

지하 공급관리소내 천연가스 고압분출시 환기효율성 검증

† 하종만 · 이정환 · 성원모*

한국가스공사 연구개발원, *한양대학교 지구환경시스템 공학과
(2002년 2월 27일 접수, 2002년 3월 21일 채택)

Investigation of Ventilation Efficiency for the Natural Gas High Pressure Release in an Underground Valve Station

J. M. Ha, J. H. Lee, W. M. Sung*

R & D Division, Korea Gas Corporation

*Dept. of Geosystem & Environmental Engineering, Hanyang University

(Received 27 February 2002 ; Accepted 21 March 2002)

요 약

지하공간에서 천연가스가 고압으로 분출될 때, 이에 응하여 작동되는 환기시스템이 전체 지하공간 내 유동에 미치는 영향은 매우 크며 이에 대한 적절한 설계는 안전성 확보측면에서 매우 중요한 일이다. 본 연구에서는 천연가스 분출 비상 시의 유동을 전산해석을 통하여 밀폐공간 내 천연가스의 농도분포 및 유동특성을 규명함으로써, 내부유동을 가시화하고 상부 환기팬 유·무에 따른 환기효율을 비교함으로써 환기시스템의 개선사항 및 설계방안을 제시하였다.

Abstract - This study was carried out for the purpose of safety evaluation about the ventilation system (according to the structure of confined room, the position and size of vent window, the amount of blowing air, e.t.c.), which is equipped in one of KOGAS underground valve stations. Particularly, the effect of the fans placed in the upper region was focused in detail. Numerical simulation was conducted in order to predict the features of flow pattern and the diffusion of natural gas concentration. This work examined the ventilation system and resulted in proposing an optimal design of ventilation system.

Key words : Natural gas release, Underground valve station, Ventilation system, Safety, Numerical simulation

1. 서 론

천연가스는 석유의 대체에너지원일 뿐만 아니라 청정에너지로서 그 수요가 날로 급증하고 있다. 가스산업의 발전과 가스이용의 획기적인 증가로 과거보다 현저히 많은 천연가스가 공급되고 있으며, 이에 따라 안정적인 공급뿐 아니라 가스시설의 안전측면이 상당한 관심으

로 대두되고 있다. 본 연구에서 다루고자 하는 대상은 한국가스공사에서 운영중인 천연가스 지하 공급관리소로서, 밀폐공간내 천연가스의 누출시 폭발위험성을 완화하기 위해 지하 밀폐형에서 상부 개방형으로 공사를 완료하여 개방공간화함으로써 지하공간의 안전성을 확보한 시스템이다. 본 연구에서는 지하 공급관리소의 환기 시스템에 대한 내부유동을 가시화하고 상

부 환기팬 유무에 따른 환기효율성을, 공학적인 측면에서 검증하고 이를 현장에 적용하여 환기시스템의 적정성 여부[1] 및 경제성 산출에 대한 근거자료로 활용하고자 하였다. 또한 향후 지하 공급관리소 설계시, 고려해야 할 사항을 도출하고 그 결과를 반영하여 보다 안전하고 효율적인 환기 시스템을 확보하고자 한다.

유체유동에 대한 연구는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어왔으며 현재도 진행중이나[2~4] 밀폐공간에서 천연가스의 내부유동에 대한 연구는 부족한 형편이다. 일반적으로 유체역학에서는 유체 입자 하나 하나를 추적하면서 해석하는 Lagrangian 관점으로는 문제해결의 어려움이 많으므로 보통 관심이 있는 영역을 정하고서 그 영역에 대해서 질량, 운동량, 에너지 등의 보존 법칙을 적용함으로써 밀도, 속도, 압력, 온도 등의 물리량들을 얻게 된다. 그러나 이러한 Eulerian 관점에 의해 방정식을 유도하면서 나타나는 비선형 (nonlinear) 항 때문에, 형상이 아주 간단한 문제를 제외하고서는 해석적인 해 (analytic solution)를 얻기는 거의 불가능하다. 따라서 특수하거나 복잡한 형태의 형상에 대한 문제를 해결하기 위해서는 관심 영역을 수많은 작은 영역으로 나누고, 각각의 작은 영역에 보존법칙들을 적용하여 근사적인 수치 해를 얻을 수 있는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics)의 도입이 필수적이다[5,6]. 따라서 본 연구에서는 FEVM (Finite Element Volume Method)이 도입된 유체유동해석 코드인 FLUENT를 사용하여 실험으로 수행하기 어려운 지하 공급관리소의 가스누출 상황을 고려하여 지하공간 내에서의 천연가스 확산 농도 분포 및 유동특성을 규명함으로써, 내부유동을 가시화[7,8]하고 지하 공급관리소 환기시스템의 개선사항을 도출함으로써 적정 환기시스템의 설계방안을 제시코자 하였다.

