

## 수평 배관의 메탄 폭발특성에 있어서 불균일성 혼합기의 영향

한우섭<sup>†</sup> · 최이락 · 김형욱 · 임진호

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원  
34122 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30  
(2023년 7월 3일 접수, 2023년 10월 5일 수정본 접수, 2023년 10월 20일 채택)

### Influence of Mixture Non-uniformity on Methane Explosion Characteristics in a Horizontal Duct

Ou-Sup Han<sup>†</sup>, Yi-Rac Choi, HyeongHk Kim and JinHo Lim

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA  
30, Expo-ro 339beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Korea  
(Received 3 July 2023; Received in revised from 5 October 2023; Accepted 20 October 2023)

#### 요 약

메탄, 프로판 등을 주성분으로 하는 연료가스는 폭발위험장소에서 사용될 수 있으며, 누출로 인한 공정조건의 영향으로 불균일한 혼합기를 형성할 수 있다. 균일한 혼합기를 대상으로 측정된 문헌 데이터를 이용한 화재 폭발 위험성 평가, 손상 예측은 가스 누출에 의한 실제 폭발 사고와 다른 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 가스 누출시 나타날 수 있는 농도 변화에 있어서 불균일성 혼합기의 폭발압력, 화염속도 등의 폭발특성을 조사하였다. 길이 0.82 m의 스테인리스 재질의 밀폐 배관에서 수행하였으며 컬러 초고속 카메라 및 압력 센서를 사용하여 관찰하였다. 또한 배관 내의 시간에 따른 농도차이 변화에 대해 회귀분석 모델을 사용하여 불균일 혼합물의 정량화 방법을 제안하였다. 본 연구의 농도 불균일성 조건에 있어서 메탄 폭발 시 전과화염은 불균일성 농도가 높아짐에 따라 화염 면적의 증가가 관찰되었고 이는 난류 화염의 주름진 화염 구조와 유사하였다. 메탄의 최대압력까지 걸리는 소요시간은 불균일성이 클수록 감소하였고, 폭발압력은 불균일성이 클수록 증가하였다. 농도가 불균일한 메탄의  $K_G$ (폭연지수)의 범위는 1.30~1.58 [MPa·m/s]으로서 메탄의 농도가 균일성에서 불균일성으로 변화하면서 17.7% 증가하였다.

**Abstract** – Fuel gases such as methane and propane are used in explosion hazardous area of domestic plants and can form non-uniform mixtures with the influence of process conditions due to leakage. The fire-explosion risk assessment using literature data measured under uniform mixtures, damage prediction can be obtained the different results from actual explosion accidents by gas leaks. An explosion characteristics such as explosion pressure and flame velocity of non-uniform gas mixtures with concentration change similar to that of facility leak were examined. The experiments were conducted in a closed 0.82 m long stainless steel duct with observation recorded by color high speed camera and piezo pressure sensor. Also we proposed the quantification method of non-uniform mixtures from a regression analysis model on the change of concentration difference with time in explosion duct. For the non-uniform condition of this study, the area of flame surface enlarged with increasing the concentration non-uniform in the flame propagation of methane and was similar to the wrinkled flame structure existing in a turbulent flame. The time to peak pressure of methane decreased as the non-uniform increased and the explosion pressure increased with increasing the non-uniform. The ranges of  $K_G$  (Deflagration index) of methane with the concentration non-uniform were 1.30 to 1.58 [MPa·m/s] and the increase rate of  $K_G$  was 17.7% in methane with changing from uniform to non-uniform.

Key words: Non-uniform, Gas explosion, Flame propagation velocity, Explosion pressure

#### 1. 서 론

2010년부터 2019년 사이 국내 사업장에서 일어난 연료용 가스 (NG, LPG)의 누출에 의한 화재폭발사고는 223건으로써 사고에 따른 인명피해로는 사망 22명 및 부상 201명이 발생하였다[1]. 가스 폭발에 의한 사고예방이나 피해저감을 위해서는 가스폭발 특성에

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hanpaule@kosha.or.kr

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.

대한 정보가 필요하다. 메탄, 프로판 등을 주성분으로 하는 연료용 가스는 청정연료로서 사업장을 비롯해 일반 가정에서도 연료원으로 많이 사용되고 있으며 폭발특성에 대해 많은 실험적 연구가 이루어져 왔다. 특히 밀폐 용기에서 혼합기의 농도, 온도 및 압력의 영향 등에 대한 결과가 많이 보고되고 있다. 이와 관련된 연구를 살펴보면 압력, 온도 및 농도에 따른 프로판 혼합기의 층류연소속도의 영향[2], 밀폐용기에서 온도 및 압력 변화에 의한 프로판의 폭발특성[3], 밀폐 구형 용기의 체적 크기에 따른 메탄 및 프로판 혼합기의 폭발한계 특성[4] 등이 있다. 또한 프로판 혼합기의 화염전파 시 화염 셀의 불안정성 및 성장 특성[5], 불활성 가스 및 온도에 따른 메탄, 프로판 혼합기의 폭발특성 변화[6-9], 온도 및 압력 변화에 따른 프로판 혼합기의 폭발농도 특성[10] 등과 같이 다양한 연구가 보고되고 있다.

이와 같이 연료용 가스의 폭발특성에 대한 연구는 농도, 온도, 압력 및 혼합기의 난류 크기 등과 같은 요인에 의해 지배되는 관점에서 주로 균일농도 예혼합기에서의 폭발특성에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 공정 설비 내 또는 가스누출에 의해 형성되는 가스혼합기는 대부분 가스와 공기의 혼합이 균일하지 않고 공간적으로 고농도와 저농도의 가스 혼합기가 복잡하게 분포할 가능성이 높다[11]. 또한 가스 폭발특성에 대한 기존 문헌자료는 균일 가스 혼합기 조건에서 측정된 것이 대부분이며, 불균일 가스 혼합기의 폭발특성은 아직도 불분명한 사항이 매우 많다[12]. 그러므로 가스폭발 피해예측을 위해 기존의 문헌자료를 사용하여 위험성 평가를 하는 경우 대부분 불균일성 혼합기에 의해 발생하는 실제 가스폭발사고와는 다른 피해예측 결과가 나타날 수 있다.

