

수소/공기/희석제 혼합기의 점화지연과 화학반응 특성연구

이동열* · 이의주**†

Characteristics of Chemical Reaction and Ignition Delay in Hydrogen/Air/Diluent Mixtures

Dong Youl Lee* · Eui Ju Lee**†

†Corresponding Author

Eui Ju Lee

Tel : +82-51-629-6471

E-mail : ejlee@pknu.ac.kr

Received : December 1, 2020

Revised : March 24, 2021

Accepted : May 25, 2021

Abstract : Hydrogen is considered a cleaner energy source than fossil fuels. As a result, the use of hydrogen in daily life and economic industries is expected to increase. However, the use of hydrogen energy is currently limited because of safety issues. The rate of combustion of the hydrogen mixture is about seven times higher than that of hydrocarbon fuels. The hydrogen mixture is highly flammable and has a low minimum ignition energy. Therefore, it presents considerable risks for fire and explosions in all areas of hydrogen manufacturing, transportation, storage, and use. In this study, the auto-ignition characteristics of hydrogen were investigated numerically for diluted hydrogen mixtures. Auto-ignition temperature, a critical property predicting the fire and explosion risk in hydrogen combustion, was determined in well-stirred reactors. When N₂ and CO₂ were used to dilute the hydrogen/air mixture, the ignition delay time increased with increasing dilution ratios in both cases. The CO₂-diluted mixtures exhibited a longer ignition delay than the N₂-diluted mixtures. We also confirmed that lower initial ignition temperatures increased the ignition delay times at 950 K and above. Overall, the auto-ignition characteristics, such as the concentrations of participating species and ignition delay times, were primarily affected by the initial temperature of the mixture.

Key Words : hydrogen, ignition delay time, diluent

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

산업혁명 이후 화석연료를 활용한 에너지 사용량이 큰 폭으로 증가하면서 에너지 변환과정에서 발생하는 환경오염 물질인 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 매연 등 온실가스와 미세먼지 배출이 사회적 문제로 대두되었고, 이에 대응하기 위하여 환경오염물질 배출이 적은 시스템을 개발하거나 신재생에너지와 같은 대체연료로의 전환에 많은 노력을 기울이고 있다. 최근 이러한 사회적 변화 과정에서 청정성이 우수한 수소가 주목받게 되었으며, 수소를 기존 화석연료에 첨가하여 오염물질 배출을 감소시키거나 연료전지를 통해 소규모 발전 및 자동차에 적용하여 수소의 사용이 대중화

되고 있다. 하지만 수소의 연소특성은 화석연료인 탄화수소 연료보다 연소속도가 약 7배 정도 빠르며 공기 중 가연한계는 약 4%~75%로 넓다. 또한 최소 점화에너지가 매우 작아 쉽게 점화될 뿐만 아니라¹⁾ 수소화염을 육안으로 식별하기 어려워 탄화수소 연료대비 화재나 폭발의 위험성은 더 높다고 할 수 있다.

수소 반응이 모든 탄화수소 산화과정에서 가장 기본적인 물질이므로 수소 연소에 관해서는 이전부터 많은 연구가 진행되었다. 기본 연소반응 및 특성^{2,3)}과 함께 설비 및 점화에 관한 안전관련 연구⁴⁾가 수행되었다. 특히, 1970년대 수소/산소 점화관련 연구가 충격파관(shock tube)을 활용한 실험연구⁵⁾의 진행으로 점화지연 시간 측정이 가능하게 되었고, 실험값을 근거로 수치

