

정적연소기를 이용한 43% 암모니아 크래킹 모사연료의 폭발 특성

김인호 · 이기만[†]

국립순천대학교 기계우주항공공학부/우주항공연구센터

Explosion Characteristics of 43% Ammonia Cracking Simulated Fuel Using a Constant-volume Chamber

INHO KIM, KEEMAN LEE[†]

School of Mechanical and Aerospace Engineering/Center for Aerospace Engineering Research, Suncheon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

[†]Corresponding author :

Kmlee@scnu.ac.kr

Received 31 July, 2024

Revised 12 September, 2024

Accepted 11 October, 2024

Abstract >> In this study, explosion characteristics with varying initial pressure and equivalence ratio were identified under the conditions of $\alpha=43\%$ (40% NH₃, 45% H₂, and 15% N₂), which are reported to be similar to the laminar flame properties of methane/air mixtures. The maximum explosion pressure (P_{max}) and explosion index (K_G) reached the maximum values at equivalence ratio of 1.1, while the explosion time (t_c) reached its minimum at 1.1. Furthermore, it was observed that as the initial pressure increased, both the explosion pressure and explosion time increased.

Key words : 43% ammonia cracking ratio(43% 암모니아 크래킹 비율), Maximum explosion pressure(최대 폭발 압력), Explosion index(폭발지수), Explosion time(폭발 시간), Maximum rate of pressure rise(최대 압력 상승률)

1. 서론

2050 탄소중립을 실현하기 위해 기존의 산업 시스템에 사용되고 있는 탄화수소 연료를 무탄소 연료로 전환하는 연구가 수행되고 있다¹⁾. 무탄소 연료 중 수소(H₂)는 단위 질량당 높은 발열량을 가지고 있고 재생 가능하며 깨끗한 에너지이기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 그러나 수소는 부피당 낮은 에너지 밀도, 높은 저장 및 운송 비용, 화재 및 폭발과 같은 연소로 인한 재해 등의 문제점들을 가지고 있다. 특히 수소를 해외로부터 공급하는 과정에서 발생하는 높은 저

장 및 운송 비용과 폭발 위험성을 해결해야만 한다. 현재 수소를 해외로부터 공급하기 위해 액체수소, 압축수소 배관 등의 방법들이 고려되고 있지만 앞에서 언급한 여러 문제점이 있기에 에너지 캐리어로써 간접 저장 매체인 암모니아(NH₃)를 이용하는 방법이 대두되고 있다^{2,3)}. 암모니아는 질량 기준 17.8%의 수소로 구성되어 있고⁴⁾ 비용이 저렴하며 생산과 공급 측면에서도 기존의 시스템을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 암모니아는 낮은 연소 속도 및 좁은 가연 한계 등의 문제점을 가지고 있어⁵⁾ 암모니아를 직접적으로 연료로 사용하기 위해서는 수소나 메탄

등 다른 연료와 혼합하여 연소시키거나 암모니아 크래킹을 통해 연소 성능을 개선하여야 한다^{6,9)}. 특히 암모니아 크래킹 반응은 낮은 압력과 높은 온도에서 일어날 수 있는 흡열 반응이며 암모니아 2몰이 수소 3몰과 질소 1몰로 분해된다($2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{N}_2$).

일반적으로 암모니아는 약 200°C에서부터 분해가 시작되는데¹⁰⁾ 촉매가 있는 경우 425°C 이상, 촉매가 없는 경우 500°C 이상의 온도에서 98-99%의 전환 효율을 가진다¹¹⁾. 특정 크래킹 비율에서는 메탄/공기 화염의 층류 화염 특성과 유사하다고 보고되는 등¹²⁾ 현재 암모니아 크래킹 연료에 관한 연구는 활발히 진행되고 있다^{12,13)}. 이러한 암모니아 크래킹 연료의 연소 특성을 파악하는 것은 탈탄소 사회를 달성하기 위해 중요하다. 특히 암모니아 연료를 크래킹하면 수소로 인해 잠재적인 폭발 위험성이 증가할 수 있어 암모니아 크래킹 연료의 폭발 특성을 파악하는 것은 더욱 중요하다.

Li와 Xiao¹⁴⁾는 구형 연소기에서 암모니아/디메틸 에테르/공기의 폭발 특성에 관해 연구하였고 Liang 등¹⁵⁾은 초기 압력, 당량비, 온도에 따른 암모니아/공기 혼합물의 화염 특성 및 폭발 과압(overpressure)을 조사하였다. 또한 Cheng과 Zhang¹⁶⁾은 암모니아/수소/공기 혼합물의 폭발 특성을 다양한 초기 압력과 당량비 구간에서 조사하였다. 이처럼 암모니아 혼소 시 폭발 특성에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나 암모니아 크래킹 연료의 폭발 특성에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다. 그러나 안전성 측면에서 볼 때 기존 산업 시스템에 주로 사용되고 있는 탄화수소 연료를 무탄소 연료로 대체하기 위해서는 암모니아 크래킹 연료의 폭발 특성 파악이 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 가연 연료들의 폭발 환경에 일차적인 변수들인 당량비와 초기 압력을 다양하게 조정하여 암모니아 크래킹 모사연료의 폭발 특성을 파악한 후 폭발 매개변수를 통하여 폭발 위험도를 정량적인 지표로 나타내었다. 따라서 본 연구를 통해 크래킹된 암모니아 연료의 폭발 특성을 이해함으로써 폭발 사고 위험성을 예방하고 억제하는 데 도움이 되고자 한다.

