



## Agar Gel Barrier의 농도변화에 따른 폭발완화 특성에 관한 실험적 연구

†박달재 · 김남일\*

서울과학기술대학교 안전공학과, \*서울과학기술대학교 산업대학원 안전공학과  
(2011년 6월 2일 접수, 2011년 9월 30일 수정, 2011년 10월 24일 채택)

### Experimental Investigations on the Characteristics of Explosion Mitigations by Different Concentrations of Agar Gel Barriers

† 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 June 2, 2011; Revised September 30, 2011; Accepted October 24, 2011)

#### 요 약

폭발챔버에서 Agar gel barrier의 폭발완화 특성을 조사하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 단면적  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ , 길이 1400 mm를 가지는 폭발챔버 그리고 폭발챔버의 개구부에 설치될 gel barrier의 고정을 위하여  $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}^3$ 의 챔버를 제작하였다. Agar gel과 물을 혼합하여 4가지 서로 다른 농도(2, 3, 4, 5 %)를 가지는 agar gel barrier를 제조하여 실험변수로 사용하였다. 폭발과정 동안 gel displacement의 가시화를 위해 고속카메라 그리고 gel barrier 전·후단의 폭발압력 변화를 관찰하고자 압력획득시스템을 사용하였다. 실험결과, gel 농도 증가에 따라 gel의 파열시간 및 최대 폭발압력 도달시간이 지연되는 것으로 나타났다. 또한, gel 농도가 증가할 때 gel barrier 전·후단에서의 폭발압력 완화율이 증가하는 경향으로 나타났다.

**Abstract** - Experimental studies were carried out to investigate the characteristics of explosion mitigations by varying concentrations of agar gel barriers in an explosion chamber, 1400 mm in length, with a square cross-section of  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Another extension chamber,  $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}^3$ , was made to hold a gel barrier. Four different gel concentrations were used in the measurements: 2, 3, 4, 5 % (by weight of gel). Displacement of the gel barrier was measured using a high speed camera, and pressure development was measured using pressure transducers and a data acquisition system. It was found that as the concentrations of the gel barriers increased, the gel rupture time and the time taken to reach the maximum pressure increased. It was also found that the increment of gel concentrations increased the reduction percentage in the maximum pressure between before and after gel barrier.

**Key words** : explosion mitigation, agar gel, gel displacement, explosion pressure

#### 1. 서 론

최근 위험물질 및 관련 설비의 사용은 날로 증가하고 있으며 향후 수소, DME-LPG 혼합연료 등 신

재생에너지가 일반 대중에게까지 보급 및 확산 될 시 이러한 설비 또는 시설은 지속적으로 증가될 전망이고, 이로 인해 폭발사고의 위험성이 가중될 우려가 높다[1].

Vilchez 등[2]은 화학 플랜트에서 발생한 사고 중 가연성 물질에 의한 사고가 전체사고의 약 90 %에

†교신저자:pdj70@snut.ac.kr

이르며, Bjerketvedt 등[3]은 탄화수소 플랜트에서 발생한 100개의 가장 큰 손실 중 약 42 %의 손실이 증기운 폭발과 관련된다고 보고하였다. 또한, Marsh[4]는 과거 30년간(1972-2001) 화학 플랜트에서 발생한 사고에 대한 재산상의 손실을 분석하여, 폭발사고가 재산손실에 크게 영향을 미친다고 보고하였다. 이와 같이 폭발사고는 그 동안 석유 · 화학, 가스설비 등의 위험물 시설에서 가장 주된 위험요인으로 작용해 오고 있으며, 최근에는 테러 등의 각종 원인에 의하여 위험물 시설 이외에서도 폭발사고가 빈번히 발생하고 있다.

