

# 다층구조 Water Gel Barrier의 농도변화에 따른 폭발특성에 대한 실험적 연구

하대일\* · 박달재\*\*†

## Experimental Studies of the Explosion Characteristics by Varying Concentrations of a Multi Layered Water Gel Barrier

Dae Il Ha\* · Dal Jae Park\*\*†

### †Corresponding Author

Dal Jae Park  
Tel : +82-2-970-6308  
E-mail : pdj70@seoultech.ac.kr

Received : October 8, 2018  
Revised : November 2, 2018  
Accepted : January 17, 2019

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : Experimental studies have been carried out to investigate characteristics of gas explosion using a multi layered water gel barrier in a vented explosion chamber. The chamber is consisted of 1600 mm in length, with a square cross-section of 100×100 mm<sup>2</sup>. The gel concentration of inner layer of MLWGB ranged from 10% to 90% with intervals of 10% by weight of gel. Displacement of the MLWGB was photographed with a measured using a high-speed video camera, and pressure development was measured using a data acquisition system. It was found that MLWGBs with 10 ~ 20% inner layer concentrations were ruptured during the explosions. As the concentrations of inner layer increased from 30% to 90%, the barriers were not ruptured. As the gel concentrations of the inner layer increased, the displacement increased toward the chamber exit and the pressure decreased for the ruptured barriers. It was found that the pressure attenuation obtained from the MLWGB was higher than that of the single water gel barrier. For the cases of non-ruptured barriers, the pressure inside the chamber less increased with increasing gel concentrations of the inner layer. It was also found that the displacement moved back into the chamber for non-ruptured MLWGBs, and it was sensitive to the gel concentrations.

**Key Words** : multi layered water gel barrier, explosion pressure, displacement

## 1. 서론

위험물을 취급하는 사업장에서의 가스폭발은 심각한 인명 및 재산피해를 발생시켜 왔고, 사고 발생 가능성도 높기에 특별한 주의가 필요하다<sup>1)</sup>. 가스폭발로 인한 피해영향은 가연성 물질의 반응성, 구조물의 밀폐 정도, 주변 시설물의 밀집도 등 다양한 변수에 영향을 받는다<sup>2)</sup>. 이러한 폭발로 인한 피해영향을 최소화시키기 위해 사업장에서는 현재 폭발격리, 폭발장벽, 물분무시스템, 폭발벤팅 등의 폭발완화 기법을 설계시 반영하여 대책을 수립하고 있다<sup>3-5)</sup>. 이러한 기법들의 특성을 고려하여 사업장에 적절히 적용하는 것이 필요하

나 이 기법만 적용하여 폭발로 인한 피해를 보다 최소화시키기에는 아직까지 어려움이 있다<sup>4,5)</sup>. 이에 폭발 발생 가능성이 높은 위험물 취급시설 등을 안전하게 설계하기 위해서는 폭발 발생 에너지를 효과적으로 감소시키는 방안이 필요하고, 기존 완화기술과 이를 병용하여 적용한다면 폭발로 인한 인명 및 재산피해 영향을 효과적으로 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다<sup>5)</sup>.

이와 관련하여 그 동안 gel, 모래 등과 같은 재료를 이용하여 폭발시 발생하는 폭발압력을 감소시키기 위한 실험적 연구<sup>4,8)</sup>가 진행되어 왔다. Water gel을 이용한 기존 연구<sup>4,6)</sup>는 Water gel barrier를 이용하여 폭발압력의 경감 특성을 조사하였고, 긍정적인 효과가 있음

\*서울과학기술대학교 산업대학원 안전공학과 석사과정 (Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry, Seoul National University of Science and Technology)

\*\*서울과학기술대학교 안전공학과 교수 (Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

을 밝혔다. 그러나 gel barrier을 이용하여 폭발시 발생하는 압력을 보다 효과적으로 경감시키기 위해서는 아직까지 다양한 노력이 필요해 보인다. 이 중 gel barrier 구조를 다층구조로 하여 폭발특성을 조사한 연구는 미흡한 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 실험실에 규모의 폭발챔버에서 Multi Layered Water Gel Barrier (이하 MLWGB)의 내부층 농도 변화에 따른 gel displacement의 거동, 폭발압력 변화 등과 같은 기초적인 폭발특성을 실험적으로 조사하고자 한다.