2. 실험 설정

2.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 원통형 정적연소기(cylindrical constant-volume chamber)와 슐리렌(Schlieren) 장치를 사용하였으며 이를 Fig. 1에 도시하였다.

Fig. 1의 연소기 내부 길이(L)와 직경(D)의 비 $L/D=1.1$ ($L=220$ mm, $D=200$ mm)이고 연소기의 체적(V)은 0.00596 m^3 이다. 연소기의 양 측면에는 연소 과정을 광학적으로 측정하기 위하여 직경 150 mm, 두께 40 mm의 석영(quartz) 창을 설치하였다. 연소기 내부에는 2개의 텅스텐 전극봉이 설치되어 있어 연소기 내부 혼합기의 점화를 위해 사용된다. 연소기 상단에는 전자 압력계(Lab DMM; AEP transducers, Cognento, Italy)가 장착되어 있어 연소기 내부의 압력을 측정하는 데 사용되었고 압력 센서(Kistler 601CAA; Kistler, Winterthur, Switzerland)로는 폭발 시 압력 거동을 측정하였다. 또한 미세 조절 밸브(micro metering valve)를 설치하여 연소기 내부에 연료를 정밀하게 공급하였다. 100 W의 할로젠 광원(light source)과 슬릿(slit), 광학 거울(optical mirrors) 그리고 나이프 에지(knife edge)로 슐리렌 장치를 구성하였으며 고속 카메라(Chronos 1.4; Kron Technologies, Burnaby, Canada)를 통해 예혼합 화염의 슐리렌 이미지를 취득하였다.

실험 방법으로는 진공펌프를 이용하여 연소기 내

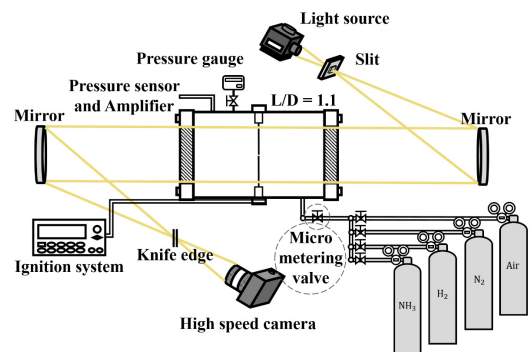


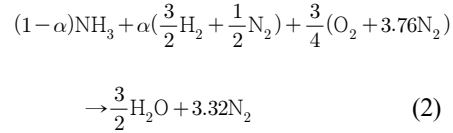
Fig. 1. Schematic diagram of an experimental setup

부와 연료 라인을 진공 상태로 만든 후 Dalton의 분압 법칙에 따라 연료와 공기를 각각의 몰분율(mole fraction)에 해당하는 부분압(partial pressure)을 조절하여 낮은 몰분율을 가지는 가스 순서대로 미세 조절 밸브를 통해 공급한다. 가스 공급 시 발생한 유동이 안정화되어야 하므로 공급 후 약 15분간의 대기 시간을 가진다. 이후 점화 장치에 약 6.5 mJ의 점화 에너지를 공급하고 두 전극봉 사이에 스파크(spark)를 발생시켜 점화한다. 점화와 동시에 화염이 순간적으로 생성되며 연소기 중앙에서 미연가스 방향으로 전파하고 연소기 벽면에 닿으면 소화된다. 소화 이후 생성된 배기가스는 실험실 외부로 배출하는 동시에 압축 공기(compressed air)를 사용하여 연소 시 생성된 응축 수증기를 증발시킨다. 화염이 구형으로 전파하는 과정을 솔리덴 기법과 고속 카메라로 취득하고 동시에 압력 센서로 압력 신호를 측정한다. 이후 전하 증폭기(charge amplifier, Kistler 5011; Kistler)를 통해 측정된 압력 신호를 증폭시키고 LabVIEW signal express (National Instruments, Austin, TX, USA)로 분석한다. 측정의 정확성을 위해 6회 이상 반복 진행하였고 오차 막대(error bar)를 통해 실험의 최댓값과 최솟값을 나타내었다.

2.2 연료 조성비

본 연구에서 모사된 암모니아 크래킹 연료는 암모니아(NH₃), 수소(H₂) 그리고 질소(N₂)로 구성된다. 측정의 정확성을 위해 실험에 사용된 가스는 모두 순도 99.999%의 고순도 가스를 사용하였다. 암모니아 크래킹 비율(ammonia cracking ratio) α 는 다음과 같이 식 (1)로 정의되고 온도와 압력에 따라 무관한 질량 분율을 사용하여 크래킹 비율을 정의하였다. 여기서 Y_i 는 연료 중 화학종 i 의 질량 분율을 의미한다¹⁷⁾.

$$\alpha = \frac{Y_{H_2} + Y_{N_2}}{Y_{NH_3} + Y_{H_2} + Y_{N_2}} \quad (1)$$



식 (1)의 정의에 따라 크래킹된 암모니아의 화학양론적 연소(stoichiometric combustion)에 대한 반응식은 식 (2)로 표현된다¹⁷⁾.