폭발사고가 발생하면, 높은 압력을 가지는 폭풍파가 매우 빠른 속도로 진행하여 일반 구조물에서는 치명적인 부재의 손실이나 붕괴 때문에 구조물이 약해져 더 큰 피해가 발생할 수 있다. 따라서 폭발 발생이 예상되는 구조물의 설계시에는 폭발완화 대책을 수립하는 것이 필요하다. 현재 대규모 화학 플랜트, 위험시설 등에는 폭발벤딩, 폭발격리, 폭발장벽, 물분무시스템 등의 폭발완화 기술을 구조물 설계시 반영하여 폭발완화 대책을 수립하고 있다[5]. 그러나 이러한 폭발완화 기술은 적용 관점에서 장·단점을 가지며, 최적의 완화기술의 선정은 매우 복잡하며 어렵고[6], 설계단계에서 이러한 기술의 적용만으로 폭발로 인한 2차, 3차의 피해를 최소화시키기에는 한계성이 있다.

이에 폭발이 예상되는 구조물이나 시설물 등을 설계할 때에 폭발 에너지를 효과적으로 감소 또는 흡수시킬 수 있는 재료를 사용한다면, 폭발로 인해 구조물 등에 미치는 영향을 저감시킬 수 있고, 이러한 설계는 구조물 등의 안전성을 한 층 더 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다. 최근에 폭발압력을 감소시킬 수 있는 재료 관련 연구[7]은 젤라틴 gel 재료를 이용하여 폭발완화 가능성을 보여주었다. 그러나 젤라틴 gel은 물질 자체의 강도가 약하다는 문제점이 있기에 폭발압력을 효과적으로 감소시킬 수 있으면서도 적절한 강도를 가지는 gel을 선정하여 폭발완화 특성을 고찰하는 기초연구가 필요할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 agar, gellan gum, xanthum gum 등 다양한 gel 종류 중 점탄성과 강도를 어느 정도 가지고 있으며, 가격 경쟁력이 있는 agar gel을 선택하여 물과 혼합하고, agar gel의 농도 변화에 따른 barrier를 제작하여 폭발완화 특성을 고찰하고자 한다.

## II. 실험장치구성

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를

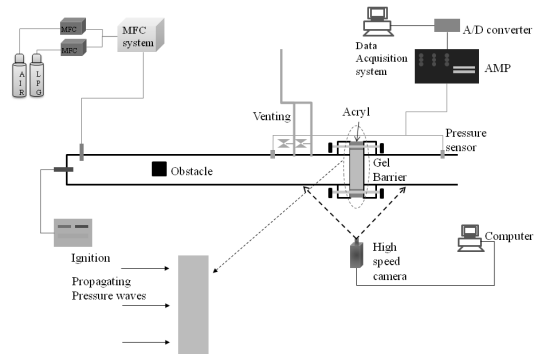


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

나타낸다. 폭발챔버는 단면적  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ , 길이 1400 mm, 두께 10 mm인 투명 아크릴로 제작하였다. 또한, 폭발챔버의 개구부에 설치될 gel barrier를 고정시키기 위하여  $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}^3$ 의 크기를 가지는 챔버를 제작하였다. 폭발압력을 증가시키기 위해  $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 을 가지는 정사각형 장애물을 점화 원으로부터 500 mm 떨어진 위치에 고정하였다.

본 실험에 사용된 연료는 LPG(88 %  $\text{C}_3\text{H}_8$ , 10 %  $\text{C}_3\text{H}_6$ , 2 %  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  by vol.)이고, LPG-공기 혼합물의 농도를 4 %로 예혼합하기 위하여 질량유량계(mass flow controllers)를 사용하였다. 폭발과정 동안 화염 전파과정 및 gel의 displacement를 가시화하기 위하여 고속카메라(Phantom v210)를 이용하여 1/1000 frames로 촬영하였다. 또한, 폭발압력 측정을 위해 70 kHz의 응답 주파수를 가지는 2개의 압력센서(Kistler 701 A)를 gel barrier 전·후단에서 200 mm 떨어진 곳에 설치하였다. 실험변수로 다양한 gel 종류 중 agar gel(한천)을 재료로 선택하였고, 물과 혼합하여 100 °C까지 가열한 후 4 °C 냉장고에 24시간 동안 gel화(gelation)시키었다. 실험에 사용된 agar gel의 농도변화는 15 mm의 일정한 두께에서 2, 3, 4, 5 %(질량단위)로 하였다. 5 %를 초과하는 agar gel 농도에서는 agar gel의 수분흡수율이 높아 agar gel이 적절히 용해되지 않아 본 연구에서는 고려하지 않았다. 실험결과의 재현성을 위해 농도별로 최소 5 회 이상 반복 폭발실험을 수행하여 그 결과를 평균하였으며, 최대 폭발압력에서 편차는 최대  $\pm 10\%$  이내였다.

