 지구온난화(GWP)와 같은 환경적인 영향을 고려한 차량 전동화와 연료의 다양화에 대한 노력은 계속적으로 진행되고 있다.<sup>1-3)</sup> 특히 대체연료로써 연소 중에 추가적인 이산화탄소를 배출하지 않는 무탄소 연료에 대한 관심은 늘어나고 있다. 본 연구에서는 대표적인 무탄소 연료인 수소와 암모니아 중 보다 운송과 사용이 용이한 암모니아 연료의 스파크 점화기관(Spark ignition engine)에서의 연소 특성을 알아본다. 암모니아는 탄소가 없고 수소보다 체적 에너지 밀도가 높아 유망한 에너지원이지만 까다로운 연소 특성, 즉 긴 점화 지연 시간과 낮은 층류 연소 속도, 뿐만 아니라 암모니아 슬립과 질소산화물 및 아산화질소의 높은

\*Corresponding author, E-mail: [energy@daejin.ac.kr](mailto:energy@daejin.ac.kr)

<sup>†</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

배출량도 모두 고려되어야 한다. SI 엔진의 연소과정은 스파크 부분에서 생성된 화염의 확장으로 표현된다. 화염확장은 연소실내의 형상과 흡기에 따른 난류 유동에 의해 난류 화염 전파는 빠른 속도로 신장(伸張)하고 진행된다. 또한 난류 유동은 복잡해서, 피스톤 속도, 흡기 유동 특성 및 속도의 지대한 영향을 받는다. 이는 연소과정의 해석을 위해서 연소실 내에서의 난류 유동에 대한 해석과 화염의 형태에 대한 해석이 필수적이라 하겠다.<sup>4,6)</sup> 특히, 암모니아와 같은 다른 특성의 연료를 SI 엔진에 사용할 경우, 연소의 거동이 달라질 수 있고 따라서 점화 지연과 열역학적 효율뿐만 아니라 배출가스에도 영향을 미칠 수 있다. 열역학적 효율은 화염 전파 속도와 관련이 있기 때문에, 암모니아 연료를 SI 엔진에 사용할 경우, 연소실내의 난류강도에 미치는 각종 인자의 영향을 파악하고 연료로서 적용 가능성에 대한 부분을 고려해야 한다. 특히 연료의 연소특성 해석은 암모니아같은 낮은 휘발성 연료의 연소 개선을 위해 중요한 부분이라 하겠다.

역사적으로는 암모니아를 연료로서 적용하기 위한 실험적, 이론적 연구는 1960부터 활발히 수행되었다. 특히 1966년부터 엔진 연료로 암모니아를 사용할 가능성이 제기되면서 암모니아 연소 연구에 대한 관심이 높아졌다. Fenimore와 Jones는 암모니아 또는 일산화질소를 첨가한 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O 용액을 조사하여 각 성분의 반응 속도 메커니즘을 정리하였고<sup>7)</sup> Pratt와 Starkman은 단일 반응기에 비촉매를 사용한 암모니아와 공기 사이의 연소 반응 연구를 통해, 암모니아 연소 반응 속도를 아레니우스 방정식으로 표현할 수 있음을 증명하였다.<sup>8)</sup> Dasch와 Blint는 암모니아-산소-질소 화학반응 특성을 조사하여 NH<sub>3</sub>에 포함된 질소가 NO 또는 N<sub>2</sub>로 전환되는 것을 제어하는 반응과 조건을 파악하였다.<sup>9)</sup> 암모니아 연소의 화학적 반응에 대한 수치적 이론적 제안은 Kaskan과 Hughes에 의해 1973년에 처음 제안되었고 1989년 Miller는 Bowman과 함께 질소 산화물 형성에 초점을 맞춘 개선된 버전의 메커니즘을 제안하였다.<sup>10)</sup> 이 개선된 Miller 메커니즘은 Davidson 등에서 암모니아의 열분해 메커니즘을 해석하는데 사용되었고<sup>11)</sup> NH<sub>3</sub> 반응 속도의 측정을 통해 NH<sub>2</sub> 및 NH 반응에 대한 정보를 제공할 수 있었다.<sup>12-14)</sup> Bian et al. 모델을 바탕으로 Vandooren은 암모니아 연소에 대한 전체 메커니즘을 정리하였다.<sup>15,16)</sup> 하지만 기존의 암모니아 연소에 대한 해석은 화학적 반응에 대한 해석에 국한되어 있고, SI 엔진에서의 암모니아 연소를 고려한 화염 속도 및 형태에 대한 연구는 거의 진행되지 않은 실정이다. 특히, 난류 화염 전파 속도는 난류 예혼합 화염의 특성을 결정하는 중요한 인자로 인식되고 있다. 예혼합 연소의 Borghi-Peters 다이어그램은 시물

레이션 중 화염에 대한 정성적 정보를 제공한다. Borghi 교수가 처음 가정하고<sup>17)</sup> Peters 교수가 확장한<sup>18)</sup> 이 다이어그램에서는 난류 및 화학적 특성 시간 척도를 비교하여 예혼합 난류 연소의 다양한 모드를 식별할 수 있다. 화학적 및 유동 현상을 통해 연소의 본질과 특성을 파악하고 연소의 특성을 규정할 수 있다. 난류 유동장과의 상호작용에 의해 결정되는 예혼합 화염 구조의 현상학을 평가하기 위해, 화염의 형태를 예혼합 난류 연소 모드의 구간으로 표현된다(Fig. 2).

