

Experimental Research of Dispersion-behavior on Heavy Gases Regarding the Influence of Roughness and Slope of Ground in a Wind Tunnel

Jeong-Hun Kim · Sylvius Hartwig

University of Wuppertal, Germany

1. 서론

산업체 등에서 사용되고 있는 가스들중에서 일반적인 가스들과는 달리 위험한 가스 (heavy gas)들은 누출사고시에 이들 고유한 확산과 계층화(stratification)방식에 의해 높은 위험성을 유발시키고 있다. 이러한 가스의 누출확산사고들과 일반적인 가스누출사고들의 비교는 그 사실들을 증명해주고 있다. 이런 사실에 의해 위험한 가스확산에 대한 실험과 고유특성을 고려한 확산모델의 개발이 여러 관점에서 진행되고 있으며, 이들의 중요성은 이미 세계적으로 의미를 부여하고 있다. 현재까지 이루어진 실험들은 진행상의 어려움과 과대한 비용의 문제를 감안하면서도 위험한 가스확산에 대해 많은 정보들을 제공해왔다. 이 연구에서는 풍동실험을 바탕으로 위험한 가스 확산을 실험하였으며 이로부터의 결과를 소개하고자 한다.

2. 이론

변수의 규정 : 중립상태의 풍동내에 위험가스로써 이산화탄소를 지면의 거칠기와 기울기를 달리한 위험가스 확산방식에 대한 영향을 조사하기 위해 누출시켰다. 이들 축척모델들의 실험에 이용한 여러가지 변수들이 이후의 실측 적용을 위해 정의되고, 이들 중의 일부는 필요에 의해 고정되었다.

이 연구에서는 위험한 가스의 누출원과 실험된 지면의 조건들로부터 추출한 확산방식에 영향을 미치는 변수들을 3종류의 변수그룹으로 정리하였다. 이들은 발생원변수그룹(누출양, 누출속도, 누출시간 등), 인근환경변수그룹(주변공기밀도, 전파속도, 주변대기의 안정화 등)과 지형변수그룹(누출지지형, 확산지지형, 지면기울기, 지면거칠기 등)으로 구분되었다. 누출된 가스확산과 계층화방식에 영향을 미치는 모든 가능한 변수들이 정의되고 특정지역 $i(x_i:y_i:z_i)$ 상의 농도치 c_i 에 연관해 다시 그 영향력이 구분되었다. 이들 변수들의 영향력은 크게 지면기울기의 변화에 의한 영향, 지면 거칠기변화에 의한 영향으로 구분되고 이들의 크기들이 변화되면서 실험이 진행되었다.

지면거칠기 : 위험가스의 확산시 유동방식은 대부분의 누출조건하에서 또는 액체상태의 1차적 누출후에 발생하는 증발 등(거의 동시에 발생하는 경우 포함)에 의해 가스형태로 존재함에도 불구하고, 가스역학적이 아닌 유체역학적인 특성으로 지면형태에 영향을 받게 된다. 도로나 빙판표면과 같은 매끈한 지면위로 확산될 경우에는 이들 지면은 위험가스의 확산에 아무런 영향을 미치지 못한다. 만약 위험가스가 누출시에 상대적으로 큰 방해물들의 위나 주변으로 지속적인 확산을 할 경우에는 방해물들에 의해 국소적인 난류가 발생하게 되며 이들은 다시 전체 위험가스운의 확산에 영향을 미치게 될 것이다. 이러한 영향의 연구를 위해 지면거칠기에 대한 수치화가 절대적으로 필요하다.

이미 존재하는 지면의 거칠기 결정방법들중에서 지표단면의 기준선에 대한 수직선의 차이를 산술평균으로 규정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이들은 표현의 차이만 있을 뿐 고려된 표면을 5개의 동일간격으로 나누어 계산되고 있다. 한단계 더 나아가 지표면의 실제 거리나 면적에 대한 투사거리나 투사면적의 비율로써 지표면의 거칠기를 표현하고 있다. 그러나 이들의 현존 방법으로는 서로 다른 구성을 지니는 지표면의 거칠기들이 동일한 수치로서 계산되는 경우가 있다. 이의 방지와 지표면의 구조를 정확히 표현하기 위하여 3차원 거칠기 변수를 규정하여 연구에 사용하였다.

