

<학술논문>

밀폐공간에서의 VCE에 의한 충격파 고찰

임사환<sup>†</sup> · 이종락<sup>\*</sup> · 허용정<sup>\*\*</sup>

(2007년 6월 19접수, 2007년 10월 31일 심사완료)

A Study on the Shock Wave Caused by VCE in Enclosure

Sa-Hwan Leem, Jong-Rark Lee and Yong-Jeong Huh

**Key Words:** Shock Wave(충격파), Vapor Cloud Explosion(VCE : 증기운폭발)

**Abstract**

In order to establish detailed plans for fire protection and reduce the possible fire accidents in the future, a study on the shock wave caused by VCE(Vapor Cloud Explosion) is very important. Destruction phenomena of structure by gas explosion is due to the explosion pressure and heat. Explosion pressure is a kind of energy converted from the gas mixture explosion. Therefore, the propagation progress of shock wave and flame is very important. This study investigated the shock wave caused by VCE in enclosure with opened vent port. From a result, the vent port of top at the straight line of ignition and leak location was opened most rapidly, and the vertical vent port not opened.

1. 서론

친환경적인 에너지원으로서 가스는 산업체와 일반가정에서 사용이 급속도로 증가하여 국내 에너지 산업의 중추적인 역할로 대두되고 있음을 Table 1에서 알 수 있다.<sup>(1)</sup> 또한 산업이 발전함과 동시에 인간의 안전에 대한 욕구도 날로 급증하고 있는 실정이다. 하지만 가스 사고는 다양한 원인과 형태에 의하여 발생하고 있고 산업체와 가정 등에서 잠재적인 위험요소는 항상 내재하고 있으며, 반복적으로 동일유형의 사고가 발생하고 있는 실정이다.

특히 가스폭발사고는 사회적으로 막대한 손실을 초래하고 있으며, 가스사고로 인한 가스화 등에 대한 화염거동 및 안전성 등 가스폭발로 인

**Table 1** Consumption of energy (Units : kiloton)

| Year               | 2001                | 2002                | 2003                | 2004                | 2005                |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Energy Consumption | 198,409             | 208,636             | 215,066             | 220,238             | 229,333             |
| LNG                | 20,787              | 23,099              | 24,194              | 28,351              | 29,989              |
| Oil(LPG)           | 100,385<br>(11,390) | 102,414<br>(12,272) | 102,380<br>(11,912) | 100,638<br>(11,937) | 101,553<br>(12,240) |
| Hydraulic          | 1,038               | 1,327               | 1,722               | 1,465               | 1,297               |
| Nuclear            | 28,033              | 29,776              | 32,415              | 32,679              | 36,695              |
| Coal               | 45,711              | 49,096              | 51,116              | 53,127              | 54,791              |
| Other              | 2,456               | 2,925               | 3,241               | 3,977               | 5,007               |

**Table 2** Accident by facility (Units : case)

| Year            | 2001     | 2002     | 2003     | 2004    | 2005     |
|-----------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| House           | (24)[14] | (26)[11] | (23)[12] | (23)[7] | (23)[10] |
| Restaurant      | 21       | 18       | 16       | 19      | 21       |
| Fist protection | 3        | 2        | 6        | 2       | 3        |
| Factory         | 3        | 6        | 5        | 1       | 3        |
| Total           | 65       | 63       | 62       | 52      | 60       |

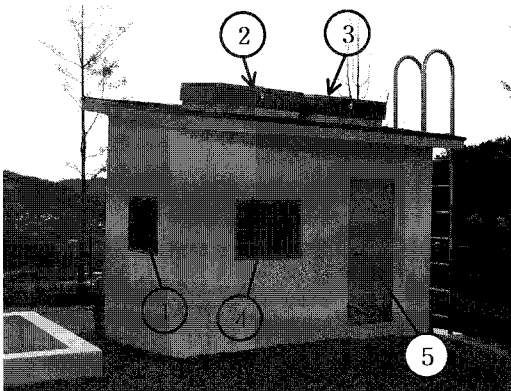
( ) : Single House, [ ] : Cooperation House

† 책임저자, 회원, 한국가스안전공사 가스안전교육원  
E-mail : gentle@kgs.or.kr  
TEL : (041)629-0615 FAX : (041)522-0521  
\* 한국가스안전공사 가스안전교육원  
\*\* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