2. 기본이론 및 해석모델

2.1. 지배 방정식 및 가스 분출량 계산

지배방정식으로는 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식, 종보존방정식 (balance equation of species)이 사용되고, 부력을 고려한 Boussinesq 모델[9]을 채택하였다. 보조방정식으로는 압축성유체의 상태방정식[10], 난류현상을 계산하기 위한 $k - \epsilon$ 방정식, 그리고 물질전달에서의 확산계수 결정을 위한 gas

kinetic theory 등이 사용되었다. 관심 영역을 수많은 작은 영역으로 나누고, 각각의 작은 영역에 보존법칙들을 적용하여 근사적인 수치해를 얻는 FEVM (Finite Element Volume Method) 접근에서, 지배방정식을 이산화 (discretization)하여 반복계산 할 때의 압력치리는 S. V. Patankar[11]가 제안한 SIMPLE 알고리즘이 널리 사용되고 있으며, 이의 상용 패키지 (package)인 FLUENT를 사용하여 계산을 수행하였다.

배관에서 천연가스가 고압으로 누출될 때, 대부분의 압력에너지는 운동에너지로 전환되며 등엔트로피 거동의 가정이 타당하므로 기계적 에너지 수치식에서 출발한 다음의 식 (1)에서 배관에서 누출되는 천연가스의 양을 계산할 수 있다[12].

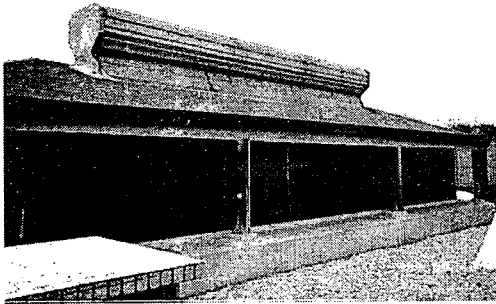
$$(Q_m)_{choked} = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{\gamma M}{R_u T_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}} \quad (1)$$

2.2. 모델형상 및 격자계

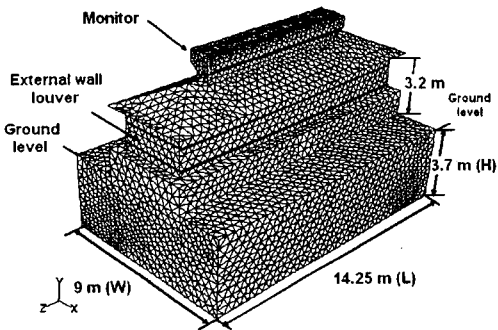
Fig. 1 (a)는 지하 공급관리소 외관을 보여주는 사진이며, Fig. 1 (b)는 이러한 형태를 고려하여 전산해석을 할 수 있도록 만들어진 외부형상의 표면격자 및 실제 치수이다. Fig. 2 (a)는 지하 공급관리소 내부의 전경사진이며, 이에 대한 내부의 시설 및 배관의 표면 격자를 Fig. 2 (b)에 도시하였다. 실제상황에 보다 가깝게 만들기 위하여 설계도면과 현장실측을 통하여, 정확한 지하 공급관리소의 크기, 시설물의 위치, 유동의 장애물이 될 수 있는 배관 및 기둥을 모두 고려하였고, 이러한 복잡한 형상을 구현하기 위해 표면격자로는 삼각형 격자 (triangular mesh), 내부공간격자로는 삼각뿔 격자 (tetra hedral mesh)가 이용되었다.