지면거칠기의 정확한 표현을 위해 거칠기를 표현한 각각의 구조물의 치수가 $R_{3D}(R_x/l_x:R_y/l_y:R_z)$ 로 설정되고, 개별인자의 정의는 각 x, y, z 방향의 거칠기 구조물의 길이와 기준거리의 비로써 나타내어졌다.

3. 실험장치와 방법

실험에 사용된 풍동은 길이 4 m, 높이와 넓이가 각각 1 m의 알루미늄과 플렉시유리로 만들어졌다. 이 풍동안에 총길이 3 m, 넓이 0.8 m의 지표면이 놓여지고, 이 중에서 2.5 m 바닥의 기울기가 변형되며 그 위에 거칠기가 모의 구성되어졌다.

위험가스로 풍동내의 지면위로 유량계와 확산기를 통해 누출된 이산화탄소의 측정점마다 농도측정을 위해 적외선가스분석기가 사용되어졌다. 이 가스분석기는 이중검출기가 부착되었으며, 미세금속관을 통해 흡입된 이산화탄소의 적외선반응에 의한 이중검출기간의 미세유량변화를 검출해 이를 다시 이산화탄소의 농도치로서 나타낸다.

확산기를 통해 누출된 위험가스가 확산되는 지면위에는 이들 가스의 농도측정을 위해 y-방향으로 5개의 동시 측정점들($y = -0.3, -0.15, 0.0, 0.15, 0.3$ m)이 미세금속관을 이용해 설치하였으며, 이들 금속흡입관들로 구성된 측정네트장치는 x-방향으로 총 7곳의 위치($x = 0.05, 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ m), z-방향으로 총 5곳($z = 0.0, 0.015, 0.03, 0.045, 0.06$ m)으로 이동되어 중복 측정되었다.

표 1에는 실험의 시간적인 진행을 나타내었다. 매초마다 기록되는 농도치의 측정이 시작된 후 1분동안 이산화탄소가 확산기를 통과하여 누출되었으며, 총 10분여동안 자료 기록이 진행되었다.

4. 실험결과

실험의 결과들은 가중평균농도와 체류시간의 분석으로 이루어졌다. 가중평균농도란 각 지점에서 실시간으로 기록된 농도들중에서 최고치를 찾아 이 시점으로부터 10초 전 후동안의 측정농도들의 산술평균치이다. 체류시간은 각 지점의 기록농도들에서 위험가스의 확산특성을 지닌 이산화탄소 절대농도 1%이상을 기록한 시간들의 합계이다. 가중평균농도와 체류시간의 자료들은 위험가스의 체류에 의한 해당지역의 화재, 폭발의 위험도의 예견뿐만 아니라, 독성학적으로 유해한 흡입가능량의 예견의 의미도 가진다.

8도로 경사진 지면위에 $R_{3D}(0.5:0.5:0.03 \text{ m})$ 의 3차원거칠기변수를 가진 구조물을 설치한 경우에 누출원으로부터 가까운 지점의 경우, 위험가스운의 중심부분에 확연한 계층구조와 최고 46 %의 높은 가중농도평균을 확인할 수 있으나, 주확산방향의 거리가 멀어질수록 계층구조가 파괴됨을 알 수 있다, 이는 기울기에 의해 위험가스운이 거칠기구조물의 위를 유동함에 따라 계층구조의 특성이 사라짐을 알 수 있다.

표 2는 역시 지면상의 가중농도평균을 전체실험의 종류에 따라 표현한 것으로 기울기와 거칠기가 증가함에 따라 위험가스의 이동량이 증가함을 나타내어준다. 예로서, $x = 2.0 \text{ m}$ 의 표준농도는 8 °의 기울기와 $R_{3D}(0.5:0.5:0.03 \text{ m})$ 를 지닌 비탈면의 경우 거칠기구조를 지니지 않은 편평한 지면에 비해 10배 이상의 표준농도를 나타내었다.