## 2. 실험방법

Fig. 1은 MLWGB의 inner layer의 농도를 변화시키어 이에 따른 폭발특성을 조사하기 위해 구성된 실험장치의 개략도이다. 길이 1600 mm, 단면적 100 × 100 mm<sup>2</sup> 가지는 폭발챔버를 제작하였고, 폭발과정 동안의 MLWGB의 displacement를 가시화하고자 챔버 전면은 투명한 재질을 가지는 폴리카보네이트로 하였다. 그리고 챔버의 vent에 MLWGB를 고정시키는데 필요한 또 하나의 챔버(100 × 100 × 400 mm<sup>3</sup>)를 제작하였다. 또한, 7개의 원통형 장애물(15 × 15 × 100 mm<sup>3</sup>)을 점화원에서 약 200 mm 이격된 위치에서부터 200 mm 간격으로 설치하였다. 본 실험에 사용된 연료(약 4% LPG-공기 혼합물 농도), 실험장치, 실험방법 등은 기존 연구<sup>4,5)</sup>와 동일하다.

Table 1은 본 실험에서 고려한 변수이며, MLWGB은 3개의 layer를 가진 구조로 하였다. Outer layer의 두께는 5 mm, water gel 농도는 100%으로, inner layer의 두께는 10 mm, 농도는 10%에서 최대 90%까지 10% 단위(질량 단위)로 증가하는 것으로 하였다. 3개의 layer를 접합시켜 20 mm 두께를 가지는 MLWGB를 제작하기 위해 물과 혼합된 5% 폴리에틸렌 옥사이드 접착제를 사용하였

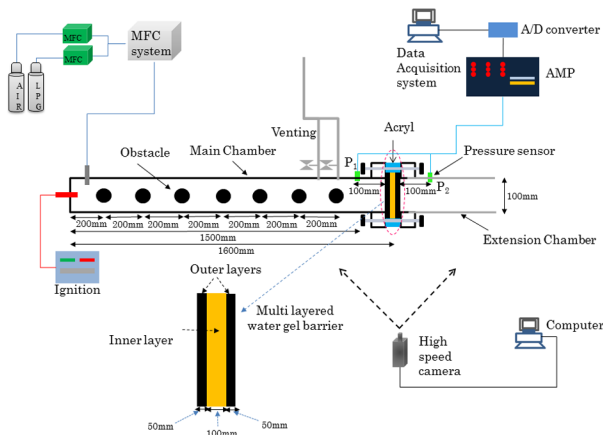


Fig. 1. Schematic diagram.

Table 1. Thickness and concentrations of MLWGB and SLWGB used in the tests

| Symbols                                  | Thickness (mm)                  | Inner Con. (%)                   | Outer Con. (%) |
|--|---------------------------------|----------------------------------|----------------|
| Multy layered water gel barrier (MLWGB)  | 20                              | O <sub>100</sub> I <sub>10</sub> | 10             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>20</sub> | 20             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>30</sub> | 30             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>40</sub> | 40             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>50</sub> | 50             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>60</sub> | 60             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>70</sub> | 70             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>80</sub> | 80             |
|  |                                 | O <sub>100</sub> I <sub>90</sub> | 90             |
| Single layered water gel barrier (SLWGB) | T <sub>20</sub> C <sub>20</sub> | 20                               | 20             |

다. Table 1에서 T<sub>20</sub>C<sub>20</sub>는 두께 20 mm, 농도 20%를 가지는 Single Layered Water Gel Barrier(이하, SLWGB)이다. 본 연구에서는 다양한 gel 종류 중 젤라틴 gel를 선정하였고, 결과의 신뢰성을 위해 각 case별 최소 5회 이상 재현실험을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 MLWGB의 displacement와 폭발압력 관계