본 연구에는 과거 실험적 자료를 기준으로 수치해석을 통해 엔진 하드웨어 변화에 따른 예혼합 난류 연소 특성을 파악하고자 한다.<sup>19-21)</sup> 암모니아 연료의 연소 특성을 이해하기 위해 단기통 가솔린 엔진(EP6)과 디젤 엔진(DV6)의 실험 결과를 CFD 수치해석 모델(Converge) 결과를 통해 암모니아 연소의 형태를 정의하고 난류 예혼합 화염의 특성을 파악하였다. 이를 기준으로 기존 내연기관에 암모니아 연료 적용 가능성에 대한 부분을 논의하고자 한다.

## 2. 암모니아 연소에 대한 이론적 해석

대체연료의 SI 엔진의 적용을 위해서는 연료의 발열량뿐만 아니라 연소 속도 및 화염 확산 속도 등에 대한 다양한 반응 요구 조건에 충족해야 한다. 연소속도는 화염 전파의 특성을 나타내는 층류 연소 속도의 함수이고 층류 연소 속도는 화염 신축의 함수이므로, 연소 모델에서는 이 매개변수를 고려해야 한다. 층류 연소 속도, 화염 반경, 연소 질량 분율, 난류 화염 주름 등에 대한 자료를 실험 및 수치해석을 통하여 측정해야 하고 이를 기본으로 난류 예혼합 화염의 특성을 결정할 수 있다.

### 2.1 예혼합 난류 연소 해석을 위한 특성치

SI 엔진의 대체 연료로서 사용하기 위해서 확인되어야 하는 첫째 중요한 특성치는 층류 연소 속도( $S_L$ )이다. 이는 연소 모델링의 핵심 매개변수이고 화염의 팽창 속도에 대한 정보를 제공한다. 이 효과는 층류 조건 즉, 불안정성이 없는 조건에서의 1차원 평면 단일 화염의 속도에 해당하는 압력, 온도, 연료 및 공연비의 함수이다. 기본적으로 층류 연소 속도는 팽창 화염의 속도를 예측하기 위한 함수이지만 이를 직접적으로 화염의 확산 속도로 간주할 수는 없다. 이는 연소실 내에서의 화염의 확산은 보다 복잡하고 확산 화염의 화염 속도는 곡률과 변형률 속도라는 두가지 변수를 포함하는 신장에 영향을 받기 때문이며,<sup>22)</sup> 화염 표면의 상대적 성장 속도로 정의할 수 있는 화염 전파는 연료의 열확산 특성과 관련이 있기

때문이다.<sup>23-25)</sup> SI 엔진에서 화염 길이에 대한 정확한 제시는 소수에 불과하고<sup>26)</sup> 많은 모델은 주로 화염 길이에 대한 고려 없이 층류 연소 속도를 기반으로 하고 있다.

예혼합 난류 연소 해석을 위해 고려되어야 하는 두번째 지수는 난류 강도 ( $u'$ )이다. 평균 유동 유입 속도와 피스톤의 속도에 의해 화염은 층류 화염 상태에서 난류 화염으로 발달되어진다. 난류의 강도가 중요한 것은 화염은 난류에 의해 주름을 만들고 신축 및 변형 특성을 변화시켜 표면을 증가시키기 때문이다. 연소실로 유입되는 평균 운동 에너지는 난류 운동 에너지로 변환되며 배기로 유입되는 질량 흐름과 밀도 변화로 인해 변한다. 난류 운동 에너지는 평균 유동장의 운동 에너지 전달에 의해 생성되고, 점성 소산에 의해 소멸되며, 배기 밸브에서의 밀도 및 유동 변화에 따라 변한다.

세번째로 고려되어야 하는 인자는 난류 특성 길이( $L_T$ )이다. 난류에 의해 생성된 주름에 대한 특성을 계산하고 이를 적분하여 길이의 척도를 추정한다. 화염은 점화 플러그 근처에서 시작하여 난류에 의해 주름지면서 난류 특성 길이를 갖고 벽면으로 확장을 한다. SI 연소 모델링의 기본 가정은 화염이 점화 플러그에서 전극 사이에서 구형의 형태로 증가하는 것으로 가정하고 실린더 내부로 전파하는 동안 평균 표면과 부피는 구형을 이루는 것으로 단순화를 통해 챔버 형상을 고려하여 수치적인 해석이 진행된다.