한편 크래킹된 대표적인 암모니아 비율과 관련하여 Shohdy 등¹⁷⁾은 암모니아 크래킹 비율을 10%, 20%, 28%로 선정 후 희박 조건에서 화염의 날림(blow-off), 크래킹 비율에 따른 NO_x 배출 등에 초점을 맞추어 조사를 진행하였다. 그중 $\alpha=28\%$ 인 조건에서의 가연 한계가 메탄-공기 화염의 가연 한계와 유사하다고 보고하였다¹³⁾. 또한 비교적 최근에 Wiseman 등¹²⁾은 메탄/공기 화염의 층류 화염 특성과 유사한 조건(40% NH₃, 45% H₂ and 15% N₂; $\alpha=43\%$)에서 화염의 blow-out limits 등에 관하여 연구하였다. 이전 연구들에서 보고된 다양한 크래킹 비율 중 메탄-공기 화염과 유사한 가연 한계를 가지는 조건($\alpha=28\%$)의 폭발 특성과 유사한 특성을 보이는 조건인 $\alpha=43\%$ 크래킹 비율의 연료가 산업적 응용에 우선적일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 43%의 암모니아 크래킹 비율을 가지는 암모니아 연료에 주안점을 두고 해당 조건에서 폭발 환경에 일차적인 변수들인 초기 압력과 당량비 변화에 따른 폭발 특성을 조사하였다.

2.3 주요 매개변수 정의

폭발 매개변수에는 최대 폭발 압력(maximum explosion pressure, P_{max}), 폭발 시간(explosion time, t_c), 최대 압력 상승률(maximum rate of pressure rise, $(dp/dt)_{max}$) 그리고 폭발지수(explosion index, K_G) 등이 있다. 연소기에 점화에너지를 공급하여 화염이 전파하게 되면 압력이 급속도로 상승하게 되는데 이때 연소기에 장착된 압력센서를 통해 시간에 따른 압력 데이터인 압력 이력(pressure history)을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 압력 이력을 통해 P_{max} , t_c , $(dp/dt)_{max}$,

K_G 와 같은 폭발 특성을 파악하는 데 중요한 매개변수들의 값을 구할 수 있다. 본 연구의 모든 조건에서는 압력거동의 곡선 그래프들이 다음과 같이 비슷한 경향을 보인다. 점화에너지가 공급된 직후에는 압력이 천천히 증가하다가 연소가 활발히 진행되면서 압력이 급격하게 증가한다. 그 후 연소기 내부 벽면에 닿으면 연소기 벽에 의한 열손실(heat loss)로 인하여 압력이 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 2는 y축의 좌측에 표기한 시간에 따른 무차원의 압력(P/P_0)과 y축의 우측에 표기한 압력 상승률을 대표적으로 나타낸 압력거동 그래프이다. 여기서 P 는 폭발 압력, P_0 는 혼합기 초기 압력이다. 또한 Fig. 2를 통해 주요한 폭발 매개변수를 나타내었다. 먼저 최대 폭발 압력(P_{max})은 연소기 내부에서 폭발이 진행되는 동안 발생하는 압력의 최댓값으로 정의된다¹⁸⁾. 그러나 실험을 통해 측정된 폭발 압력(P)은 열전도, 대류 및 복사로 인한 열손실로 인해 시스템이 열역학적으로 달성할 수 있는 최댓값, 즉 단일 평형 압력(adiabatic equilibrium pressure, P_e)보다 상당히 낮다고 보고된다¹⁹⁾. 폭발 시간(t_c)은 점화에너지가 공급된 시간과 최대 폭발 압력에 도달하는데 걸린 시간 사이의 간격으로 정의되며 연소로 인한 열방출률과 열손실이 같아지는 순간으로 구형 연소기에서는 연소가 완료된 순간을 나타낸다²⁰⁾. 최대 압력 상승률($(dp/dt)_{max}$)은 P/P_0 의 기울기가 최댓값을 가지는 지점으로 정의되고 폭발지수(K_G)를 구하는 데

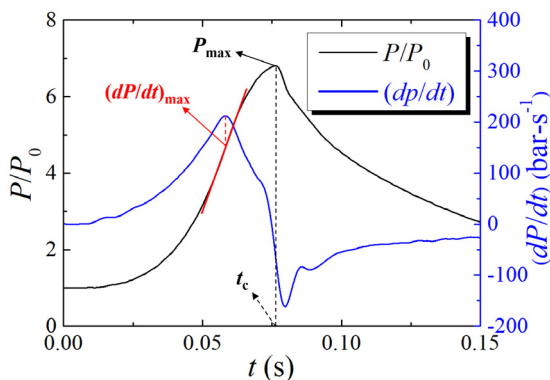


Fig. 2. Definition of the explosion parameters ($\alpha=43\%$, $\Phi=1.3$)

사용된다.

