



Water Gel Barrier 표면형상의 크기에 따른 폭발특성

†박달재 · 김남일*

서울과학기술대학교 안전공학과, *서울과학기술대학교 산업대학원 안전공학과
(2012년 1월 6일 접수, 2012년 6월 27일 수정, 2012년 6월 27일 채택)

Explosion Characteristics by Different Sizes in the Wall Surface Shape of a Water Gel Barrier

† Dal Jae Park · Nam Il Kim*

Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

**Dept. of Safety Engineering, Graduate School of Industry, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea*

(Received January 6, 2012; Revised June 27, 2012; Accepted June 27, 2012)

요약

폭발챔버에서 water gel barrier의 표면형상의 크기에 따른 폭발거동 특성을 조사하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 단면적 $100 \times 100 \text{ mm}^2$, 길이 1600 mm를 가지는 폭발챔버 그리고 점화원으로부터 각각 300 mm, 700 mm 및 1100 mm 떨어진 챔버 바닥면에 $100 \times 200 \text{ mm}^2$ 의 크기에 서로 다른 크기의 표면형상을 고려한 gel barrier를 설치할 수 있도록 제작하였다. 젤라틴 gel과 물을 혼합하여 4가지 크기의 표면형상을 가지는 water gel barrier를 제조하여 실험 변수로 사용하였다. 폭발과정 동안 화염전과 과정을 가시화하기 위해 고속카메라 그리고 폭발압력 변화를 관찰하고자 압력획득시스템을 사용하였다. 실험결과, gel barrier의 표면형상의 크기가 커질수록 화염전과과정 및 최대 폭발압력 도달시간은 빠르게 진행되는 것으로 나타났으며, 화염속도 및 폭발압력 또한 증가하는 경향으로 나타났다.

Abstract - Experimental investigations were carried out to examine the explosion characteristics by different sizes in the wall surface shape of a water gel barrier in an explosion chamber, 1,600 mm in length with a square cross-section of $100 \times 100 \text{ mm}^2$. The sizes in the wall surface shape were varied by using water gel barriers with a cross-section of $100 \times 200 \text{ mm}^2$ and its were varied in the bottom of the chamber away 300, 700 and 1,100 mm, respectively from the closed end of the chamber. The flame propagation images were photographed with a high speed camera and the pressure was recorded using a pressure transducer and a data acquisition system. It was found that as the size of the wall surface shape increased, the flame propagation process and the time taken to reach the maximum pressure were found to be faster. As a result, both the flame speed and the explosion overpressure increased as the size of the wall surface shape increased.

Key words : Wall surface shape, Gel barrier, Flame speed, Pressure

1. 서론

가스 폭발사고는 그 동안 석유 · 화학, 가스설비,

광산 등의 산업에서 가장 주된 위험요인으로 작용해 왔다[1]. 이러한 폭발사고로 인한 주변에 피해정도는 크게 연료의 반응성, 점화원, 구조물 밀폐 정도, 장애물 밀집도 등 다양한 변수에 의해 좌우된다[2]. 특히, 밀폐공간 또는 부분개방 공간에서의 폭발은 연쇄적

†교신저자:pdj70@seoultech.ac.kr

인 도미노 효과 및 심각한 피해를 발생시킬 가능성이 크기에 특별한 주의가 필요하며, 폭발로 인해 발생하는 과압을 예측하는 것은 매우 중요한 관심사이다 [3]. 이러한 폭발과압 예측은 설비를 안전하게 설계하고, 비상사태를 대비하는데 매우 중요하다. 현재 폭발 위험성 분석에 이용 가능한 이론적인 모델은 크게 상호 관계모델, 현상학 모델, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 모델로 구분할 수 있으며, 이중 CFD 모델은 가장 효과적인 모델로 인정받고 있다. 그러나 CFD 모델은 다른 모델에 비해 계산시간이 오래 걸리고, 제한된 실험 데이터만 가지고 검증되고 있어 신뢰성 문제가 대두되고 있는 실정이다[4]. 가스 폭발의 위험성을 예측하기 위하여 사전에 사고 현상에 대한 깊은 연구가 필요하며, 이를 기반으로 가스 폭발현상 특성 및 안전 조치가 개발되고 이행되어야 한다.