불균일 혼합기의 가스폭발특성에 대한 국내외 연구는 많지 않기 때문에 관련 정보는 매우 제한적이지만 폭발특성이 농도 불균일성에 의해 변할 수 있다는 실험적 사실이 관련 연구자들에 의해 제시되고 있다. 원통형(내경 10 cm 및 높이 21.3 cm) 밀폐용기에서 가스농도와 가스분출 시간의 변동에 따른 폭발압력 특성을 조사하였으며, 밀폐용기 내의 가스 평균농도가 폭발범위가 아닌 조건에서도 착화가 일어나는 것을 확인하고 이러한 결과를 통해 불균일 농도조건에서는 폭발하한농도 이하라도 혼합기의 일부가 폭발범위를 형성할 수 있음을 제시하고 있다[13]. 폭발용기 내의 가연성 가스의 분출 시간이나 분출 후의 착화 지연시간을 변화시키면서 불균일성 혼합기의 폭발특성을 조사한 결과, 가스 분출 후의 지연시간이 작을수록 불균일 상태가 증가할 것으로 추정하였으며 불균일 조건에서의 폭발하한농도는 균일농도보다 감소할 수 있음을 나타냈다[14]. 프로판 및 수소를 사용하여 중력, 확산 및 난류에 의한 방법으로 불균일성 혼합기를 만들어 착화 한계 지연시간을 조사한 결과에서는 폭발특성이 초기의 기체 조성 및 혼합기 부피에 영향을 받았다[15]. 또한 밀폐 배관에서 가스 누출구의 크기와 누출속도에 따른 가스 불균일성을 조사하였으며 누출구 및 누출속도가 증가할수록 불균일성이 높아졌으며 폭발압력도 증가하였다[16]. 반 밀폐형 배관(지름 2.5 m 및 길이 10 m)에서 메탄의 분출시간을 변화시키면서 불균일성 혼합기를 형성시켜 압력 및 화염속도를 조사한 결과에서는 가스 불균일성이 화염전파속도에 영향을 주는 것이 확인되었다[17].

기존 관련 연구결과에서와 같이 평균농도가 동일하여도 불균일성 혼합기에서의 가스폭발 특성은 달라질 수 있으며 이에 따라 가스폭발 위험성도 농도 분포에 따라 다른 피해예측 결과로 나타날

수 있음을 예상할 수 있다. 또한 기존의 불균일성 혼합기에서의 가스폭발 특성 연구는 주로 착화 지연시간, 노즐의 크기, 가스 분출시간 등의 불균일성 형성 조건을 사용하여 조사가 이루어졌다. 이러한 방법에서는 혼합기의 불균일성 크기를 정성적인 평가를 통해 폭발특성을 관찰하고 있다. 따라서 가스폭발의 대부분이 불균일성 혼합기에 의해 일어나므로 이에 대한 결과를 예측하고 적절한 피해저감 기술을 개발하기 위해서는 불균일성 가스폭발 특성에 대한 이해가 중요하다. 이를 위해서는 혼합기의 가스농도 변화 정도를 나타낼 수 있는 불균일성 혼합기에 대한 기준이 요구되며, 이에 기반한 정량적인 불균일성의 변화에 따른 가스폭발특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 천연가스(NG)의 주성분인 메탄( $\text{CH}_4$ ) 가스의 누출에 의한 폭발사고 피해저감을 위하여 실제 가스 누출 상황에서 일어날 수 있는 불균일성 가스 혼합기에서의 화염전파 및 폭발 특성을 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 불균일성 정도를 정량적인 농도차이의 크기로써 평가하는 방법을 제시하고 불균일성에 따른 화재폭발 위험성을 분석 및 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 불균일 가스혼합기의 폭발 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 스테인리스(STS304)로 제작된 폭발용기는 내압력 30 bar까지 설계되었다. Fig. 2와 같이 폭발용기는 밀폐형 수평 배관(Tubular type) 형태로서 정사각형( $0.072 \text{ m} \times 0.072 \text{ m}$ )의 단면적(Cross section)과 0.82 m의 길이를 갖으며, 전면 및 측면이 투명

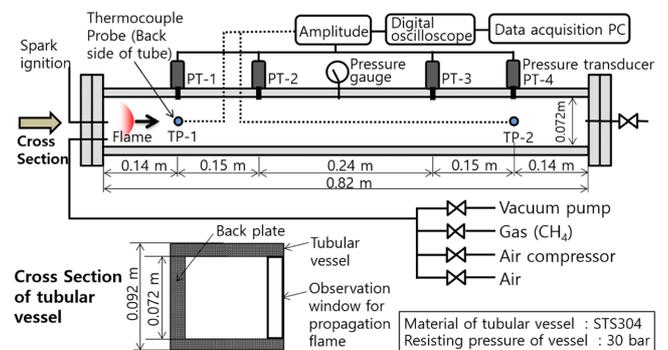


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup for non-uniform gas explosion.

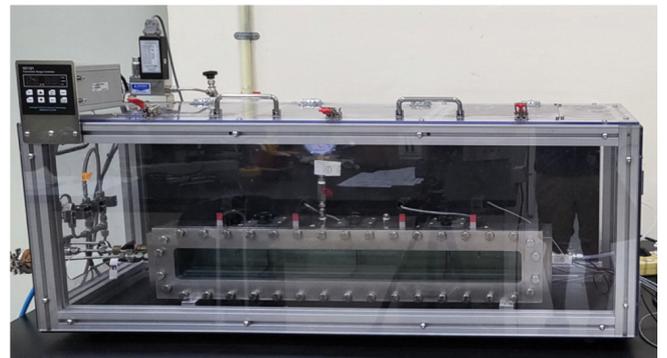


Fig. 2. Tubular vessel for evaluating gas explosion hazard.

창으로 되어 있는 안전보호장치 내에 설치되어 있다. 폭발용기는 전면에 폭발 거동을 확인할 수 있는 강화유리로 제작한 관측창(Observation window)을 설치하여 폭발 현상 및 화염전파속도 등을 관측할 수 있도록 하였다.

가스 혼합기의 착화는 전극 간격 3 mm로 설정된 점화원(Spark ignition)을 사용하였으며 네온트랜스에 의한 고전압 유도 전극의 불꽃방전을 사용하였다. 또한 폭발용기의 상부에는 30 bar의 압력 센서(Pressure Transducer)를 설치하여 혼합기의 착화에 따른 과압 거동을 조사하였다. 실험에 사용된 가스 시료는 순도 99.95% 이상의 고순도 메탄가스를 사용하였다.

실험방법은 폭발용기 내부를 Fig. 1의 진공펌프(Vacuum pump,  $5 \times 10^{-4}$  Torr)를 사용하여 진공 상태로 만든 후, 시험할 가스 농도에 해당하는 메탄을 분압(Partial pressure) 방식을 활용하여 폭발용기 내에 주입한 다음에 고순도 공기를 넣어 용기 내부를 대기압 상태가 되도록 한다. 그리고 설정된 지연시간(Delay time) 후에 점화원을 사용하여 메탄 혼합기를 착화시키고 폭발 현상을 관찰한다. 배관 형태의 폭발용기 내에서 혼합기가 착화되면 Fig. 1과 같이 용기의 좌단에서 우단으로 화염이 전파하게 된다. 폭발용기의 상단에 일정 거리에 따라 설치된 압력센서에 의해 시간-압력 과정을 측정하고, 동시에 폭발용기의 전면 관측창을 통해 컬러비디오카메라 및 초고속카메라(Optronix CR 3000, Germany)를 사용하여 화염전파 거동을 기록하였다. Fig. 1에서 메탄의 농도차는 양쪽 끝단의 농도로서 상온(23 °C) 및 대기압(1 atm) 하에서 동일 농도 조건으로 5회의 반복 실험을 통하여 결과를 얻었다.