마지막으로 예혼합 난류 연소 해석을 위한 인자는 층류 화염 두께( $\delta_L$ )이다. 층류 화염 두께는 열 확산도와 층류 연소 속도의 비율로 정의할 수 있다.<sup>27,28)</sup>

### 2.2 예혼합 난류 연소 해석을 위한 특성치 측정 방식

일정 압력에서 자유롭게 전파되는 화염을 이용한 예혼합 층류 연소 속도를 측정하기 위해 CFD 시뮬레이션 1D 프로그램이 사용되었다. SI 엔진 고압, 고온 조건에서의 연료와 공기의 당량비( $\phi$ ), 실린더 압력( $p$ ), 흡기 가스 온도( $T_u$ )을 고려하여 층류 연소 속도( $S_L$ )를 결정하였다. 이를 위해 Converge CFD 툴인 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 알고리즘이 사용되었다. 이를 통해 압력, 온도, 공연비(AFR) 및 여러 조건에 대한 혼합기 층류 화염 속도를 정의할 수 있다. 본 연구의 시뮬레이션 구성은 Fig. 1과 같이 구성된다. 10 cm의 도메인은 100 x 1 x 1의 형태로 세분되어지고 압력은 1-200 bar, 미연 온도는 300 - 1000 K, EQR은 1.0 - 2.0으로 고려하였다.

층류 화염 두께는 열 확산도와 비신장 층류 연소 속도의 비율로 정의된다. 실제로 확산 두께는 층류 화염 두께의 실제 값보다 작으므로 본 연구에서는 연소 가스와 흡

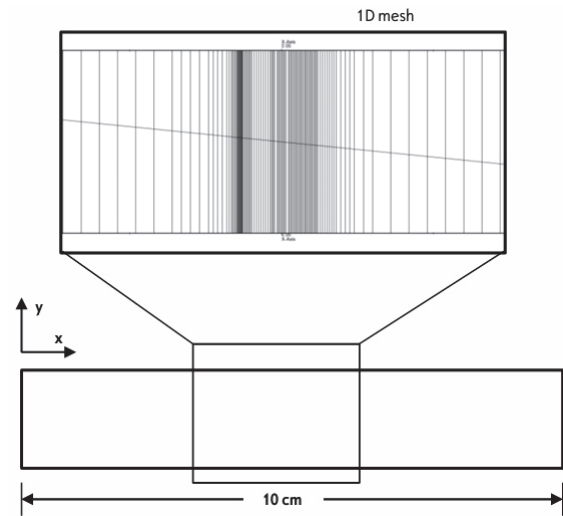


Fig. 1 CFD simulation setup(Converge)

기 가스 온도의 비율로 고려하였다.

난류의 강도는 엔진의 형태 즉 흡입구와 연소실 형상에 영향을 받는 함수로써 시뮬레이션을 통한 난류 강도를 계산하게 된다. 엔진 조건에 따른 CFD를 이용한 층류 화염 속도를 인증하고 이를 기준으로 엔진 시뮬레이션을 위한 난류 속도 모델링 정의할 수 있었다. 단기통 엔진에서의 실험적 결과를 기준으로 수치해석을 통해 엔진 하드웨어 변화에 따른 난류 강도를 측정하였다.<sup>29,30)</sup> 평형 주름 계수는 화염 밀도 방정식의 해석적 해의 결과이고 화염 표면 밀도의 3D CFD 방정식을 약분하여 얻어진다.<sup>31)</sup> 주름 계수를 규정하고 난류 강도( $u'$ )와 수치해석에서의 적분 길이 척도( $L_T$ )를 추정함으로써 난류 특성 길이를 정의하였다. 여기에는 연소 모델의 교정 계수가 포함되며 슈미트 수를 통해 연료에 따라 달라진다.

### 2.3 Borghi-Peters diagram

Fig. 2는 위에서 설명한 4가지의 인자들을 고려하여 예혼합 난류 연소의 특성을 나타낸다. 그림에 표현된 화염의 형태처럼 구간에 따라 난류 화염의 모양은 각기 다른 형태를 갖게 되는데, 화염 구조는 y축에서 층류 화염 속도에 대한 난류 강도의 비율과 x축에서 층류 화염 두께와 화염 곡률의 비율을 기준으로 5개 영역으로 나뉘어 보여준다. 5개 영역은 레이놀즈 수(Re), 담펠러 수(Da), 카를로비츠 수(Ka)의 세 가지 무차원 수로 세분된다. 유체 시스템의 난류 정도를 규정하는 흐름의 레이놀즈 수로 특징지어지고 레이놀즈 수는 개별 유체 요소에 대한 관성력과 점성력의 비율로 정의된다. 담펠러 수는 특성 혼합 시간을 화학 반응이 발생하는 데 걸리는 시간으로 나누는 값으로 정의된다. 한 쌍의 반대 방향으로 회전하는

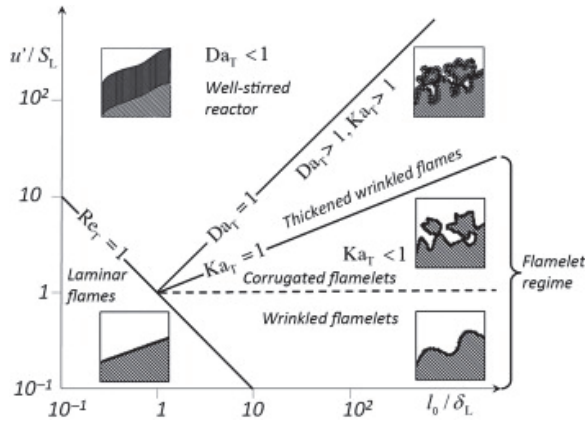


Fig. 2 Borghi-peters diagram of premixed combustion

와류에 의해 발생하는 화염면의 변형률 속도는 모든 난류 스케일에 대해 적분되며, 각 스케일이 화염면을 독립적으로 주름지게 한다고 가정한다.