*부경대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

**부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

해석을 위한 반응 메커니즘(reaction mechanism)도 함께 개발되었다⁶⁾. 수소의 사용 중 안전에 가장 중요한 물리 특성인 점화지연시간과 관련된 연구는 항공유와 같은 혼합 액체연료의 점화지연특성 연구⁷⁾ 및 가스터빈과 엔진 점화특성^{8,9)}에 관련한 연구가 많이 수행되었고, 점화지연 또는 소화를 위해서는 수소/공기/HFP 혼합기에서 화학반응 및 점화지연특성 연구¹⁰⁾와 혼합연료에서의 CO₂ 희석효과¹¹⁾ 등에 관한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 자세한 수치해석을 통해 화재나 폭발의 핵심적 단계인 자연점화 과정 중 반응특성을 연구하였고, 자연점화를 억제하거나 지연시키기 위해 희석제를 첨가하여 수소/공기 혼합기의 자연점화 지연특성을 고찰하였다. 이 결과는 수소가스의 자연점화특성을 이해하고 희석제의 물리·화학적 영향인자를 도출하여 수소 대중화 사회에 수소 제조, 수송, 저장 그리고 사용 전반의 안전관리에 기초적인 자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

수소/공기 혼합기의 자연점화과정에 대한 화학반응 기구와 점화지연시간 특성을 수치해석하기 위해서 Chemkin의 PSR(perfectly stirred reactor) 프로그램¹²⁾을 활용하여 해석하였다. PSR은 자연점화과정에 단일 밀폐시스템 비정상 상태를 가정하여 해석되었고, 아래와 같이 에너지 방정식과 화학종 방정식을 이용하였다.

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho c_p} \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k W_k \quad (1)$$

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho}, k = 1, \dots, K \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 Y_k 는 화학종의 질량분율, T 는 온도, t 는 독립변수인 시간을 의미 한다 또한 c_p 는 평균 정압비열, ρ 는 밀도, h_k 는 화학종의 단위질량당 엔탈피(specific enthalpy), $\dot{\omega}_k$ 는 화학종의 몰생성율(molar production rate), 그리고 W_k 는 화학종의 각각의 분자량을 의미한다. 수소 산화 반응을 위해서는 San Diego 반응기구¹³⁾로 잘 알려져 있는 반응메커니즘을 사용했으며, 이 반응기구는 40개의 화학종과 175개의 화학반응식이 고려되었다.

자연점화 과정에서의 반응특성과 자연점화시간을 다양한 물리량에 대한 영향을 수치해석하였다. 질소와 이산화탄소의 희석제를 선정하였고, 수소/공기의 완전 화학반응에서 연료 중 희석제를 20%, 50%, 80%로 첨

가하여 전체혼합기에서는 희석제의 몰분율이 6.9%, 22.9%, 54.2%로 하였다. 초기 온도는 840 K에서부터 1320 K까지 변화시켰으며, 압력은 대기압을 포함하여 0.5 atm, 1.0 atm, 2.0 atm에서 수치해석하였고, 수소와 공기의 혼합비인 당량비(equivalence ratio, ϕ)는 0.5, 1.0, 2.0에 대해서 계산하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 점화단계의 수치해석 검증 및 반응특성

수소/공기 혼합기의 점화특성 연구에 사용된 반응기구를 포함한 수치해석 결과의 검증을 위해 계산된 점화지연시간을 기존 연구논문의 실험결과¹⁴⁾와 비교하여 Fig. 1에 도시하였다. 이론당량비 혼합기에서 0.5 atm, 1.0 atm, 2.0 atm 등 세 가지의 분위기 압력에서의 점화지연시간을 비교한 결과 2.0 atm 조건에서 실험값과 계산값이 가장 잘 일치하였고, 0.5 atm과 1.0 atm에서는 실험값에 비해 계산값이 다소 낮았으며, 저온 영역에는 실험값 데이터가 부족하여 차이를 비교하기는 곤란하였다. 그러나 실험값이 있는 범위의 데이터는 온도 변화에 대한 점화지연시간 변화의 경향이 모든 압력에서 잘 일치하였으므로, 본 연구의 수치해석에서 사용한 San Diego 반응메커니즘¹³⁾이 점화단계에서도 충분히 사용이 가능하다는 결론을 얻었다. 또한 로그 스케일로 도시한 점화지연시간 결과는 0.5 atm, 1.0 atm, 2.0 atm의 3가지 압력 조건 모두에서 지수함수 형태로 급격히 증가하는 혼합기의 초기온도가 존재한다는 사실을 알 수 있고, 압력에 따른 대략적인 온도 위치를 Fig. 1에 화살표로 표시하였다.