## 2-2. 가스 불균일성의 정량화 방법

기존 연구에서 수행한 불균일 혼합가스의 형성 방법을 크게 구분하면 누출 노즐 크기의 변화, 압력차, 주입 또는 분출시간의 변화 등이 사용되었다[13-17]. 이러한 불균일 가스의 형성 방법은 불균일 농도장의 형성은 예측되지만 폭발공간 내의 구체적인 불균일성 크기를 예측할 수 없으며 또한 기존의 불균일성 방법에 의한 폭발특성 자료는 정량적인 불균일성 정도를 알 수 없기 때문에 실제 공정에 활용하는 것이 쉽지 않다는 제한점이 있다. 가스가 누출되면 가스 확산을 통해 혼합기 공간 내 가스 분자의 수밀도 차이가 발생하고, 밀도가 높은 공간에서 낮은 공간으로 이동을 통해 밀도 평형을 유지하여 농도 차이가 감소하게 된다. 종류가 서로 다른 가스의 혼합에서는 비중 및 중력의 영향으로 미세한 농도 기울기가 수직방향으로 형성될 가능성은 있지만 이러한 차이는 무시할 정도로 작으므로 가스농도의 차이를 조사하여 불균일성을 평가할 수 있다.

배관 형태의 용기(정사각형 단면  $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ , 길이  $0.82 \text{ m}$ )에 메탄을 일정한 농도(10 vol%)로 주입하여 용기 양쪽 끝단의 농도 차이를 가스크로마토그래피(GC)로 분석하였다[18]. 지연 시간(Delay time)에 따른 농도 변화 결과를 Fig. 3에 내었으며 폭발용기에 주입된 혼합기의 농도는 초기에 가장 큰 불균일성을 나타내며 시간이 지남에 따라 농도 차이가 줄어들며 불균일성이 감소하였다. 메탄의 지연시간(x)에 따른 농도변화(y)를 다항식 회귀 모델(Polynomial regression model)을 사용한 회귀분석을 통해 얻어진 예측식은 식 (1)과 같으며 Fig. 3에서 실선으로 표시하였다.

$$y = 1.2569 - 0.0559x + (6.2717 \times 10^{-4})x^2 \quad (1)$$

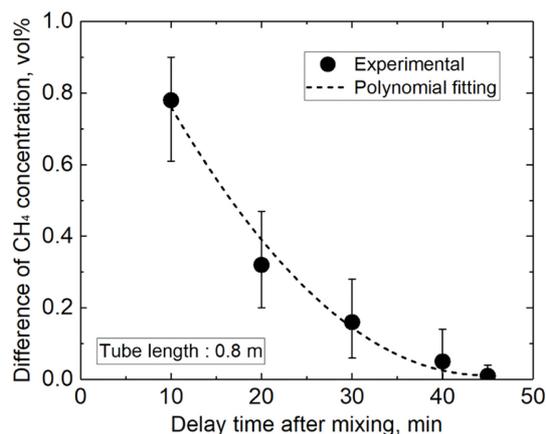


Fig. 3. Concentration of CH<sub>4</sub> with delay time.

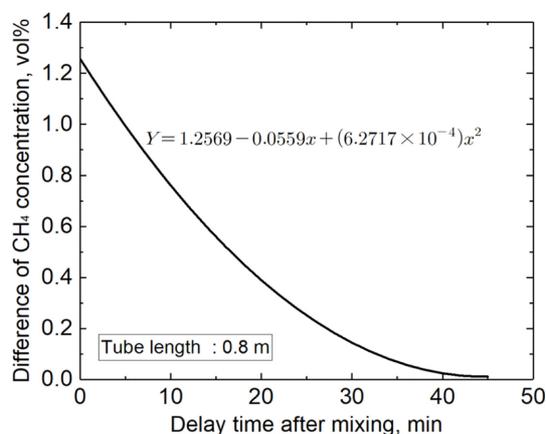


Fig. 4. Prediction of CH<sub>4</sub> concentration difference with delay time.

메탄 농도차이(y) 예측식의 결정계수(R-square; Coefficient of determination)는 0.99193으로 시험자료에 대한 추정값이 매우 높게 나타났다. 폭발용기에 메탄을 주입한 후의 지연시간에 따른 메탄 혼합기의 농도차에 의한 불균일성 예측을 식 (1)을 사용하여 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4를 보면 지연시간 1분이 경과하면 농도차(불균일성)이 1.20 vol%가 되며, 지연시간이 증가하여 45분이 경과하면 불균일성은 0.011 vol%가 되어 혼합기는 농도 균일성에 근접하게 된다.

평균 가스농도에 있어서 혼합 직후 가스농도 차이의 초기값( $C_i$ )에 대한 지연 시간에서의 농도 측정값( $C_{dt}$ ) 차이의 비율로써 계산하고자 하였으며, 메탄을 주입하여 혼합기가 만들어진 직후로부터 지연시간에 따른 불균일성( $C_{NU}$ )의 정량화( $C_{NU} = 0 \sim 1.0$ )는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서는 혼합기의 불균일성(Non-uniform :  $C_{NU}$ )을 이하 식 (2)로 나타냈다.

$$C_{NU} = 1 - \left( \frac{C_i - C_{dt}}{C_i} \right) \quad (2)$$

가스 혼합기를 만든 직후 난류성 기류가 발생하고 농도 차이가 가장 크게 나타나므로 불균일 농도가 최대가 된다. 지연 시간이 45분 이상이 되면 정지 기류가 최대가 되며 평균농도 상태에 근접하는 균일 혼합기 조건이 된다. 본 연구에서의 불균일 및 균일 혼합기의 지연시간 및 불균일성( $C_{NU}$ )의 조건은 Table 1과 같다. 불균일 조건

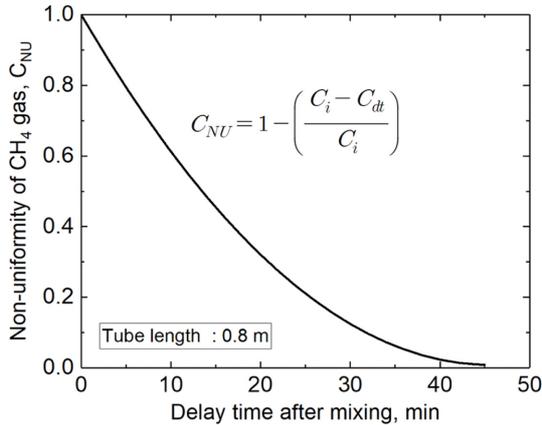


Fig. 5. Quantification of non-uniform by gas concentration difference.