**Table 3** Type by LPgas accident (Units : case)

| Year       | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Explosion  | 40(3)[6] | 55(2)[-] | 49(-)[1] | 37(3)[5] | 39(1)[-] |
| Fire       | 33(-)[4] | 17(1)[3] | 28(6)[2] | 15(4)[1] | 18(2)[2] |
| Leakage    | 3(7)[2]  | 2(15)[2] | 6(4)[5]  | 5(8)[1]  | 2(7)[-]  |
| CO         |          |          |          |          |          |
| Toxicosis  | 1(8)     | 2(9)     | 1(5)     | 2(6)     | 6(6)     |
| Oxygen     |          |          |          |          |          |
| Deficiency | -[2]     | -        | -[1]     | 2        | 1        |

( ) : City Gas, [ ] : High-Pressure Gas

**Fig. 1** Experimental booth

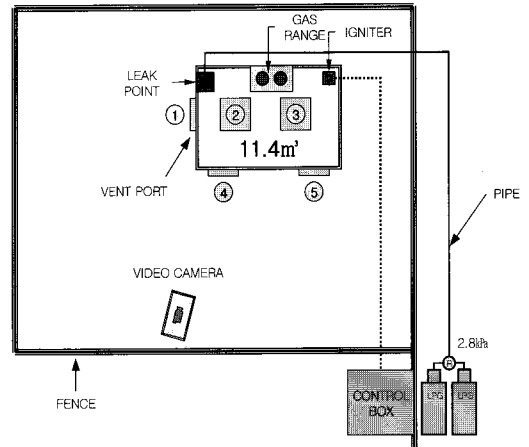
한 피해영향 범위에 대하여 연구가 선행<sup>(2-6)</sup>되었으며, 가스사고의 안전성을 검증하기 위하여 폭발실험이 활발하게 이루어지고 있으나 실제건물을 제작하기 어렵고 실제상황에서 재현하기가 어렵기 때문에 일정비율로 축소하여 제작된 실험 모델로 실험<sup>(7,8)</sup>을 실시하고 있는 실정이다.

최근 5년간 가스시설에서의 사고현황은 Table 2와 같으며, 형태는 Table 3과 같다.<sup>(9)</sup>

이러한 가스 사고를 미연에 예방하기 위한 대책의 일환으로 대규모 사업장 등에는 안전관리자를 선임하여 배치하고 있으며, 선임 된지 6개월 이내에 법정안전교육을 필하도록 규정하고 있다. 하지만 모든 가스시설에 안전관리자를 배치하고 있지는 않는다.<sup>(10-12)</sup>

따라서 안전관리자가 배치되지 않는 가스시설에서 가스의 폭발로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 충격과 화염의 진행방향의 예측이 매우 중요할 것이다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 폭발실험용부스를 설치하여 폭발강도를 최대가 되도록 실험 장비를

**Fig. 2** Experimental apparatus

구성하였으며, 가스폭발의 충격과 화염의 진행 경로에 대하여 비디오카메라 촬영을 통하여 관찰하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

실험 장치는 크게 실험용부스와 계측장비들로 구성되어 있으며, 계약적인 구성도는 Fig. 2와 같다. 실험용부스의 크기는 가로×세로×높이가 183cm×282cm×221cm인 11.4m<sup>2</sup>의 직육면체형태로 되어 있다.

부스안쪽에 점화장치를 상·하에 설치하였으며, 연속점화방식을 채택하였다. 또한 폭발의 강도를 최대로 하기 위하여 점화장치의 위치와 누출지점을 가스레인을 중간에 두고 배관에서 누출되는 경우를 대비하여 실험 장비를 구성하였다. 누출지점도 상·하로 설치하여 LPgas의 경우 하부에서의 누출과 NG의 경우 상부에서의 누출에 대하여 실험을 실시할 수 있도록 하였다.

또한, 방출구의 설치는 점화장치와 누출지점에 따른 적절한 위치에 설치하였다.

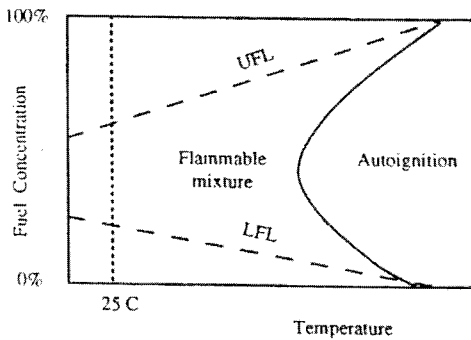
### 2.2 실험 방법

Fig. 2에서 보듯이 점화장치는 강화유리를 지나서 제어박스에서 작동되도록 설치하여 연속점화 방식으로 점화를 촉진한다. 따라서 실험에 참여하는 연구자의 안전을 확보하였다.

