

가연성 혼합액체의 증발 및 분포 속도에 관한 연구

†안형환

한국교통대학교 안전공학과

(2014년 10월 22일 접수, 2014년 12월 8일 수정, 2014년 12월 9일 채택)

A Study on the Evaporation and Distribution Velocity a Volatile Mixtures

†Hyung-whan An

Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju
Chungbuk Korea

(Received October 22, 2014; Revised December 8, 2014; Accepted December 9, 2014)

요 약

이 연구는 가연성 액체물질인 methanol, tetrahydrofuran, xylene의 온도와 풍속에 따른 증발속도에 대하여 실험을 통해 조사하였다. 측정하고자하는 물질의 양은 약24 g을 기준으로 하였고 혼합물질의 경우 24 g을 기준으로 하여 각각 같은 비율로 혼합하여 사용하였다. 또한 풍속에 대한 영향을 살펴보기 위하여 소형선풍기를 용기 입구높이 약 10 cm, 측방향 30 cm의 위치에 설치하고 풍속계를 이용하여 풍속을 측정하였다. 대기속도에 대한 영향을 알아보기 위하여 풍속을 0 m/s, 1.63 m/s, 2.03 m/s로 변화시켜 실험하였고 온도의 미치는 영향은 21 °C, 32 °C, 52 °C로 변화시켜가며 항온조에서 조절하여 실험하였다. 그 결과 Xylene의 경우 1.4 mg/min, Tetrahydrofuran 19.8 mg/min, Methanol 10.2 mg/min의 속도로 차이 큰 것을 알 수 있었으며 또한 온도와 풍속에 대한 영향이 아주 민감한 것으로 나타났다. 또한 혼합물의 경우도 각 단일 물질의 평균 증발속도와와의 차이가 큰 것을 알 수 있었다.

Abstract - This study is based on a investigation regarding the evaporation rate of a volatile liquid(methanol, tetrahydrofuran, xylene) according to changes of the temperature and wind. The weight of a volatile liquid was standardized to 24 g and the mixture was formed with the same weight ratio. In order to discover about the effect of the wind velocity, small fan was installed at 10 cm above the entrance and 30 cm away in the direction of the cylinder. The effect of the wind velocity was tested at 0 m/s, 1.63 m/s, 2.03 m/s respectively and the effect of the temperature on the volatile liquid was experimented at the temperature of 21 °C, 32 °C, 52 °C in the constant temperature water base. As a result, in case of Xylene, the evaporation rate of the tetrahydrofuran and methanol showed 1.4 mg/min, 19.8 mg/min and 10.2 mg/min respectively. Also, the effect of the evaporation rate on the temperature of the volatile liquid and on the velocity of wind was shown to be very sensitive. At the same time, the evaporation rate of the mixture showed large difference compared to that of the single volatile liquid.

Key words : Volatile Liquid, Evaporation

†Corresponding author:hhahn@ut.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

인화성액체 및 혼합물을 사용 및 취급 또는 저장하는 설비에서 인화성액체가 누출되고 이로 인하여 발생하는 화재·폭발사고 뿐만 아니라 독성사고가 자주 발생하고 있으며 그에 따른 재산 피해 및 인명 피해가 크게 이슈화되고 있다. 산업안전보건법상에서 인화성액체(Flammable Liquids)란 표준압력 하에서 인화점(Flash Point)이 60℃이하이거나 고온·고압의 공정운전 조건으로 인하여 화재·폭발이 있는 상태에서 취급되는 액체를 말한다[1]. 이러한 인화성액체는 누출시 주변에 넓은 면적에 걸쳐 분포하게 되고 각종 점화원의 존재로 인하여 화재·폭발을 일으키기도 할 뿐만 아니라 때로는 성분의 독성정도에 따라 매우 심각한 인명피해를 가져오기도 한다. 한편 고용노동부의 발생형태별 사망사고를 살펴보면 2012년 폭발과열 32건(3.35%), 화재 29건(3.04%) 그리고 유해화학·중독·질식 36건(3.77%)를 차지하고 있는 것으로 나타났다[2]. 또한 환경부 2012년도 생활공간 화학물질 인식도조사에서 7가지(유해화학물질피해, 쓰레기오염, 대기오염, 수질오염, 소음/진동, 악취 등) 유형의 피해를 기준으로 우선해결과제에 대한 인식조사를 실시한 결과 조사대상 1,000명 중 31.3% 유해화학물질피해를 선택하였고 피해발생 심각성 인식도에서 80%가 화학물질로 인한 피해가 심각하다고 조사되었다고 보고하였다[3].