Fig. 3(a)는 43%의 크래킹 비율일 때 시간에 따라 무차원한 압력 이력을 보여주고 있으며 Fig. 3(b)에는 Fig. 3(a)와 같은 조건에서 dp/dt 신호를 나타내었다. 이 경우 Fig. 3(a)의 압력-시간 곡선과 달리 Fig. 3(b)의 dp/dt 값은 압력 진동의 영향을 많이 받기 때문에 측정으로 얻은 처리되지 않은 데이터(raw data)가 평균값(filtered data) 주위로 더 크게 흩어져 취득된다. 이러한 데이터를 처리 시 스무딩 필터(smoothing filter)를 사용하지 않으면 폭발지수(K_G)를 구하는데 사용되는 $(dp/dt)_{max}$ 결정이 의미가 없어질 수 있다. 따라서 본 연구에서도 압력 진동에 따른 편차를 처리하기 위하여 Savitsky-Golay 방법으로 데이터를 처리하였다²¹⁾.

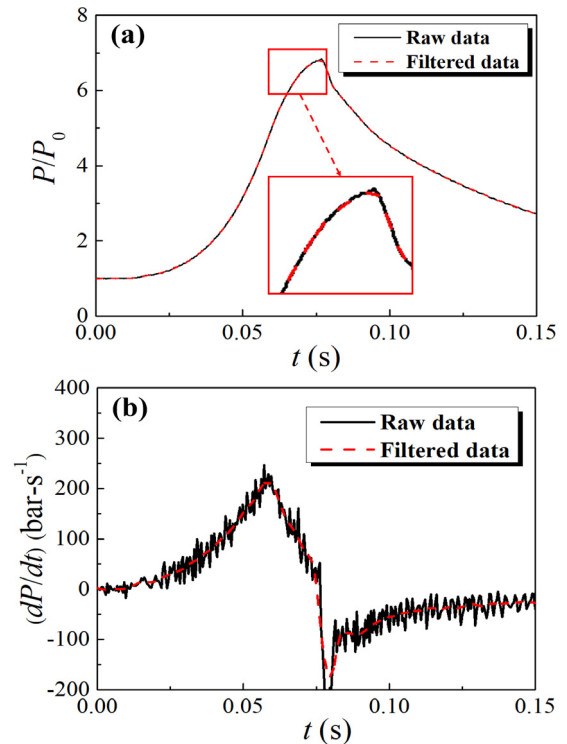


Fig. 3. Smoothing filter²¹⁾ on the pressure curve and determination of the pressure rise. (a) The normalized explosion pressure curve and (b) the dp/dt signal ($\alpha=43\%$, $\Phi=1.3$)

3. 결과 및 고찰

3.1 솔리렌 이미지

솔리렌 기법과 고속 카메라를 통해 암모니아 크래킹 연료의 순간 솔리렌 이미지를 취득하였고 이를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 $\alpha=43\%$ 인 조건에서 초기 압력이 1 bar일 때 당량비에 따른 화염 형상을 나타낸 솔리렌 이미지이고 화염의 상부 표면이 연소기 중앙으로부터 40 mm 떨어진 위치에 도달한 순간을 나타낸다. Hu 등²²⁾은 다양한 당량비와 초기 압력에 따른 수소/암모니아/공기 혼합물의 화염 전파 및 불안정성에 관해 연구하였는데 수소/암모니아/공기 혼합물의 전반적인 화염 안정성은 열 확산과 유체 역학적 불안정성의 결합 효과로 인해 당량비가 증가함에 따라 점차 증가한다고 보고하였다. 또한 $\phi=0.5$ 및 0.8에서는 화염 표면에 주름(wrinkle)이 관찰된 반면 $\phi=1.2$ 및 1.5에서는 화염 표면이 매끄럽게 유지된다고 보고하였다. 본 연구에서도 마찬가지로 당량비가 0.8에서 1.2로 증가할수록 화염 표면의 주름(wrinkle)이 감소하여 당량비 1.2 조건의 화염 표면이 당량비 0.8 조건의 화염 표면보다 상대적으로 매끄러운 것을 볼 수 있다.

3.2 폭발 압력 및 압력 이력

Fig. 5는 $\alpha=43\%$ 인 조건에서 최대 폭발 압력(P_{max})을 기준압(P_0)으로 무차원시킨 후 당량비에 따라 나타낸 그래프이다. Li와 Xiao¹⁴⁾는 암모니아/디메틸에테르/공기 혼합물의 경우 최대 폭발 압력은 희박 당량비 구간에서부터 당량비가 증가함에 따라 증가하다가 당량비 1.1-1.2에서 최댓값에 도달한다고 보고

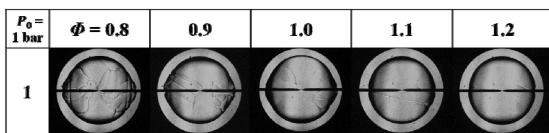


Fig. 4. Instantaneous Schlieren images under $\alpha=43\%$ condition

하였다. 본 연구에서는 이전 연구와 다른 연료를 사용하였지만 당량비 0.8에서부터 당량비가 증가함에 따라 점차 증가하다가 당량비 1.1에서 최댓값을 갖고 점차 감소하는 경향은 유사한 것을 확인할 수 있었다.