지난 수십 년간 많은 연구자[5-9]들의 지속적인 연구 관심주제 중의 하나는 장치산업 시설의 복잡성을 고려하여 크고 작은 규모의 폭발실험을 통하여 전파하는 화염과 장애물 사이의 상호작용을 규명하는 연구였고, 연구결과는 CFD 모델을 검증하는데 사용되어 왔다. 이러한 노력으로 장치산업에서의 폭발 위험분석에 CFD 모델링의 사용을 가능케 하였다. 장치산업 시설과 비교하여 탄광 또는 터널 환경은 화염가속화를 발생시키는 장애물이 거의 없으나 구조상 폭연에서 폭풍으로 전이가 가능하고[10], 내부 벽면의 표면형상은 환경에 따라 그 정도가 크게 변할 수 있어 폭발거동 특성이 달라질 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 이러한 표면형상의 크기 변화에 따른 폭발거동 특성에 관한 연구결과는 보고된 바 없다.

이에 본 연구에서는 폭발챔버 내벽의 표면형상의 크기 변화에 따른 화염속도 및 폭발압력 등과 같은 폭발거동 특성을 실험적으로 조사하여 보고하고자 하며, 연구결과는 향후 탄광 또는 터널과 같은 환경에 대하여 내부 벽면의 표면형상의 크기를 고려하여 폭발 위험성을 평가하고자 전산유체역학(CFD) 도구를 적용할 때 CFD 모델을 검증하는데 유용한 기초자료로 활용되리라 판단된다.

II. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 폭발챔버는 단면적 $100 \times 100 \text{ mm}^2$, 길이 1,600 mm, 두께 10 mm인 아크릴로 제작하였다. 그리고 점화원으로부터 각각 300 mm, 700 mm, 1,100 mm 떨어진 챔버 바닥면에 $100 \times 200 \text{ mm}^2$ 의 크기에 서로 다른 크기의 표면형상을 가지는 gel barrier를 설치할 수 있도록 제작하였다. 또한, 폭발압력을 증가시키기

위해 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 를 가지는 정사각형 장애물을 점화원으로부터 400 mm 떨어진 위치에 고정하였다.

본 실험에 사용된 연료는 LPG(88 % C_3H_8 , 10% C_3H_6 , 2 % C_4H_{10} by vol.)이고, LPG-공기 혼합물의 농도를 4 %로 예혼합하기 위하여 질량유량계(mass flow controllers)를 사용하였다. 폭발과정 동안 화염전파과정을 가시화하기 위하여 고속카메라(Phantom v210)를 이용하여 1/1000 frames로 촬영하였다. 또한, 폭발압력 측정을 위해 폭발벤트 근처에 70 kHz의 응답 주파수를 가지는 압력센서(Kistler 701 A)를 설치하였다.

Fig. 2는 서로 다른 크기의 표면형상을 가지는 젤라틴 gel barrier 시편을 제작하기 위한 과정을 나타낸 하나의 예시이며, 20 % (질량단위) gelatine-물의 혼합물을 제작된 몰드에 부은 후 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 냉장고에서 24시간 동안 gel화(gelation)시키었다. 본 연구의 실험변수로 사용된 water gel barrier의 표면특성을 나타내면 Table 1과 같으며, 실험결과의 재현성을 위