Table 1. Category of non-uniform and uniform with delay time

Items	Delay time (min)	Non-Uniform ( $C_{NU}$ )
Non	1	0.98
Uniform	10	0.76
	20	0.39
Uniform	45	0.01

(Non-uniform)에서는 지연 시간(Delay time)을 1, 10, 20분으로 하며, 균일(Uniform) 조건에서는 45분으로 하였으며, 이러한 농도 조건이 과압 및 화염전파 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 불균일성에 따른 화염전파 특성

가스폭발에 의한 물질 및 인적 피해의 직접적인 요인은 폭발과압에 의한 것이지만, 이러한 과압특성에 직접적으로 영향을 주는 화염전파속도를 고려할 필요가 있다[19]. 균일농도 조건( $C_{NU}=0.01$ )에서 가스농도를 7~13 %로 변화시키면서 메탄의 화염전파를 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 7, 8 vol%의 조건에서 메탄의 화염면(Flame front)은 매끄러운 형태를 가지며 화염의 교란은 거의 보이지 않고 있다. 화염 선단(Flame edge)은 덕트 형 배관의 상부를

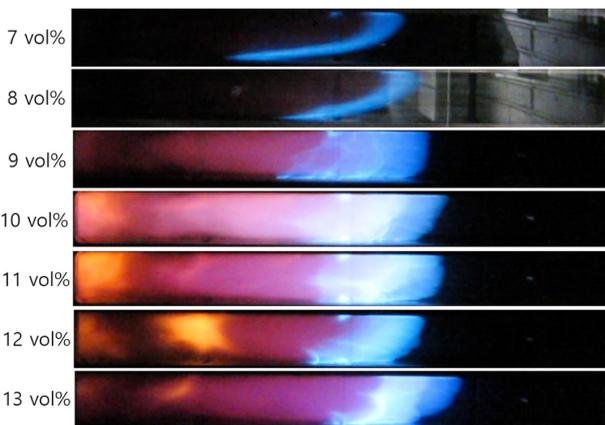


Fig. 6. Flame propagation of CH<sub>4</sub> with concentration for uniform ( $C_{NU}=0.01$ ).

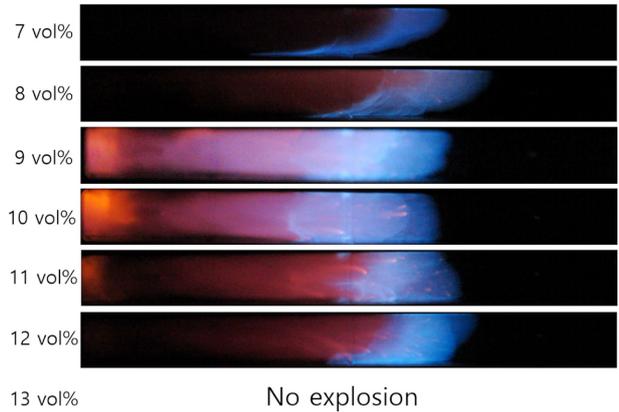


Fig. 7. Flame propagation of CH<sub>4</sub> with concentration for non-uniform( $C_{NU}=0.98$ ).

따라 전파하고 있으며 이는 화염온도에 의한 부력의 영향으로 판단된다. 농도가 증가하여 화학양론농도에 근접한 9 vol%에서는 일정한 형태의 화염면을 가지면서 전파하며 화염전파속도가 최대값으로 되면서 부력의 영향이 상대적으로 감소하는 것으로 보인다. 10 vol% 이상에서는 화염전파속도가 감소하며 배관 상부를 따라 화염이 전파하고 있다.

Fig. 7은 기류의 상태와 불균일성이 가장 크게 나타나는 농도( $C_{NU}=0.98$ )에서 메탄의 화염전파 모습이다. 농도 7 및 8 vol%의 화염전파를 보면 균일조건( $C_{NU}=0.01$ )과는 달리 화염의 면적이 증가하는 것이 관찰된다. 이러한 현상은 난류 화염(Turbulent flame)에서 나타나는 주름 형태의 화염구조(Wrinkled flame)와 유사하며 화염 면적의 증가 원인으로 판단된다[20-21]. 9 vol% 이상의 농도에서 부력의 영향이 감소하여 화염면이 일정한 형태를 가지며 전파하는데 화염전파속도가 균일조건( $C_{NU}=0.01$ )에 비하여 증가하였기 때문으로 추정된다. 농도 13 vol%의 비폭발(No explosion)은 동일 농도 조건에서 5회 반복 시험에서 폭발이 일어나지 않았음을 나타내며 폭발발생 확률이 저하됨을 의미하고 있다. 점화원은 Fig. 1의 폭발용기 좌측 끝단의 배관 하부에서 수직방향으로 0.036 m에 위치하고 있는데, 불균일 조건에서 폭발상한농도로 가까워지면 점화원 주변은 폭발한계 이상의 농도 형성이 용이해지면서 착화가 확률적으로 결정되기 때문에 쉽게 착화가 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

#### 3-2. 불균일성에 의한 화염면의 이동

가연성 가스가 누출되면 불균일 농도의 분포, 주변 환경의 기류 등의 외적 요인으로 인해 화염전파의 가속이 일어날 수 있으며 이러한 현상은 과압의 크기를 증대시켜 폭발피해가 증가할 수 있다. 그러므로 동일 평균 가스농도의 조건에서 불균일성에 따른 화염면의 이동 특성을 관찰함으로써 폭발 위험성의 조사에 활용할 수 있다. 메탄 농도 8 vol%의 폭발에 있어서 불균일성의 변화가 화염면(Flame edge)의 이동 특성에 미치는 영향을 조사하여 얻은 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 농도 불균일성이 변화하는 경우 착화 후 화염면의 이동 위치가 시간에 따라 어떻게 달라지는지를 착화지점으로부터의 거리를 측정한 결과이다. 불균일성 변화에 따른 화염전파 영상에서 시간 간격 33 ms로 캡처한 이미지를 화상처리 소프트웨어(Image processing software)를 사용하여 픽셀간 거리를 실제 사이의 거리(용기의 수직 거리)로 스케일 설정을 통하여 화염면의 이

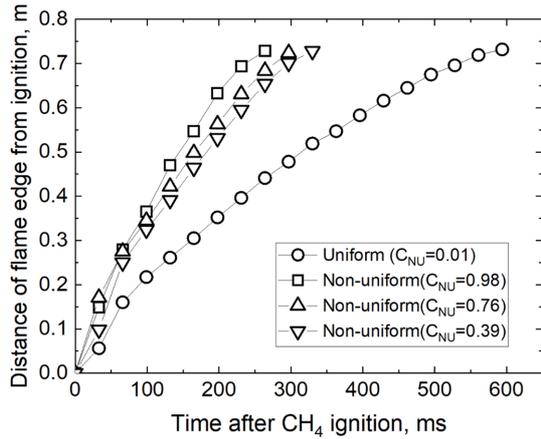


Fig. 8. Movement of flame edge after ignition in CH<sub>4</sub> mixture of 8 vol%.

동거리를 계속하였다. 착화 후의 초기 화염면의 이동은 150 ms까지는 불균일성과 관계없이 증가하는 경향을 보이고 있다. 초기 화염면의 가속 현상은 스파크 접화에 의해 발생하는 미소 충격파 (Micro shock wave)에 의한 것으로 추정된다. 착화 후의 약 150 ms부터는 화염면의 이동이 일정한 속도로 진행되는데, 수평 배관의 우측(중단부)에 근접할수록 감소 경향을 나타내고 있다. 화염전파 속도가 감소하는 원인으로는 수평 배관 내에서의 화염전파 특성 및 농도 불균일성에 기인하는 것으로 보인다. 일반적으로 화염전파 속도는 가스의 연소속도와 불균일성을 동반하는 기류속도의 합으로 나타낼 수 있다. 기체의 흐름은 균일( $C_{NU}=0.01$ ) 조건에 비하여 불균일성이 증가할수록( $C_{NU}=0.39, 0.76$  및  $0.98$ ) 증가하며, 화염전파가 수평 배관의 우측(중단부)으로 가까워질수록 미연소 혼합기의 부피가 작아지며 기체 유속이 감소하게 된다. 가스 혼합기의 연소 속도는 가스 종류, 혼합기 조성을 비롯하여 혼합기의 화학적 및 물리적 성질에 의존하며 영향을 받는다. 연소속도는 압력 변화에 의해 영향을 받는데, 대기압( $P_0$ )에서의 연소속도를  $S_0$ 라고 하면 압력 ( $P$ )과 연소속도( $S$ )의 관계는 이하 식 (3)으로 표현되며 메탄에서는 압력이 증가하면 연소속도가 감소한다[22].

$$S = S_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^\beta \quad (3)$$

식 (3)에서  $\beta$ 의 값은 연소속도( $S_0$ )에 따라 달라지는데  $S_0$ 가 0.5 m/s 이하에서는 음의 값을 가지며, 1.0 m/s보다 큰 경우에는 양의 값을 가진다.