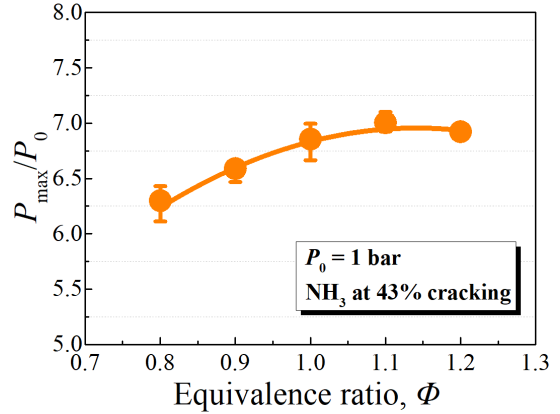


Fig. 5. Normalized maximum explosion pressure, P_{max}/P_0 of $\alpha=43\%$ condition

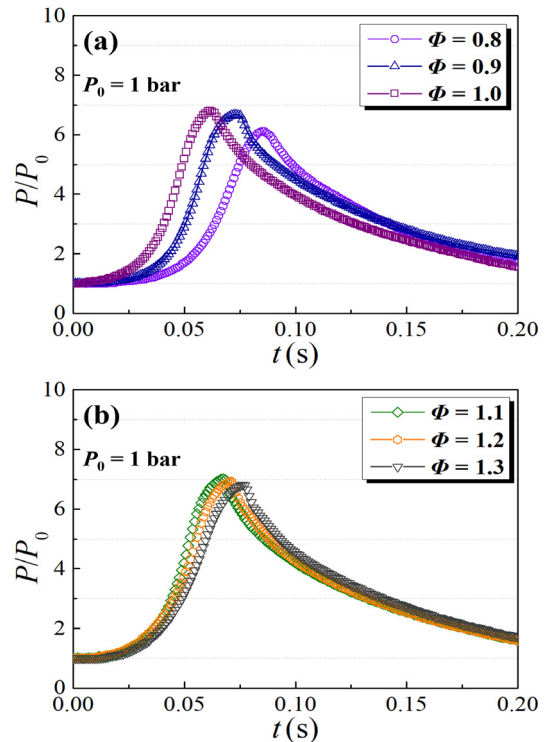


Fig. 6. Pressure history for various equivalence ratio under (a) the lean condition and (b) the rich condition ($\alpha=43\%$)

Fig. 6은 기준압(P_0)으로 무차원시킨 압력-시간 곡선을 나타낸 그래프이다. Fig. 6(a)에는 초기 압력 1 bar에서 희박 당량비 구간의 압력 이력을 나타내었고 Fig. 6(b)에는 Fig. 6(a)와 동일한 조건에서 과농 당량비 구간의 압력 이력을 나타내었다. Fig. 6의 모든 조건에서 압력-시간 곡선은 유사한 경향을 보이는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(a)의 최대 폭발 압력 값은 당량비가 0.8에서 0.9로 증가 시 11.1% 증가하고 당량비가 0.9에서 1.0으로 증가 시 2.4%가 증가하는 경향을 보였다. Fig. 6(b)의 그래프에서는 당량비가 0.1씩 증가함에 따라 최대 폭발 압력 값이 각각 1.52%와 1.9%씩 감소하는 경향을 보였다. 이를 통해 희박 및 과농 후 당량비 조건 모두 화학양론적 조건에 비해 최대 폭발 압력의 값이 낮은 것을 확인할 수 있으며 이러한 경향은 과농 당량비 구간인 Fig. 6(b) 그래프보다 희박 당량비 구간인 Fig. 6(a) 그래프에서 더욱 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

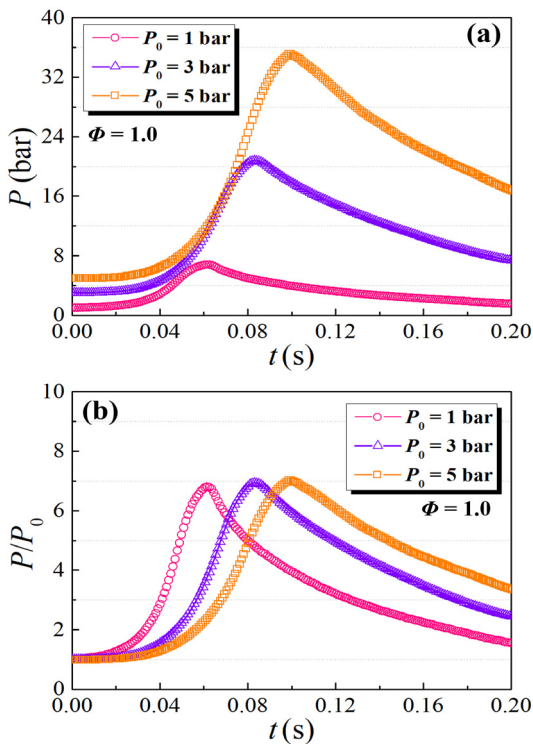


Fig. 7. With various initial pressures, (a) the explosion pressure curve and (b) the normalized explosion pressure curve