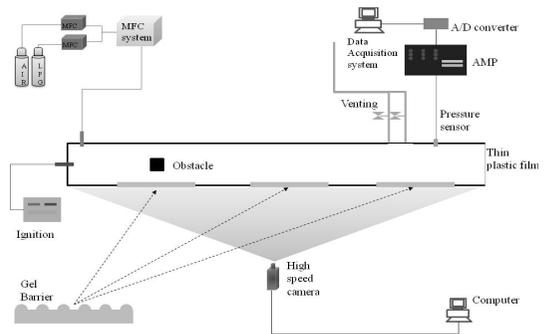


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

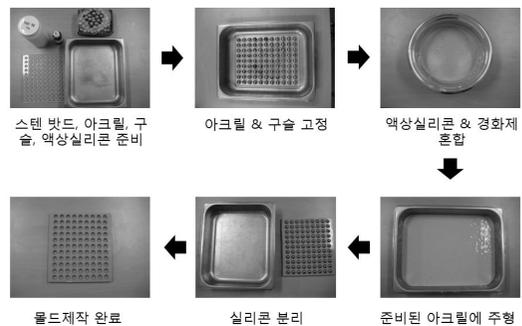


Fig. 2. A process for manufacturing the wall surface shape of water gel barrier.

Table 1. Properties of the wall surface of water gel barriers used in the measurements

Symbol	표면형상	N	D	H	P	T
1R2.5H		1	5	2.5	10	200
3R2.5H		3	5	2.5	10	600
1R5H		1	10	5	15	98
3R5H		3	10	5	15	294
1R7.5H		1	15	7.5	20	50
3R7.5H		3	15	7.5	20	150
1R10H		1	20	10	25	32
3R10H		3	20	10	25	96

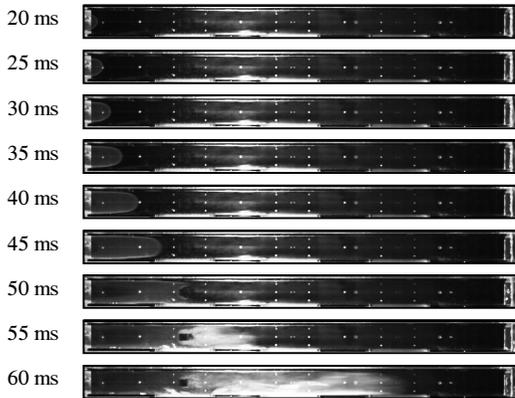
N: Barrier 수, D(mm): 표면에 돌출된 반구형 직경, H(mm): 표면에 돌출된 반구형 높이, P(mm): 연속적인 돌출부 중심 사이의 거리, T: 돌출부 총 개수

해 변수별로 최소 5회 이상 반복 폭발실험을 수행하여 그 결과를 평균하였으며, 최대 폭발압력에서 편차는 최대 $\pm 10\%$ 이내였다.

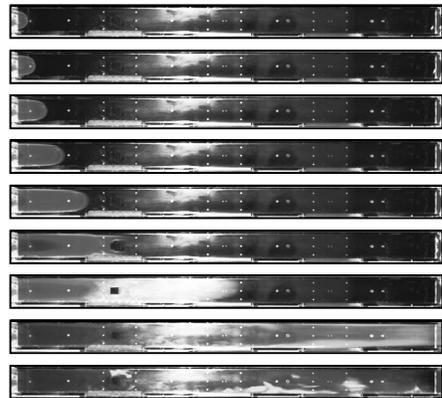
III. 결과 및 고찰

3.1. Barrier 유무에 따른 화염전파 및 압력

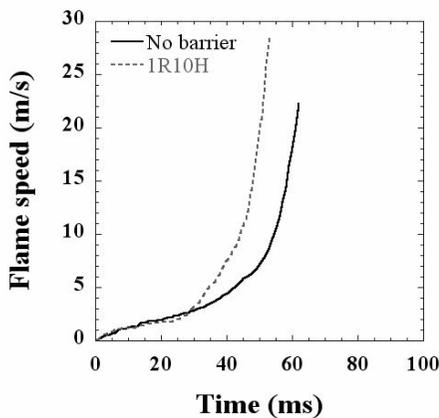
Fig. 3은 gel barrier 유무에 따른 화염전파 및 압력 변화 특성을 비교하기 위하여 no gel barrier 경우와 표면형상 크기 1R10H를 가지는 barrier를 설치했을 경우의 점화 후 시간에 따른 화염전파과정, 화염속도 및 폭발압력 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 화염속도는 챔버내에 전파되는 화염전면(flame front)의 팁(tips)이 이동한 거리를 시간(ms)로 나누어 계산하였다. 점화 후 20 ~ 30 ms 범위에서 초기화염은 약 2 ~ 3 m/s의