온도 295 K에서 메탄의 연소속도( $S_0$ )는 0.37 m/s로[23]  $\beta$ 는 음의 값을 나타내므로, 과압( $P$ )이 상승하면 연소속도가 감소하며 이는 화염전파속도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 화염전파속도는 폭발용기의 체적이나 형태, 용기의 개폐 상태, 배관 내벽의 상태 및 장애물 등의 다양한 요인에 의해 달라질 수 있다.

Fig. 9에 8 vol%의 메탄 혼합기에서 불균일성에 의한 화염전파속도의 시계열적 변화를 나타냈다. 착화가 일어나고 약 150 ms까지는 전기 스파크로 인한 충격파 영향으로 보이는 화염전파속도의 급격한 교란이 발생하지만 이후에는 시간에 따라 화염전파속도는 완만히 감소하고 있다. 장방향 수평배관에서의 이러한 경향은 불균일성과 관계없이 모두 관찰되며, 화염전파가 용기 내부의 좌측에서 우측으

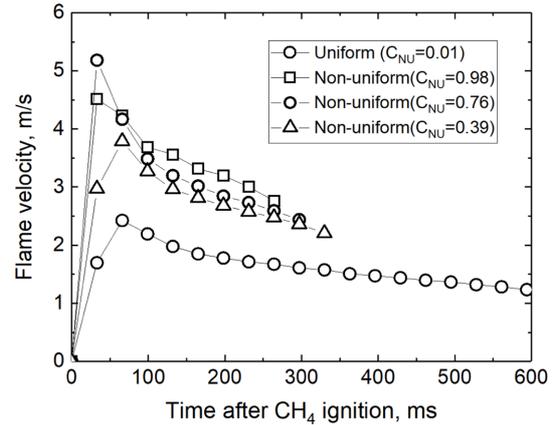


Fig. 9. Time-series variation of flame velocity in 8 vol% CH<sub>4</sub> mixture.

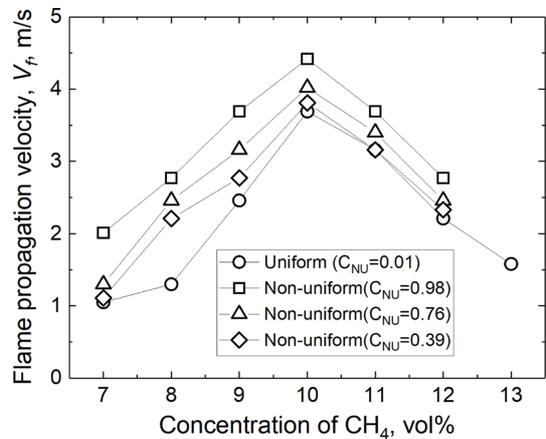


Fig. 10. Flame velocity due to non-uniform of CH<sub>4</sub> with concentration.

로 진행되면서 미연소 가스의 체적이 줄어들고 또한 압력증가에 따라 연소속도의 감소에 영향을 준 것으로 판단된다.

화염전파속도는 고속카메라를 이용하여 화염전파의 시계열 데이터 및 시간-압력의 파형을 분석하여 측정하였다. Fig. 10은 메탄 혼합기의 농도 변화에 있어서 불균일성에 따른 화염전파속도의 영향을 조사한 결과이다. 구형(Spherical) 용기에서 폭발이 일어나면 구상화염(Spherical flame)이 일정한 속도로 전방향(All directions)으로 전파하게 되며, 발생하는 압력은 시간의 3승에 비례한다[24]. 본 연구와 같이 장방향 배관에서 폭발이 발생하면 초기에는 구상화염 형태로 전파하므로 구형 폭발용기에서와 같은 유사한 화염전파가 일어난다. 그러나 화염면이 배관 내의 상부와 바닥에 도달하면 화염전파 방향이 제한을 받으므로 화염전파는 미연소 혼합기가 있는 배관 내의 수평방향으로 1차 함수적으로 압력이 전파하게 된다. 그러므로 화염은 배관의 단면적의 형태로 화염면적을 가지며 전파하는데, 균일혼합기( $C_{NU}=0.01$ )에서는 Fig. 9와 같이 화염가속이 일어나지 않으며 일정한 속도의 화염전파가 관찰된다. 일정 크기의 농도 및 압력 조건에서 화염속도가 증가하는 요인으로는 화염면적이 늘어남에 따라 난류성 연소속도가 증가하고 화염면 전방에 존재하는 미연소 혼합기의 가속이 원인이 된다[19]. 농도 불균일성이 높아지면 Fig. 8에서와 같이 메탄 화염면의 연소 면적을 증가시키고 이는 화염전파속도를 증가시키는 원인이 될 수 있다. 그러므로

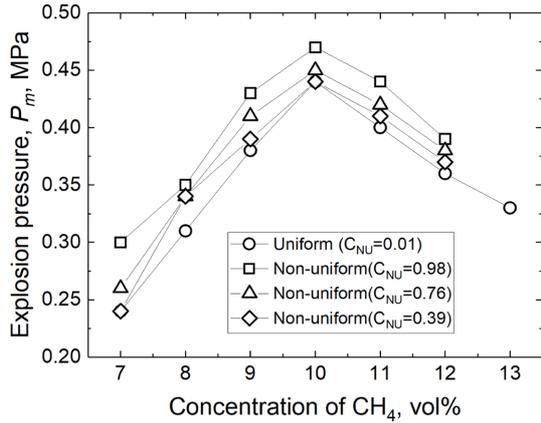


Fig. 11. Explosion pressure in non-uniform mixture with CH<sub>4</sub> concentration.

화염속도의 증가 요인이 동일한 조건이라면, 메탄 혼합기에서의 불균일성 증가는 Fig. 10과 같이 화염전파속도의 증가에 영향을 주는 것으로 판단된다.

