

## 불균일 농도 혼합가스의 폭발 특성에 관한 연구

오규형, 김 홍, 조영도\*, 김상섭\*, 이영철\*\*  
호서대학교, \* 한국가스안전공사, \*\* 한국가스공사

### A Study on the Gas Explosion Characteristics of Non-uniform Concentration.

Kyu-hyung Oh, Hong Kim, Yoong-do Jo\*, Sang-sub Kim\*  
Young-chul Lee\*\*  
Hoseo University, \* Korea Gas Safety Cooperation,  
\*\* Korea Gas Cooperation

#### 1. 서론

문화의 발전과 함께 연료의 사용 형태가 크게 달라지고 있으며 특히 최근 들어 가스연료의 사용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 현상은 생활의 편리성뿐 아니라 기존의 석탄과 석유 연료들의 연소시 발생하는 배출물질로 인한 환경오염을 감소시키기 위해 가스 연료의 사용이 증가되고 있다.

한편 가스연료의 사용과 함께 가스의 누출과 이에 따른 폭발과 화재 사고도 증가하고 있다. 표1은 최근 몇 년간의 국내 가스 소비량과 이에 따른 사고 현황을 보여주고 있다. 이 표에서 사고통계는 공식적으로 집계된 것들이고 이외의 것들도 포함한다면 사고건수는 더욱 증가할 것으로 보이며 가스의 소비량이 증가하면서 사고도 증가하고 있음을 알 수 있다.

표1. 가스 소비량과 사고 건수

구 분 \ 연 도	'92	'93	'94	'95	'96
가스소비량(톤)	5,240	6,240	7,177	8,620	9,966
사고 건수	100	90	126	552	556
사고건수/소비량	0.019	0.014	0.017	0.064	0.055

또한 이러한 사고의 50% 정도가 가정에서 일어나고 있음을 표2를 통해서 알 수 있다.

사고 건수를 분석한 결과를 보면 도시가스에 비해 LPG의 사고 건수가 약 2배 가량 되는 것으로 나타났으며 도시가스와 LPG에 의한 가스사고 건수가 85%이상을 차지하고 있음을 알 수 있었다. 사고에 의한 피해정도는 도시가스에 비해 LPG가 약 2배 가량이나 되며 형태별로는 40%이상이 폭발과 화재사고이다.

특히 폭발이나 화재사고의 대부분은 가스가 누출되어 공간내에 균일한 농도로 확산되기 전에 착화되어 발생하는 불균일 농도 혼합가스의 폭발형태를 이루게 된다. 그동안 균일 농도에서의 가스 폭발특성은 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔으며 이론적, 실험적 결과들이 많이 확보되어 있으나 사고 폭발과 같은 불균일 농도에서의 폭발특성에 대한 연구는 연구결과의 해석 및 적용이 어렵기 때문에 연구 자료들을 찾아보기 매우 힘들다.

본 연구에서는 가스 주입구 노즐의 직경과 가스 주입유량을 변화시키면서 밀폐 또는 파열면이 발생하는 조건에서의 폭발실험을 통하여 불균일 농도 상태에서 가스폭발특성을 고찰하고 사고 폭발시의 폭발특성들을 예측하고자 하였다.

표2. 사용장소별 가스사고 현황

연도 사용처별	~ '91	'92	'93	'94	'95	'96	계	구성비(%)
계	624	103	97	136	577	576	2,113	100
공동주택	74	21	25	21	131	137	409	19.4
단독주택	94	32	22	46	190	173	557	26.4
요식업소	107	9	15	14	52	69	266	12.6
공장등	102	7	8	4	14	20	155	7.3
허가업소	132	7	7	9	9	27	191	9.0
도로·배관 등	53	15	11	25	122	103	329	15.6
기타	62	12	9	17	59	47	206	9.7

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 폭발통과 계측 장비들로 구성되어 있으며 개략적인 구성도는 그림1과 같다. 폭발통의 크기는 가로×세로×높이가 100cm×60cm×

45cm 인 270 l 의 직육면체형태로 되어 있으며 폭발통의 측면에 압력센사와 점화원을 부착할 수 있도록 되어 있고 진공 펌프와 가스주입밸브를 부착하였다. 또 전면은 폭발화염의 전과과정을 촬영하고 관찰하기 위하여 투명 폴리카보네이트 관측창을 만들었다.