이와 같이 가연성 액체혼합물 및 유해성 단일물질에 대한 위험성은 확인되었고 따라서 이에 대한 피해를 최소화하기 위한 연구가 필수적이다. 특히 Xylene과 Tetrahydrofuran 그리고 Methanol은 가연성물질로 각종 플라스틱 용매 또는 합성원료로 많이 사용되고 있어 누출시 사고로 이어질 수 있을 뿐만 아니라 인체의 피해를 줄 수 있는 물질이다. 따라서 단일 물질 뿐만 아니라 혼합물질의 경우에 누출에 대비하여 증발속도(vaporization rate) 실험을 통하여 확보하는 것은 매우 중요하다. 이에 많은 연구자들의 연구가 진행되어 왔고 활발하게 진행 중에 있다[4-6]. Douglas Bohl과 Gregory Jackson은[7] 넓고 짧은 터널형사각형에 수직으로 설치된 큰 방해물에서의 acetone의 유출 현상에 대한 이미지 연구를 통해 일정한 온도에서의 최대 유출크기는 유출 부피에 따라 증가하고, 일정한 유출 부피에서는 표면온도의 증가에 따라 감소하는 것으로 보고하였다. 또한 3.0 m/s이하의 바람에 대한 영향은 최대 유출 크기에 영향을 주지 않는다고 발표하였다. 또한 Katsuhiko Okamoto 등[8]은 높은 octane가를 갖은 gasoline과 보통의 gasoline을 이용하여 증기압과 증발속도를

측정하고 예측모델을 제시하였다. 그리고 Alan Parker와 Richard Babas[9]는 Stefan tube기초로 TGA를 이용하여 액체의 진보된 증발속도 예측모델을 만들었고 예측모델에 의한 계산 값은 30 kPa~60 kPa의 증기압 범위에서의 실험값과 거의 일치하였다고 보고 하였다. 그러나 이와 같이 많은 연구자들은 단일 물질을 위주로 예측모델에 대한 연구에 초점을 맞추고 있어 다양한 환경적 조건(온도, 대류 등) 뿐만 아니라 혼합물질에 대한 연구가 필요한 시점이다.

따라서 이 연구는 가연성물질이 각종 사고나 작업 중 실수에 의해 대기 중 누출에 대한 위험성을 예측하기 위하여 단일물질과 혼합물질(Xylene과 Tetrahydrofuran, Methanol)에서 다양한 온도 변화와 풍속 변화에 따른 증발속도의 영향을 알아보았다.

II. 실험방법

2.1. 시약준비

이 실험에 사용한 Methanol의 경우 특급시약으로 순도가 99.85%(hayma Limited)을 사용하였고 Xylene의 경우 95%(Katayama Chemical), Tetrahydro-furan(95, 95%, Duksan Pharmceutical)을 사용하였다.