43% 크래킹된 암모니아/공기 예혼합 화염의 초기 압력에 따른 압력-시간 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)의 y축은 폭발 압력을 의미하고 Fig. 7(b)의 y축은 초기 기준압(P_0)으로 무차원시킨 폭발 압력을 의미한다. Fig. 7(a)를 통해 폭발 압력은 초기 압력이 증가함에 따라 증가하는 것을 보여준다. 초기 압력이 1 bar를 기준으로 3 bar와 5 bar로 증가함에 따라 폭발 압력은 각각 248%, 490%씩 증가하였다. 이는 체적이 같을 때 혼합물에 포함된 연료 압력이 초기 압력이 증가함에 따라 증가하기 때문이다. 그러나 Fig. 7(b)의 기준압으로 무차원시킨 폭발 압력은 초기 압력이 1 bar를 기준으로 3 bar와 5 bar로 증가하였음에도 각각 1.87%, 3.25%씩 소폭 증가하여 초기 압력은 무차원시킨 폭발 압력에 영향을 거의 미치지 않는 것을 보여준다. 또한 Fig. 7을 통해 초기 압력이 증가할수록 점화에너지가 공급된 이후부터 최대 폭발 압력까지 도달하는 시간인 폭발 시간(t_c)이 길어지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 폭발 시간(t_c)은 층류 연소 속도가 감소하면 최대 폭발 압력까지 도달하는 시간이 지연되어 길어지게 된다. 따라서 동일한 당량비 조건에서 초기 압력이 증가함에 따라 연소 속도가 감소하게 되므로²³⁾ 폭발 시간(t_c)이 길어지는 것으로 해석된다.

3.3 폭발지수 및 폭발 시간

폭발 사고는 인명 피해, 화재, 유해 물질 방출, 경제적 손실 등 수많은 피해를 초래한다. 따라서 폭발의 심각성을 평가하는 데 사용되고 안전 장비 및 폭발 완화 기술을 설계하는 데 있어서 중요한 인자인 폭발지수(K_G)를 파악하는 것은 특히 중요하다. 폭발지수는 다음과 같이 식 (3)을 통해 구할 수 있는데 여기서 $(dp/dt)_{\max}$ 는 최대 압력 상승률이고 V 는 연소기의 체적이다.

$$K_G = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

폭발지수는 폭발의 강도를 나타내므로 폭발지수가 높을수록 폭발의 심각성이 더욱 증가한다. 특히 수소는 폭발지수 값이 크고 폭발 가능성이 더 높기 때문에 크래킹 연료 중 수소 비율이 45%인 43% 크래킹된 암모니아/공기 예혼합 화염의 폭발지수 파악은 현실적으로 매우 필요하다.

Fig. 8은 43% 크래킹된 암모니아의 폭발지수를 다른 연구자들의 연구 결과와 비교한 그래프이다. 다른 연구자들의 폭발지수 결과는 모두 기존 natural gas (NG) 기반의 연소기 연료로 대변되는 메탄/공기의 실험값(마름모, Gieras 등²⁴), 원, INERIS²⁵), 삼각형, BAM²⁵); 오각형, Leo와 Zhang²⁶)이다. Fig. 8을 통해

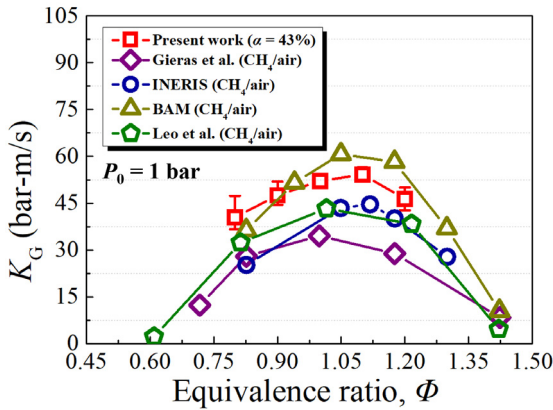


Fig. 8. Data comparing the explosion index under the condition of $\alpha=43\%$ with the explosion index from other literature