## III. 실험결과 및 고찰

### 3.1 화염전파과정 및 gel displacement

Fig. 2는 gel barrier를 설치하지 않은 상태에서의

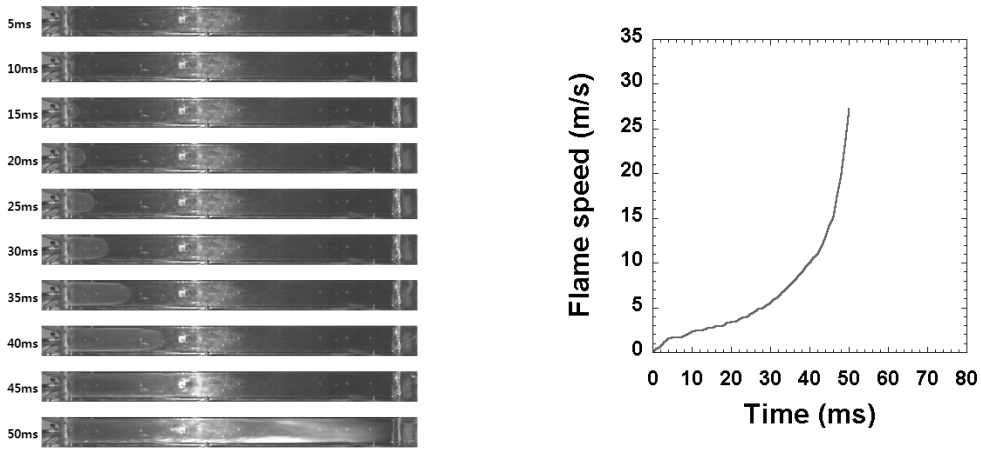


Fig. 2. Flame propagation and flame speed versus time for no gel barrier.

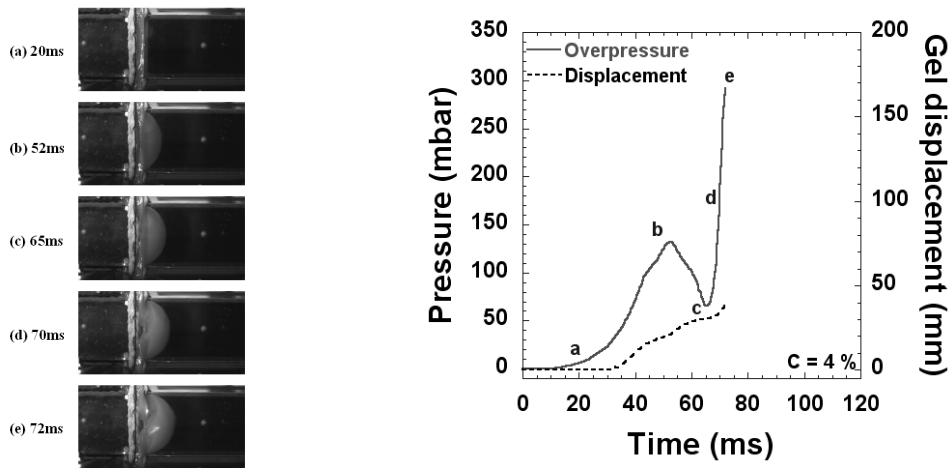


Fig. 3. Measured gel displacement images and pressure versus time for 4 % gel barrier.