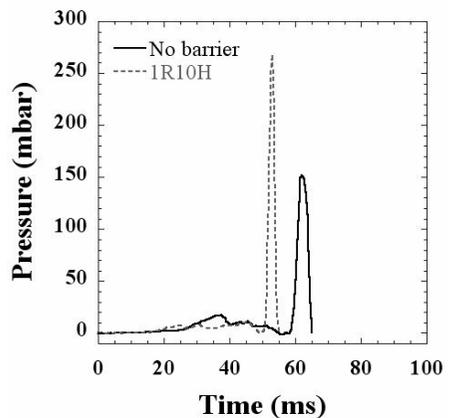
(a) No gel barrier



(b) 1R10H



(c) Flame speed



(d) Pressure

Fig. 3. Flame propagations, flame speeds and pressures versus time for both the no gel barrier and the gel barrier with 1R10H.

층류화염속도를 가지고 장애물 방향으로 전파하기 시작하면서 연소에 의해 미연소 가스의 부피팽창이 증가되면서 시간에 따라 화염 전파속도가 증가하기 시작하였다. 시간 경과 후 화염전면(flame front)은 장애물 전면(점화원 방향) 중앙의 정체점(stagnation point)에 도달하고, 이로 인해 화염전면의 중앙이 오목해지기 시작하고, no barrier인 경우 약 $t = 48$ ms, 1R10H는 약 $t = 42$ ms 에서 화염은 장애물에 도달하였고, 이때의 화염은 no barrier는 약 6.4 m/s, 1R10H는 약 8.1 m/s의 속도를 가지는 것으로 나타났다. 전파하는 화염이 장애물에 도달하기 전에 no barrier인 경우보다 1R10H에서 화염의 장애물 도달시간이 빨라지고, 화염속도가 증가하는 원인은 gel barrier 표면에 돌출된 형상의 크기로 인해 화염 전면 앞의 미연소가스의 유속이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 화염전면이 장애물에 도달한 후, 장애물과 챔버 내벽 사이로 두 갈래로 나뉘어져 발달하게 되며, 2개의 화염전면은 장애물 후류에서 생성된 미연소 가스의 와류와 상호작용하면서 no barrier는 약 $t = 53$ ms, 1R10H는 약 $t = 46$ ms에서 재결합하였고, 이때의 화염속도는 no barrier는 약 8.8 m/s, 1R10H에서는 약 11 m/s로 나타났다. 1R10H인 경우의 화염은 장애물뿐만 아니라 barrier의 표면에 돌출된 형상하고도 상호작용하기 때문에 no barrier인 경우 보다 난류가 증가되어 화염속도가 증가된 것으로 판단된다. 이러한 상호작용 동안 화염은 난류화염으로 전환되면서 계속적으로 연소속도를 증가시켜 화염전면이 챔버 개구부 근처에 도달하는 시간은 no barrier인 경우 약 $t = 62$ ms, 1R10H에서는 약 $t = 53$ ms이었으며, 최대화염속도는 no barrier인 경우 약 22 m/s, 1R10H에서는 약 $t = 28$ m/s로 나타났다. 최대폭발압력인 경우에는 no barrier는 약 $t = 62$ ms에서 약 151 mbar, 1R10H에서는 약 $t = 53$ ms에서 약 267 mbar로 나타났다.

3.2. Barrier 표면형상 크기에 따른 화염전파 및 압력

Figs. 4-5는 점화원으로부터 약 300 mm 떨어진 챔버 바닥면에 설치된 gel barrier의 표면형상 크기 별 시간에 따른 화염속도 및 폭발압력 변화를 나타낸 것이다. Gel barrier의 표면형상 크기가 커질수록 화염속도는 증가하는 경향을 보였고, 가장 큰 표면형상을 가지는 1R10H에서의 최대화염속도는 약 28 ms, 가장 작은 표면형상을 가지는1R2.5H에서는 약 23 ms로 나타났다. 최대화염속도 도달시간은 1R10H가 1R2.5H 보다 약 7 ms 빠른 것으로 나타났다. 폭발압력 또한 gel barrier의 표면형상 크기가 커질수록 증

