

## 불균일 농도가 가스 폭발에 미치는 영향

†김 상 섭 · 장 기 현\*

한국가스안전공사 가스안전시험연구원

\*인하대학교 기계공학부 대학원

(2003년 9월 10일 접수, 2003년 10월 7일 채택)

## Effect of Non-uniform Concentration on Gas Explosion

Sang Sub Kim and Gi Hyun Jang\*

*Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation*

*\*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University*

*(Received 10 September 2003 ; Accepted 7 October 2003)*

### 요 약

일반적으로 발생하는 사고중의 가스폭발사고는 일정한 상태로의 혼합과정보다는 불균일하게 이루어진 상태로 폭발이 발생하고 있다. 본 연구에서는 불균일 상태에서의 불균일 농도에 의한 폭발현상을 실제 실내의 축소형으로 폭발통을 제작, 모형화하여 여러 현상을 재현함으로써 실제 사고시의 폭발현상을 예측할 수 있었다.

그 결과, 어떤 공간에서 가스가 누출될 경우 내부의 가스의 혼합정도는 누출구의 크기 및 누출속도에 따라 영향을 받으며, 불균일 정도가 클수록 폭발압력 및 압력상승속도는 낮아지고 폭발압력은 감소하지만 화염의 체류시간이 증가하여 폭발화염의 복사열에 의한 폭발 후에는 화재의 위험성이 증가함을 알 수 있었다.

**Abstract** - Generally the accident by gas explosion in the working place is occurred at the condition of non-uniform mixture rather than uniform one. This study could predict the explosion phenomenon of non-uniform mixture with model explosion chamber which realize various practical conditions.

As a result, the mixing level of gas in the chamber depends on discharge area and velocity when there is gas discharge in certain space. In addition, as non-uniform increases, explosion pressure and its increasing rate decrease. However, firing risk after the explosion flame by infrared heat increase due to the increase of residence time of flame.

**Key words** : gas explosion, non-uniform mixture, explosion chamber

### 1. 서 론

문화의 발전과 함께 연료의 사용 형태가 크게 달라지고 있으며 최근 들어 가스연료의 사

용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 현상은 생활의 편리성뿐만 아니라 기존의 석탄과 석유연료들의 연소시 발생하는 배출물들로 인한 환경오염을 감소시키기 위해 가스 연료의 사용이

Table 1. Amount of gas consuming and number of accident.

구분 \ 연도	'97	'98	'99	'00	'01
가스소비량(톤)	11,543	16,187	18,618	21,474	23,287
사고건수	457	380	207	169	153
사고건수/소비(건/만톤)	0.4	0.2	0.1	0.07	0.07

증가되고 있다. 한편 사용자와 함께 가스의 누출과 이에 따른 폭발과 화재 사고도 증가하고 있다. Table1은 최근 몇 년간의 국내 가스 소비량과 이에 따른 사고 현황을 보여주고 있다. 이 표에서 사고통계는 공식적으로 집계된 것들 이고 이외의 것들도 포함한다면 사고건수는 더욱 증가할 것으로 보이며, 가스의 소비량이 증가하면서 사고도 증가하고 있음을 알 수 있다.

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 가스 사고 건수가 85%이상 차지하고 있음을 알 수 있다. 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 연구결과 의 해석 및 적용이 어렵기 때문에 연구 자료들을 찾아보기 매우 힘들다.

본 연구에서는 가스 주입구 노출의 직경과 가스 주입유량을 변화시키면서 밀폐 또는 과열면이 발생되는 조건에서의 폭발실험을 통하여 불균일 농도상태에서 가스폭발특성을 고찰하고 사고 폭발시의 폭발특성들을 예측하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 폭발통과 계측 장비들로 구성되어 있으며, 개략적인 구성도는 Fig.1과 같다. 폭발통의 크기는 가로×세로×높이가 100cm×60cm×45cm 인 270 l 의 직육면체형태로 되어 있으며, 폭발통의 측면에 압력센서와

