

화염전파속도에 대한 폭발관 구조의 영향과 세라믹 소염소자의 소염성능

Effects of Explosion Pipe Structure on the Flame Propagation Velocity and the Quenching Ability of Ceramic Honeycomb Monolith

김 영 수*·신 창 섭**
Young-Su Kim·Chang-Sub Shin

ABSTRACT

The behaviors of flame propagation and quenching in a pipe were investigated to make a design criteria of flame arrester. The effects of sealing condition of pipe end, pipe diameter and length were studied, and also the effects of thickness of ceramic honeycomb monolith on the quenching ability were discussed.

Experimental results showed that the flame velocity in case of closed pipe was increased about twenty times faster than that of opened and the sealing conditions of pipe end and length showed significant effects on it. The quenching ability of ceramic honeycomb monolith was increased with thickness and coincided well with Palmer's equation.

1. 서 론

각종 인화성 액체, 폭발성 가스, 증기를 취급하는 설비 및 장치의 경우 장치 외부 혹은 인접장치에서 발생한 화염이 전파하여 폭발을 일으키고 화재가 확산될 위험성이 높다. 설비의 안전을 위하여는 이에 대한 근본적인 대책이 강구되어야 하며 바람직한 기기로 화염방지기(flame arrester)가 있다.

화염방지기는 취급하는 가연성물질의 종류, 농도, 압력, 온도 및 화염이 전파하는 관로의 형상, 크기, 내벽의 상태 등에 따라 다르게 설치되어야 한다. 화염방지기의 가장 중요한 부분은 소염소자이며, 소염소자는 화염으로부터 연소에 필요한 활성분자를 흡수하고 화염전파에 필요한 최소한의 온도 이하로 화염을 냉각시켜 소염시키는 장치이다. 그리고 화염을 소멸시키는 것과 함께 폭발압력에 견뎌야 하며, 압력손실 등을 고려하여 가장 효율적인 소염소자를 설치하여야 한다.

* 충북대학교 대학원

** 충북대학교 안전공학과

화염전파속도는 화염방지 설계의 가장 중요한 인자이다. 화염전파속도는 장치의 구조 및 재질, 점화원으로 부터의 거리에 따라 변하게 되므로 화염방지 설계의 설계를 위하여 우선 각 장치내에서의 최대 화염속도를 추정하여야 한다. 화염방지기의 소염형태와 소염기구에 관해서는 지금까지 여러 보고^{2,3,6,7}가 있지만 설치장소의 특성에 따른 소염소자의 설계기준으로 확립된 것은 거의 볼 수 없다. 그리고 현재 널리 사용되는 소염소자는 crimped metal ribbon이나 津田 등은 honeycomb형 세라믹 소자의 사용가능성에 대하여 발표한 바 있다.^{6,7}

따라서 본 연구에서는 폭발관을 변화시켜 폭발관 구조에 따른 화염전파속도 등 화염전파현상을 측정하고, 새로운 소자인 honeycomb형 세라믹을 소염소자로 사용하여 소염성능을 측정하여 효율적인 소염소자의 설계에 관한 기준을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 관내에서의 화염전파속도

양끝이 개방된 관내에 가연성 가스를 주입하고 점화원으로 한쪽에서 점화시킨 경우 점화 초기에는 관내에서 화염면이 균일하게 진행된다. 연소된 가스가 자유롭게 이동하기 때문에 초기에는 화염전파속도(V_{ex})가 연소속도(V_n)와 같다. 그러나 이러한 현상은 점화초기에만 나타나며 연소가 진행되면 미연소 가스에 난류가 형성되어 연소속도는 증가하게 되며, 화염면의 모양은 dome모양을 하게 된다. 그리고 화염의 표면적(F)는 파이프 단면적(f)보다 크게 되고 가시화염속도인 화염전파속도는 연소속도와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{ex} = \frac{F}{f} V_n \dots\dots\dots (1)$$

점화쪽이 밀폐된 관에서 폭발이 일어날 경우 화염전파속도는 일반적으로 가시화염속도의 80~90%가 되는 치환속도(displacement velocity) V_d 에 의해 미연소가스가 움직이기 때문에, 화염전파속도는 관끝을 개방한 부분에서 점화할 경우에 비해 빠르게 된다. 이때의 화염전파속도는 치환속도의 효과 뿐만 아니라 치환에 따라 발생한 난류에 의하여 화염의 표면적(F)가 더욱 크게 되어 화염전파

속도는 가속화 된다. 이때의 화염전파속도는 다음과 같다.

$$V_{ex} = \frac{F}{f} V_n + V_d \dots\dots\dots (2)$$

여기서 V_d 는 치환속도이며, 난류의 영향에 따라 관끝이 밀폐된 경우 F/f 가 아주 크게되며 많은 경우에 화염진동이 일어난다.