가하는 경향을 보였고, 1R10H에서는 약 268 mbar, 1R2.5H는 약 170 mbar로 1R10H가 1R2.5H 보다 약 58 % 높은 폭발압력을 발생시키었다. 최대폭발압력 도달시간은 표면형상 크기가 커짐에 따라 빨라지는 것으로 나타났으며, 1R10H와 1R2.5H를 비교했을 때 약 10 ms의 차이를 보였다. Gel barrier의 표면형상 크기의 증가에 따라 화염속도 및 폭발압력이 증가하는 원인은 화염전면이 장애물과 챔버벽 사이의

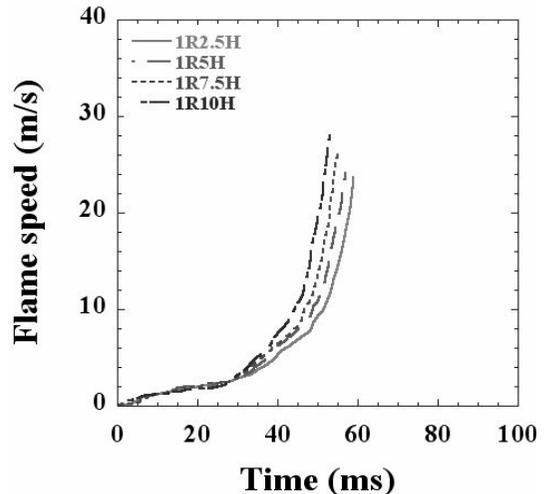


Fig. 4. Flame speed versus time by different sizes in the wall surface shape for one gel barrier.

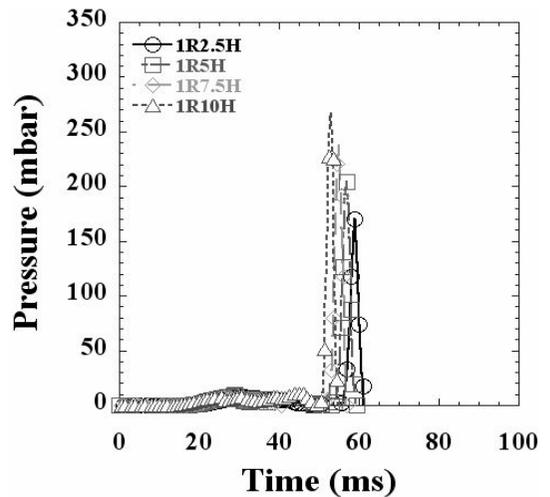


Fig. 5. Pressure versus time by different sizes in the wall surface shape for one gel barrier

공간으로 전파될 때 챔버 바닥 표면에 돌출된 형상의 크기가 커짐에 따라 장애물 후류에서의 난류 증가와 관련되는 것으로 여겨진다.

Figs. 6-7은 점화원으로부터 각각 300 mm, 700 mm 및 1100 mm 떨어진 챔버 바닥면에 설치된 3개의 gel barrier 표면형상 크기별 시간에 따른 화염속도 및 폭발압력 변화를 나타낸다. Gel barrier의 표면형상 크기가 커질수록 앞에서 기술한 1개의 gel barrier의 결과와 동일하게 화염속도는 증가하는 경향으로 나타났고, 3R10H에서의 최대화염속도는 약

29 m/s, 3R2.5H는 약 24 m/s로 나타났다. 최대화염속도 도달시간은 3R10H가 3R2.5H 보다 약 5 ms 빠른 것으로 나타났다. 폭발압력도 gel barrier의 표면형상 크기가 커질수록 증가하는 경향으로 나타났고, 3R10H에서는 약 277 mbar, 3R2.5H는 약 179 mbar로 3R10H가 3R2.5H 보다 약 55 % 높은 폭발압력을 발생시켰다. 최대 폭발압력 도달시간은 표면형상 크기가 커짐에 따라 빨라졌으며, gel barrier의 수가 1개인 경우와 동일하게 3R10H가 3R2.5H보다 약 10 ms 빠른 것으로 나타났다.