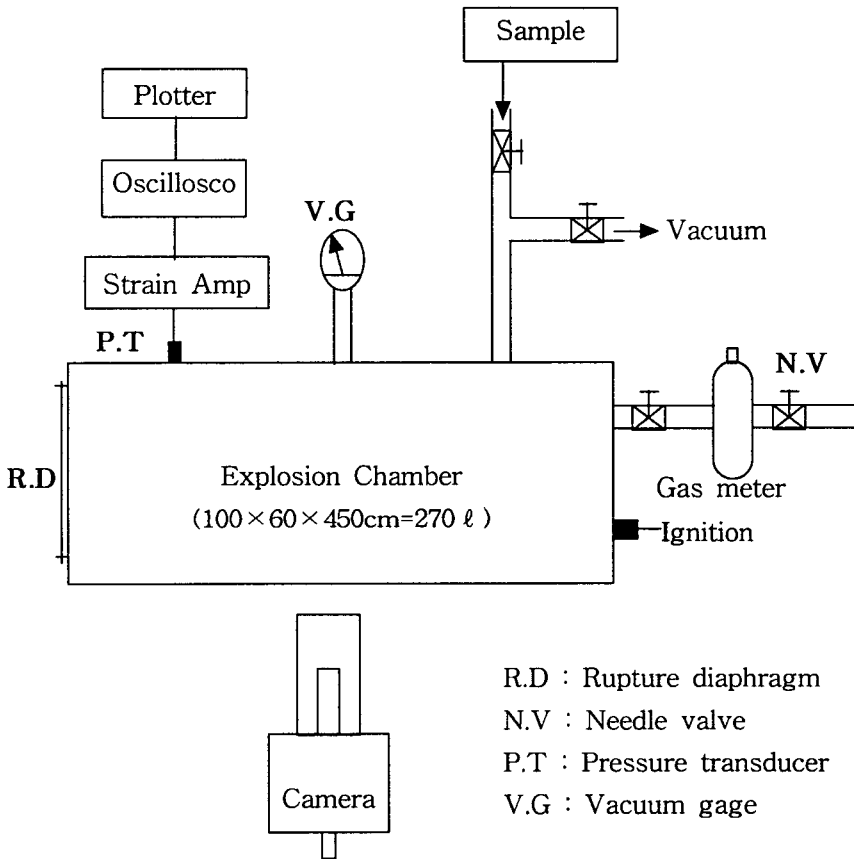


그림1. 실험장치 구성도

불균일 농도로 만들기 위해 가스를 노즐을 통해 폭발용기 내부로 직접 주입하였으며 불균일 상태를 여러 종류로 만들기 위해 노즐의 직경을 2mm, 6mm, 10mm 세종류를 사용하였으며 가스의 주입속도는 1분에 1l, 2l, 4l 가 되는 속도로 각각 변경하며 실험하였다. 가스의 주입량은 적산유량계를 이용하여 폭발통 부피에 대하여 4%에 해당되는 양을 실온 상태에서 주입하였다.

점화원의 위치를 용기의 바닥에서부터 상중하 각각 5cm, 22cm, 40cm로 실험하여 용기 내 주입된 가스의 확산 상태와, 또한 점화 위치의 변화에 따른 폭발특성의 변화를 측정하였다.

불균일 농도에서의 실험은 크게 2종류로 폭발에 의해 한쪽면이 파열될 때 폭발압력 및 압력상승속도의 변화에 대한 실험과 밀폐공간내에서 폭발특성의 변화를 측정하는 실험을 수행하였다.