Table 2. Statistics of gas accident with various place

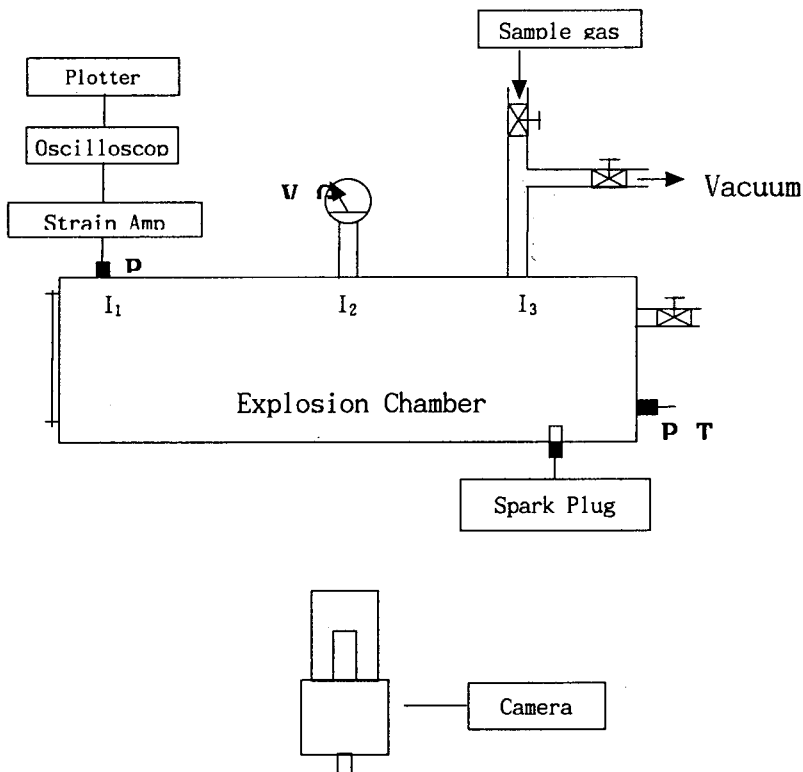
연도 \ 사용처별	~'96	'97	'98	'99	'00	'01	계	구성비(%)
계	576	477	397	224	176	170	2,020	100
공동주택	137	102	69	81	48	36	473	23.4
단독주택	173	166	139	31	57	56	622	30.8
요식업소	67	50	58	31	20	23	249	12.3
공장	20	6	10	8	6	5	55	2.7
공급시설	79	60	33	10	6	6	194	9.6
허가업소	27	15	11	25	122	103	303	15
차량	24	19	9	5	5	5	67	3.3
다중이용시설	6	5	2	-	-	1	14	0.7
제1종보호시설	12	12	14	6	4	6	54	2.6
기타	31	30	49	4	21	20	155	7.6

점화원을 부착할 수 있도록 되어 있고, 진공 펌프와 가스주입밸브를 부착하였다. 또 전면은 폭발화염의 전파과정을 촬영하고 관찰하기 위하여 투명 폴리카보네이트 관측창을 제작하였다.

불균일 농도로 만들기 위해 가스를 노즐을 통해 폭발용기 내부로 직접 주입하였으며 불균일 상태를 여러 종류로 만들기 위해 노즐의 직경을 2mm, 6mm, 10mm 3종류를 사용하였으며, 가스의 주입속도는 1분에 1ℓ, 2ℓ, 4ℓ 가 되는 속도로 각각 변경하며 실험하였다. 가스의 주입량은 적산유량계를 이용하여 폭발통 부피에 대하여 4%에 해당되는 양을 실은 상태에서 주입하였다.

점화원의 위치를 용기의 바닥에서부터 상중하 각각 5cm, 22cm, 40cm로 실험하여 용기내 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 밀폐 공간내에서 폭발특성의 변화를 측정하는 실험을 수행하였다. 실험결과는 Strain형 압력센서를 이용한 폭발압력의 측정과 폭발화염이 전파되는 현상을 가시화 하여 불균일농도 폭발특성을 고찰하였다. 폭발에 의해 파열면이 생성되는 실험은 파열면으로 아트지를 사용하였고, 니들밸브



- I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> : Ignition source
- P.T : Pressure transducer
- V.G : Vacuum gage

Fig. 1 Experimental apparatus.

Table 3. Velocity with nozzle diameter and injection velocity.