2.2 소염소자의 세극크기와 한계화염속도

Palmer^{2,3}는 소염을 이루기 위해 소염소자의 세극 직경 및 두께에 따른 한계화염속도를 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$V_f = 0.5 \epsilon \frac{L}{D^2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 ϵ 은 금속망의 노출면적에 대한 개구부면적비, L 는 소염소자의 두께, D 는 세극의 직경이다.

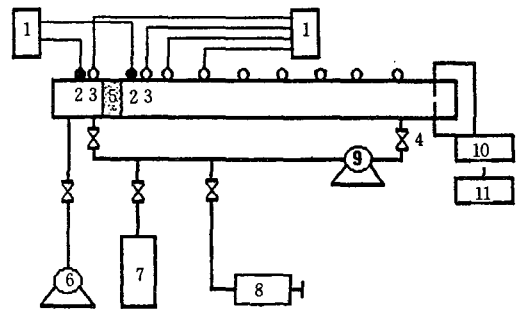
그리고 세극단면이 원형이 아닌 경우는 상당직경(D_H)을 사용한다.

$$D_H = 4 \times (\text{세극의 단면}) / \text{세극의 둘레}$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 장치는 Fig. 1과 같으며 내



- | | |
|---------------------------------|--------------------|
| 1. Digital storage oscilloscope | 2. Pressure sensor |
| 3. Optical sensor | 4. Valve |
| 5. Flame arrester | 6. Vacuum pump |
| 7. LPG | 8. Cylinder |
| 9. Circulation pump | 10. Controller |
| 11. Neon transducer | |

Fig. 1 Schematic of the explosion system

경 54mm, 82mm, 106mm, 길이 4500mm인 파이프형 폭발관을 각각 수평으로 고정 설치하여 사용하였다. 그리고 화염전파속도를 측정하기 위하여 광센서를 500mm 간격으로 8곳에 설치하고 여기서 나오는 신호는 증폭기를 통하여 digital storage oscilloscope로 계측하고 화염방지기 뒤에도 광센서를 설치하여 화염이 화염방지기 의해 소멸되었는지 여부를 확인할 수 있도록 하였다. 또한 압력센서를 화염방지기의 앞과 뒤에 설치하여 화염이 소멸된 경우와 통과될 때의 폭발압력의 변화를 측정하였다.

폭발관에 주입되는 가연성물질은 순도 97.3% 프로판을 사용하였으며, 압축 실린더를 사용하여 정량을 주입하고 프로판과 공기의 균일한 혼합을 위하여 펌프를 사용하여 순환 혼합시켰다. 점화원으로는 1차 220V, 2차 20000V의 neon transducer를 사용하고 방전전극의 전극간 길이는 0.1mm, 방전 시간은 0.5sec로 하였다.

3.2 실험방법

실험은 파이프형 폭발관 양끝을 플랜지로 막고 진공펌프로 내부를 진공으로 만든 후 실린더를 이용하여 정량의 프로판과 공기를 주입한다. 다음으로 관내의 균일한 농도를 위하여 순환펌프를 이용하여 수분 동안 혼합시킨 후 관끝 10cm 부근에서 점화시킨다.

실험 첫번째 단계로 관의 위치와 프로판의 농도 변화에 따른 최대 화염전파속도를 측정한다. 관끝의 상태를 점화원 쪽은 밀폐하고 반대쪽을 개방한 경우(이하 밀폐한 경우)와 점화원쪽과 반대쪽 모두를 개방한 경우(이하 개방한 경우) 각 조건에서의 화염전파속도와 폭발압력 및 압력상승 속도를 측정한다.

실험 두번째 단계로 두께가 6.5, 13.0, 19.5, 26.0, 32.5mm인 5종의 honeycomb monolith를 소염소자로 사용하여 각 조건에서의 소염능력을 측정하고, 소멸된 경우와 화염이 통과될 때의 폭발압력의 차이를 측정한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 관내에서의 화염전파속도

관내에서 화염이 발생하면 반응열에 의해 화염면 근처에서 급격한 팽창이 일어날 화염전파에 큰 영향을 미친다. 그리고 이러한 팽창의 영향은 관끝의 밀폐여부에 따라 크게 변한다.