실험의 결과는 Strain형 압력센서를 이용한 폭발압력의 측정과 폭발화염이 전파되는 현상을 가시화 하여 불균일농도 폭발특성을 고찰하였다.

폭발에 의해 파열면이 생성되는 실험은 파열면으로 아트를 사용하였고, 니들밸브와 압력조정기를 통해 실험조건에 맞는 주입속도로 조절되면 적산 유량계를 거쳐 폭발통내에 주입하였으며 내부 압력의 증가의 방지와 주입되는 가스의 확산을 위해 파열면에 작은 슬리트를 만들어 주었다.

가스주입이 끝나면 모든 밸브를 닫고 1분 이내에 점화시키도록 하였으며 점화 위치에 따라 착화되지 않는 경우에는 5분에서 10분 동안 계속 점화를 시도해보았다.

밀폐공간에서 폭발특성을 측정하는 경우는 파열면이 아닌 철판으로 막았으며 가스 주입시 내부 압력 증가 방지와 주입되는 가스가 자연스럽게 확산될 수 있도록 주입구로부터 멀리 떨어진 곳에 있는 밸브를 열어주었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 가스주입구의 크기에 따른 폭발특성

가스의 주입속도에 따른 불균일 농도의 정도도 달라지게 될 것이다. 본 연구에서는 가스의 주입속도를 1분에 1ℓ, 2ℓ, 4ℓ의 유량속도로 주입구(노즐)직경이 각각 2mm, 6mm, 10mm를 사용하여 돌려보냈으며 이때 노즐에서의 유속을 계산해보면 표1과 같다. 주입구의 직경이 2mm인 경우 주입구 끝에서 용기내부로 가스흐름에 의하여 용기 내부에 난류흐름을 형성시킬 수 있을 것으로 보이며 반면에 주입구 직경이 10mm인 경우는 유속이 느려져서 층류흐름이 되며 용기 내부에서 유동이 작아 가스의 비중에 의해 용기의 하부에 채류하게 될 것을 예측할 수 있으며 이에 따라 용기 내부에서 점화원의 위치에 따라 착화현상이 달라지며 폭발특성도 달라지게 될 것이다.

표1. 노즐직경 및 주입유량에 대한 유속

노즐직경(mm)	2			6			10		
가스주입속도 ( $l/min$ )	1	2	4	1	2	4	1	2	4
노즐에서의 유속 ( $cm/s$ )	531	1,062	2,124	59	118	236	21	42	85

그림2는 LPG 주입속도가  $1 l/min$ 일 때의 폭발압력과 압력상승속도에 대한 실험결과로 그림2에서 폭발압력은 노즐직경이 증가할수록 폭발압력이 감소하고 있으며 그림3에서 폭발압력 상승속도 역시 노즐직경의 증가와 함께 감소하는 현상을 보여주고 있는데 이는 앞의 표1에서 노즐직경의 증가와 함께 유속이 낮아져 불균일 혼합이 심해지기 때문에 폭발특성값이 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 점화위치에 따라 폭발특성이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 중간 높에서 점화되었을 때가 아랫부분에서 점화되었을 때보다 폭발압력과 압력상승속도가 크게 나타나고, 상부에서는 점화되지 않는데 이유는 가스의 비중으로 인해 용기 아랫부분이 당량농도보다 높게 되고 중간부분이 당량농도에 가까운 농도로 확산되었으며 용기상부에는 하한농도보다 낮게 확산되어 있음을 알 수 있었다.