위험가스의 확산범위는 우선 0.4-0.6의 등농도곡선을 고려할 때 단지 기울기의 증가에 의해 주방향으로는 확산거리가 증가하나 수평면으로는 그 범위가 좁아짐을 알 수 있다. 거칠기변수를 함께 고려해볼 때 확산범위는 조금은 복잡한 양상을 나타낸다. 편평한 지면의 경우 거칠기구조물은 위험가스의 확산을 방해하고 있으며, 이에 의해 누출원의 근접부분에서는 가스농도가 오히려 평면의 경우 3배까지, 기울어진 지면의 경우 거의 6배까지 증가하고 있다(등농도곡선 0.8-1.0). 그렇지만 기울어진 지면의 거칠기가 증가할 경우, 확산되는 가스운은 기울기에 의한 지역간의 높이 차이에 의해 초기 누출시 가스운 자체의 확산추진력이 상실되더라도 2차적으로 x-방향으로 확산이동을 위한 추진력을 새로이 받게 된다. 이 추진력에 의한 가스운의 이동력은 거칠기구조물에 도달해 부딪히며 국소적인 미세난류를 발생시키며, 계층화되어 이동되던 가스운의 농도층간의 계층혼탁에 기여하는 것으로 보인다. 이로 인한 새로운 농도범위의 변화, 다시 정확히 말하자면 안전공학상으로 새로운 위험을 제공하는 농도의 상승을 일으킨다.

거칠기 변화에 따라 0도와 8도로 기울어진 지면차이를 보면, 0도로 기울어진 지면의 경우에는 주확산방향으로 거리가 증가함에 따라 체류시간이 점점 짧아지며 최종부분에는 이산화탄소가 증가스운으로 도달하지는 못한 것으로 나타나며, 8도의 지면위로는 기울기가 제공하는 지면의 높이차이가 위험가스운의 유동에 2차적 추진력을 제공해 거의 동일한 시간체류를 기록하고 있다.

위험가스운의 체류시간을 다시 각 지면거칠기의 강도에 따라 나타내 보면, 편평한 지면의 경우, 거칠기의 강도가 증가함에 따라 누출원으로부터 멀어짐에 따라, 위험가스운

의 체류시간이 줄어들며, $x = 2.5 \text{ m}$ 의 지역에는 도달하지도 못한 것으로 나타났다. 경사면의 경우에는, 이와 달리 거칠기구조물이 확산과 계층화의 혼란을 일으키고 있음이 체류시간의 분석을 통해 다시 입증되었다. 거칠기의 강도의 증가는 체류시간의 분명한 증가를 나타내었다.

5. 결론

1) 지면 기울기의 증가는 위험한 가스인 확산범위의 주유동방향(x)으로 증가시키나, 이에 따른 확산범위의 수평방향(y)의 감소를 가져오며, 누출원으로부터 멀어질 경우 수직방향으로의 농도상승을 동시에 유발하고 있다.

2) 지면 거칠기의 증가는 지면 기울기의 여부에 따라 서로 다른 영향을 나타낸다. 지면이 편평한 경우, 지면거칠기의 강도에 관여없이 거칠기구조물은 가스확산에 하나의 방해물로 작용하고 있으나, 누출원 근처의 농도증가는 안전상 또 다른 측면에서 고려되어야 할 사항이다.

3) 지면의 특성인자들이 조합되는 경우, 위험가스의 확산성은 지면이 기울어지고, 거칠기가 증가할수록 평탄한 지형에 비해 보다 많은 잠재위험을 지니고 있을 수 있다는 사실을 유추할 수 있다.

Table 1. Time progress of experiment.

time [s]	progress	comment
t = 0	start of measurement	measuring of basic concentration
t = 61	release of carbon dioxide	flow regulator ON (30 l/min)
t = 120	stop of release	release valve OFF
t = 620	stop of measurement	measuring of CO ₂ concentration

Table 2. Standardized weight-mean on the y-centre line for x- and z-distance (x und z in m).