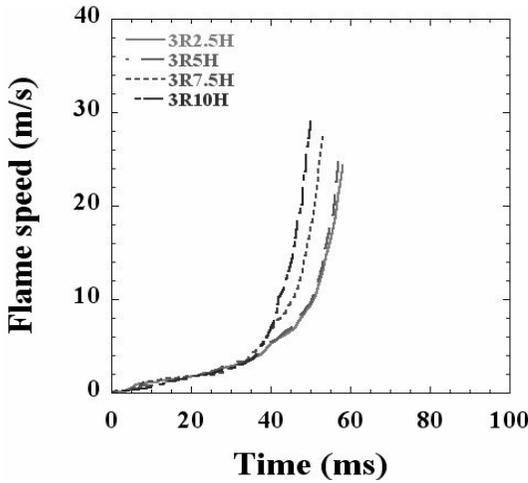


Fig. 6. Flame speed versus time by different sizes in the wall surface shape for three barriers.

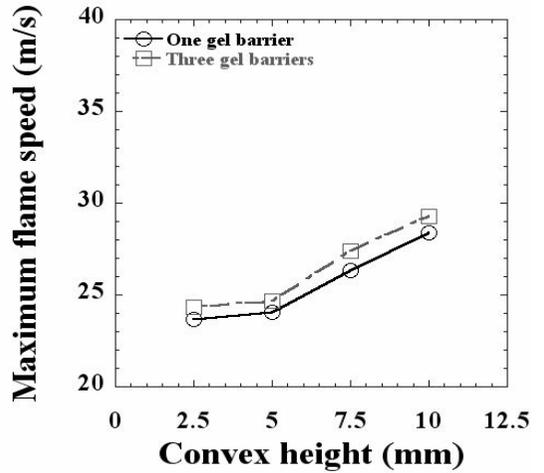


Fig. 8. The maximum flame speed versus size in the wall surface shape for one and three barriers.

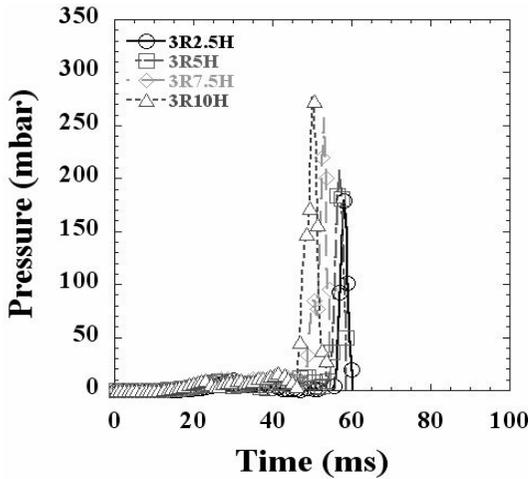


Fig. 7. Pressure versus time by different sizes in the wall surface shape for three barriers.

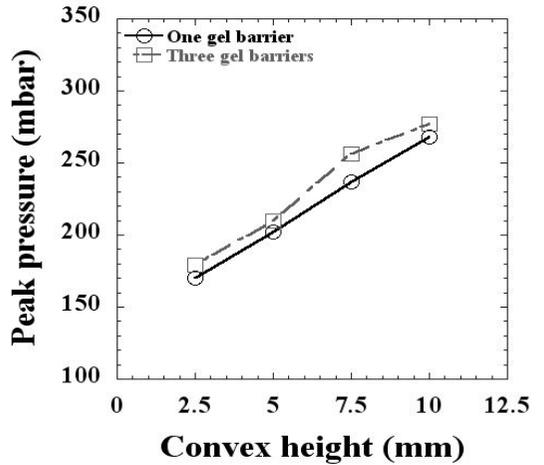


Fig. 9. The peak pressure versus size in the wall surface shape for one and three barriers.