노즐직경(mm)	2			6			10		
가스주입 속도( $\ell$ /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

와 압력조정기를 통해 실험조건에 맞는 주입속도로 조절되면 적산유량계를 거쳐 폭발통내에 주입하였으며, 내부 압력의 증가의 방지와 주입되는 가스의 확산을 위해 파열면에 작은 슬리트를 만들어 주었다.

가스주입이 끝나면 모든 밸브를 닫고 1분 이내에 점화시키도록 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 확산 될 수 있도록 주입구로부터 멀리 떨어진 곳에 있는 밸브를 열어주었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 가스 주입구의 크기에 따른 폭발특성

가스의 주입속도에 따른 불균일 농도의 정도도 달라지게 될 것이다. 본 연구에서는 가스의 주입속도를 1분에 1 $\ell$ , 2 $\ell$ , 4 $\ell$ 의 유량속도로 주입구(노즐)직경이 각각 2mm, 6mm, 10mm를 사용하여 실험해보았으며, 이때 노즐에서의 유속을

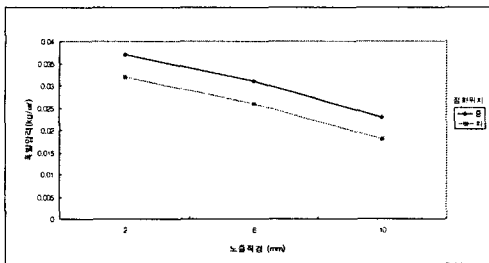


Fig. 2 Explosion pressure with Ignition position and nozzle diameter. (gas injection velocity : 1  $\ell$ /min)

계산해보면 Table3과 같다. 주입구의 직경이 2mm인 경우 주입구 끝에서 용기내부의 가스흐름에 의하여 용기 내부에 난류흐름을 형성

시킬 수 있을 것으로 보이며, 반면에 주입구 직경이 10mm인 경우는 유속이 느려져서 층류흐름이 되며 용기 내부에서 유동이 작아 가스의 비중에 의해 용기의 하부에 체류하게 될 것을 예측할 수 있으며, 이에 따라 용기 내부에서 점화원의 위치에 따라 착화현상이 달라지며 폭발특성도 달라지게 될 것이다.

Fig. 2는 LPG 주입속도가 1 $\ell$ /min일 때의 폭발압력과 압력상승속도에 대한 실험 결과로, 폭발압력은 노즐직경이 증가할수록 폭발압력이 감소하고 있으며, Fig.3 에서 폭발압력 상승속도 역시 노즐직경의 증가와 함께 유속이 낮아져 불균일 혼합이 심해지기 때문에 폭발 특성 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 점화위치에 따라 폭발특성이 달라지는 것을 볼 수 있다. 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 있기 때문이다.

또한 점화위치에 따라 폭발특성이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 중간 높이에서 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 용기에는 하한농도보다 낮게 확산되어 있기 때문이다.

#### 3.2. 가스 주입구 크기에 따른 연소 현상

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

Fig. 3은 직경이 다른 세 개의 가스 주입구를 통해 1 $\ell$ /min의 속도로 가스를 주입하고 점화시켰을 때 착화에서 파열면이 파열될 때까지의 시간을 측정하여 Fig. 4에서 보는 바

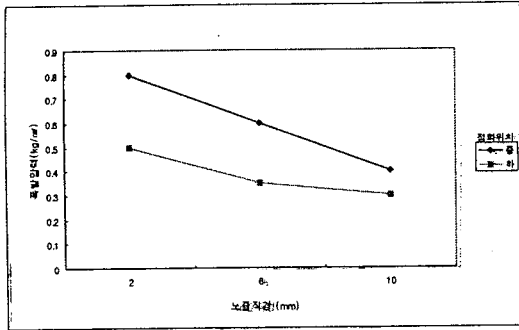


Fig. 3 Pressure rising velocity with Ignition position and nozzle diameter.