Table 1. Physical properties of a materials

Materials Properties	Methanol	Xylene	Tetrahydrofuran
Formular	CH ₃ OH	C ₈ H ₁₀	C ₄ H ₈ O
Molecular weight(g)	32.0	106.2	72.1
Boiling point(°C)	64.67	144.4	65
Melting point(°C)	-97.49	-25.2	-108.5
Specific gravity(25/4)	0.7915	0.876	0.8892
Vapor pressure(mmHg, 34.03°C)	200	-	700
Flash point (°C)	11	32	-14
LEL(vol%)	6.0~36	1.0~6.0	2.0~11.8
AC(ppm)	200	100	200

2.2. 증발속도의 측정

증발속도 측정을 위해 10^6 g의 성능을 전자저울(DE/BJ 120S, SARTORIUS)을 사용하여 10^{-4} g범위로 21℃에서 30분 간격으로 질량의 변화를 측정하였고 증발용기는 부피 10 ml, 길이 10 cm, 직경 10 mm인 메스실린더를 이용하였다. 이 때 측정하고자하는 물질의 양은 단일물질의 경우 약 24 g을 기준으로 하였고 혼합물질의 경우 24 g을 기준으로 하여 각각 같은 비율로 혼합하여 사용하였다. 또한 풍속에 대한 영향을 살펴보기 위하여 소형선풍기를 용기 입구 높이가 약 10 cm, 측방향 30 cm의 위치에 설치하고 풍속계(kestrel4000, NV, NK)를 이용하여 풍속을 측정하였다. 또한 대류의 영향을 알아보기 위하여 풍속을 0 m/s, 1.63 m/s, 2.03 m/s로 변화시켜 실험하였고 온도의 미치는 영향은 21 ℃, 32 ℃, 52 ℃로 변화시켜가며 항온조에서 조절하여 실험하였다.

III. 결 과

3.1. 단일물질의 대한 증발속도

Xylene과 Tetrahydrofuran 그리고 Methanol의 증발속도 측정은 온도 21 ℃를 유지하며 측정을 실시하였다. 그 결과 Fig. 1, 2, 3에서 보는 바와 같이 Xylene의 경우 1.4 mg/min의 속도로 증발되는 것을 알 수 있었으며 Tetrahydrofuran의 경우는 19.8 mg/min, Methanol은 10.2 mg/min의 속도로 증발하였다. 따라서 Tetrahydrofuran의 경우 Xylene의 약 14배 정도의 속도차가 나는 것을 알 수 있었으며, 단일물질의 누출에서의 누출원점에서의 빠른 확산에 따른 폭발범위 도달하는 시간과 폭발가능 면적의 차이가 확연하게 다를 수 있다.

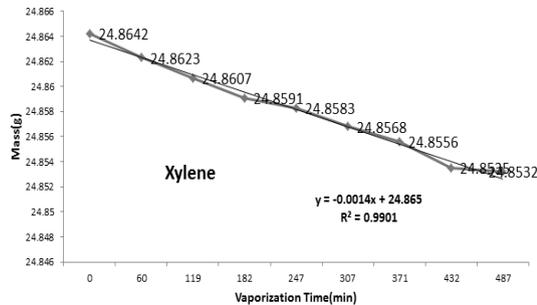


Fig. 1. The mass loss of xylene with vaporization time.

3.2. 혼합물질의 대한 증발속도

일반적으로 증발속도는 butyacetate를 기준으로 증발속도의 빠르기를 가늠하고 있으나 혼합물질의 다양한 물리적 특성 및 대류나 환경 조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서 혼합물질에 대한 증발속도가 물질에 따라 어떠한 영향을 미치는 지를 알아보기 위하여 Tetrahydrofuran과 Xylene 그리고 Methanol을 각각 동량으로 희석하여 증발속도를 측정한다. 결과 Fig. 4, 5, 6에서 보는바와 같이 Methanol과 Xylene의 경우 각각 단일물질의 평균이 5.8 mg/min과 완전히 다른 경향을 보여 11.6 mg/min의 증발속도를 보였다. 이러한 현상은 빠른 증발속도를 갖은 물질과의 혼합에서 빠른 증발물질의 물질 간 인력에 의한 영향을 받아 동반 증발 현상이 일어나는 것으로 추론할 수 있다. 이와 마찬가지로 위의 세 성분의 물질을 혼합하였을 경우에도 동반상승하여 각각의 평균속도 10.47 mg/min보다 상승하여 11.7 mg/min으로 나타났다.