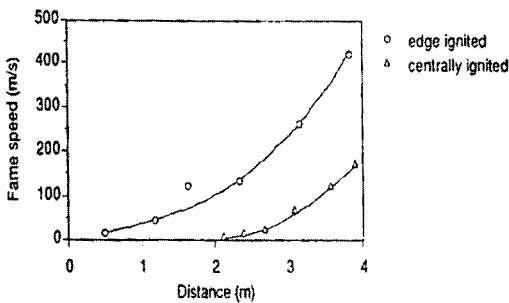
**Table 4** Safety characteristics derived from explosion regions of important flammable gases in mixtures with air and inert gases\*

| Flammable gas | Explosion limit(amount of flammable gas in mixture with air) |            |
|---------------|--|------------|
|               | lower mol%   | upper mol% |
| Methane       | 4.4  | 17.0       |
| Propane       | 1.7  | 10.9       |

\* The values are valid for room temperature and atmospheric pressure



**Fig. 3** The effect of temperature on LFL and UFL



**Fig. 4** Flame speed vs. distance for centrally and edge ignited explosions in a double configuration(i.e. solid top plate) with obstacles<sup>(15)</sup>

실험용 부스에 가스공급은 LPG 용기 - 조정기 - 배관 - 중간밸브 - 염화비닐호스를 통하여 공급하는 방식을 채택하였으며, 기존연구에서 폭발위력이 가장 크다고 알려진 범위의 농도를 확산시켰다. 또한 점화장치와 누출지점의 위치는 최대한 멀리 구성하였으며, 폭발력이 쉽게 방출되도록 점화장치와 누출지점을 선정하였다.

방출구는 폭발에 의한 압력을 최대한 빠른 시간에 외부로 방출할 수 있는 방향으로 ①, ②,

③, ④, ⑤로 설치하였다. Fig. 1과 Fig. 2에서 보듯이 방출구 ①은 누출지점 근처, 방출구 ②와 ③은 지붕에 설치되어 있으며, 방출구 ④와 ⑤는 전방으로 구성되어 있다. 특히 방출구 ⑤는 출입문으로 활용되기도 한다.

모든 방출구에는 폭발압력에 의하여 실험용 부스의 안전성과 파편에 의한 연구자의 손상을 확보하기 위하여 낮은 압력에도 파괴되는 종이를 부착하여 밀폐하였다. 유리를 사용하는 것이 보다 현실적이겠지만, 유리파편에 의한 위험성 배제와 화염의 거동형태를 쉽게 파악하기 위해서 종이를 사용하였다.

Fig. 2에서 보듯이 충격파와 화염의 거동을 파악하기 위하여 비디오카메라를 정면에서 약간 좌측부분에 위치시켰다. 이는 보다 많은 부분의 방출구의 충격파와 화염의 거동현상을 고찰하기 위함이다.

### 2.3 폭발 이론

가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성 증기운(Vapor Cloud)을 형성하고 이때 착화원에 의하여 화구(Fire Ball)형태로 착화 폭발하는 것을 증기운폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)이라 한다.<sup>(13)</sup>

Fig. 3에서 보여주는 것처럼 연소범위는 초기온도가 증가하면 넓어질 것이다. 초기압력의 변화는 공기중 탄화수소에 대해 LFL은 그다지 변화가 없으나 UFL은 증가할 것이다.<sup>(14)</sup> 이러한 증기운 폭발은 BLEVE(Boiling liquid expanding vapor explosion : 沸騰液體膨脹蒸氣爆發)보다 폭발효율이 적으며, 연소에너지의 약 20%만 폭발파로 전환된다. 또한 Fig. 4에서 보듯이 증기와 공기와의 난류혼합 또는 방출점으로부터 먼 지점에서의 증기운 점화는 폭발의 충격을 가중시킨다.<sup>(15)</sup>

Table 4는 가연성 가스의 폭발범위<sup>(16)</sup>이며, 대기압하에서의 조건으로 CHEMSAFE에서 발췌한 것이다.<sup>(17)</sup> 폭발범위의 근원적인 자료 수집은 Nabert-Schön<sup>(18)</sup>의 독일어 표와 Zabetakis의 영어 표<sup>(19)</sup>에서 인용하였다. 이 Table의 본질적 자료는 최초의 자료에서 가져왔다.