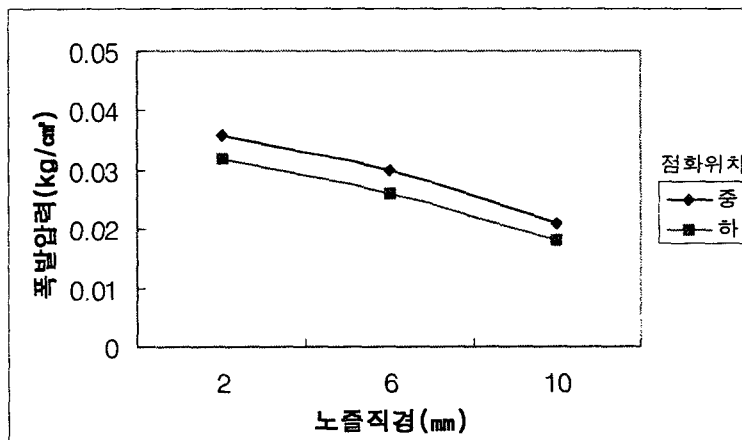


그림2. 점화위치 및 노즐직경에 따른 폭발압력  
(가스주입속도  $1 l/min$ )

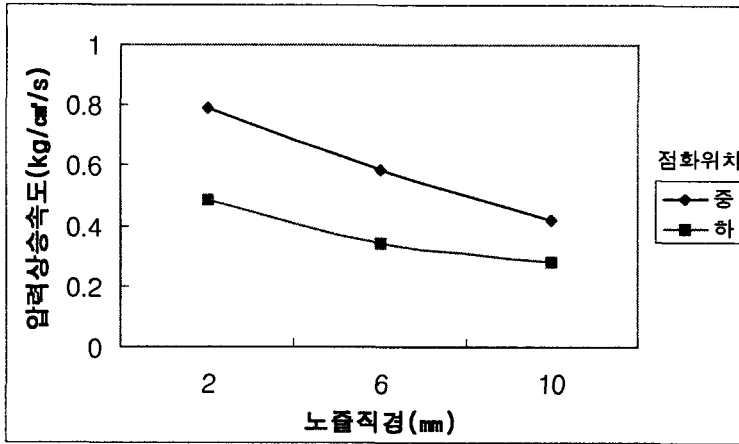


그림3. 점화위치 및 노즐직경에 따른 압력상승속도  
(가스주입속도 1 l/min)

### 3-2. 가스 주입구 크기에 따른 연소 현상

가스 주입구의 크기에 따라 용기내 주입된 가스의 확산정도가 달라져 용기내부의 농도 불균일 상태도 달라지게 될 것이며 이와 함께 용기내부에서의 폭발 연소 현상도 달라지게 될 것이다.

그림3은 직경이 다른 세 개의 가스주입구를 통해 1 l/min의 속도로 가스를 주입하고 점화시켰을 때 착화에서 파열면이 파열될 때까지의 시간을 측정하여 그림4에서 보는 바와 같이 가스주입구 직경이 커질수록 파열면이 파열되는데 까지의 시간이 길어짐을 알 수 있는데 이는 불균일에 따른 혼합가스의 연소시간이 길어짐과, 압력상승이 늦어지기 때문인 것으로 생각된다.

그림5는 점화후 파열면의 파열과 함께 용기내부에 화염이 체류하는 시간을 측정하여 그림5에서 보는 바와 같이 직경의 증가와 함께 화염의 체류시간이 크게 증가하는 현상을 보여주고 있다. 화염의 체류시간이 길어지는 이유로는 그림2에서 노즐직경 증가에 따라 폭발압력이 작아지고 따라서 그림4에서 파열면의 파열시간이 길어지므로 파열면의 파열에 따른 폭발용기내부 연소공기의 밖으로 분출속도가 작고, 부압에 의한 외부공기의 유입 속도가 낮아지기 때문에 용기내부에 폭발화염의 체류시간이 길어지게 되는 것으로 판단된다.

불균일 정도가 심하게 되면 폭발압력이 작아지는 대신 화염의 체류시간이

길어져 화염의 복사열로 폭발공간내에 있는 가연성 물질의 열분해가 용이하게 되어 폭발 후에 화재로의 천이가 쉽게 될 것이다.