Peters에 의해 제안된 카를로비츠 수는 난류/화염 상호작용의 다양한 시나리오를 분류하는 데 사용되며, 화염 시간 척도와 콜모고로프 시간 척도의 비율로 정의된다. 난류 구간에서의 네 영역은 난류 화염의 형태를 이해하는데 적용된다. 담콜러 수가 1보다 크면 가장 큰 와류를 포함한 모든 와류가 화염 통과 중에 여러 번 회전한다. 이로 인해 화염 구조가 파괴되어 두꺼워지고 화염과 상호 작용하는 와류가 더 많아지고, 잘 교반된 반응기(Well-stirred reactor)로서 용기 전체가 빠르게 연소가 진행된다. 이는 연소실 내에서의 연소의 형태로 해석할 때, 콜모고로프 스케일로 정의된 가장 작은 와류는 여전히 화염에 진입하여 큰 변형률을 생성하고 국부적인 급랭과 분산 화염 구조를 초래하므로 연소의 회박성을 보인다. 반면, Flamelets 영역은 비율에 따라 두 영역으로 세분된다. 비율이 작으면 낮은 난류 수준이 화염면에 주름 효과만 미치고(Corrugated flamelets) 비율이 크면 난류 와류가 화염 구조 내부로 침투하지는 못하지만 화염을 밀어내는 효과를 보이며 이로 인해 화염의 주름을 형성하게 된다. 이는 화염면에 큰 변동을 일으키고 주름진 구조를 형성한다(Wrinkled flamelets).

### 3. 암모니아 엔진 연소 실험과 3D CFD 모델

엔진 하드웨어 변화에 따른 암모니아 연소 특성의 변화를 이해하기 위해 기존 유럽에 대표적인 1.6리터 푸조 승용차량의 기술된 엔진(EP6)과 디젤 엔진(DV6)을 개조한 단기통 엔진으로 실행하였다. 또한 암모니아 연료 실험 결과를 바탕으로 3D CFD 수치해석(Converge)을 수행하였다.

### 3.1 암모니아 연소 해석을 위한 단기통 엔진 실험

기존 SI(Spark ignition)과 마찬가지로 CI(Compression ignition) 엔진을 개조하여 중앙 연료 분사 장치 자리에 불꽃 점화 장치(NGK IL ZKR8CG)를 장착하여 SI 엔진의 방식을 구현하였다. 단, 흡기와 연소실의 형태를 기존 형태로 유지하였다. 엔진 기본 사양 정보는 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of SI- and CI engine

Engine type	EP6 (SI engine)	DV6 (CI engine)
Displacement Vol.	400 cm <sup>3</sup>	400 cm <sup>3</sup>
Compression ratio	10.5	16.3
Tumble ratio	2.4	-
Swirl ratio	-	2.0

암모니아 연료는 연료 가스통(10 bar)으로부터 흡기부(Intake manifold)에 직접 주입되고 연료와 공기의 흡기량은 체적 유량계(Brooks thermal mass flowmeters)를 사용하여 측정하였다. 가스상 연료와 공기를 예혼합시킴으로써 가솔린 포트분사 시스템을 구현하였다. 연료 분사시, 연료의 보온 장치를 통해 높은 기화 잠열을 통한 아이징 효과를 방지하였다. 공기의 온도는 온도 저절 시스템을 통해 정해진 온도로 연소실내로 주입된다. 연소내 압력은 압력 센서(Kistler piezo transducer, 6045A)를 통해 150 cycle의 평균치로 측정하였다. 본 실험의 공연비는 측정된 체적 유량계를 통해 직접 계산하거나 배출가스 측정치 즉, 암모니아 연소 밸런스를 통해 계산 보정하였다. 엔진실험 장치에 대략도는 Fig. 3과 같다.

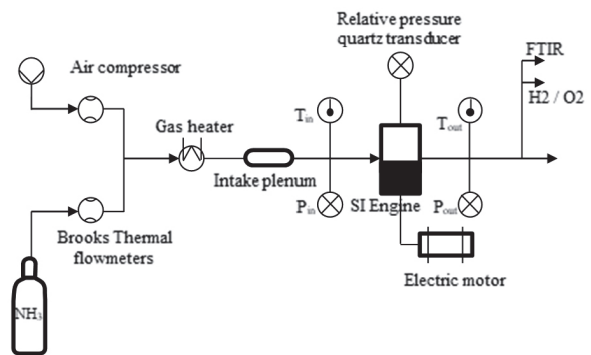


Fig. 3 Sketch of the single cylinder engine test cell

### 3.2 암모니아 연소 해석을 위한 3D CFD 수치해석

암모니아 연소 특성의 이해와 예혼합 난류 화염의 특성 파악을 위한 수치들을 측정하기 위해 3D CFD 모델이 사용되었다. 우선 시뮬레이션 검증은 엔진 실험을 통한

연소 해석과 일치함을 증명함을 통해 이루어진다. Fig. 4는 CI 엔진(DV6)의 암모니아 연소의 성향을 실험 결과와 시뮬레이션의 결과를 비교함으로써 시뮬레이션 결과의 유용함을 증명하였다.