Fig. 2는 내층농도 20%인 MLWGB(O<sub>100</sub>I<sub>20</sub>)에서 점화 후 폭발과정 동안에 특정시간별 gel displacement 그리고 시간에 따른 폭발압력(P<sub>1</sub>)과 gel displacement 변화에 대한 예이다. 시간에 따른 압력 곡선을 보면, 약 t = 20 ~ 40 ms의 기간 동안 압력은 서서히 증가하며 약 40 ms 이후 급격히 압력이 증가하는 경향을 보였다. O<sub>100</sub>I<sub>20</sub>가 파열되는 약 t = 56 ms에서 약 1.36 bar의 피크압이 발생하였고, 이는 챔버내에서 전파하는 화염이 barrier에 도달하기 전에 발생된 압력파에 의해 barrier가 팽창하면서 파열되어 최대 폭발압력에 도달하는 현상으로 기존 연

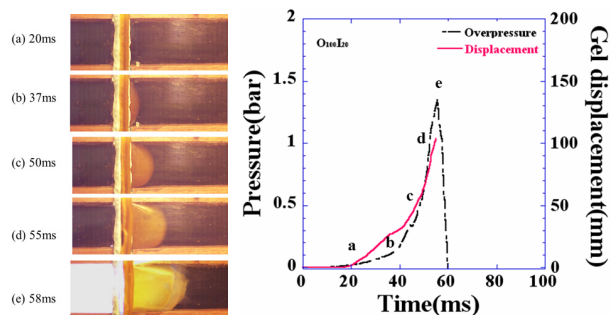


Fig. 2. Left) Gel displacement images. Right) Pressure/gel displacement versus time for O<sub>100</sub>I<sub>20</sub>.

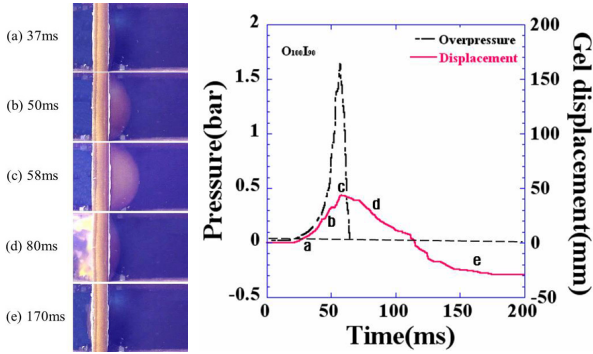


Fig. 3. Left) Gel displacement images. Right) Pressure/gel displacement versus time for  $O_{100I90}$ .

구결과<sup>5)</sup>와 유사한 경향을 가진다. 이때 displacement는 약 103 mm이었고, gel barrier가 파열된 후 압력은 급격히 감소하였다.

Fig. 3은 폭발압력에 의해 파열하지 않은 내측농도 90%를 가지는 MLWGB( $O_{100I90}$ )에 대한 특정시간별 displacement 과정 그리고 시간에 따른 폭발압력 및 gel barrier의 displacement 변화에 대한 예이다. 폭발압력 곡선을 살펴보면, gel barrier가 파열된  $O_{100I20}$ 와 유사하게 점화 후 약 40 ms 이후 폭발압력은 증가하기 시작하였으며, 약  $t = 57$  ms에서 약 1.64 bar의 피크압이 발생하였다. 시간에 따른 gel displacement 변화를 보면 약  $t = 20$  ms에서 부터 서서히 증가하다가 최대 폭발압력 도달시간인 약  $t = 57$  ms에서 약 44 mm의 gel displacement를 보였으며 이후 폭발압력 감소와 함께 displacement도 감소하기 시작하였다. 약  $t = 64$  ms부터 챔버내 음압이 생성되기 시작하였고, 약  $t = 114$  ms 이후  $O_{100I90}$ 의 displacement는 점화원 방향(음의방향)으로 움직이면서 약  $t = 200$  ms에서 약 29 mm로 나타났다. Barrier가 파열하는 내측농도 20%인 경우와 파열되지 않은 90%를 고려하였을 때 barrier의 파열에 관계없이 시간에 따른 압력변화는 전체적으로 동일한 경향을 가지는 것으로 보였다.