점화 후 시간에 따른 화염전파과정 및 화염속도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 화염속도는 시간에 따라 전파되는 화염전면(flame front)의 팁(tips)을 고려하여 결정하였다. 점화 후 초기에 화염은 반구형에서 원통형 모양으로 변화하면서 장애물 왼쪽 표면을 향하여 전파하기 시작하였으며, 약  $t = 41$  ms에서 화염전면은 장애물에 도달하고, 이때의 화염은 약 10.5 m/s의 층류화염속도를 가지는 것으로 나타났다. 화염전면이 장애물 표면에 도달된 이후, 장애물의 모서리와 상호작용하면서 분기되기 시작하였고, 분기된 2개의 화염전면이 장애물과 폭발챔버의 벽

사이의 좁은 공간을 지나면서 화염전파 속도는 증가하였다. 분기된 2개의 화염전면은 장애물 후류에 생성된 와류와 상호작용하면서 약  $t = 45$  ms에서 재결합되며, 이때의 화염속도는 약 14 m/s로 나타났다. 장애물과 상호작용 동안 화염은 난류화염으로 전환되기 시작하면서 계속적으로 연소속도를 증가시켜 화염전면이 챔버 개구부 근처에 도달하는 시간, 약  $t = 50$  ms에서 화염속도는 최대 약 27 m/s까지 증가하였다.

Fig. 3은 4%의 agar gel barrier에서 점화 후 특정시간별 gel displacement 과정 그리고 시간에 따른 폭발

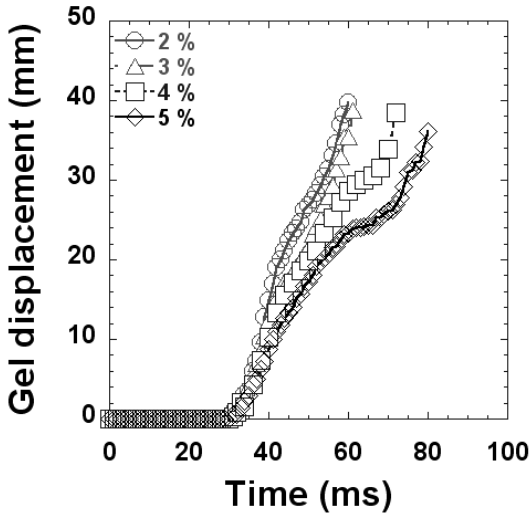


Fig. 4. Displacement variations versus time for gel concentrations of barriers.

압력과 gel displacement 변화에 대한 하나의 예를 나타낸다. Fig. 3과 같이, 폭발압력 곡선 상에 2개의 피크압력이 나타났다. 첫 번째 피크압은 화염이 개구부에 도달할 때, 두 번째는 폭발압력에 의해 팽창하는 gel이 파열할 때 발생하는 것과 관련된다. 점화 후 약  $t = 20 \sim 50$  ms 기간 동안은 폭발압력은 천천히 증가하다가 화염이 개구부 근처에 도달하는 시간, 약  $t = 50$  ms 에서 약 135 mbar의 압력을 발생시키는 첫 번째 피크압이 발생하였다. gel displacement 곡선을 보면,  $t = 30$  ms까지는 거의 변화가 없다가 화염이 장애물 후류로 진행되는 시간, 약  $t = 44$  ms부터 증가하기 시작하였다. 첫 번째 피크압 발생 이후, 약  $t = 50 \sim 65$  ms 기간 동안, 폭발압력은 감소하는 경향을 보였다. 이는 압력에 의해 gel의 팽창과 함께 gel 측면이 개방되면서 연소가스가 외부로 누출하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 일시적인 압력감소 이후, 압력은 급격히 증가하다가 gel이 파열하는 시간, 약  $t = 72$  ms 에서 약 300 mbar를 발생시키는 두 번째 피크압이 발생하였다.

Fig. 4는 agar gel barrier 농도별 시간에 따른 gel displacement 변화를 나타낸다. 여기서, 시간에 따른 gel displacement는 폭발압력에 의해 팽창하는 gel barrier front의 tip에서 결정하였다. 점화 후 약  $t = 30$  ms까지는 gel 농도에 관계없이 gel displacement의 변화는 없었으며, 그 이후부터는 시간 경과에 따라 급속히 증가하면서 gel 농도가 증가할 때 gel 파열시간은 지연되는 것으로 나타났다. 2%와 5% gel의 파열시간을