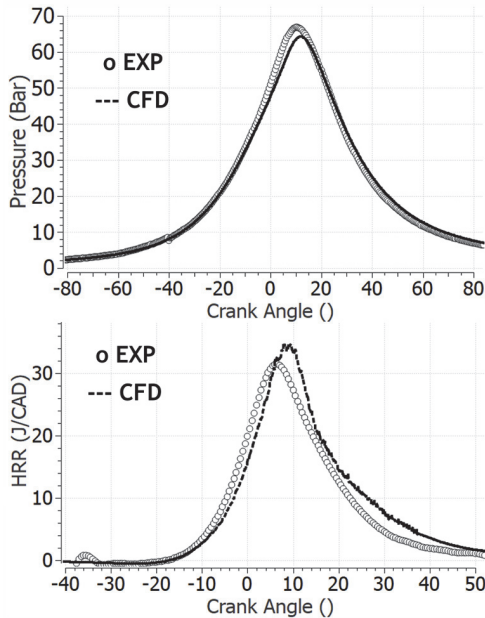


Fig. 4 Pressure and heat release curves for the validation of 3D CFD simulation(DV6) at 1500 rpm and 8 bar of IMEP

암모니아 연료의 특성을 파악하기 위해 CFD 시뮬레이션의 중요한 사용은 엔진 형상에 따른 혼합기 유동 특성에 대한 부분이다. 난류 특성, 즉 난류 강도 및 화염의 적분 길이 척도는 연료의 특성보다는 엔진 하드웨어에 의한 유동에 대한 해석이 필요하기 때문이다. Fig. 5의 3D CFD 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯, 난류 강도가 연료와는 비교적 독립적이며 연소실과 흡입 포트의 기하학적 특성에 따라 달라진다는 사실을 확인 할 수 있다. 이는 SI 엔진 하드웨어가 보다 높은 Tumble 효과와 함께 CI 엔진 보다 높은 난류의 강도의 특성을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

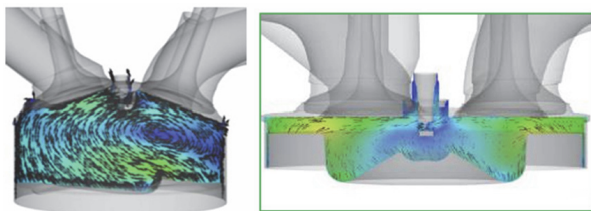


Fig. 5 SI(left) & CI(right) engine 3D CFD simulation results

#### 4. 엔진에 따른 암모니아 예혼합 난류 화염 형태

실험과 시뮬레이션 결과치를 토대로 암모니아 연소의 예혼합 난류 화염의 특성을 파악하고 Borghi-peters diagram 을 통해 화염의 형태 구간을 정의하였다.

##### 4.1 엔진에 따른 암모니아 연소 특성

단기통 엔진 실험을 통한 두 엔진에서의 암모니아 연소에 의한 발열량의 형태는 Fig. 6과 같다. 두 엔진 모두 스파크 타이밍(SIT)을 조절하여 발열량의 중심 위치(CA50)를 상사점 이후 8도(after CA 8°)로 하였다. 일반적으로 높은 압력과 온도의 조건에서의 CI 엔진의 경우 비교적 짧은 연소 기간과 원활한 화염 성장을 기대할 수 있었다. 이는 비교적 비슷한 온도와 압력에서도 CI엔진에서의 암모니아 연소가 비교적 빠르게 진행되는 특성을 보이는 것으로 보아,<sup>19)</sup> 이는 단순한 온도와 압력의 영향 뿐만 아니라 엔진 형상에 따른 난류 강도 및 난류 특성 길이에 의한 영향도 고려되어야 함을 나타낸다. 참고로, 암모니아 연료의 층류 연소 속도와 층류 화염의 두께는 실험으로 보정된 CFD 모델 결과를 바탕으로 계산되었다.