밀폐한 경우는 석유화학공장 등에서 장치와 장치사이의 배관내에서의 화염전파의 경우를, 그리고 개방한 경우는 외부에서 석유류 저장탱크의 통기관 등을 통해 역화되는 경우에 적용 가능한 조건들로서 본 연구에서는 화염전파속도를 측정하기 위하여 관끝의 상태를 밀폐한 경우와 개방한 경우 각각에 대하여 실험하였다.

4.1.1 관끝 상태의 영향

Fig. 2는 54mm 폭발관을 사용하였을 때의 화염전파속도를 나타낸 것으로 밀폐한 경우 최고 125.1 m/sec를 나타냈으나 개방한 경우는 최고 5.4 m/sec로 나타나 평균 20배의 차이를 보이고 있다. 이와 같이 밀폐한 경우 화염전파속도가 크게 증가되는 원인은 밀폐에 의하여 연소 가스가 압축되고 이 압력에 의해 화염이 급격히 이동하는 것과 함께 화염면이 난류의 형태가 되기 때문이며, 화염방지기의 설치시 장치의 구조가 소염성능에 결정적 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

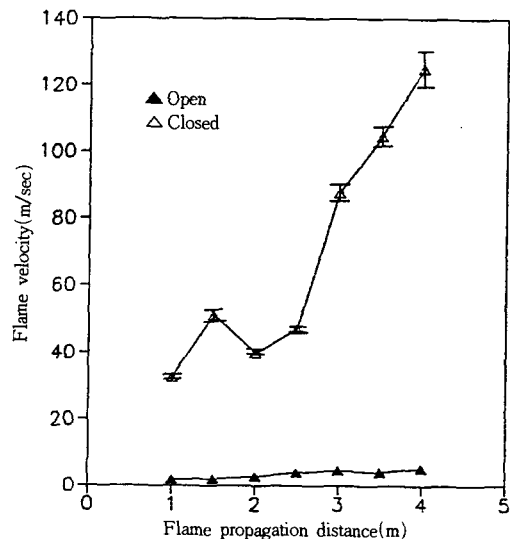


Fig. 2 Variations of flame velocity with flame propagation distance

4.1.2 폭발관 직경의 영향

Fig. 3은 밀폐한 경우의 폭발관 직경에 따른 화염전파속도의 변화를 나타내고 있다. 점화지점에서 부터 멀어질수록 전체적으로 화염전파속도가 증가하는 경향이지만, 관의 직경이 54mm, 106mm에서 2m지점에서 화염전파속도가 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 감소현상은 점화초기에 폭발에 의해 화염면이 고온이 되고 급격한 팽창을 하여 화염전파속도가 빠르나, 관벽으로의 열손실에 의하여 수축작용이 일어나 이러한 감소지점이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 한편, 직경 82mm의 경우는 다른 형태로 3m 부근에서 화염전파속도가 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

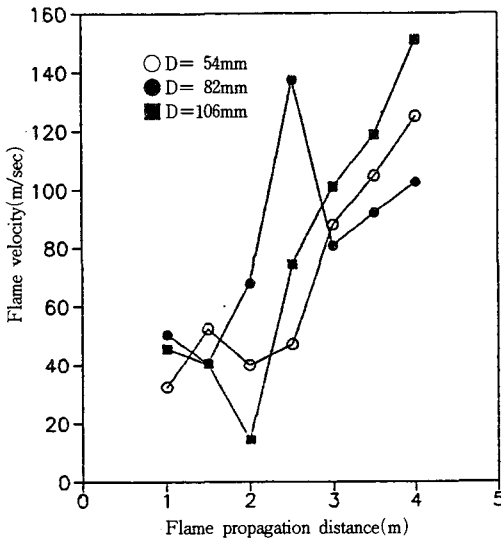


Fig. 3 Variations of flame velocity with flame propagation distance in case of ignition at closed end

Fig. 4는 개방한 경우로 밀폐한 경우와 같은 일부 구간에서의 화염전파속도 하강현상은 나타나지 않았으며, 2m와 2.5m 사이에서 최대로 가속화 됨을 알 수 있다. 그러나 직경 82mm에서는 2m지점 이후에서 속도가 떨어지는 형태로 나타나 관경에 따라 전파특성이 다를 수 있다.