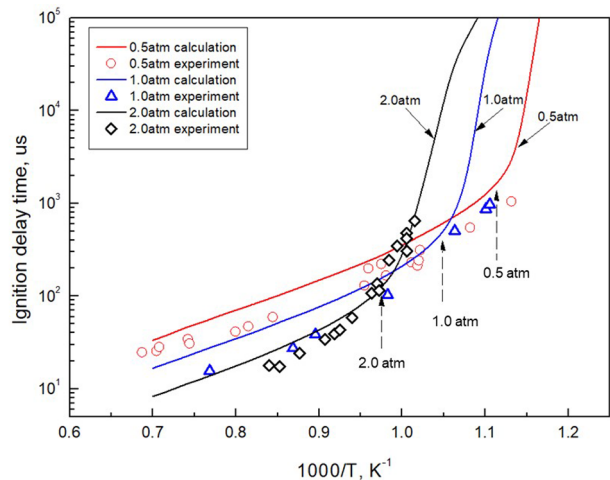


Fig. 1. Comparison of calculated and experimental¹⁴⁾ values in the hydrogen/air mixture at 0.5, 1.0, and 2.0 atm pressure conditions.

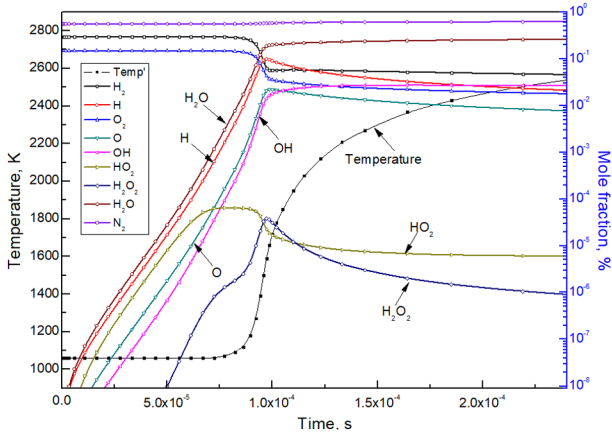


Fig. 2. Ignition characteristics at 1060K at temperatures above the inflection point in the hydrogen/air mixtures at $\phi=1.0$.

자연점화의 반응특성에 영향을 미치는 변수는 여러 가지가 있지만 점화 현상이 화학반응속도에 의해 의존하므로 여러 변수 중 초기온도의 영향이 가장 중요하다고 예측할 수 있다. 이와 같이 점화반응 특성을 달리 하는 초기온도의 선정 기준이 요구되는데 본 연구에서는 Fig. 1의 자연점화시간의 변곡점을 이용하였다. 가장 일반적인 대기압 조건에서 점화지연시간이 급격히 변화되는 변곡점 온도는 약 960 K이다. 따라서 고온조건으로는 이 온도보다 100 K 높은 1060 K을 초기온도로 선정하였고, 100 K 낮은 860 K을 저온조건으로 선정하여 점화단계의 화학반응특성을 수치해석하였다.

Fig. 2는 대기압하의 이론당량비 수소/공기 혼합기가 초기온도 1060 K에서 점화가 발생할 때 시간에 따라 반응에 참여하는 화학종의 농도 및 온도를 나타내었다. 반응이 활성화되기 위해서는 반응기(radical)의 농도가 높아져야 하는데 점화초기의 저온에서는 H, O, OH 뿐만 아니라 HO_2 도 높은 농도를 나타내고 있지만, 어느 정도 점화가 진행되고 난 후에는 HO_2 의 반응이 크게 감소함을 알 수 있다. 이 단계에서 민감성 분석을 수행한 결과 H 생성율(rate of product, ROP)에 가장 크게 기여하는 반응은 $\text{H} + \text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{O}_2$ 이다. 또한, OH와 O는 각각 $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{OH}$ 와 $2\text{O} + \text{M} \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{M}$ 반응에 의해 주로 생성된다. H_2O_2 는 HO_2 와 유사하게 초기에는 물분율이 증가되었으나 H, O, OH에 비하여 온도가 급격히 상승되는 시점부터 물분율이 천천히 감소한다.