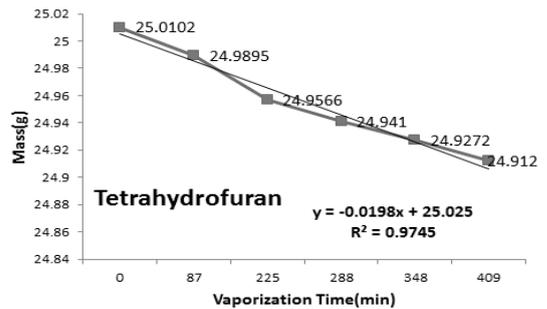


Fig. 2. The mass loss of tetrahydrofuran with vaporization time.

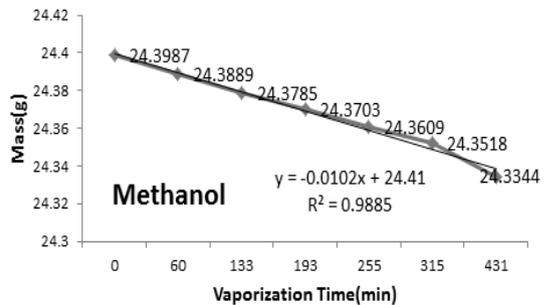


Fig. 3. The mass loss of methanol with vaporization time.

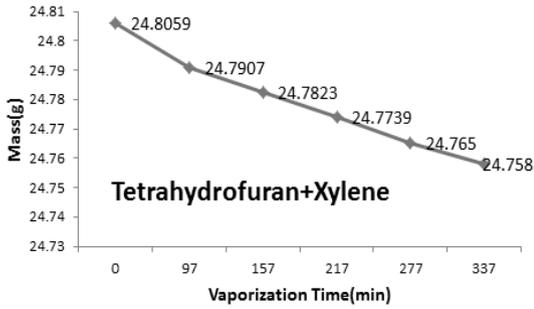


Fig. 4. The mass loss of the mixture(Te+Xy) with vaporization time.

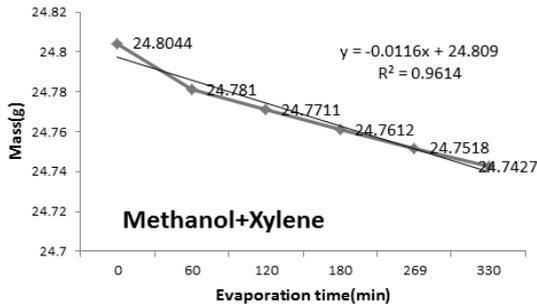


Fig. 5. The mass loss of the mixture(Me+Xy) with vaporization time.

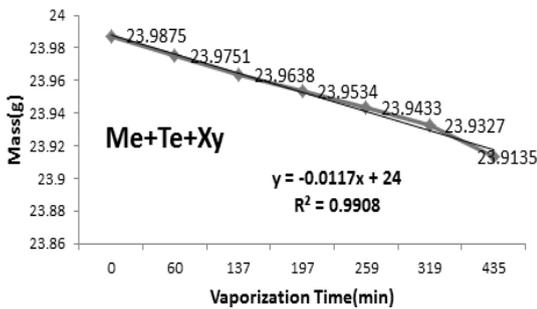
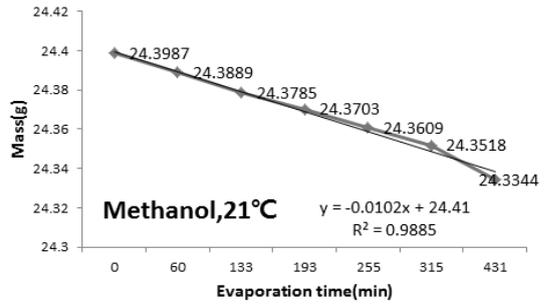


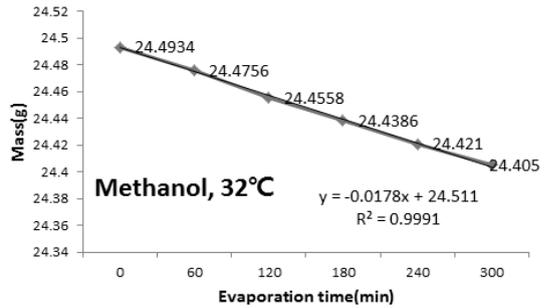
Fig. 6. The mass loss of the mixture(Me+Te+Xy) with vaporization time.