### 3-3. 폭발특성에 미치는 불균일성의 영향

메탄 농도 변화에 있어서 불균일성 조건에 따른 폭발 시 과압 특성 조사 결과를 Fig. 11에 제시하였다. 동일 농도 및 동일 불균일성 상태에서도 착화가 확률적으로 일어나기 때문에 동일 농도에서 5회의 반복 실험을 수행하여 평균값으로 나타냈다. 농도가 증가하면 과압이 증가하며 화학양론농도보다 높은 약 10 vol%에서 최대가 되고 감소하는 경향을 나타내고 있다. 불균일성이 증가하면 일부 농도에서는 과압 증가의 경향성이 작게 나타나기는 하지만 폭발과압에 미치는 영향이 전체적으로 증가하고 있다. Fig. 11과 같이 균일농도 조건( $C_{NU} = 0.01$ )에서의 과압은 농도증가와 함께 증가하여 10 vol%에서 0.44 MPa가 얻어졌다. 본 연구와 폭발용기 형태가 다른 20 L 구형(Spherical) 용기에서 조사된 메탄의 폭발압력은 농도 10 vol%에서 0.74 MPa로 보고되었다[25]. 구형 용기와 비교하여 배관내에서 메탄의 폭발압력은 감소하는데, 폭발용기의 기하학적 형태와 부피에 따라 화염가속과 압력특성이 영향을 받는 것으로 보인다. 폭발용기가 구형(Spherical)에서 배관 형태로 변하면 폭발특성이 감소하는데 배관 길이가 1.0 m 이상으로 증가하면 화염가속 특성은 급격히 증가하는 것으로 알려져 있으며[26-27], 또한 배관의 길이가 증가할수록 폭발압력도 증가하였다[28]. 불균일성에 따른 폭발압력 특성을 보면, 균일혼합기( $C_{NU} = 0.01$ )와 비교하여 불균일성이 증가( $C_{NU} = 0.39, 0.76, 0.98$ )하면 일부 농도에서의 예외적 사항을 제외하면 전체적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과를 통해서 메탄 혼합기의 불균일성의 증가가 폭발 위험성의 증가에 영향을 주는 것으로 보인다. 농도 변화에 따른 메탄 폭발 시 최대압력 도달시간(Time to peak pressure)을 Fig. 12에 제시하였다. 최대압력 도달시간은 폭발에 의해 발생된 과압이 최대가 되기까지 소요되는 시간을 나타낸다. 농도가 증가함에 따라 최대압력 도달시간은 감소하였으며 화학양론농도(9.47 vol%)보다 다소 높은 10 vol%에서 최소값을 나타냈다. 이후 농도가 증가하면서 최대압력도달시간도 증가하였다. 이러한 최대압력 도달시간은 불균일성이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 폭발압력의 크기는 혼합기가 연소하여 발생한 발열량에 영향을 받으며 최대폭발압력은

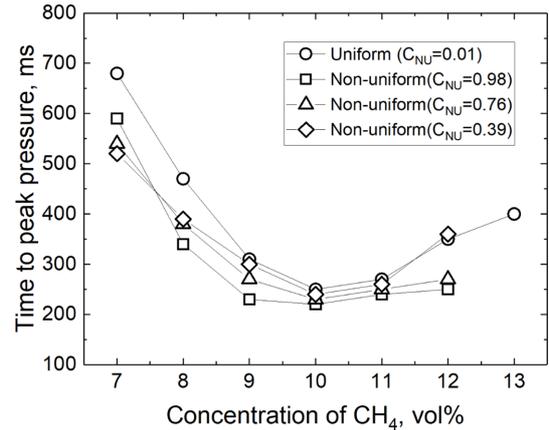


Fig. 12. Time to peak pressure in non-uniform explosion with CH<sub>4</sub> concentration.

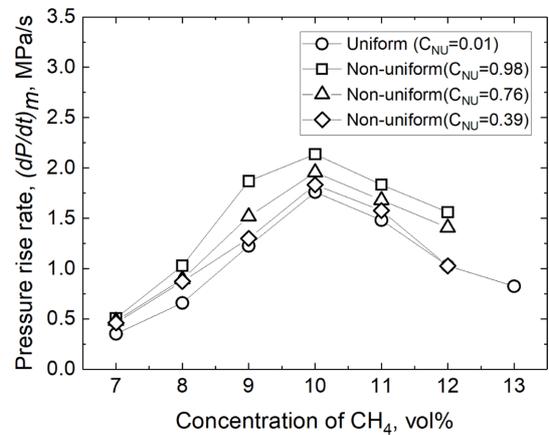


Fig. 13. Pressure rise rate due to non-uniform explosion with CH<sub>4</sub> concentration.

폭발에 의해 연소된 혼합기의 체적량에 해당된다. 최대압력 도달시간은 화염전파속도와 화염의 전파 경로에 의해 결정된다고 할 수 있다. 또한 화염이 전파하는 과정에서의 압력특성은 화염전파속도에 의존하는 것으로 볼 수 있다. 불균일성이 높아질수록 농도 분포에 따른 화염전파 경로의 불규칙적인 증가는 화염전파속도에도 영향을 줄 수 있다.

농도 불균일성에 있어서 메탄의 농도에 따른 폭발압력상승속도( $(dP/dt)_m$ ) 변화를 Fig. 13에 나타냈다. 농도 증가에 따라 압력상승속도는 증가하는데 10 vol% 근방에서 최대값이 되고 그 이상의 농도 증가에서는 감소한다. 폭발압력상승속도는 화염면적과 연소속도의 곱에 의해 비례하기 때문에 압력은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내게 된다[29]. 불균일( $C_{NU} = 0.39, 0.76, 0.98$ ) 증가에서는 화염면적이 늘어나며 연소속도의 증가로 이어지므로 폭발압력상승속도는 증가하게 된다. 메탄의 폭발압력상승속도는 용기의 형태에 따라 의존하는데, 동일 농도에서 단일 조건이 유지되는 폭발 용기인 경우 용기 체적에 관계없이 연소가스의 온도가 일정하므로 폭발용기의 형태에 의존하지 않고 최대압력은 동일하게 된다. 그러나 실제 폭발에서는 화염이 용기 벽면과 접촉하여 열손실(Heat loss)이 발생하기 때문에 폭발용기 내의 표면적이 커질수록 열교환이 증가하여 폭발 압력이 감소하므로 압력상승속도는 감소하게 된다. 구형(Spherical) 밀폐용기에서의 메탄 혼합기 폭발 시 발생하는 전체 열

손실 중에서 76.01% 이상은 열복사에 의한 것이 관찰되었으며 화염의 열손실은 구형용기 보다 배관형태의 폭발 용기에서 크게 나타난다[30]. 그 밖에 압력상승속도의 감소 요인으로써 연소반응 시에 발생하는 수증기 응축에 의한 열손실, 불완전 연소반응에 의한 연소열 감소 등도 예상된다.

### 3-4. 농도 불균일성에 따른 폭발압력

메탄의 혼합기에서 농도 불균일성에 의한 폭발압력상승속도에 미치는 영향을 보면, Fig. 13과 같이 대부분의 농도에서 불균일성이 증가하면 폭발압력상승속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 불균일성이 증가할수록 미연소 혼합기의 난류화를 증대시켜 화염면적이 증가하고 화염전파속도가 가속되어 폭발압력상승속도( $[dP/dt]_m$ )가 증가하기 때문으로 판단된다.

혼합기의 폭발특성 중에서 폭발강도( $K_G$ )를 나타내는 지표는 화염전파속도, 폭발압력상승속도( $[dP/dt]_m$ ), 최대폭발압력( $P_{max}$ ) 등이 있다.