변곡점 대비 상대적으로 낮은 초기온도인 860 K에서 점화가 발생하는 경우에 시간에 따른 온도 및 주요 화학종의 물분율을 Fig. 3에 도시하였다. 낮은 초기온도에서 점화된 경우에는 초기온도가 고온인 Fig. 2의 반응특성과 매우 다르게 점화초기부터 생성물인 H_2O 외에 중간생성물인 H_2O_2 와 HO의 물분율이 시간에 따

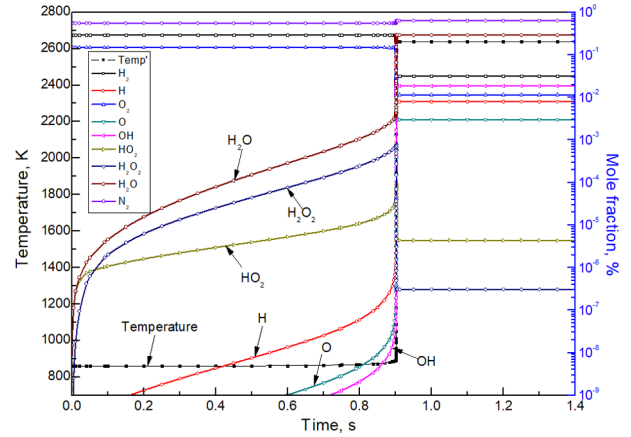


Fig. 3. Ignition characteristics at 860K at temperatures below the inflection point in the hydrogen/air mixtures at $\phi=1.0$.

라 급격히 증가한다. H_2O_2 생성에 크게 기여하는 화학반응기구는 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{H}_2$ 이며, HO_2 생성의 가장 큰 화학반응기구는 2가지로 나뉘는데 자연점화전의 약 0.9 s까지는 $\text{H} + \text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{O}_2$, 이후에는 $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{M}$ 반응이 HO_2 생성을 주도하게 된다. 높은 초기온도에서 주요 반응 화학종이었던 H, O, OH는 초기에는 농도가 매우 작고, 점화 후 온도증가와 함께 농도가 크게 증가함을 볼 수 있다.

이러한 점화 단계 반응특성으로부터 높은 초기온도에서는 H, O, 그리고 OH가 점화초기에 생성량이 증가하여 활성화 되는 반응특징이 있으며, 낮은 초기온도에서는 H_2O_2 와 HO_2 의 농도가 점화 초기에 증가하여 전체 반응을 주도하는 서로 다른 특징이 있음을 확인하였다.

3.2 희석된 수소/공기 혼합기의 점화지연 특성

자연점화를 억제하거나 지연시키기 위해 희석제를 첨가하여 수소/공기 혼합기의 자연점화 지연특성을 고찰하였다. 이 때 희석된 혼합기의 점화지연 특성에 대한 인자로서 압력, 희석제의 농도 그리고 당량비를 선정하여 각각의 점화지연시간에 대한 영향을 해석하였다.

Fig. 1에서 수소/공기 혼합기를 0.5 atm, 1.0 atm, 2.0 atm 등 압력에서 점화지연시간을 수치 해석하여 실험 데이터와 비교하였다. 동일한 조건인 3가지 압력에서 CO_2 와 N_2 가스로 희석했을 경우에 점화지연 특성을 수치해석하여 Fig. 4에 나타내었다. 모든 압력에서 CO_2 와 N_2 로 희석한 점화지연시간 곡선에서도 변곡점이 발견되는데, 이 변곡점을 기준으로 고온영역과 저온영역에서 점화지연시간 경향성에 차이가 나타난다. 수치해석된 모든 압력에서 고온영역에서는 CO_2 와 N_2 의 점화지연시간 차이가 작아 희석제 종류에 따른 점화지연시간 크기는 유사하지만 저온영역에서는 CO_2 가 N_2 보다 점