3.3. 온도의 대한 영향

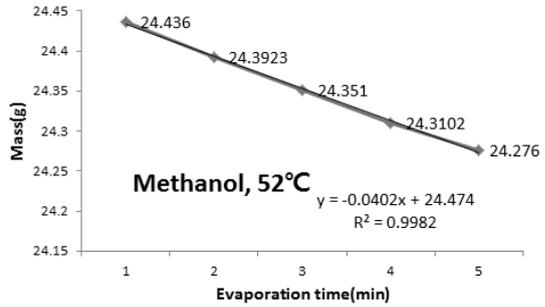
온도 상승에 대한 증발속도가 어느 정도 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 Fig. 7에서와 같이 Methanol을 21 °C, 32 °C, 52 °C로 변화시켜 실험한 결과 증발속도가 10.2 mg/min에서 17.8 mg/min, 40.2 mg/min으로 급상승하는 것을 알 수 있었다. 따라서



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. The effect of temperature(a:21°C, b:32°C, c:52°C) with vaporization time.

산업현장에서의 가연성물질의 누출에 있어 주변의 온도에 아주 민감한 것을 알 수 있다. 특히 물질의 종류와 특성에 따라 온도에 대한 영향이 크기 때문에 현장 상황에 맞추어 대응 전략이 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 대류에 대한 영향

증발속도가 바람에 미치는 영향을 알아보기 위하여 소형선풍기를 사용하여 증발 실험터 입구 높이 10 cm 측면 30 cm에서 바람의 세기를 조절하여 측정하였다. Fig. 8에 나타낸바와 같이 바람의 속도가

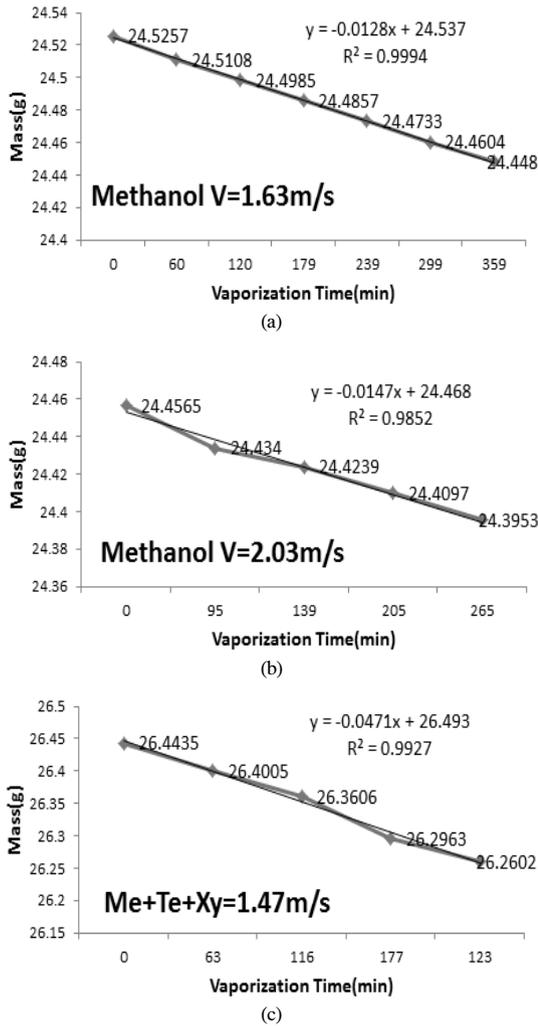


Fig. 8. The effect of the wind velocity(a:1.63m/s, b:2.03m/s, c:mixture 1.47m/s) with vaporization time.