### 3.2 MLWGB 내측 농도 변화에 따른 displacement

Fig. 4는 MLWGB가 파열되는 내측 Layer의 농도 10% ( $O_{100I10}$ )와 20%( $O_{100I20}$ )의 displacement를 나타낸 것이다. 여기서, 시간에 따른 gel displacement 변화는 압력에 의해 폭발챔버의 벤트 방향으로 팽창하는 gel barrier의 tip에서 결정하였다.  $O_{100I20}$ 과  $O_{100I10}$ 의 파열되는 시간을 보면,  $O_{100I20}$ 가  $O_{100I10}$ 보다 약 4 ms 늦게 파열되었으며  $O_{100I20}$ 에서 약 7 mm 더 팽창되었다. 여기서 고려한 농도에 관계없이, 시간 경과에 따라 gel displacement는 증가하기 시작하면서 barrier가 파열될 때 까지 유사한 경향을 가졌다.

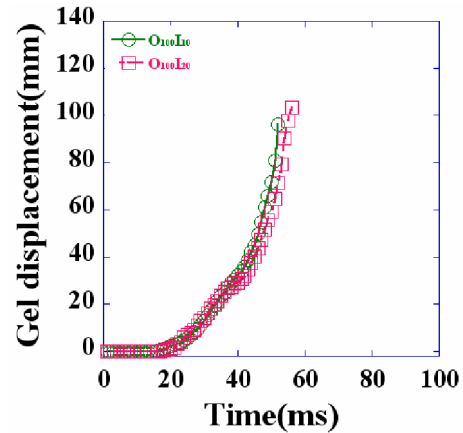


Fig. 4. Gel displacements for cases of  $O_{100I10}$  and  $O_{100I20}$ .

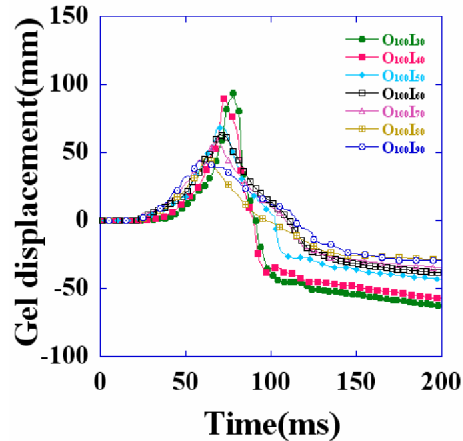


Fig. 5. Gel displacements for cases from  $O_{100I30}$  to  $O_{100I90}$ .

Fig. 5는 폭발과정 동안에 gel barrier가 파열되지 않는 다양한 MLWGBs( $O_{100I30}$ 에서  $O_{100I90}$ 까지)에 대한 시간에 따른 gel displacement 변화이다. 약  $t = 20$  ms까지 MLWGB의 내측 농도에 관계없이 gel displacement의 변화는 없었고, 이후 시간 경과에 따라 천천히 증가하는 것으로 나타났다. 실험결과,  $O_{100I30}$ 와  $O_{100I90}$ 의 양의 방향(벤트방향) 최대 displacement에 도달시간은  $O_{100I30}$ 가  $O_{100I90}$ 보다 약 20 ms 지연되었으며, displacement는  $O_{100I30}$ 가  $O_{100I90}$ 보다 약 50 mm 더 팽창하였다. 음의방향(점화원 방향) 최대 displacement 도달시간은  $O_{100I30}$ 가  $O_{100I90}$ 보다 약 71 ms 빨랐으며, displacement도  $O_{100I30}$ 가  $O_{100I90}$ 보다 약 32 mm 더 팽창하였다. 앞에서 언급한 barrier가 파열되는 경우와는 다르게 MLWGB의 내측 농도가 증가할수록 displacement는 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3 MLWGB 내측의 농도 변화에 따른 폭발압력