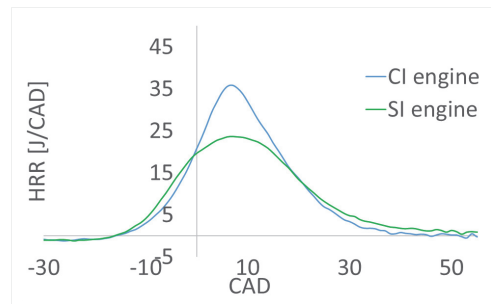


Fig. 6 Heat release rates at SI engine(EP6) and CI engine (DV6) at 1500 rpm and 9 bar of IMEP

Fig. 7은 SI와 CI 엔진에서의 암모니아 공연비 변화에 따른 층류 연소 속도의 변화를 비교한 것이다. 운전 영역은 1500 rpm 엔진 속도와 8 bar의 평균 유효 압력 구간이다. 높은 압축비를 갖는 CI 엔진의 경우 같은 크랭크각에서 높은 압력과 온도를 갖으며 이로 인해 연소 초기의 층류 화염 속도가 10% 정도 빠른 것으로 나타난다. 하지만 이 영역에서 0.4 m/s 이상의 층류 연소 속도를 갖는 가솔린 계열의 연료의 비해서는 암모니아 층류 연소 속도는 상대적으로 낮은 수치를 보인다. 엔진 효율 향상을 위해 연료 속도를 증가해야 하는 암모니아 연소의 경우, 난류 스케일에 따른 예혼합 난류 화염의 형태를 무시하고도, CI 엔진이 기존의 SI엔진 보다 암모니아 연소에 용이함을 예측할 수 있다. 두 엔진에서의 암모니아 층류 화염

두께는 SI 엔진에서 10% 정도 두꺼운 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 화염 주름에 간접적인 영향을 미치게 된다. 하지만 두 엔진에서의 화염 두께 차이는 많이 크지 않으므로 화염 주름 변화에 미미한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

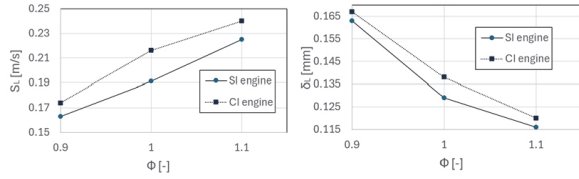


Fig. 7 Laminar burning velocity and thickness vs. equivalence ratios of NH<sub>3</sub> on SI- and CI engine (at 1500 rpm and 8 bar of IMEP)

두 엔진에서의 난류 강도와 난류 특성 길이는 엔진 형상에 따른 CFD 수치해석의 결과이다. 3.2절의 수치해석의 결과처럼 두 엔진의 난류 강도는 운전영역에 따라 크기의 차이를 보인다. 예를 들어, 1500 rpm의 엔진속도와 8 bar 평균유효압력의 경우, SI 엔진은 2.5 m/s의 평균 난류강도를 보이고 CI 엔진은 1.5 m/s의 강도를 보였다. 난류 특성 길이 또한 차이를 보였으며, SI 엔진은 1.5 mm의 평균 길이를 CI 엔진은 짧은 0.8 mm의 결과를 보였다.

4.2 Borghi-Peters diagram에서의 암모니아 연소 형태

예혼합 난류 화염의 Borghi-peters 다이어그램은 시뮬레이션 결과를 이용하여 화염에 대한 정성적인 정보를 얻을 수 있다. 난류 유동장과의 상호작용에 의해 결정되는 예혼합 화염 구조의 현상학을 평가하기 위해 화염을 예혼합 난류 연소 모드의 영역으로 배치한 것이다. 난류 및 화학적 특성 시간 척도를 비교하여 예혼합 난류 연소의 다양한 형태를 식별하는 방식이라 하겠다.

본 연구에 사용한 SI 엔진에서의 암모니아 연소의 예혼합 난류 화염의 형태(Blue circle symbol)는 Fig. 8처럼 Broken reaction zone과 Thin reaction zone 사이 즉 Well-stirred reactor에 존재하는 것으로 식별된다 (1500 rpm and 8 bar of IMEP). 이 구간은 2.3절에서 설명했듯이, 이 구간의 화염의 형태는 비교적 강한 난류와 함께 화염 구조가 파괴될 수 있고 와류가 화염에 진입하여 큰 변형률을 생성하고 국부적인 급랭과 분산 화염 구조를 초래할 수 있다. 이는 연소의 회박성을 보이고 암모니아와 같은 낮은 층류 연소 속도를 갖는 연료는 안정적인 연소를 갖기에는 적합하지 않은 화염의 형태라고 하겠다. 일반적으로 가솔린 계열의 연료가 SI엔진에서 연소가 진행될

경우, 카를로비츠 수(Ka)가 1인 영역 즉, 그림 중앙에 화염 형태를 보임과 비교했을 때, 가솔린과 같은 안정적인 화염의 신장을 위해서는 암모니아 화염 형태 변화가 필요하다 하겠다. 이에 반해, CI 엔진에서의 암모니아 화염의 형태는, 낮은 난류 강도와 난류 특성 길이 감소와 함께, SI엔진에서의 암모니아 연소 형태와 비교 x축과 y축의 값이 낮아지므로 아래 방향으로 이동하는 것을 보인다(Black rectangle symbol). SI 엔진과 비교해 CI 엔진에서 암모니아 연소가 보다 안정적인 이유라고 할 수 있으며 이는 단순한 압축비의 증가에 따른 연소 온도와 압력의 증가 뿐 아니라 예혼합 난류 화염의 형태 변화가 엔진 효율 향상에 효과 또한 있음을 알 수 있다. 위에 논의했듯이, 예혼합 난류 화염의 Borghi-peters 다이어그램은 화염 형태의 비교를 통해 연료 및 엔진 하드웨어에 따른 초기 화염의 형태와 신장을 이해하는데 도움을 준다. 이는 대체연료를 사용하기에 앞서 하드웨어와 연료의 특성을 이해하고 이를 위한 적절한 조화를 이루는 것이 중요하다 하겠다. 하지만 예혼합 난류 화염의 특성이 연소실에서의 화염 전파 전구간에서의 형태를 설명하지는 않는다. 실질적으로 연소실 내에서의 연소 중 화염 성장이 급격히 감소하는 것을 자주 볼 수 있는데, 이는 화염이 피스톤 헤드에 도달하여 화염 곡률의 증가하여 더 이상 존재하지 않거나, 스쿼시 영역 (CI 엔진)에서 난류 화염 성장의 급격한 감소가 발생할 수 있기 때문이다. 전체적인 화염 전파에 대한 해석을 위해서는 연소실 형상에 따른 전체 영역에서의 난류 화염 전파 효과를 이해하는 것이 중요하다 하겠다.