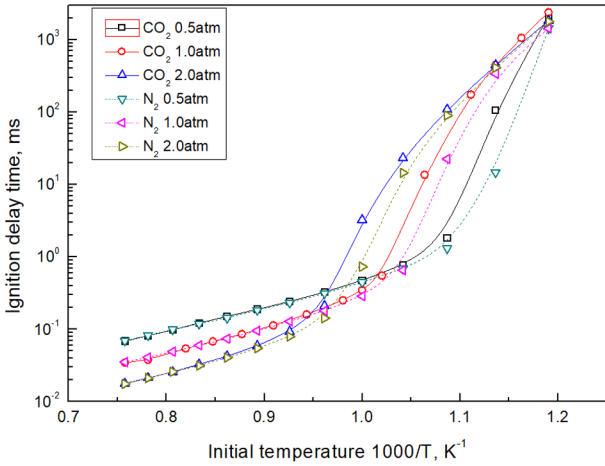


Fig. 4. Effect of ignition delay time on dilution of N_2 and CO_2 in the hydrogen/air mixture at 0.5 atm, 1.0 atm, 2.0 atm pressure.

화지연시간이 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 점화지연시간에 대한 압력의 영향도 고온과 저온 영역에서 경향성이 달라진다. 고온영역에서는 압력이 높을수록 점화지연시간이 작아지지만 저온영역에서는 압력이 높을수록 점화지연시간이 크게 나타나는데 이러한 경향성은 CO_2 와 N_2 희석 모두에서 확인된다. 점화지연시간을 변곡점을 기준으로 해석해 볼 때 압력이 높을수록 변곡점의 위치가 높은 온도로 이동되고 온도가 하락할수록 점화지연이 급격히 증가하며, CO_2 희석이 N_2 희석보다 더 높은 온도에서 변곡점이 생성되고 저온영역에서는 고온영역과 다르게 CO_2 희석이 N_2 희석보다 점화지연시간이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

수소/공기 혼합기에 첨가된 희석제 CO_2 와 N_2 의 농도 변화에 대한 점화지연시간을 Fig. 5에 나타내었다. 희석제의 농도는 CO_2 와 N_2 모두 6.9%, 22.9%, 54.2% 3가지

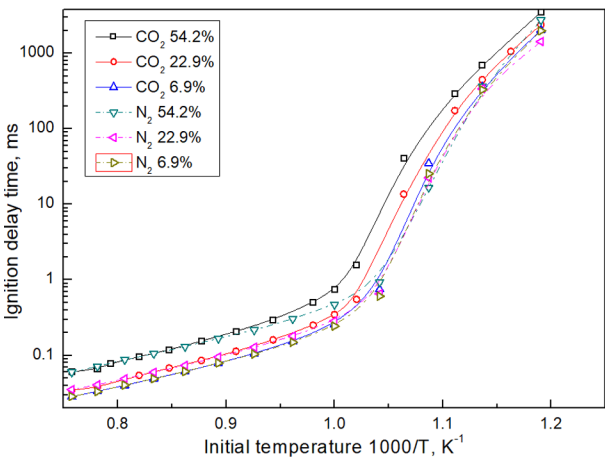


Fig. 5. Effect of ignition delay time on dilution's concentration of N_2 and CO_2 in the hydrogen/air mixture at 1.0 atm pressure.