Fig. 6(a)는 MLWGB가 파열되는  $O_{100I20}$ 의 시간에 따

른 압력변화 곡선이며, Fig. 6(b)는 동일 두께(20 mm)에서 전체 농도가 20%인 SLWGB( $T_{20}C_{20}$ )의 시간에 따른 압력변화이다.  $O_{100}I_{20}$  경우  $P_1$ 과  $P_2$ 의 폭발 압력차,  $\Delta P$ 는 0.89 bar이었으며,  $T_{20}C_{20}$ 에서의  $\Delta P$ 는 0.23 bar로 나타났다.  $P_1$ 에서 압력차가 발생하는 이유는 챔버내 미연소가스의 외부 누출과 관련된 것으로 여겨진다. gel barrier를 향하여 폭발압력이 진행될 때 barrier의 팽창으로 인해 barrier 측면이 개방되면서 챔버내 미연소가스가 외부로 나가게 되고, barrier가 파열되기 전까지 이러한 개방 정도는 더욱 커져 더 많은 양의 미연소가스가 누출하게 된다.  $T_{20}C_{20}$ 인 경우  $O_{100}I_{20}$ 보다 압력파에 의해 시간적으로 더 빠르게 미연소가스가 빠져나가는 공간이 발생하게 되고, 이로 인해 미연소가스가 외부로 더 많이 누출되는 결과를 야기시켜 이러한 압력차가 발생된 것으로 판단된다. 폭발압력 완화율을 살펴보면,  $O_{100}I_{20}$ 에서는 약 66%,  $T_{20}C_{20}$ 는 약 50%로  $O_{100}I_{20}$ 에서의 폭발완화율이  $T_{20}C_{20}$ 보다 약 16% 더 높았

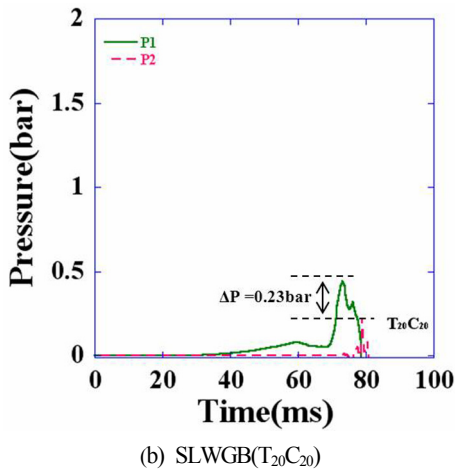
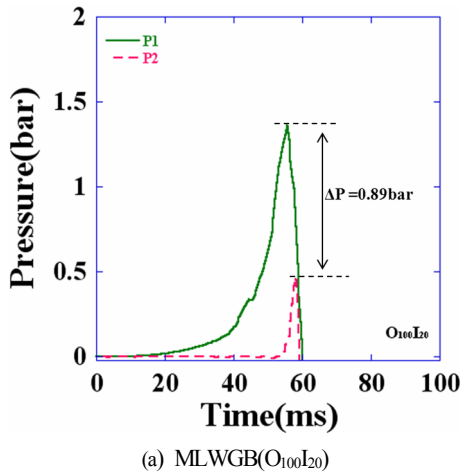


Fig. 6. Comparison of Pressure time histories of both MLWGB and SLWGB : (a)  $O_{100}I_{20}$  and (b)  $T_{20}C_{20}$ .