지하 공급관리소의 내부공간은 크게 세 부분으로 구성되어 있는데, 14.25 m (L)×9 m (W)×3.7 m (H) 크기의 완전히 지하에 묻혀있는 부분과, 전후좌우 네 방향으로 개구율 50%의 환기 루버 (louver)로 이루어져 대기 중에 개방시킨 측면개방부분과, 최상부의 소위 모니터 (monitor)부분이다. 모니터는 지붕 환기구로서 상부 환기팬을 지지하고 우천 시 빗물의 인입을 방지하기 위한 설비이다. 지하 공급관리소 내부 전체 공간의 체적은 약 630 m³이며,

지하공간 하부에 2대의 강제송풍기가 Fig. 1의 (b)와 같이 동일 벽면에 설치되어 있다. 송풍기의 용량 ($1.2 \text{ kW} \times 2 \text{ units}$)은 대당 $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 송풍능력을 보유하고 있어 가스의 누출이 생기면 초당 5 m^3 의 외부공기를 유입 환기시킬 수 있다. 또한 모니터 안에는 지하 공급관리소 최상부 공간에 정채되어있는 누출가스를 외부로 배출시키기 위한 용도로 대당 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 용량을 가진 4개의 환기팬이 추가로 설치되어 있다. 천연가스가 누출되는 비상시의 환기는 누출된 가스를 가스 검지기가 포착하면 지하공간 하부에 위치한 2대의 송풍기가 자동 작동되면서, 신선한 공기가 내부로 유입되고 강제환기가 형성된다. 강제송풍된 공기와 누출가스는, 대기 개방된 상부의 4측면과 모니터의 환기팬을 통해 바깥으로 배출된다. 지하 공급관리소의 환기는 평상시 대기 개방부분의 공기 유·출입을 통하여 자연환풍시키고 있다.

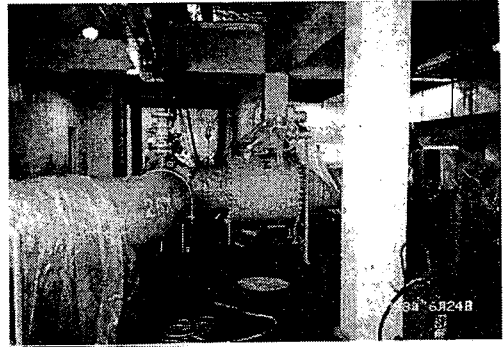


(a) Outside view

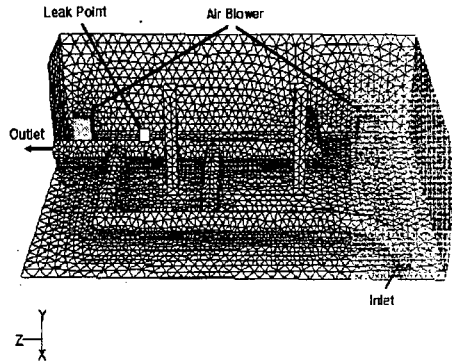


(b) Exterior surface mesh and size

Fig. 1. Exterior geometry and mesh of underground valve station.



(a) Inside view



(b) Interior surface mesh

Fig. 2. Interior geometry and mesh of underground valve station.

2.3. 시나리오의 선정 및 경계조건

천연가스의 내부유동의 형태는 배관에서의 누출위치와 누출직경의 크기에 따라 달라질 것이므로 환기효율성을 검증할 수 있는 경우의 수는 여러 가지일 것이다. 그러나 본 연구에서는 예상되는 상황 중, 가장 가능성이 높으면서도 가장 위험한 경우에 대하여 전산모사하였다. 일반적으로 배관에 갑작스런 구멍이 생겨 천연가스가 고압 분출되는 경우는 생각하기 힘들고, 배관의 플랜지 이음부분에서 기밀이 충분치 않은 부위에서 조금씩 누설되는 경우는 발생할 가능성이 있다. 그러나 극히 미량이 누설될 뿐이며, 공기 중에 소산되면 폭발하한(5 vol %)에도 접근하지 못한다. 본 연구에서는 발생 가능한 누출 시나리오로써, 정압기 일정거리 하류의 배관부위를 분출위치로 선정하였다. 이는 정압기 후단부 배관에 세관으로 부착

된 계측기의 용접부위 불량과 그 파손으로 배관에서 이탈되는 사고를 고려한 것이며, 이로써 고압분출의 위치와, 분출압력, 분출구명직경은 결정되어질 수 있다.

가스누출은 Fig. 2의 (b)에서 보는 바와 같이 정압기 후단 배관의 계측기 용접부에서 분출되며 이때 배관압력은 1.76 MPa 이고 분출되는 구멍직경은 3.5 cm이다. 천연가스는 메탄 90%, 에탄 7%, 프로판 3%의 성분으로 가정하였으며, 분출부위에 대한 경계조건은 식 (1)에서 얻은 누출량 (8.087 kg/s)으로부터 분출속도를 계산하여 204.5 m/s의 속도조건을 주었고, 천연가스의 온도는 288 K로 가정하였다. 지하 공급관리소 내부로 강제 송풍되는 공기의 경계조건은 송풍기 풍량에서 계산된 속도 3.26 m/s를 주었고, 대기개방 4 측면은 대기압의 압력조건을 이용하였다. 모니터 내부에 위치한 배기용 환기팬은, 팬을 지나면서 발생한 순간상승 압력 500 Pa을 경계조건으로 입력하였다. 가스누출 비상시의 지하 공급관리소 내부 환기형태의 적절성에 궁극적 관심이 있으므로 정상상태 (steady-state flow)에 대하여 계산하였다.