밀폐 폭발공간에서의 폭발압력특성에 의해 구해지는  $K_G$ (폭연지수)는 폭발용기의 체적을  $V$ , 폭발압력상승속도를  $(dP/dt)_{max}$  라고 할 때 식 (4)에 의해 정의된다[24].

$$K_G = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

식 (4)는 혼합기의 과압특성이 시간의 3승에 비례하여 증가하는 3승법칙(Cubic Law)에 근거하고 있다. 또한 서로 다른 체적을 가지고 있는 폭발용기에 있어서 폭발 용기의 형태가 동일하거나 점화원의 종류 및 점화위치가 같으며, 동일 혼합가스, 동일 압력, 유사한 기류 상태 등과 같이 동일한 조건에서 폭발이 일어나면 거의 유사한  $K_G$ 가 구해진다는 것을 나타내고 있다.  $K_G$ 는 폭발압력상승속도( $[dP/dt]_m$ )의 파라메타의 영향을 받으며 이는 폭발압력과 화염전파속도에 의해 결정된다. 그러므로 농도 불균일에 의해 화염전파속도, 최대폭발압력 등의 폭발특성이 증가할수록 가스 혼합기의 폭발피해 크기와 위험성이 증가할 수 있다. Fig. 14는 메탄 혼합기에 있어서 농도 불균일에 따른  $K_G$ 의 변화를 나타낸 것이다. 화학양론농도(9.56 vol%)보다 다소 높으며 압력상승속도의 최대값이 나타나는 농도에서  $K_G$ 의 최대값이 얻어졌다. 농도 불균일성이 증가하면 대부분의 농도 변화에서  $K_G$ 가 증가하는 경향이 보이고 있다. 본 연구에서 조사된 메탄 농도 불균일에 있어서  $K_G$ 는 1.30~1.58 [MPa·m/s]의 범위가 얻어졌다. 균일 농도 조건에서 메탄의  $K_G$  문헌값은 5.5 [MPa·m/s]가 제시되고 있는데[24], 본 연구의  $K_G$ 는 문헌값보다 약 4~5배가 작은 것을 알 수 있다. 이러한 차이는  $K_G$ 의 측정방법에 의한 것이 원인으로 판단된다.  $K_G$ 의 표준시험 측정은 구형 폭발용기의 용기 중심에서 착화시키며 화염이 거의 동일한 속도로 폭발공간을 전파하게 되므로 용기 체적과 관계없이 일정한 값을 가지게 된다. 반면에 본 연구에서 사용된 수평배관에서는 배관 좌측면에서 착화가 일어나며 화염은 좌측단에서 우측단으로 전파한다. Fig. 9와 같이 화염전파의 시간적 추이를 보면 배관용기의 우측 끝단으로 갈수록 화염이동이 감소하며 속도가 감소하고 있다. 길이가 수 m 이상의 긴 배관에서는 화염가속 현상이 관찰되지만[26], 본 연구에서 사용한 상대적으로 길이가 작은 0.82 m의 수평배관에서는 화염가속이 관찰되지 않았다. 또한 수평배관에서 착화에 의해 발생한 화염은 배관의 수직거리(0.072 m)까지는 구상(Spherical) 형태로 전파

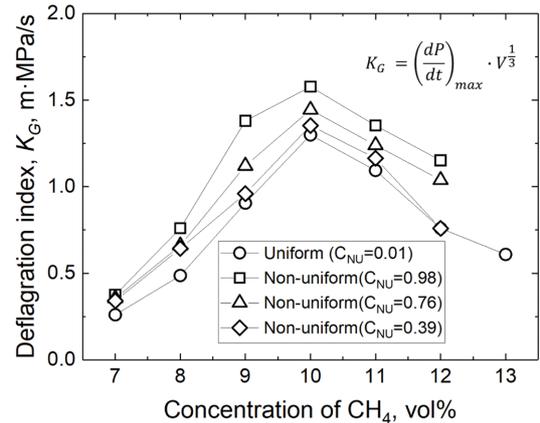


Fig. 14. Deflagration index in CH<sub>4</sub> non-uniform explosion with concentration.

하지만 용기 벽면의 제한으로 화염면적의 증가는 용기 단면적으로 제한된다. 또한 폭발압력상승속도는 화염면적과 연소속도에 곱에 거의 비례하므로, Fig. 13과 같이 폭발압력상승속도는 급격한 증가가 일어나지 않고 직선적으로 증가한다. 이와 같은 원인 등으로 인해 압력상승속도는  $K_G$ 의 표준시험과 비교하여 감소하는 것으로 판단된다. 농도 불균일성이  $K_G$ 에 미치는 영향을 보면 Fig. 14에서와 같이 불균일성이 증가하면  $K_G$ 의 증가로 나타나며 폭발피해의 증가요인이 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 농도 균일( $C_{NU}=0.01$ ) 조건의 메탄 혼합기의  $K_G$ 는 불균일성( $C_{NU}=0.98$ ) 조건에서 폭발 위험성이 최대 17.7% 증가하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 천연가스(NG)를 구성하는 메탄의 누출에 따른 폭발예방을 위해 실제 설비의 누출 상황과 유사한 불균일 가스혼합기의 폭발과압, 화염전파속도 등을 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 균일 및 불균일 농도조건에서의 폭발위험성 영향을 조사, 분석하여 이하의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 메탄의 화염전파에서 불균일성이 증가할수록 화염면적의 면적이 증가하는 것이 관찰되었는데 난류화염(Turbulent flame)에서 존재하는 주름 형태의 화염구조(Wrinkled flame)와 유사하였으며, 화염가속에 영향을 주어 폭발위험성을 증가시키는 원인으로 추정된다.
- (2) 메탄의 폭발특성에 있어서 최대압력 도달시간(Time to peak pressure)은 불균일성이 증가할수록 감소하였으며, 폭발압력은 불균일성이 증가할수록 증가하였다.
- (3) 메탄 폭발에서 폭발압력상승속도는 불균일성이 증가할수록 높아지는 경향을 보였다. 불균일성이 증가하면 화염면적이 늘어나며 연소속도의 증대로 이어지므로 폭발압력상승속도를 증가시키는 것으로 판단된다.

- (4) 메탄혼합기의 농도 불균일성에 따른  $K_G$ (폭연지수)의 범위는 1.30~1.58 [MPa·m/s]가 얻어졌으며, 불균일성이 증가하면 대부분의 농도 변화에서 증가하였으며  $K_G$ 의 최대 증가율은 17.7%로 나타났다.

폭발위험장소에서 가스가 누출될 경우 기류가 존재하는 농도를

불균일성으로 설정하여 폭발압력 및 과압분포를 조사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 불균일성을 고려한 가스폭발의 피해 평가법을 제안하였으며, 문헌자료의 폭발특성값 만이 아닌 가스 농도장 설정에 있어서 누출량, 밀폐공간 내의 기류, 환기 등을 조사하고 농도 불균일성 영향을 함께 고려하여 과압분포를 평가할 필요가 있다.

## 감 사

본 논문은 2022년도 산업안전보건연구원의 자체연구과제 “폭발 위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구 (ISBN 979-11-92782-09- 6)”의 수행된 결과의 일부입니다.