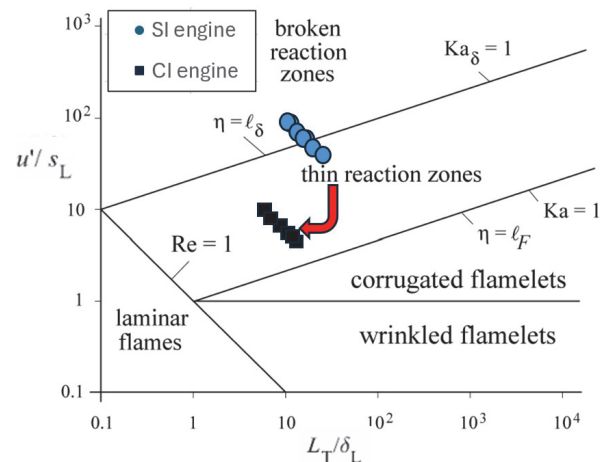


Fig. 8 Borghi-Peters diagram for NH<sub>3</sub> premixed combustion

## 5. 결론

본 연구는 기존 암모니아 연료의 엔진 실험과 수치해석을 바탕으로 하드웨어 변형에 따른 암모니아 연소의 특성을 파악하고 암모니아 예혼합 난류 연소의 형태를 정의하였다. 화염 표면 밀도 방정식에 기반한 CFD 연소 모델을 통해 층류 연소 속도, 화염 두께, 난류 강도 및 난류 화염 주름을 계산하였고 이를 기반으로 Borghi-peters 선도를 통해 암모니아 예혼합 난류 연소의 특성을 분석하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 암모니아 엔진 실험 결과, SI엔진에 비해 CI 엔진에서 암모니아는 비교적 짧은 연소 시간을 갖는데, 이는 단순한 온도와 압력의 영향뿐만 아니라 엔진 형상에 따른 난류 강도 및 난류 특성 길이에 의한 영향도 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 두 엔진에서의 암모니아 예혼합 난류 연소의 형태를 비교한 결과 (1500 rpm, 8 bar of IMEP), SI엔진의 경우, 강한 난류와 함께 화염 구조의 변형이 쉬운 Well-stirred reactor 구역에 존재하고 이는 국부적인 급랭과 분산 화염 구조를 초래할 수 있어 엔진 부하의 변형에 따라 희박연소의 특성을 보일 수 있겠다.
- 3) 이에 반해 CI엔진에서의 경우, 낮은 난류 강도와 난류 특성 길이 감소와 함께, SI 엔진과 비교해 보다 Flamelets 구간에 가까워 암모니아 연소가 CI 엔진에서 상대적으로 안정적인 형태를 보임을 알 수 있다.

기존 내연기관의 비교를 통해 암모니아가 보다 안정적으로 연소할 수 있는 하드웨어 설계의 정보를 제공하였다. 이는 암모니아 연료의 엔진적용을 위해 예혼합 난류 화염 전파 특성을 이해하는 것이 중요함을 보인다.

## References

- 1) J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster and V. Ginzburg, "Mitigation Pathways Compatible with 1.5 °C in the Context of Sustainable Development," 2018.
- 2) European Commission, "The European Green Deal," COM (2019) 640 final, 2019.
- 3) ICCT Report, "The European Commission Regulatory Proposal for Post-2020 CO2 Targets for Cars and Vans: A Summary and Evaluation," January 2018, www.theicct.org.
- 4) M. J. Hall and F. V. Bracco, "A Study of Velocities and Turbulence Intensities Measured in Firing and Motored Engines" SAE 870453, pp.1–28, 1987.
- 5) C. Borgnakke, G. Davis and R. J. Tabaczynski, "Predictions of In-Cylinder Swirl Velocity and Turbulence Intensity for an Open Chamber Cup in