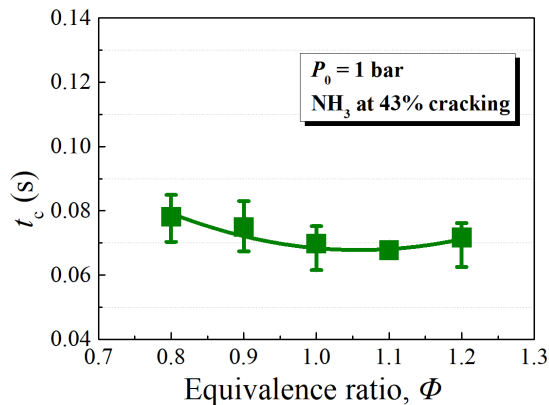


Fig. 9. Explosion time (t_c), under different equivalence ratio condition

본 연구에서 측정된 메탄/공기 화염과 유사한 층류 연소 특성을 보이는 43% 크래킹된 암모니아/공기 예혼합 화염의 폭발지수 값들이 다른 연구자들의 NG 연료 기반인 메탄/공기 혼합물의 폭발지수 값들과 마찬가지로 당량비 1.0-1.1 부근에서 최댓값을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 희박 당량비 구간에서는 당량비가 증가함에 따라 폭발지수가 증가하는 경향을 보이며 최댓값에 도달 후 과농 당량비 구간에서는 당량비가 증가함에 따라 폭발지수가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향들은 이전 메탄/공기 혼합물의 폭발지수 연구와 본 43% 크래킹 암모니아 연료의 폭발지수 연구에서 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

폭발 시간(t_c)은 점화에너지가 공급된 이후부터 최대 폭발 압력에 도달하는 순간까지 걸린 시간을 의미하며 안전장치 설계에 중요한 매개변수이다. 본 연구에서 실험을 통해 $\alpha=43\%$ 인 조건에서의 당량비에 따른 폭발 시간을 측정하였고 이를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 폭발 시간(t_c)은 당량비 0.8에서부터 당량비가 증가함에 따라 감소하다가 당량비 1.1에서 최솟값을 가진 이후 당량비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 암모니아/디메틸에테르/공기 혼합물의 폭발 특성 조사한 Li와 Xiao¹⁴)의 실험 결과에서도 이러한 경향을 볼 수 있는데 당량비가 증가함에 따라 감소하여 당량비 1.1 근처에서 최솟값에 도달한 다음 다시 증가하는 경향을 보인다고 보고하고 있다. 이 문헌에서 폭발 시간(t_c)은 층류 연소 속도와 밀접하게 관련되어 있으며 층류 연소 속도는 희박 당량비 구간에서는 연료가 부족하여 감소하고 과농 당량비 구간에서는 산화제가 부족하여 감소한 현상으로 분석하였다¹⁴). 따라서 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 당량비 1.1에서 $\alpha=43\%$ 인 조건의 층류 연소 속도가 최댓값을 가지기 때문에 본 연구의 폭발 시간이 당량비 1.1에서 최솟값을 나타내는 것으로 이해된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 대표적인 탄소 연료로 NG 기반의 연소기 연료로 대변되는 메탄/공기 화염의 층류

화염 특성과 비슷한 조건으로 보고된 $\alpha=43\%$ 인 무탄소 암모니아 연료 조건에서 초기 압력과 당량비에 따른 폭발 특성을 파악하였고 다음의 결론을 얻었다.

1) 43% 크래킹된 암모니아/공기 예혼합 화염의 최대 폭발 압력(P_{max})은 희박 당량비 구간에서 당량비가 증가함에 따라 증가하다가 1.1에서 최댓값에 도달한 후 과농 당량비 구간에서 당량비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

2) 초기 압력이 증가함에 따라 폭발 압력이 증가하는 경향을 보였는데 이는 동일한 체적에서 초기 압력이 증가함에 따라 혼합물에 포함된 연료가 증가하기 때문이다. 반면 기준압(P_0)으로 무차원한 폭발 압력은 초기 압력이 증가하였음에도 값이 거의 변하지 않았다.

3) 43% 크래킹된 암모니아/공기 예혼합 화염의 당량비에 따른 폭발지수(K_G)는 최대 폭발 압력(P_{max})과 유사한 경향을 보였고 당량비 1.1에서 최댓값을 가졌다. 반면 당량비에 따른 폭발 시간(t_c)은 폭발지수(K_G), 최대 폭발 압력(P_{max})과 반대의 경향을 보였고 1.1에서 최솟값을 가졌다.

4) 최대 폭발 압력(P_{max})에 도달한 순간을 나타내는 폭발 시간(t_c)은 초기 압력이 증가함에 따라 길어지는 경향을 보였다. 이는 동일한 당량비 조건에서 초기 압력이 증가하면 미연가스의 밀도가 증가하게 되고 층류 연소 속도가 감소하기 때문이다. 따라서 층류 연소 속도와 밀접한 관련이 있는 폭발 시간(t_c)이 길어지는 것으로 판단하였다.

후 기

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구(2020 6710100060, 분산발전 가스터빈용 수소전소저 NOx 연소기 개발) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2022R1F1A1072007)이며 이에 감사드립니다.