(gas injection velocity : 1ℓ/min)

와 같이 가스주입구 직경이 커질수록 파열면이 파열되는데 까지의 시간이 길어짐을 알 수 있는데, 이는 불균일에 따른 혼합가스의 연소시간이 길어짐과, 압력상승이 늦어지기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5는 점화후 파열면의 파열과 함께 용기 내부에 화염이 체류하는 시간을 측정하여 것으로 노즐직경의 증가와 함께 화염의 체류시간이 크게 증가하는 현상을 보여주고 있다. 화염의 체류시간이 길어지는 이유는 Fig.2에서 노즐직경 증가에 따라 폭발압력이 작아지고 따라서 Fig. 4에서 파열면의 파열시간이 길어지므로 파열면의 파열에 따른 폭발용기내부 연소공기의 밖으로 분출속도가 작고, 부압에 의한 외부공기의 유입속도가 낮아지기 때문에 용기내부에

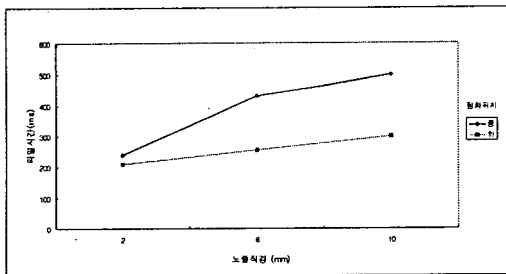


Fig. 4 Explosion time with Ignition position and nozzle diameter.

(gas injection velocity : 1ℓ/min)

폭발화염의 체류시간이 길어지게 되는 것으로 판단된다. 불균일 정도가 심하게 되면 폭발압

력이 작아지는 대신 화염의 체류시간이 길어져 화염의 복사열로의 폭발공간내에 있는 가연성 물질의 열분해가 용이하게 되어 폭발 후에 화재로의 천이가 쉽게 될 것이다.

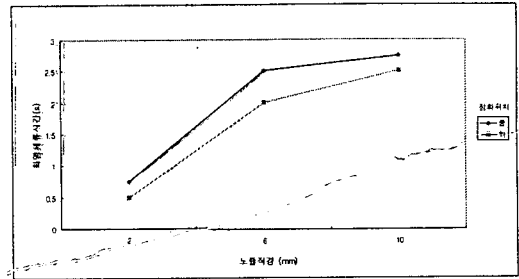


Fig. 5 Flame residence time with Ignition position and nozzle diameter.

(gas injection velocity : 1ℓ/min)

#### 4. 결 론

본 연구는 불균일 혼합가스의 폭발시험으로 실험값의 편차가 크기 때문에 일관성 있는 결과를 얻기는 어려웠으나 실험적인 연구를 통해서 어떤 공간내에 가스가 누출될 경우 내부의 가스혼합정도는 누출구의 크기 및 누출속도에 따라서 영향을 받게되며 누출속도가 작은 경우는 유체 역학적인 운동에 의해 확산보다 누출개스의 밀도 등 물질에 의해 영향을 받게 됨을 알 수 있었다. 또한 누출가스의 폭발특성실험 결과 불균일 정도가 클수록 폭발압력 및 압력상승속도는 낮아지게 되지만, 밀폐된 공간내에서 폭발이 될 경우는 약 3kg/cm<sup>2</sup> 이상이 되어 건물을 파괴할 만큼의 위험성을 갖고있으며, 불균일이 심한 경우 폭발공간에서의 폭발압력은 감소하지만 화염의 체류시간이 증가하여 폭발화염의 복사열에 의한 폭발 후 화재의 위험성은 증가하게됨을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 오규형외, "실내가스폭발현상 및 실내의 영향분석 보고서", (1998)
- [2] Michiko Harayama, et al, "Explosion of Combustible Gaseous Mixtures with Non- uniform Concentration" 안전공학, Vol. 19, No. 5, (1980)
- [3] Kees van Wingerden et al, "Gas

- Explosion handbook", Elsevier Science, (1997)
- [4] T. Hirano, "Gas Explosion Prevention Engineering", Kaibundo, (1983)
- [5] Kees van Wingerden, "prediction of pressure and flame effects surroundings of installations protected by dust explosion venting", J. Loss Prev. Process Ind., Vol.6, No.4, (1993)
- [6] D. Crowhurst, S. A. Colwell, and D.P. Hoare, "The external effect of vented dust. explosion", Process safety-the International Dimension, IBC London, (1994)
- [7] Dag Bjerketvedt et al, "Gas explosion handbook, Elsevier Science", (1997)