### 3. 결과 및 토의

가연성가스를 누출하여 폭발실험을 실시한 결

과 충격파의 진행방향이 Fig. 5(a)~(d)로 나타났다.

본 연구에서는 최대폭발압력이 되도록 양론조성에 가깝게 폭발범위를 유지하였으며, 점화원과 누출원의 위치를 최대한 멀리하였다.

Fig. 5(a)는 ①번 방출구에 대한 개도를 그래프로 나타낸 것으로 폭발 압력이 좌상부 다음으로 급격하게 압력이 방출됨을 알 수 있다. 이는 점화에너지의 진행방향으로의 운동에너지에 의한 것으로 유추된다.

Fig. 5(b)는 ②번 방출구에 대한 개도를 그래프로 나타낸 것으로 초반에 압력의 변화가 느리다가 급격하게 압력이 외부로 방출됨을 알 수 있으며, 가장 먼저 방출구가 개도됨을 알 수 있다. 이는 화염뿐만 아니라 충격파도 누출원 근처 상부가 가장 큰 피해를 야기함을 알 수 있다.

Fig. 5(c)는 ③번 방출구에 대한 개도를 그래프로 나타낸 것으로 ①, ②번의 방출구에서 압력이 급격하게 유출됨으로써 느리게 진행되다가 배압과 잔류압력이 급격하게 외부로 방출됨을 알 수 있다.

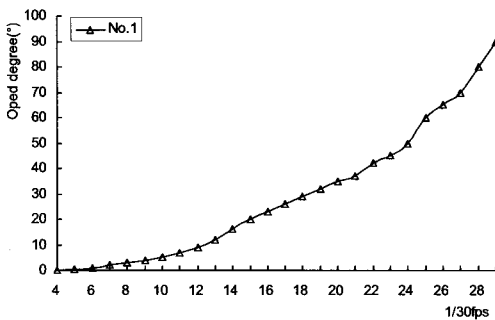
상부의 방출구로 급격하게 유출되는 것은 화염의 일반적인 형태인데 실험을 통하여 검증되었다. 따라서 가스시설을 설치시에는 점화원과 누출원의 위치를 충분히 고려하여야 할 것이다.

Fig. 5(d)는 ⑤번 방출구에 대한 개도를 그래프로 나타낸 것으로 초반부터 조금씩 압력이 작용함을 알 수 있으나, 아주 느리게 압력의 변화를 고찰 할 수 있다.

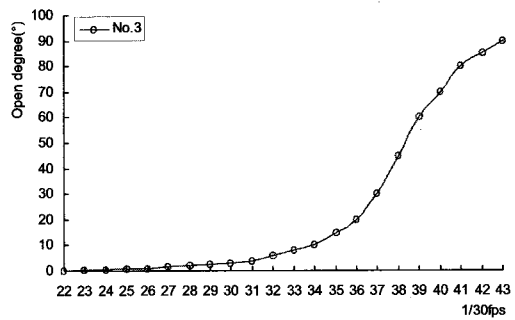
④번 방출구는 충격파가 전혀 전달되지 않는 것으로 나타났으며, 이는 기존의 연구결과와 대동소이함을 알 수 있다.

Fig. 6을 살펴보면 ②번 방출구와 ③번 방출구는 시간의 흐름에는 차이가 있지만, 압력방출이 급격하게 변화하는 것이 비슷하게 나타나고 있다. 또한 ①번과 ⑤번 방출구의 개도 그래프를 살펴보면 비슷하게 전개됨을 알 수 있다.

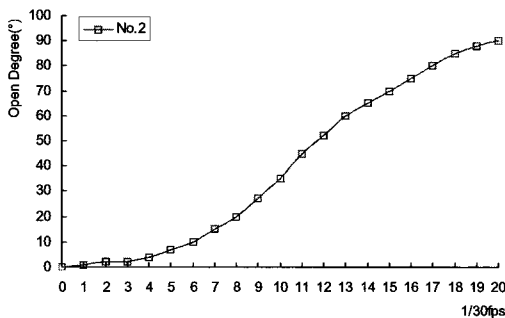
Fig. 7은 각각의 방출구에서의 시간당 충격파의 누출속도에 따른 개구부의 개도로 인한 누출량을 도시화한 것이다.