Fig. 5는 식(1)을 적용하여 화염의 최대속도로부터 화염의 표면적의 비, E/f 를 구한 결과로서 관의 직경이 54mm인 경우 8, 82mm인 경우 10.5, 106mm인 경우 10.9로 나타나 관경이 증가할수록

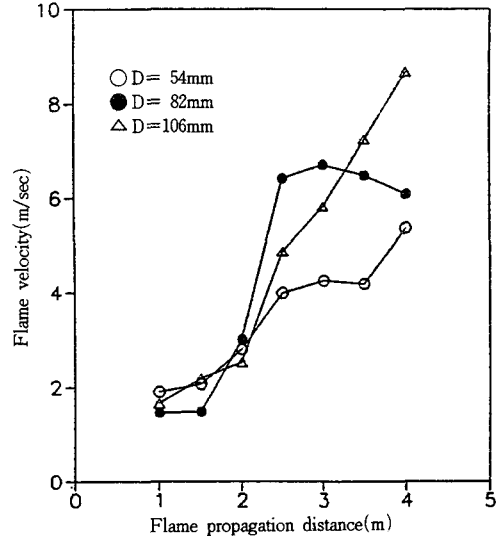


Fig. 4 Variations of flame velocity with flame propagation distance in case of ignition at open end

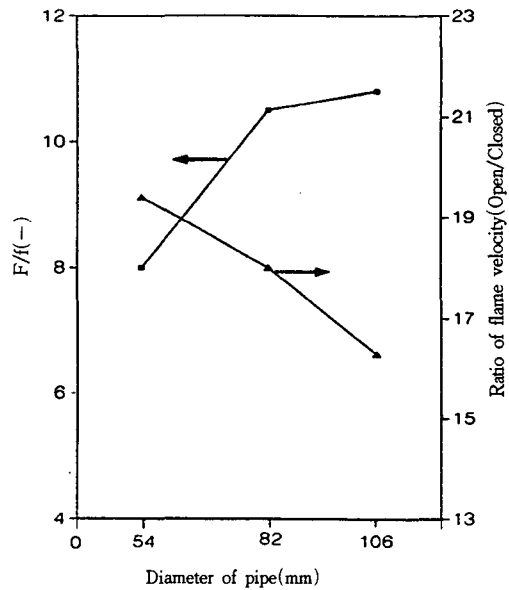


Fig. 5 Effect of pipe diameter on the ratio of flame surface area to cross sectional area and on the flame velocity

E/f 는 증가함을 알 수 있다. 한편, 밀폐한 경우 실험값을 식(2)에 대입하여 치환속도를 추정하면 관

의 직경이 54mm인 경우 66.5m/sec, 82mm인 경우 77.1m/sec 그리고 106mm인 경우 73.2m/sec이었다. 그리고 우측 좌표는 밀폐한 경우와 개방한 경우의 화염전파속도의 차이를 비율로 나타낸 것으로 폭발관의 직경이 작을수록 속도비가 커져 직경이 작은 관의 경우 관끝의 영향을 더욱 크게 받는 것을 알 수 있고 그 비율은 최대 20배까지 나타났다.

4.2 세라믹 소염소자의 소염성능

Honeycomb형 재질의 두께가 6.5, 13.0, 19.5, 26.0, 32.5mm이고, Table 1과 같은 특성을 지닌 소염소자를 사용하여 직경 54mm, 길이 4500mm 관에서 소염성능을 측정하였다.

Table 1 Characteristics of honeycomb monolith

Thickness of membrane (mm)	Width of aperture (mm)	Proportion of space not blocked by membrane (ϵ)
0.32	1.125	0.77

Fig. 6에 나타난 ●는 화염이 소염된 경우이고, ○는 화염이 통과한 경우로 한계화염속도를 측정하기 위해 시료가스의 농도를 변화시켜 실험한 결과로서 그림과 같이 화염전파속도의 임계치가 조

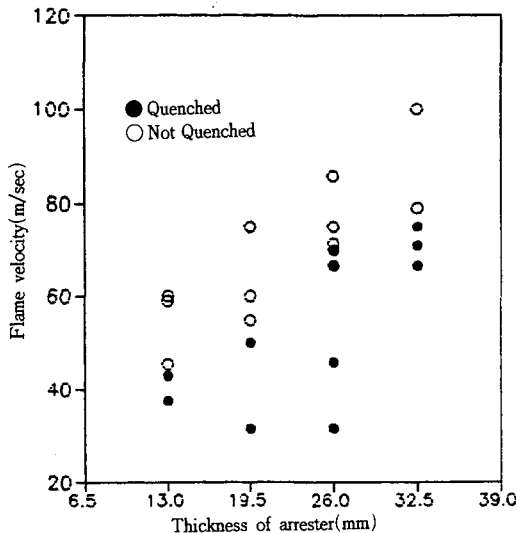


Fig. 6 Effect of flame arrester thickness on quenching

재하고 그 한계화염속도 이하에서는 화염이 모두 소염되어 화염방지기의 소염성능은 관내에서의 화염전파속도에 따라 결정되었으며, 따라서 한계화염속도로 소염성능을 평가하는 것이 가능함을 알 수 있다. 여기서 소염소자의 두께가 6.5mm 증가하면 한계화염속도는 평균 21%씩 증가하였다.