- Piston Engines" SAE 810224, pp.964–978, 1981.
- 6) R. J. Tabaczynski, "A Turbulent Entertainment Model for Spark Ignition Engine Combustion," SAE 770647, pp.2414–2433, 1977.
- 7) C. Fenimore and G. Jones, "Oxidation of Ammonia in Flames," Journal of Physical Chemistry, Vol.65, No.2, pp.298–303, 1961.
- 8) D. Pratt and E. Starkman, "High-Temperature Kinetics of Ammonia-Air Combustion," Twelfth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.891–899, 1969.
- 9) C. Dasch and R. Blint, "A Mechanistic and Experimental Study of Ammonia Flames," Combustion Science and Technology, Vol.41, pp.223–244, 1984.
- 10) J. Miller and C. Bowman, "Mechanism and Modelling of Nitrogen Chemistry in Combustion," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.15, pp.287–338, 1989.
- 11) D. F. Davidson, K. Kohse-Hoinghaus, A. Y. Chang and R. K. Hanson, "A Pyrolysis Mechanism for Ammonia," Int. J. Chem. Kinet., Vol.22, pp.513–535, 1990.
- 12) J. Mertens, A. Chang, R. Hanson and C. Bowman, "Reaction Kinetics of NH in the Shock Tube Pyrolysis of HNCO," Int. J. Chem. Kinet., Vol.21, pp.1049–1067, 1989.
- 13) D. Davidson and R. Hanson, "High Temperature Reaction Rate Coefficients Derived from N-Atom Aras Measurements and Excimer Photolysis of NO," Int. J. Chem. Kinet., Vol.22, pp.843–861, 1990.
- 14) P. Dransfeld, W. Hack, H. Kurzke, F. Temps and H. Wagner, "Direct Studies of Elementary Reactions of NH<sub>2</sub>-Radicals in the Gas Phase," Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Vol.20, pp.655–663, 1984.
- 15) J. Bian, J. Vandooren and P. Van Tiggelen, "Experimental Study of the Formation of Nitrous and Nitric Oxides in H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar Flames Seeded with No and/or NH<sub>3</sub>," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.379–386, 1990.
- 16) J. Vandooren, J. Bian and P. van Tiggelen, "Comparison of Experimental and Calculated Structures of an Ammonia-Nitric Oxide Flame: Importance of the NH<sub>2</sub>+NO Reaction," Combustion and Flame, Vol.98, pp.402–410, 1994.
- 17) R. Borghi, "On the Structure and Morphology of Turbulent Premixed Flames," Recent Advances in Aerospace Sciences, 1985.
- 18) N. Peters, "The Turbulent Burning Velocity for

- Large-Scale and Small-Scale Turbulence,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.384, pp.107–132, 1999.
- 19) H. W. Won, D. Kumar, V. Morel, A. Mercier, C. Mounaïm-Rousselle, J. Bourriot, S. Houille and C. Dumand, “Effect of Compression Ratio and Ignition Energy on Ammonia Premixed Combustion Process in a Single Cylinder Engine,” *Conference on Thermo- and Fluid Dynamics of Clean Propulsion Powerplants, THIESEL*, 2022.
  - 20) H. Won, “Engineering Design Using Carbon Free Fuels on Internal Combustion Engines,” *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.11, pp.875–882, 2024.
  - 21) H. Won, “Study on the Possibility of Using Pure NH<sub>3</sub> Fuel on a Spark Ignition Engine with a High Compression Ratio,” *Transactions of KSAE*, Vol.30, No.11, pp.865–871, 2022.
  - 22) S. M. Candel and T. J. Poinso, “Flame Stretch and the Balance Equation for the Flame Area,” *Combustion Science and Technology*, Vol.70, pp.1–15, 1990.
  - 23) F. Halter, T. Tahtouh and C. Mounaïm-Rousselle, “Nonlinear Effects of Stretch on the Flame Front Propagation,” *Combustion and Flame*.
  - 24) B. Renou and A. Boukhalfa, “An Experimental Study of Freely Propagating Premixed Flames at Various Lewis Numbers,” *Combustion Science and Technology*.
  - 25) Z. Chen, “On the Extraction of Laminar Flame Speed and Markstein Length from Outwardly Propagating Spherical Flames,” *Combustion and Flame*.
  - 26) P. Brequigny, C. Mounaïm-Rousselle, F. Halter, B. Moreau and T. Dubois, “Impact of Fuel Properties and Flame Stretch on the Turbulent Flame Speed in Spark-Ignition Engines,” *SAE 2013-24-0054*, 2013.
  - 27) T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, 3rd Ed., 2012.
  - 28) R. J. Blint, “The Relationship of the Laminar Flame Width to Flame Speed,” *Combustion Science and Technology*, Vol.49, pp.79–92, 1986.
  - 29) F. Bozza, A. Gimelli, N. Federico, S. S. Merola and B. M. Vaglieco, “Validation of a Fractal Combustion Model through Flame Imaging,” *SAE 2005-01-1120*, 2005.
  - 30) F. Bozza, G. Fontana, E. Galloni and E. Torella, “3D-1D Analyses of the Turbulent Flow Field, Burning Speed and Knock Occurrence in a Turbocharged SI Engine,” *SAE 2007-24-0029*, 2007.
  - 31) J. Duclos, D. Veynante and T. Poinso, “A Comparison of Flamelet Models for Premixed Turbulent Combustion,” *Combustion and Flame*, Vol.95, pp.101–117, 1993.