조건에 대하여 해석하여 비교하였다. Fig. 5에서 농도 변화에 대한 점화지연시간 곡선에서도 변곡점은 나타나고 이 점을 경계로 나눈 온도영역에서 다른 특성이 관찰된다. CO_2 희석에서는 모든 온도영역에서 희석제 농도가 높을수록 점화지연시간이 크고 농도가 낮을수록 작게 나타나는 경향이 뚜렷하다. 하지만 N_2 희석의 경우 고온영역에서는 농도가 높을수록 점화지연시간이 크게 나타났으나 저온영역에서는 3가지 농도 조건에서 변곡점을 기준으로 온도가 낮아질수록 점화지연시간의 크기가 혼재되어 단조변화의 현상을 찾을 수 없었다. Fig. 5에서 저온영역인 초기온도 $1000/T=1.05$ 에서는 점화지연시간이 가장 큰 54.2%의 희석조건이 점화지연 시간이 가장 컸으나, 감소된 온도인 $1000/T=1.1$ 에서는 희석조건 6.9%와 22.9%보다 작은 점화지연 시간을 갖고 더 낮은 온도인 $1000/T=1.2$ 에서는 다시 54.2% 희석조건이 나머지 두 농도 조건보다 높은 점화지연시간을 갖는 역전 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 수소/공기 혼합기에서 CO_2 와 N_2 희석 조건에 점화지연시간을 해석한 결과 전반적으로 CO_2 가 N_2 보다 점화지연 효과가 크게 나타나는데, 이는 N_2 에 비해 CO_2 의 큰 열용량에 기인한다고 판단되며 실제 CO_2 가 N_2 에 비해 약 1.7배 큰 비열(specific heat)¹⁵⁾을 가지고 있다. 또한, N_2 의 점화지연시간이 온도가 낮아짐에 따라 경향성이 달라지는 것은 물리적인 열용량과 함께 온도에 따른 화학적 반응에 의한 결과라고 해석할 수 있다.

수소/공기 혼합기의 당량비에 따른 희석제의 점화지연시간에의 효과를 알아보기 위해 $\phi=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 의 4가지 당량비 혼합기에 CO_2 와 N_2 를 54.2% 희석하여 840 K부터 1320 K까지의 초기온도 변화에 따른 점화지연시간을 계산하여 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다.

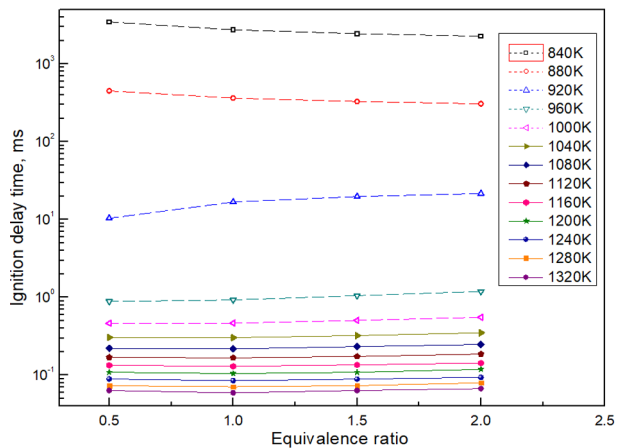


Fig. 6. Comparison of ignition delay time in hydrogen/air/carbon dioxide mixture each different equivalence ratio at pressure 1.0 atm.

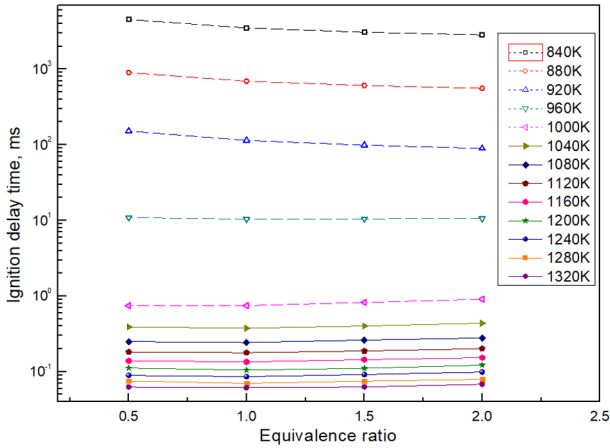


Fig. 7. Comparison of ignition delay time in hydrogen/air/nitrogen mixture each different equivalence ratio at pressure 1.0 atm.