References

1. A. M. Elbaz, S. Wang, T. F. Guiberti, and W. L. Roberts, "Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications", *Fuel Communications*, Vol. 10, 2022, pp. 100053, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fueco.2022.100053>.
2. M. Comotti and S. Frigo, "Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fuelled internal combustion engines", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 33, 2015, pp. 10673-10686, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.080>.
3. P. Berwal, S. Kumar, and B. Khandelwal, "A comprehensive review on synthesis, chemical kinetics, and practical application of ammonia as future fuel for combustion", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 99, 2021, pp. 273-298, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.10.001>.
4. A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen, "Ammonia for power", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 69, 2018, pp. 63-102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>.
5. H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, "Science and technology of ammonia combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 1, 2019, pp. 109-133, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
6. M. Richter, R. Schultheis, J. R. Dawson, A. Gruber, R. S. Barlow, A. Dreizler, and D. Geyer, "Extinction strain rates of premixed ammonia/hydrogen/nitrogen-air counterflow flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 39, No. 2, 2023, pp. 2027-2035, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.09.011>.
7. W. S. Chai, Y. Bao, P. Jin, G. Tang, and L. Zhou, "A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 147, 2021, pp. 111254, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111254>.
8. H. Xiao, M. Howard, A. Valera-Medina, S. Dooley, P. J. Bowen, "Study on reduced chemical mechanisms of ammonia/methane combustion under gas turbine conditions", *Energy & Fuels*, Vol. 30, No. 10, 2016, pp. 8701-8710, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01556>.
9. Z. Wang, C. Ji, D. Wang, R. Hou, T. Zhang, and S. Wang, "Experimental and numerical study on premixed partially dissociated ammonia mixtures. Part II: numerical study of premixed combustion characteristics", *Fuel*, Vol. 306, 2021, pp. 121660, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121660>.
10. R. Lan, J. T. S. Irvine, and S. Tao, "Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 2, 2012, pp. 1482-1494, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.004>.

11. A. Klerke, C. H. Christensen, J. K. Nørskovb, and T. Vegge, "Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 20, 2008, pp. 2304-2310, doi: <https://doi.org/10.1039/B720020J>.
12. S. Wiseman, M. Rieth, A. Gruber, J. R. Dawson, and J. H. Chen, "A comparison of the blow-out behavior of turbulent premixed ammonia/hydrogen/nitrogen-air and methane-air flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 38, No. 2, 2021, pp. 2869-2876, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.011>.
13. F. J. Verkamp, M. C. Hardin, and J. R. Williams, "Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners", *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 11, No. 1, 1967, pp. 985-992, doi: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(67\)80225-X](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(67)80225-X).
14. H. Li and H. Xiao, "Experimental study on the explosion characteristics of NH₃/DME/air mixtures", *Fuel*, Vol. 352, 2023, pp. 129069, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129069>.
15. B. Liang, W. Gao, K. Zhang, and Y. Li, "Ammonia-air combustion and explosion characteristics at elevated temperature and elevated pressure", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 53, 2023, pp. 20225-20237, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.011>.
16. J. Cheng and B. Zhang, "Experimental study on the explosion characteristics of ammonia-hydrogen-air mixtures", *Fuel*, Vol. 363, 2024, pp. 131046, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131046>.
17. N. N. Shohdy, M. Alicherif, and D. A. Lacoste, "Transfer functions of ammonia and partly cracked ammonia swirl flames", *Energies*, Vol. 16, No. 3, pp. 1323, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031323>.
18. D. Razus, C. Movileanu, V. Brinzea, and D. Oancea, "Explosion pressures of hydrocarbon-air mixtures in closed vessels", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 135, No. 1-3, 2006, pp. 58-65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.061>.
19. C. Tang, S. Zhang, Z. Si, Z. Huang, K. Zhang, and Z. Jin, "High methane natural gas/air explosion characteristics in confined vessel", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 278, 2014, pp. 520-528, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.047>.
20. Y. Xie, J. Wang, X. Cai, and Z. Huang, "Pressure history in the explosion of moist syngas/air mixtures", *Fuel*, Vol. 185, 2016, pp. 18-25, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.072>.
21. A. Savitzky and M. J. E. Golay, "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures", *Analytical Chemistry*, Vol. 36, No. 8, 1964, pp. 1627-1639, doi: <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.
22. X. Hu, C. Luo, X. Chen, Q. Liu, and M. Su, "Study on flame propagation and inherent instability of hydrogen/ammonia/air mixture", *Fuel*, Vol. 357, Pt. B, 2024, pp. 129848, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129848>.
23. J. Song and K. Lee, "A study on measurement of laminar burning velocity and Markstein length of SNG fuel in spherical propagation flame", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 1, 2019, pp. 67-75, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.1.67>.
24. M. Gieras, R. Klemens, G. Rarata, and P. Wolański, "Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40 dm³ at normal and elevated temperature", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19, No. 2-3, 2006, pp. 263-270, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.05.004>.
25. K. Holtappels, C. Liebner, V. Schröder, and H. P. Schildberg, "Project SAFEKINEX - safe and efficient hydrocarbon oxidation processes by kinetics and explosion expertise", Federal Institute for Materials Research and Testing, 2006. Available from <https://www.morechemistry.com/SAFEKINEX/deliverables/44.Del.%20No.%208.pdf>.
26. Y. Leo and B. Zhang, "Explosion behavior of methane-air mixtures and Rayleigh-Taylor instability in the explosion process near the flammability limits", *Fuel*, Vol. 324, Pt. C, 2022, pp. 124730, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124730>.