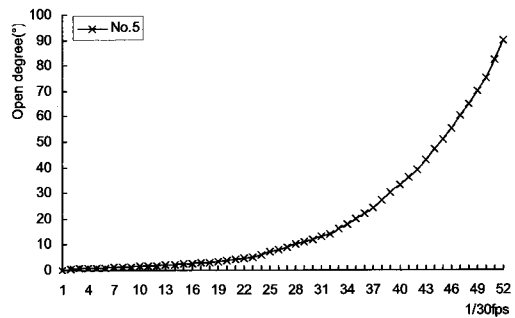
(a)



(c)



(b)



(d)

Fig. 5 Open degree of explosion venting caused by the explosion pressure in the Booth

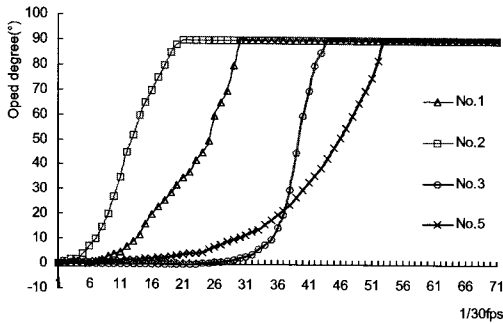


Fig. 6 Open degree of explosion venting

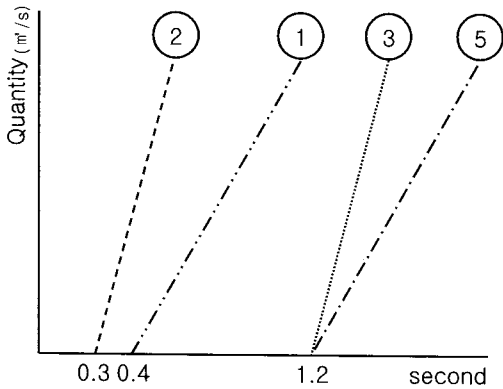


Fig. 7 The quantity of second

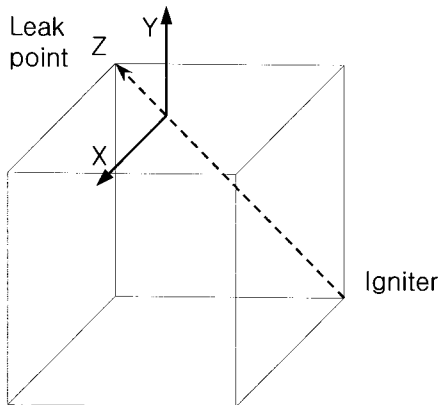


Fig. 8 The state of shock wave propagation

#### 4. 결론

본 연구에서는 가스폭발로 인한 충격파의 거동에 대하여 살펴보았다.

이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.<sup>(20)</sup>

(1) 누출원과 점화원의 위치가 멀리 떨어져 있을 때 충격파가 가장 심하게 작용함을 알 수 있었다. 이는 기존의 연구<sup>(15)</sup>와 동일함을 알았으며, 본 연구를 통하여 새롭게 정립되는 것은 압력파의 반대파가 작용함을 실험을 통하여 고찰할 수 있었다.

(2) 누출원과 점화원의 일직선상(Fig. 8에서 Z)에 위치한 방출구(①번)가 가장 먼저 개도가 됨을 알 수 있었다. 특히 상부(Fig. 8에서 Y)에 있는 방출구(②, ③번)로 유출되는 압력파는 모두 급격하게 유출됨을 알 수 있었다.

(3) 누출원과 점화원의 일직선상에 수직(Fig. 8에서 X)인 방향의 방출구(④번)는 개도가 되지 않음을 알 수 있다. 이는 기존의 연구<sup>(21,22)</sup>와 비교해 볼 때, 점화원과 누출원의 위치에 따라 화염의 체류시간 및 측면방향으로의 열손실에 미치는 영향이 있는 것과 동일하다.

(4) 점화원과 누출원의 일직선상에 위치한 방출구보다 일직선 상부에 위치한 방출구(②번)가 먼저 파열됨을 알 수 있었다.

(5) 누출원과 점화원 근처의 방출구(⑤번)는 보다 완만하게 압력이 방출됨을 확인할 수 있었다.

추후 연구를 진전시켜 가스농도에 따른 화염 및 폭발파편에 의한 안전사고 피해영향 범위를 실험을 통하여 파악코자 한다. 또한 방호벽의 안전성에 대하여 스트레인게이지를 이용하여 방호벽 성능에 대하여도 연구를 진전코자 한다.