CO₂희석 결과인 Fig. 6에서 상부의 점선의 온도 840 K 부터 1000 K까지 점선으로 표시된 저온영역에서 당량비 변화에 대한 점화지연시간 값의 변화는 온도별 증가하는 경향과 감소되는 경향이 혼재되어 있다. 그러나 초기온도 1040 K부터 1320 K의 실선에 해당하는 고온영역에서는 일정하게 당량비 $\phi=1.0$ 에서 점화지연시간이 가장 작고 $\phi=1.0$ 에서 커지거나 작아질수록 점화지연 시간이 증가되는 같은 경향성이 있음을 확인할 수 있다. 그러나 저온 영역에서는 당량비 이외에도 온도에 따른 화학반응의 영향으로 점화지연시간을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. Fig. 7은 수소/공기혼합기에 N₂를 희석하였을 경우에 점화지연시간을 나타내고 있다. 점화지연시간을 확인한 결과 점선으로 표시된 1000 K 이하의 저온영역에서는 840 K부터 920 K까지는 당량비가 증가할수록 증가하는 경향이 있으나 1000 K에서는 다시 경향성이 달라진다. 하지만 1040 K이상의 고온영역에서는 CO₂와 동일하게 당량비 $\phi=1.0$ 의 점화지연시간이 가장 작고 $\phi=1.0$ 으로부터 멀어질수록 점화지연시간이 증가하는 특성이 관찰된다. 이와 같이 CO₂와 N₂ 희석의 경우 모두 저온영역에서 점화지연시간의 경향성이 변화되는 결과로부터 저온에서의 반응기구가 당량비와의 연관성이 크음을 확인할 수 있었다.

이와 같이 자세한 반응기구와 함께 수치해석을 통해 수소/공기 혼합기의 자연점화단계에서 반응특성과 희석제를 첨가한 경우 자연점화 지연효과에 대해서 고찰하였다. 이러한 결과는 수소연료의 화재나 폭발사고가 발생할 수 있는 환경에서 압력조건과 희석제 종류와 농도, 그리고 비활성기체 공급을 통한 당량비 변화 등을 고려하여 점화지연 시간을 극대화시킬 수 있는 기초적인 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한 수소가 사

용되는 여러 산업공정에서 본 연구를 통해 수행된 연구방법과 얻어진 결과를 이용하면 수소취급설비의 안전한 설계, 작동조건 최적화 그리고 소화설비 등에도 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

화재나 폭발의 핵심적 단계인 자연점화 과정 중 반응특성과 희석제 첨가가 수소/공기 혼합기의 자연점화 지연에 대한 효과를 고찰하기 위해 PSR 혼합기에서 수치해석을 하였고 다음과 같이 결과를 요약하였다.

1) 수치해석에 사용한 반응메커니즘 검증을 위해 점화지연시간을 0.5, 1.0 그리고 2.0 atm에서 얻어 기존의 실험결과와 비교하였다. 그 결과 초기온도에 따른 점화지연시간의 경향성은 모든 압력조건에서 부합하였으며, 특히 2.0 atm에서는 전체 온도범위에서 실험값과 매우 잘 일치하였다.

2) 3가지 압력에서 점화지연시간이 급격히 변화하는 혼합기의 초기온도가 존재한다. 이 임계온도를 기준으로 높은 초기온도 조건에서는 H, O, 그리고 OH가 점화초기에 생성량이 증가하여 활성화되는 반응특징이 있으며, 낮은 초기온도 조건에서는 H₂O₂와 HO₂의 농도가 점화초기에 증가하여 전체 반응을 주도한다. 이러한 임계온도의 존재는 점화현상을 조절하는 결정적인 변수로서 향후 안전한 수소 이용에 중요하게 사용할 수 있다.

3) CO₂와 N₂ 희석제 종류에 대한 점화지연시간은 임계온도 기준으로 고온영역에서는 CO₂와 N₂의 희석제 종류와 관계없이 점화지연시간 차이가 작고 저온영역에서는 CO₂가 N₂보다 점화지연시간이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

4) 압력변화에 대한 점화지연특성은 CO₂와 N₂ 모두 압력이 높을수록 고온영역에서는 점화지연이 작지만, 저온영역에서는 압력이 높을수록 점화지연이 크게 나타난다.