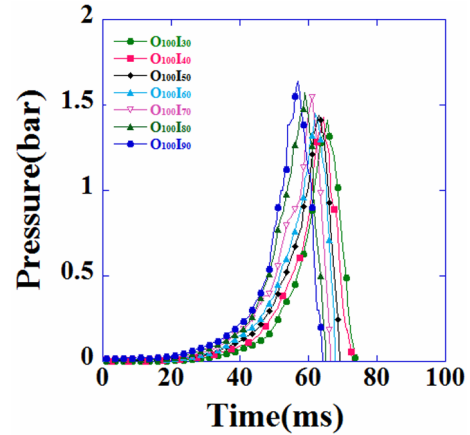


Fig. 7. Pressure-time histories for cases from  $O_{100}I_{30}$  to  $O_{100}I_{90}$ .

다. 이러한 폭발완화율의 차이도 앞에서 언급한 미연소가스의 외부 누출로 인한 영향으로 보인다.

Fig. 7은 gel barrier가 파열되지 않는 MLWGB의 내측 농도 약 30%( $O_{100}I_{30}$ )에서 약 90%( $O_{100}I_{90}$ )까지의 시간에 따른 폭발압력 곡선을 비교한 것이다. MLWGB가 파열되지 않아  $P_1$ 에서만 폭발압력을 분석하였다.  $O_{100}I_{30}$ 과  $O_{100}I_{90}$ 의 폭발압력차,  $\Delta P_1$ 는 0.23 bar,  $O_{100}I_{90}$ 와  $O_{100}I_{30}$ 의 최대 폭발압력 도달시간의 차,  $\Delta t$ 는 약 15 ms이었다. MLWGB가 파열되지 않는 경우, MLWGB의 내측 농도가 높아질수록 챔버 내 폭발압력은 조금씩 증가하는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않았다. 이는 폭발압력에 의해 barrier의 팽창과 함께 barrier 측면이 개방되는 정도가 매우 작아 미연소가스가 외부로 누출되는 것이 내측농도에 따라 덜 민감하여 발생된 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 실험실 규모의 폭발챔버에서 MLWGB의 내측 Layer의 농도변화에 따른 폭발특성을 조사하였으며, 이에 대한 핵심 결과를 요약하여 나타내면 다음과 같다.

1. MLWGB가 파열되는  $O_{100}I_{20}$  경우, 약  $t = 20$  ms에서 폭발압력이 증가하면서 displacement도 증가하기 시작하였다.  $O_{100}I_{20}$ 의 MLWGB가 파열되는 약  $t = 56$  ms에서 약 1.36 bar의 최대 폭발압력이 발생하였다. MLWGB가 파열되지 않는  $O_{100}I_{90}$  경우, 최대 폭발압력은 약 1.64 bar, 약  $t = 57$  ms에서 약 44 mm의 최대 양의 displacement가 발생하였고, 폭발 후 발생한 음압에 의해 약  $t = 200$  ms에서 약 29 mm의 최대 음의 displacement가 발생하였다. Barrier의 파열에 관계없이 시간에 따른 압력변화는 유사한 경향을 보였다.

2. MLWGB가 파열되는  $O_{100I_{10}}$ 과  $O_{100I_{20}}$ 의 displacement 움직임 및 파열시간을 비교해보면,  $O_{100I_{20}}$ 에서 약 7 mm 더 신장되었고, 파열시간은 약 4 ms 지연되었다. MLWGB가 파열되지 않는  $O_{100I_{30}}$ 에서  $O_{100I_{90}}$ 까지의 displacement는 양(positive)과 음(negative)의 값을 가지는 것으로 나타났다.  $O_{100I_{30}}$ 와  $O_{100I_{90}}$ 의 폭발벤트 방향(양의방향) 최대 displacement 도달시간은  $O_{100I_{30}}$ 이  $O_{100I_{90}}$ 보다 약 20 ms 늦은 것으로 나타났으며, displacement인 경우  $O_{100I_{30}}$ 이  $O_{100I_{90}}$  보다 약 50 mm 더 팽창하였다. Gel barrier가 점화원 방향(음의방향)으로 움직이는 경우 최대 displacement 도달시간은  $O_{100I_{30}}$ 이  $O_{100I_{90}}$ 보다 약 71 ms 더 빠른 것으로 나타났고, displacement도  $O_{100I_{30}}$ 이  $O_{100I_{90}}$ 보다 약 32 mm 더 팽창하였다. Barrier가 파열되는 경우와는 다르게 MLWGB의 내측 농도가 높아질수록 displacement는 감소하는 경향을 보였다.