#### 참고문헌

- (1) Korea Statistical Information System Consumption data of Energy source <http://kosis.nso.go.kr>
- (2) Leem, S. H., 2006, "A Study on the Noise Near the Butane-can Explosion Location," *Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 1166~1175.
- (3) Leem, S. H. and Huh, Y. J., 2006, "A Development of Intelligent Decision System by Safety Distance of Gas Storage Tank," *Journal of the Korea Academic Industrial Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 721~726.
- (4) Leem, S. H. and Huh, Y. J., 2007, "A Study on the Damage of Fireball by the Butane- Can Explosion," *Journal of the Korean Society of Safety*,

- Vol. 22, No. 4, pp. 110~116.
- (5) Oh, K. H., Kang, Y. O. and Lee, S. E., 2004, "A Study on the Flame Behavior of Whirl Fire and Pool Fire," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 19, No. 3, pp. 45~50.
- (6) Lee, B. J. and Kim, J. H., 2005, "Characteristics of Methane Non-Premixed Multiple Jet Flames," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol.29, No.3, pp. 349~355.
- (7) Lee, Y. S., Chae, S. H. and Jung, S. I., 2006, "A Experimental Study on the Characteristics of Gas Explosion Due to Vent Shape and Size," *Journal of the Korea Society of Safety*, Vol. 21, No. 3, pp.38~44.
- (8) Chae, J. O., Kim, S. S., Jo, Y. D. and Jang, G. H., 2003, "A Study on the Characteristics of Gas Explosion with Vent Area," *Journal of the Korea Institute of Gas*, Vol.7, No. 4, pp. 53~60.
- (9) Korea Gas Safety Corporation, 2006. "2005 Gas Accident Yearbook," *O-Sung Printing*, pp. 25-287.
- (10) Korea Gas Safety Corporation, 2006. "High Pressure Gas Safety Control Law," *Namjin Painting House*, p. 49, pp. 75~76.
- (11) Korea Gas Safety Corporation, 2006. "Liquid Petroleum Gas Safety Control Law," *Namjin Painting House*, pp. 41~44, pp. 66~67.
- (12) Korea Gas Safety Corporation, 2006. "City Gas Business Law," *Bansuk Munhwa Painting House*, pp. 65~68.
- (13) CCPS, 1994, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE," *AIChE*, New York.
- (14) H.P. Niepenberg von, Rick Oppenberg, 1978, "Zusammenstellung sicherheitstechnischer Daten Zur Vermeidung Von Explosionen in Feuerraumen, (Ger)," *Industriefeuerung* 11.
- (15) C.J.M. Van Wingerden. J.P. Zeeuwen, 1986, "Explosions in Pipe-rack-like Obstacle Array," 10th International Colloquium of Explosion and Reactive Systems. 1985. Berkeley. California. *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*. 106.
- (16) Hattwig, M., Steen, H., 2004, "Handbook of Explosion Prevention and Protection," *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, pp. 276~282.
- (17) CHEMSAFE : Datenbank für bewertete Sicherheitstechnische Kenngrößen, Erstellt Von BAM, Berlin, DECHMA, Frankfurt und PTB, Braunschweig.
- (18) Nabert, K., Schön, G., 1990, "Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe. Deutscher Eichverlag, Braunschweig," 2. Auflage, Nachdruck 1978 Mit 6. Nachtrag(T. Redeker und G. Schön), *Deutscher Eichverlag*, Braunschweig.
- (19) Zabetakis, M. G., 1965, "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapor," *US Bureau of Mines Bulletin 627*, *US Government Printing Office*, Washington.
- (20) Leem, S. H., Huh, Y. J. and Lee, J. R., 2007, "A Study on the Shock Wave Caused by VCE in Enclosure," *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting*, pp. 54~59.
- (21) Park, J., Hwang, D. J., Kim, J. S., Keel, S. I. and Kim, T. K., 2006, "Edge Flame Instability of CH<sub>4</sub>-Air Diffusion Flame Diluted with CO<sub>2</sub>," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 30, No. 9, pp. 905~912.
- (22) Lee, C. E., Hwang, C. H., Hyun, S. H. and Tak, Y. J., 2007, "The Effect of Residence Time and Heat Loss on NO<sub>x</sub> Formation Characteristics in the Downstream Region of CH<sub>4</sub>/Air Premixed Flame," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 31, No. 1, pp. 99~108.