θ	R_{3D}	(0:0:0)			(0.5:0.5:0.01 m)			(0.5:0.5:0.2 m)			(0.5:0.5:0.0 m)		
	$\begin{matrix} x \\ z \end{matrix}$	0.3	1.0	2.0	0.3	1.0	2.0	0.3	1.0	2.0	0.3	1.0	2.0
0 °	0.03	0.02	0.04	0.00	0.14	0.06	0.00	0.29	0.04	0.00	0.47	0.05	0.00
	0.015	0.24	0.18	0.02	0.64	0.20	0.02	0.71	0.11	0.00	0.76	0.13	0.00
	0.0	0.71	0.25	0.03	0.73	0.28	0.02	0.83	0.16	0.00	0.83	0.17	0.00
4 °	0.03	0.00	0.01	0.02	0.06	0.04	0.06	0.17	0.10	0.05	0.43	0.11	0.08
	0.015	0.14	0.16	0.10	0.42	0.29	0.17	0.59	0.36	0.11	0.65	0.34	0.14
	0.0	0.76	0.30	0.14	0.86	0.44	0.19	0.88	0.53	0.14	0.85	0.53	0.19
8 °	0.03	0.00	0.01	0.01	0.05	0.04	0.06	0.09	0.09	0.10	0.20	0.11	0.13
	0.015	0.11	0.14	0.10	0.18	0.20	0.13	0.37	0.31	0.24	0.49	0.35	0.27
	0.0	0.77	0.33	0.17	0.81	0.39	0.24	0.78	0.45	0.27	0.85	0.56	0.40

참고문헌

- 1) S. Hartwig, K. Woerfsdoerfer, "Experimentelle Untersuchung ueber die Schwergasausbreitung mit Stroemungshindernissen", Chem.-Ing.-Tech. 61(12), pp. 984-985, 1989.
- 2) M. Galinski, "Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Ausbreitung von Chlor anhand zweier vorgegebener Freisetzungsszenarien", Diplomarbeit, Uni. Wuppertal, 1993.
- 3) S. Hartwig, "Experimentelle Untersuchungen zum Stroemungsverhalten schwerer Gase und seine Bedeutung fuer industrielle Stoefaelle", Chem.-Ing.-Tech., 60(2), pp. 125-128, 1988.
- 4) S. Hartwig, G. Klumpe, "Ausbreitung schwerer Gase in dicht bebautem Industriegelaende", Staub-Reinhaltung der Luft, 51, pp. 169-174, 1991.
- 5) W. Theurer, "Ausbreitung bodennaher Emissionen in komplexen Bebauungen", Dissertation, TH-Karlsruhe, 1993.
- 6) K. Marotzke, "Physikalische Modellierung der Ausbreitung stoerfallartig freigesetzter schwerer Gase zur Abschaetzung von Gefahrenbereichen im bebauten Gelaende", Meteorologisches Institut Hamburg, 1993.
- 7) J. H. Spurk, "Dimensionsanalyse in der Stroemungslehre", Springer-Verlag Berlin

Heidelberg, 1992.

- 8) R.H. Leaver, T.R. Thomas, "Versuchsauswertung", Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Braunschweig, 1977.
- 9) M. Schatzmann, B. Leidl, J. Liedtke, "Validierung numerischer Modelle fuer Ausbreitungssimulationen in Stadtgebieten", Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, 59(9), pp. 349-355, 1999.
- 10) W. Theurer, "Typical building arrangements for urban air pollution modelling", Atmospheric Environment, 33, pp. 4057-4066, 1999.
- 11) Olaf Duewel, "Die Bedeutung der Bodenrauigkeit fuer die Bodenerosion durch Wind", Universitaet Goettingen, 1995.
- 12) Horst Sorg, "Praxis der Rauheitsmessung und Oberflaechenbeurteilung", Carl Hanser Verlag Muenchen, 1995.
- 13) Dove J.E., Frost J.D., "A Method for Measuring Geomembrane Surface Roughness", Geosynthetics International, 3(3), pp. 369-392, 1996.