3. 결과 및 해석

가연성인 천연가스는 비중 (약 0.6)이 공기보다 가벼워 누출 시 자연적으로 위로 상승하게 된다. 이때 가스 누출공간이 대기 중이 아니라 밀폐공간일 경우에는 누출가스가 상부에 체류하게되고 점화원과의 공존 시 폭발의 위험성이 있으므로 신속히 외부로 배출시켜 환기시켜야만 한다. 본 연구에서는 하부 강제흡기, 상부 강제배기 형태의 혼합형 환기시스템을 적용하고 있는 천연가스 지하 공급관리소에 대하여 상부 강제 환기팬 작동 유·무에 따라 공간 내부의 유동 형태를 상대 비교하고 내부공간에 남아 있는 천연가스 잔존량을 서로 비교함으로써, 환기효율의 적절성을 판단하고자 하였다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 천연가스 누출시 상부 환기팬이 작동하지 않을 경우로써, 앞서 언급한 시나리오 및 경계조건을 토대로 3차원 전산모사를 수행한 후 Y-Z 평면으로 절단하여 분속도 크기 선도 및 천연가스 농도분포 곡선이다. Fig. 3의 (a)를 볼 때, 공간 하부 양단에서 나타나는 원형의 등속영역은 3.26 m/s의 속도로 급기되는 송풍기로 인한 현상이며 공간 중앙부위는 천연가스 누출의 분출속도에 영향을

받아 또 하나의 빠른 속도영역을 구성하고 있다. 천연가스 농도분포 곡선인 Fig. 3의 (b)를 보면 공간 하부에 위치한 송풍기를 통해 외부에서 유입되는 공기가 누출가스를 상부로 밀어 올리며 일부 혼합되고 외부로 배기되는 현상을 볼 수 있으나, 공간 하부 양쪽 끝단에서 16~18 vol %의 천연가스가 환기되지 않고 국부적으로 체류되는 현상이 확인된다.

Fig. 4의 (a)와 (b)는 상부 환기팬이 작동할 경우의 속도 크기 선도 및 천연가스 농도분포 곡선이다. Fig. 3의 (a), (b)와 비교하여 볼 때 상부의 환기팬 유·무에 따른 속도장의 형태 및 크기는 상부 환기팬 주위 영역을 제외하고는 별로 나타나지 않는다. 이는 상부 환기팬이 전체 공간의 유동에 큰 영향을 끼치지 못하고 있다는 것을 의미한다. 농도분포곡선의 경우는 모니터 아래 지붕 왼쪽 위치에 6~8 vol %의 천연가스 농도 분포대가 형성되는 정도의 환기개선은 이루어지지만 공간하부 양쪽 끝단의 국부적 체류는 여전히 잔존하고 있다.

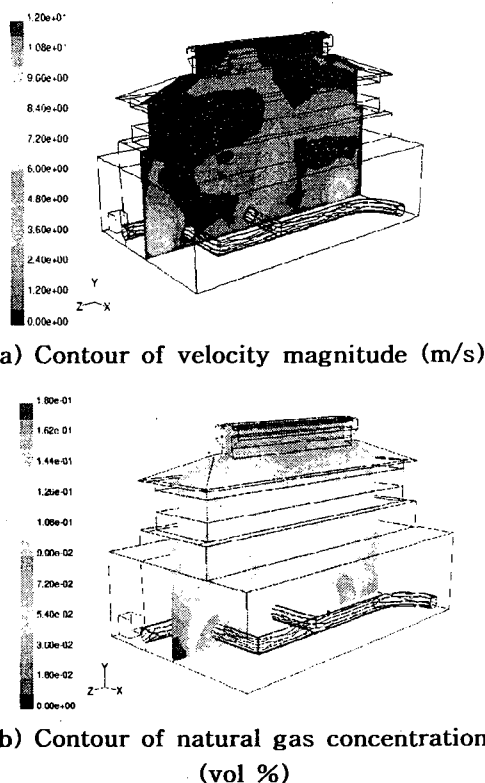


Fig. 3. Case in upper fan not working.