3. MLWGB가 파열되는 경우 폭발압력 완화율을 보면,  $O_{100I_{20}}$ 이  $O_{100I_{10}}$ 보다 약 12% 높은 것으로 나타났다. SLWGB와 폭발압력 완화율을 비교하면,  $O_{100I_{20}}$ 의 MLWGB가  $T_{20}C_{20}$ 의 SLWGB보다 약 16% 높았다. MLWGB가 파열되지 않는 경우에 내측농도 증가에 따라 챔버내 압력이 조금씩 증가하는 경향을 보였으나 그 영향은 미비하였다. 이는 압력차에 의해 gel barrier의 팽창과 함께 barrier 측면이 개방되는 정도가 매우 작아 미연소가스가 외부로 누출되는 것이 내측농도에 따라 덜 민감하여 발생된 것으로 판단된다.

이러한 연구결과는 가스 폭발이 발생할 것으로 예상되는 위험물 취급시설 등에서의 폭발방호를 위한 설계를 고려할 때 기초자료로 활용하는데 도움이 될 수 있으나 향후 다양한 폭발성 물질, 대규모 실증시험 등의 추가적인 연구를 통한 보완이 필요하리라 판단된다.

**감사의 글:** 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었음(No. 2010-0024911)

※ 주저자의 석사학위논문인 “Multi Layered Water Gel Barrier에 의한 폭발완화 특성에 관한 실험적 연구”(서울과학기술대학교, 2013)의 일부 내용을 보완하여 작성하였음.

## References

- 1) S. H. Chae, S. I. Jung and Y. S. Lee, “A Experimental Study on the Characteristics of Gas Explosion due to Vent Shape and Size”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 21, No. 3, pp. 38-44, 2006.
- 2) N. S. Kim and D. J. Park, “Experimental Investigations on Explosion Characteristics of LPG/Air Mixture by Electrostatic Discharge Energies”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 6, pp. 26-30, 2011.
- 3) A. Pekalski, J. Zevenbergen, S. Lemkowitz and H. Pasman, “A Review of Explosion Prevention and Protection Systems Suitable as Ultimate Layer of Protection in Chemical Process Installations”, Process Safety and Environmental Protection, 83(B1), pp. 1-17, 2005.
- 4) N. I. Kim and D. J. Park, “Experimental investigations of the Deflagration Pressure Attenuation using a Water Gel Barrier in a Vented Explosion Chamber”, Science Technology of Energetic Materials, Vol. 77, No. 6, pp. 148-152, 2016.
- 5) D. J. Park and N. I. Kim, “Experimental Investigations on the Characteristics of Explosion Mitigations by Different Concentrations of Agar Gel Barriers”, KIGAS, Vol. 15, No. 5, pp. 13-18, 2011.
- 6) T. Homae, K. Wakabayashi, T. Matsumura and Y. Nakayama, “Attenuation of Blast Wave using Water Gel”, Science and Technology of Energetic Materials, Vol. 67, pp. 182-186, 2006.
- 7) T. Homae, K. Wakabayashi, T. Matsumura and Y. Nakayama, “Attenuation of Blast Wave using Sand around a Spherical Pentolite”, Science and Technology of Energetic Materials, 68, 90-93, 2007.
- 8) T. Homae, K. Wakabayashi, T. Matsumura and Y. Nakayama, “Dependence of Blast Attenuation on Weight of Barrier Materials”, Materials Science Forum, Vol. 566, pp.179-184, 2007.