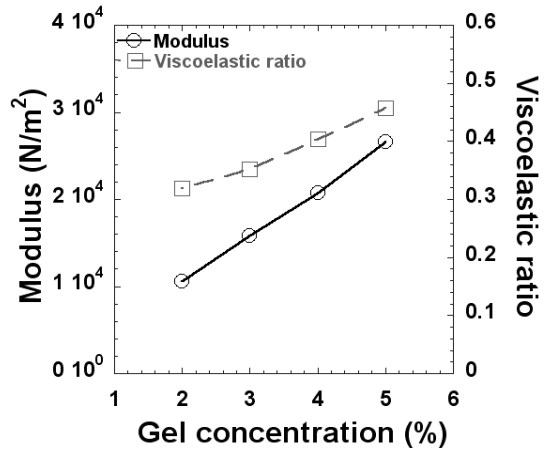


Fig. 5. Measured modulus & viscoelastic ratio for gel concentrations of barriers.

비교하면, 5% gel이 2% 보다 약 20 ms 지연되는 것으로 나타났으며, 2 및 3%의 gel의 경우에는 거의 유사하였다.

Fig. 5는 agar gel 농도에 따른 탄성계수(modulus, E) 및 점탄성비(viscoelastic ratio)의 변화를 나타낸다. 여기서, gel의 탄성계수와 점탄성비는 Texture analyzer(TAXT plus)를 이용하여 gel의 응력( $\sigma$ )을 측정 한 후 탄성계수는  $\sigma = E \cdot \epsilon$  (E: 탄성계수,  $\epsilon$ : 변형률)으로, gel 점탄성비는  $SR = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1$  ( $\sigma_1$ : 초기 응력,  $\sigma_2$ : 하중 제거시 응력)을 이용하여 계산하였다. gel 농도 증가에 따라 탄성계수 및 점탄성비는 증가하는 경향을 보였으며, 2%와 5% gel의 탄성계수를 비교하면, 5% gel이 2% 보다 약 130% 증가하였다. gel 농도의 증가에 따른 gel 파열시간의 지연은 탄성계수 및 점탄성비의 증가와 관련된다.

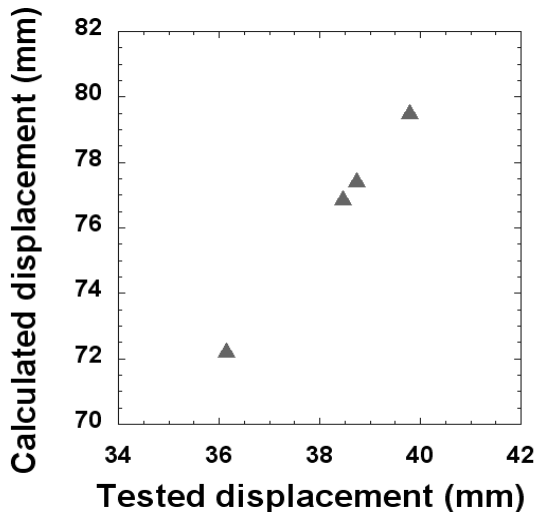
Table 1과 Fig. 6은 gel 농도에 따라 측정된 최대 gel displacement와 폭발로 인한 구조물의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 단자유도계(Single degree of freedom, SDOF) 모델[8]을 이용하여 계산된 displacement의 결과를 나타낸다. SDOF 모델을 이용하여 산정된 displacement는 실험으로부터 측정된 displacement와 선형적 관계를 가지는 경향으로 나타났고, SDOF 모델로 계산한 결과가 측정결과보다 약 2배 높았다.