0 m/s, 1.63 m/s, 2.03 m/s로 변화되었을 때의 증발 속도는 각각 10.2m/min, 12.8 m/min, 14.7 m/min로 상승되는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 앞에서의 온도에 영향뿐만 아니라 바람에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 혼합물의 경우도 0 m/s에서 1.47 m/s로 변화되었을 때 11.7 mg/s에 47.1 mg/s로 급상승한 것을 알 수 있었다. 따라서 온도와 풍속은 산업 현장에서의 가연성물질 및 독성물질의 누출에 급격한 영향을 미치기 때문에 반드시 사전 예방 및 대책이 필요하다

VI. 결론

가연성물질인 Methanol, Xylene, Tetrahydro furan의 증발속도를 알아보기 위하여 단일물질과 혼합한 혼합물질로 나누어 온도와 풍속의 영향을 실험적으로 조사한 결과 다음과 같았다.

(1) Xylene, Tetrahydrofuran, Methanol 각각의 경우 비중차이는 0.876, 0.8892, 0.7915로 크지 않았지만 증발속도가 Xylene의 경우 1.4 mg/min, Tetrahydrofuran 19.8 mg/min, Methanol 10.2 mg/min의 속도로 차이 큰 것을 알 수 있었다.

(2) 혼합물의 증발속도 실험 결과 Methanol과 Xylene의 경우 각각 단일물질의 평균이 5.8 mg/min에 비해 11.6 mg/min의 증발속도를 보여 빠른 증발속도를 갖은 물질과의 혼합에서 빠른 증발물질의 물질간 인력에 의한 영향을 받아 동반 증발 현상이 일어나는 것으로 추론할 수 있었다.

(3) 증발속도의 온도 변화에 대한 증발실험에서 Methanol을 21 °C, 32 °C, 52 °C로 변화시켜 실험한 결과 증발속도가 10.2 mg/min에서 17.8 mg/min, 40.2 mg/min으로 급상승하였고 온도에 아주 민감한 것을 알 수 있다.

(4) Methanol의 경우 풍속이 0 m/s, 1.63 m/s, 2.03 m/s로 변화되었을 때의 증발속도는 각각 10.2 mg/s, 12.8 mg/s, 14.7 mg/s로 상승되는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

“이 논문은 2014년도 한국교통대학교의 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임”

REFERENCES

- [1] 산업안전보건법, 화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준, <별표 1> 화학물질 등의 분류, 노동부고시 제2009-68호
- [2] 고용노동부, 발생형태별사망사고(2012)
- [3] <http://hikostat.kr/2010>, 통계로 소통하는 통하는 세상, 통계청, 1(2013)
- [4] Katsuhiko Okamoto, Muneaki Hiramatsu, Hiroki Miyamoto, Tomonori Hino, Masakatsu Honma, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Koji Miwa, Hideo Ohtani, “Evaporation and diffusion behavior of fuel mixtures of gasoline and kerosene”, *Fire Safety Journal*, Volume 49,

- 47-61(2012)
- [5] Ling Zhu, Jiaqing Chen, Yan Liu, Rongmei Geng, Junjie Yu, "Experimental analysis of the evaporation process for gasoline", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 25, Issue 6, 916-922(2012)
- [6] Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Koji Miwa, Hideo Ohtani, "Evaporation characteristics of multi-component liquid", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 23, Issue 1, 89-97(2010)
- [7] Douglas Bohl, Gregory Jackson, "Experimental study of the spill and vaporization of a volatile liquid", *Journal of Hazardous Materials*, 140, 117-128(2007)
- [8] Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Koji Miwa, Hideo Ohtani, "Changes in evaporation rate and vapor pressure of gasoline with progress of evaporation", *Fire Safety Journal*, Volume 44, Issue 5, 756-763, (2009)
- [9] Alan Parker, Richard Babas, "Thermogravimetric measurement of evaporation: Data analysis based on the Stefan tube", *Thermochimica Acta*, 595, 67-73(2014)