3.3. Barrier 개수별 최대화염속도 및 최대폭발압력 비교

Figs. 8-9는 폭발챔버 바닥면에 설치된 gel barrier의 개수별 최대화염속도 및 최대폭발압력의 변화를 나타낸 것이다. Gel barrier의 수가 1개에서 3개로 증가할 때 최대화염속도 및 최대폭발압력은 조금씩 증가하는 경향을 보였고, 3R10H에서의 측정된 최대화염속도는 1R2.5H 보다 약 24 %, 최대폭발압력은 약 63 % 높은 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 water gel barrier의 표면형상 크기에 따른 폭발거동 특성을 알아보기 위하여 폭발실험을 수행하였으며, 그 결과로 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) No gel barrier 경우와 1R10H의 표면형상 크기를 가지는 barrier를 비교한 결과, 최대화염속도는 no barrier인 경우 약 22 m/s, 1R10H에서는 약 $t = 28$ m/s이었으며, 최대폭발압력인 경우에는 no barrier는 약 151 mbar, 1R10H에서는 약 267 mbar로 나타났다. 1R10H에서 화염속도 및 폭발압력이 증가하는 원인은 화염이 장애물뿐만 아니라 barrier의 표면에 돌출된 형상과의 상호작용으로 인하여 no barrier인 경우 보다 난류가 증가되어 화염속도 및 압력이 증가하는 것으로 판단된다.

(2) Gel barrier의 수에 관계없이 barrier의 표면형상 크기가 증가할수록 화염속도 및 폭발압력이 증가하는 경향을 보였으며, 최대화염속도 도달시간은 barrier 수가 1개인 경우 1R10H가 1R2.5H 보다 약 7 ms, barrier 수가 3개인 경우에는 3R10H가 3R2.5H 보다 약 5 ms 빠른 것으로 보였다. 최대폭발압력 도달시간의 경우에도 barrier의 수에 관계없이, 가장 큰 표면형상 크기를 가지는 barrier가 가장 작은 경우 보다 약 10 ms 빠른 것으로 나타났다.

(3) Gel barrier의 수가 하나에서 세 개로 증가할 때 최대화염속도 및 최대폭발압력은 조금씩 증가하는 경향을 보였고, 3R10H에서의 측정된 최대화염속도는 1R2.5H 보다 약 24 %, 최대폭발압력은 약 63 % 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행

된 것임(No. 2010-0024911)

참고문헌

- [1] 박달재, 김남일, "Agar Gel Barrier의 농도변화에 따른 폭발완화 특성에 관한 실험적 연구", *KIGAS*, **15**(5), 13-16, (2011)
- [2] 박달재, 김남일, "정전기 방전에너지에 따른 가솔린-공기 혼합물의 화염전파", *KIGAS*, **15**(3), 6-10, (2011)
- [3] Nehzat, N., *Gas explosion modeling for complex geometries*, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia, (1998).
- [4] Park, D.J. and Lee, Y.S., "A comparison on predictive models of gas explosions", *Korean Journal of Chemical Engineering*, **26**(2), 313-323, (2009)
- [5] Moen, I.O., Donato, M., Knystautas, R. and Lee, J.H.S., "Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles", *Combustion and Flame*, **39**, 21-32 (1980)
- [6] Hjertager, B.H., Fuhre, K., and Bjorkhaug, M., "Concentration effects on flame acceleration by obstacles in large-scale methane-air and propane-air vented explosions", *Combustion Science and Technology*, **62**, 239-256 (1988)
- [7] Fairweather, M., Hargrave, G.K, Ibrahim, S.S and Walker, D.G., "Studies of premixed flame propagation in explosion tubes", *Combustion and Flame*, **116**, 504-518 (1999)
- [8] Ibrahim, S.S. and Masri, A.R., "The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**, 213-221 (2001)
- [9] Park, D.J., Green, A.R., Lee, Y.S. and Chen, Y.C., "Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement", *Combustion and Flame*, **150**, 27-39 (2007)
- [10] Green, A.R., Piper, I.C. and Upfold, R.W., "Gas explosion modelling using massively parallel processing", *25th International Conference Safety in Mines Research Institutes*, September, South Africa, (1993)