5) 당량비 변화에 대한 CO₂와 N₂ 희석 조건의 점화지연시간 변화는 두 물질의 희석조건 모두에서 온도에 따른 변화가 관찰된다. 높은 온도 영역에서는 $\phi=1.0$ 에서 점화지연시간이 가장 작은 특성이 존재하지만, 낮은 온도영역에서는 점화지연시간에 대해 규칙적인 변화의 특성을 발견할 수 없었다.

Acknowledgement: This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1I1A3075066).

References

- 1) Y. D. Jo, S. S. Tak, K. S. Choi, J. R. Lee and K. S. Park, "Analysis of Hydrogen Accident in Korea", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15, No. 1, pp. 82-87, 2004.
- 2) F. A. Williams, "Detailed and Reduced Chemistry for Hydrogen Autoignition", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 21, pp. 131-135, 2008.
- 3) J. H. Kim, K. O. Lee and C. E. Lee, "A Study on the NOx Emission Characteristics in Parametrically Varied Laminar Hydrogen-Air Coflow Flames", J. Korean Soc. Saf., Vol. 16, No. 4, pp. 82-87, 2001.
- 4) H. W. Lee, M. S. Jae, N. C. Cho, J. E. Yang and W. J. Lee, "Safety Assessments for the IS(Iodine Sulfur) Process in a Hydrogen Production Facility", J. Korean Soc. Saf., Vol. 24, No. 3, pp. 54-58, 2009.
- 5) N. Donohoe, A. Heufer, W. K. Metcalfe, H. J. Curran, M. L. Davis, O. Mathieu, D. Plichta, A. Morones, E. L. Petersen and F. Guthe, "Ignition Delay Times Laminar Flame Speeds and Mechanism Validation for Natural Gas/Hydrogen Blends at Elevated Pressures", The Journal of the Combustion and Flame, Vol. 161, pp. 1432-1443, 2014.
- 6) Y. Zhang, Z. Huang, L. Wei, J. Zhang and C. K. Law, "Experimental and Modeling Study on Ignition Delays of Lean Mixtures of Methane Hydrogen Oxygen and Argon at Elevated Pressures", The Journal of the Combustion and Flame, Vol. 159, pp. 918-931, 2012.
- 7) H. S. Han, Y. Wang, C. J. Kim and C. H. Sohn "Measurement of Ignition Delay Time of Jet Aviation Fuel", Journal of The Korean Society of Combustion, Vol. 22, No. 3, pp. 35-40, 2017.
- 8) H. C. Lee, L. Y. Jiang and A. A. Mohamad, "A Review on the Laminar Flame Speed and Ignition Delay time of Syngas Mixtures", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, pp. 1105-1121, 2014.
- 9) G. Bansala, H. G. Im and S. R. Lee, "Auto-ignition of a Homogeneous Hydrogen-air Mixture Subjected to Unsteady Temperature Fluctuations", The Combustion Theory and Modelling, Vol. 13, No. 3, pp. 413-425, 2009.
- 10) E. J. Lee and C. B. Oh, "Characteristics of Chemical Reaction and Ignition Delay of H₂/Air/HFP Mixtures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 1, pp. 17-21, 2010.
- 11) H. H. Lee, C. B. Oh and C. H. Hwang, "CO₂ Suppression Characteristics of the Nitrogen-diluted Methane Counterflow Non-premixed Flame", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 1, pp. 42-48, 2013.
- 12) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin II: A Fortran Chemical kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics", Sandia National Laboratories Report No. SAND 89-8009, 1989.
- 13) A. L. Sanchez and F. A. Williams, "Review Recent Advances in Understanding of Flammability Characteristics of Hydrogen", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 41, pp. 1-55, 2014.
- 14) C. J. Jachimowski, "An Analytical Study of the Hydrogen-air Reaction Mechanism with Application to Scramjet Combustion", NASA Technical paper, 2791, 1988.
- 15) I. Glassman, "Combustion", 3rd ed., Academic Press, 1996.