### 3.2 폭발압력

Fig. 7은 agar gel 농도별 점화 후 시간에 따른 폭발압력 곡선을 나타낸다. gel 농도가 증가할 때 폭발압력은 증가하는 경향을 보였고, 최대 폭발압력 도

**Table 1.** Results calculated by SDOF model with experimental data obtained from the measurements

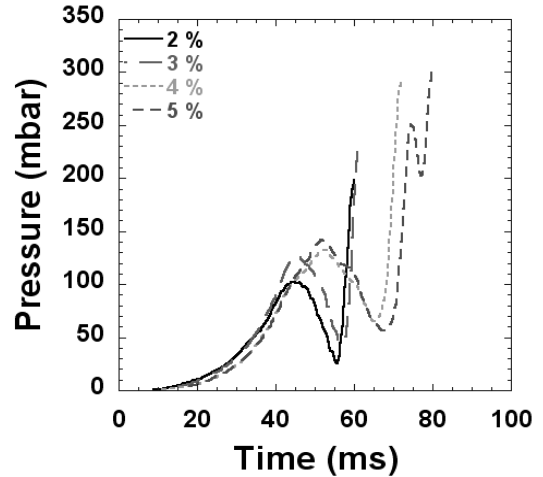
Gel concentrations (%)	Maximum pressure (mbar)	Displacement from tests (mm)	Displacement from SDOF (mm)
2	198.15	39.78	79.56
3	232.97	38.74	77.48
4	291.42	38.46	76.92
5	306.13	36.14	72.28



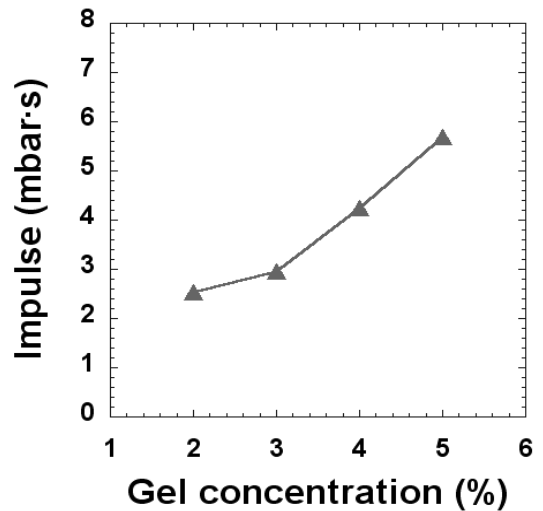
**Fig. 6.** Comparison of displacements calculated by SDOF model with experimental data.

달시간은 지연되는 것으로 나타났다. 2 %와 5 % gel의 최대 폭발압력 도달시간을 보면, 5 % gel은 점화 후 약  $t = 80$  ms, 2 %는  $t = 60$  ms로 5 % gel이 2 % 보다 약 20 ms지연되었다. 2 및 3 %의 gel의 경우에는 거의 유사하였다. 농도 증가에 따른 최대 폭발압력 도달시간의 지연은 3.1절에서 언급한 gel 파열 시간의 지연과 관련된다.

**Fig. 8**는 gel 농도에 따른 임펄스(impulse) 변화를 나타낸다. 여기서, 임펄스는 점화 후 최대 폭발압력까지의 압력곡선을 적분하여 계산하였다. 임펄스는 폭발압력의 경우와 동일하게 gel 농도가 증가할수록 증가하였다. 2 %와 5 % gel의 임펄스를 비교하면, 5 % gel이 2 % 보다 약 124 % 높은 것으로 나타났고, 2 및 3 % gel의 경우에는 거의 유사하였다.



**Fig. 7.** Pressure-time histories for different concentrations of gel barriers.



**Fig. 8.** Results of impulses for gel concentrations of barriers.

**Fig. 9**는 agar gel 농도에 따른 폭발압력 완화율의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 폭발압력 완화율은 gel barrier 전·후단에 설치된 압력센서를 통하여 측정된 최대 폭발압력을 이용하여  $R(\%) = \frac{\text{PeakP}_2}{\text{PeakP}_1} \times 100$  ( $\text{PeakP}_1$ : gel설치된 전단에 압력센서를 통하여 얻어진 최대 폭발압력,  $\text{PeakP}_2$ : gel 후단에 설치된 압력센서를 통하여 얻어진 최대 폭발압력)로 계산하였다. gel의 농도가 증가할수록 폭발압력 완화율이 증가하는 경향으로 나타났으며, 최대