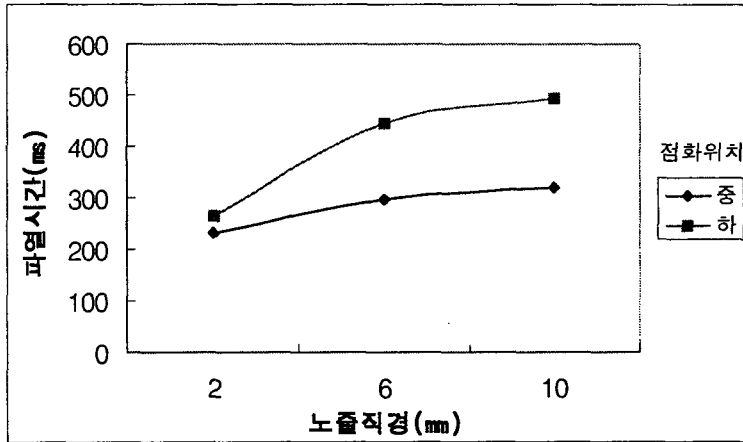


그림4. 점화위치 및 노즐직경에 따른 파열면 파열시간 (가스주입속도 1 l/min)

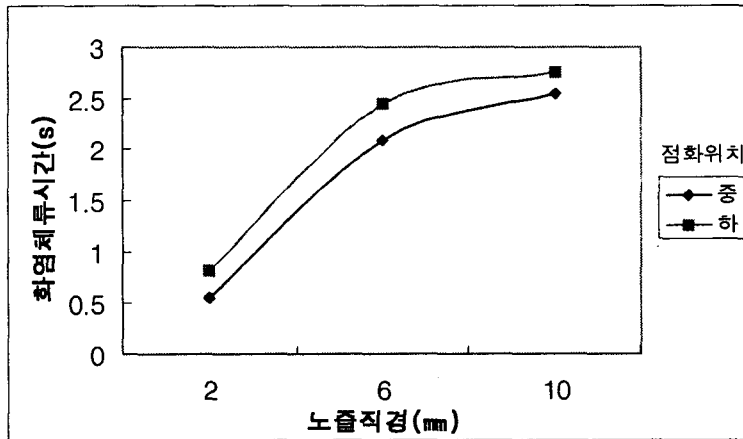


그림5. 점화위치 및 노즐직경에 따른 화염체류시간 (가스주입속도 1 l/min)

#### 4. 결론

본 연구는 불균일 혼합가스의 폭발실험으로 실험값의 편차가 크기 때문에 일관성 있는 결과를 얻기는 어려웠으나 실험적인 연구를 통해서 어떤 공간내에 가스가 누출될 경우 내부의 가스의 혼합정도는 누출구의 크기 및 누출속도에 따라서 영향을 받게되며 누출속도가 작은 경우는 유체 역학적인 운동에 의한 확산보다 누출가스의 밀도등 물성에 의해 영향을 받게 됨을 알 수 있었다. 또한 누출가스의 폭발특성실험결과 불균일 정도가 클수록 폭발압력 및 압력상승속도는 낮아지게 되지만 밀폐된 공간내에서 폭발이 될 경우는 약  $3\text{kg}/\text{cm}^3$  이상이 되어 건물을 파괴할 만큼의 위험성을 갖고 있으며, 불균일이 심한 경우 폭발공간에서의 폭발압력은 감소하지만 화염의 체류시간이 증가하여 폭발화염의 복사열에 의한 폭발 후 화재의 위험성은 증가하게됨을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 오규형 외, "실내가스폭발현상 및 실내·외 영향 분석"  
호서대학교 연구보고서 (1998. 6)
2. 오규형 외, "실내가스누출 및 폭발특성에 관한 연구"  
호서대학교 연구보고서 (1999. 7)
3. Michiko Harayama 외, "Explosion of Combustible Gaseous Mixtures with Non-uniform Concentration" 안전공학, Vol.19, No.5 (1980)
4. Kees van Wingerden 외, "Gas Explosion handbook"  
Elsevier Science, (1997)