Fig. 7은 Palmer의 식(3)에 의해 계산한 값과 본 실험에 측정된 실험값을 비교한 것으로 전체적으로 같은 경향을 나타내고 있어 세라믹 소염소자의 경우 Palmer 식을 적용할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 화염방지기를 설계하는 경우 먼저 장치의 구조, 위치에 따른 최대화염전파속도를 추정하고, 이를 기준으로 Palmer의 식을 적용하면 적절한 소염소자의 크기를 결정할 수 있다.

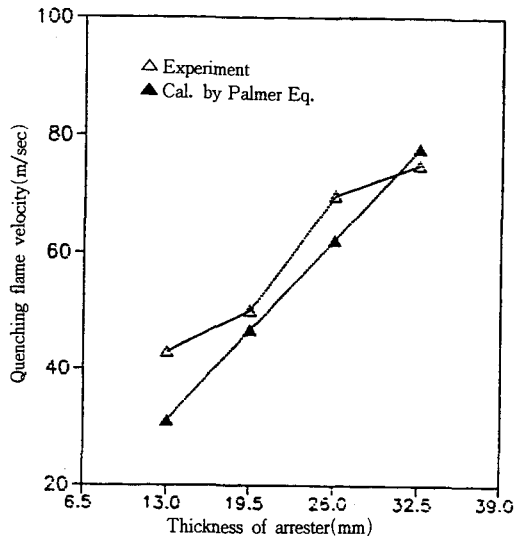


Fig. 7 Comparison of experimental quenching flame velocity with calculated data by Palmer equation

5. 결 론

이상과 같이 관내에서의 화염전파속도와 소염소자에 대한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 관내에서의 화염전파속도는 관끝을 개방한 경우보다 밀폐한 경우 최대 20배 증가하였으며, 관경 54mm에서 106mm 사이에서 관의 직경이 작을수록 증가율이 높게 나타났다.
- 2) 양끝을 개방한 경우 관경의 증가와 더불어 평균화염속도는 증가하여 파이프단면적에 대한

화염표면적비가 상승되었으며, 이때의 화염표면적은 파이프단면적의 평균 10배로 추정된다.

- 3) Honeycomb형 세라믹 소염소자의 소염성능은 두께가 6.5mm증가 할때마다 약 21%씩 증가하였으며, 소염성능에 대한 Palmer의 식의 적용이 가능하다.
- 4) 점화원에서 부터 멀어질수록 화염전파속도는 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 위치에 따라서는 감소하는 부분도 나타나고 있으며, 관 끝을 밀폐한 경우 이 현상은 뚜렷이 나타나고 있다.

참 고 문 헌

- 1) B. Water., Flame Arrester and Flash back Preventers., Plant/Operation, Vol. 2, No. 4, pp. 203~208, 1982.
- 2) G. L. Broschka, I. Ginsburgh, R. A. Mancini, and R. G. Will., A Study of Flame Arrester in Piping System, Plant/Operation, Vol. 2, No. 1, pp. 5~12, 1983.
- 3) K. N. Palmer., Seventh International Symposium on Combustion., pp. 497~507, 1963.
- 4) K. N. Palmer., Chemical Process Hazards., 1980.
- 5) N. Roussakis and K. Lapp., A Comprehensive Test Method for Inline Flame Arrester, Plant/Operation, Vol. 10, No. 2, pp. 85~92, 1991.
- 6) 津田健, 北條英光, フレームアレスタ-の 壓力損失と 消炎性能に 及ぼす 目詰まりの 影響, 安全工學, Vol. 31, No. 4, pp. 249~252, 1992.
- 7) 津田健, 北條英光, 新井信, 加納能一, 管内におけるきくの 火災の 傳播學動と フレームアレスタ-の 消炎性能, 化學工學論文集, 第12卷, 第2號, pp. 153~158, 1986.
- 8) 배정일, 濃度不均一 LPG-空氣混合氣體의 爆發特性., 석사학위논문, 충북대학교, 1992.