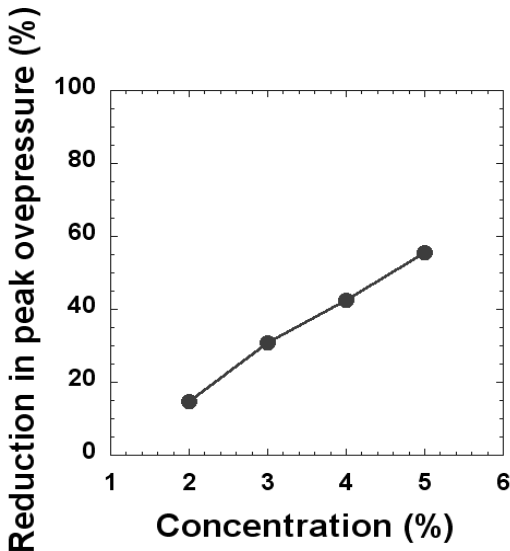


Fig. 9. Reduction percentage in peak overpressures between before and after barrier by gel concentrations of barriers.

완화율은 5 % gel에서 약 60 %, 최소는 2 % gel에서 약 18 %의 완화율을 보였다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 agar gel의 농도 변화에 따른 폭발 완화 특성을 조사하였으며, 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) agar gel barrier를 설치하지 않은 경우, 점화 후 화염전면이 장애물에 도달할 때의 화염속도는 약 10.5 m/s, 장애물 후류에서 2개의 화염전면이 재결합할 때는 약 14 m/s, 챔버 개구부 근처에 도달하였을 때 최대 약 27 m/s까지 증가하였다.

(2) agar gel의 농도가 증가할 때 gel 파열시간은 지연되는 경향을 보였으며, 2 %와 5 % gel의 파열시간을 비교하면, 5 % gel이 2 % 보다 약 20 ms 지연되는 것으로 나타났다. gel 농도에 따른 gel 파열시간의 지연은 gel의 탄성계수 및 점탄성비 증가와 관련된다. 또한, gel 농도에 따라 측정된 최대 gel displacement와 단자유도계(SDOF) 모델을 이용하여 계산한 결과를 비교한 결과, SDOF 모델의 계산 결과가 측정 결과보다 약 2배 높았다.

(3) agar gel barrier를 설치한 경우, 폭발압력 곡선 상에 2개의 피크압: 첫 번째 피크압은 화염이 챔버

개구부에 도달할 때, 두 번째는 폭발압력에 의해 팽창하는 gel이 파열할 때 발생하였다. gel 농도가 증가할 때 폭발압력은 증가하고, 최대 폭발압력 도달 시간은 5 % gel이 2 %에 비해 약 20 ms 지연되는 것으로 나타났다. 농도 증가에 따른 최대 폭발압력 도달시간의 지연은 gel 파열시간의 지연과 관련되었다. 또한, gel의 농도가 증가할수록 폭발압력 완화율이 증가하는 경향으로 나타났으며, 최대 완화율은 5 % gel에서 약 60 %, 최소는 2 % gel에서 약 18 %의 완화율을 보였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0024911)

#### 참고문헌

- [1] 박달재, 이영순, “DME-LPG 혼합연료에 따른 사고결과 피해예측”, *KIGAS*, **15**(2), 57-62, (2011)
- [2] Vilchez, J.A., Sevilla, S., Montiel, H. & Casl, J., “Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*, **8**(2), 87-97,(1995)
- [3] Bjerketvedt, D., Bakke, J.R. & Van wingerden, K., “Gas Explosion Handbook”, *Journal of Hazardous Materials*, **52**, 1-150 (1997)
- [4] Marsh, *Large property damage losses in the hydrocarbon-chemical industries: The 100 largest losses 1972-2001*, 20th ed., Marsh’s Risk Consulting Practice, USA, (2003)
- [5] HSE, “Review of explosion mitigation measures for platform legs”, HSL Report 64, (2006)
- [6] Pekalski A.A, Zevenbergen J.F, Lemkowitz S.M and Pasman H.J, “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), 1-17, (2005)
- [7] 홍은정, “가스폭발압력 완화에 미치는 워터겔의 영향”, 서울산업대학교 석사학위 논문, (2006)
- [8] Biggs, J. M., *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, New York, (1964)