## Reference

1. Database for Major Industrial Accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), (2010~2019).
2. Metghalchi, M. and Keck, J. C., “Laminar Burning Velocity of Propane-air Mixtures at High Temperature and Pressure,” *Combustion and Flame*, **38**, 143-154(1980).
3. Razus, D., Brinzea, V., Mitu, M. and Oancea, D., “Temperature and Pressure Influence on Explosion Pressures of Closed Vessel Propane-air Deflagrations,” *J. Hazard. Mater.*, **174**, 548-555(2010).
4. Cashdollar, K. L., Zlochower, I. S., Green, G. M., Thomas, R. and Hertzberg, M., “Flammability of Methane, Propane, and Hydrogen Gases,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **13**, 327-340(2000).
5. Bauwens, C. R., Bergthorson, J. M. and Dorofeev, S. B., “Experimental Study of Spherical-flame Acceleration Mechanisms in Large-scale Propane-air Flames,” *Proceedings of the Combustion Institute*, **35**(2), 2059-2066(2015).
6. Planas-Cuchi, E., Vilchez, J. A. and Casal, J., “Fire and Explosion Hazards during Filling-emptying of Tanks,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **12**, 479-483(1999).
7. Molnarne, M., Mizsey, P. and Schroder, V., “Flammability of Gas Mixtures Part 2: Influence of Inert Gases,” *J. Hazard. Mater.*, **121**, 45-49(2005).
8. Chen, C. C., Liaw, H. J., Wang, T. C. and Lin, C. Y., “Carbon Dioxide Dilution Effect on Flammability Limits for Hydrocarbons,” *J. Hazard. Mater.*, **163**, 795-803(2009).
9. Giurcan, V., Mitu, M., Movileanu, C., Razus, D. and Oancea, D., “Influence of Inert Additives on Small-scale Closed Vessel Explosions of Propane-air Mixtures,” *Fire Safety Journal*, **111**, 102939 (2020).
10. Liu, Y., Zhang, Y., Zhao, D., Bai, M. and Shu C. M., “Effects of Initial Temperature and Pressure on Explosion Characteristics of Propane-diluent-air Mixtures,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **72**, 104585(2021).
11. Zheng, K., Wu, Q., Chen, C., Xing, Z., Hao, Y. and Yu, M., “Explosion Behavior of Non-uniform Methane-air Mixture in an Obstructed Duct with Different Blockage Ratios,” *Energy*, **255**(15), 124603 (2022).
12. Gao, J., Ai, B., Hao, B., Guo, B., Hong, B. and Jiang, X., “Effect of Obstacles Gradient Arrangement on Non-Uniformly Distributed LPG-Air Premixed Gas Deflagration,” *Energies*, **15**, 6872 (2022).
13. Harayama, M., Ohtano, H., Hirano, T. and Akita, K., “Explosion of Combustible Gaseous Mixtures with Non-Uniform Concentration Distribution,” *Japan Society for Safety Engineering*, **19**(5), 266-271(1980).
14. Bae, J. I., Kim, Y. S., Seo, Y. C. and Shin, C. S., “Explosion Characteristics of Nonhomogeneous LPG-Air Mixtures,” *Journal of KIIS*, **8**(4), 114-119(1993).
15. Sochet, I., Lamy, T. and Brossard, J., “Experimental Investigation on the Detonability of Non-uniform Gaseous Mixtures,” *Shock Waves*, **10**, 363-376(2000).
16. Kim, S. S. and Jang, G. H., “Effect of Non-uniform Concentration on Gas Explosion,” *KIGAS*, **7**(4), 14-19(2003).
17. Hjertager, B. H., Bjørkhaug, M. and Fuhre, K., “Explosion Propagation of Non-homogeneous Methane-air Clouds inside An Obstructed 50 m<sup>3</sup> Vented Vessel,” *J. Hazard. Mater.*, **19**(2), 139-153(1988).
18. Han, O. S., “Study on Analysis Model and Effect Factors in Fire and Explosion Accidents,” Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, 2016-OSHIR-1254, 6-8(2016).
19. Dobashi, R., Kawamura, S., Kuwana, K. and Nakayama, Y., “Consequence Analysis of Blast Wave from Accidental Gas Explosion,” *Proc. Combust. Inst.*, **33**, 2295-2301(2011).
20. Gostintsev, Y. A., Fortov, V. E. and Shatskikh, Y. V., “The Self-similar Law of Propagation and Fractal Surface Structure of the Free Extending Turbulent Spherical Flame,” *Doklady Physical Chemistry*, **397**, 141-144(2004).
21. Kim, W. K., Endo, T., Mogi, T., Kuana, K. and Dobashi, R., “Wrinkling of Large-scale Flame in Lean Propane-air Mixture due to Cellular Instabilities,” *Combust. Sci. Technol.*, **191**, 491-503 (2019).
22. Andrews, G. E. and Bradley, D., “The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures,” *Combustion and Flame*, **19**(2), 275-288(1972).
23. Anupam, G., Natalia, M. M., Karl, P. C. and Deanna, A. L., “Laminar Burning Velocity of Hydrogen, Methane, Ethane, Ethylene and Propane Flames at near-crogenic Temperature,” *Application in Energy and Combustion Science*, **12**, 100094(2022).
24. NFPA 68, Standard on Explosion Protection By Deflagration Venting, National Fire Protection Association(2018).
25. Li, X., Zhang, H., Bai, S., Dong, C., Ye, X. and Jia, S., “Analysis of the Effect Mechanism of Water and CH<sub>4</sub> Concentration on Gas Explosion in Confined Space,” *J. Saudi Chem. Soci.*, **25**, 101363 (2021).
26. Kundu, S., Zanganeh, J. and Moghtaderi, B., “A Review on Understanding Explosion from Methane-air mixture,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **40**, 507-523(2016).
27. Kuznetsov, M., Ciccarelli, G., Dorofeev, S., Alekseev, V., Yankin, Y. and Kim, T., “DDT in Methane-air Mixtures,” *Shock Wave*, **12**, 215-220(2002).
28. Zhang, Q., Pang, L. and Liang, H., “Effect of Scale on the Explosion of Methane in air and its Shockwave,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **24**, 43-48(2011).
29. Dobashi, R., “Experimental Study on Gas Explosion Behavior in Enclosure,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **10**(2), 83-89(1997).
30. Lei, B., Xiao, J., Kuznetsov, M. and Jordan, T., “Effects of Heat Transfer Mechanism on Methane-air Mixture Explosion in 20L Spherical Device,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, **80**, 104864 (2022).

**Authors**

**Ou-Sup Han:** Deputy Director, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Daejeon 34122, Korea; hanpaule@kosha.or.kr

**Yi-Rac Choi:** Senior Researcher, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Daejeon 34122, Korea; yirac@kosha.or.kr

**HyeongHk Kim:** Assistant Researcher, Occupational Safety Division 2, Busan Metropolitan Office, KOSHA, Busan 46274, Korea; bro.uki@kosha.or.kr

**JinHo Lim:** Senior Manager, Metropolitan Accident Investigation Center, Busan Metropolitan Office, KOSHA, Busan 46274, Korea; safekosha@kosha.or.kr