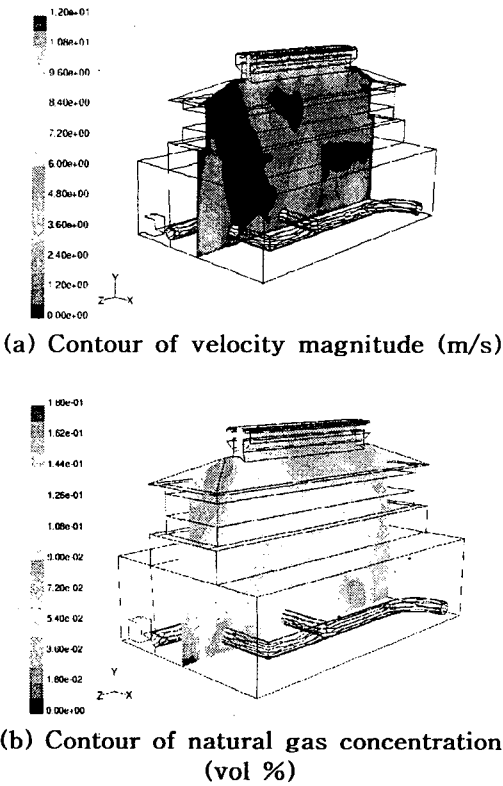


Fig. 4. Case in upper fan working.

따라서 모니터에 부착된 환기팬 주변의 유동에 대한 상세한 분석이 필요해진다. Fig. 5는 지하 공급관리소 지붕 위에 위치한 최상부의 모니터를 X-Y 평면으로 투영한 내부의 형상 및 환기팬 주위의 유동 속도벡터이며 환기팬을 통한 유체의 유동 경로와 크기를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5를 단순화시킨 모니터 단면도이다. 팬을 통과한 유체는 모니터 지붕에 부딪혀 방향이 꺾인 후 비들이침 방지차양 (rain preventer)을 지나서 양쪽 개방된 부분을 통해 외부로 빠져나가지만 Fig. 7의 Y-Z 평면으로 투영한 팬과 팬 사이의 유동을 보면, 지붕에 부딪힌 공기가 하향하여 다시 내부로 들어가는 것을 볼 수 있다. 환기팬에서 나온 유체는 일부 외부로 빠져나가지만 대부분은 환기팬 주위에서 계속 맴돌이를 일으키면서 빠져나가지 못하고 순환 (circulation)하고 있기 때문에, 상부 환기팬의 설치목적인 최상부에 정체되어있는 천연가스를 빨리 배출시키려는 기대효과를 얻

지 못하고 있는 것이다. 이러한 비효율성은 Table 1의 지하공간내 남아있는 천연가스의 양을 비교함으로써 정량적으로 확인 할 수 있다. 설정된 시나리오의 상황에서 팬 작동 시를 작동치 않는 경우와 비교해 볼 때 103.1 kg에서 98.7 kg으로, 단지 4.2 %의 환기량 증가만 볼 수 있을 뿐이다.

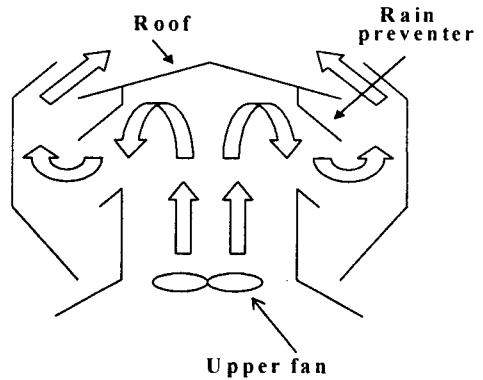


Fig. 6. Monitor geometry and ventilation path.

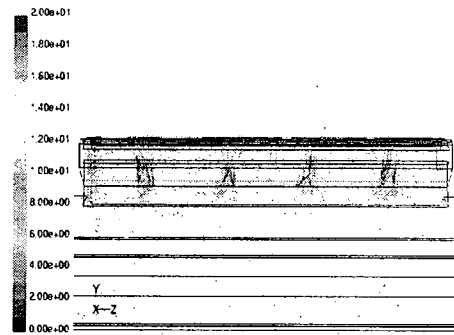


Fig. 7. Velocity vectors in upper fan region - side view (m/s)

Table 1. Remaining natural gas amount in space (under the 1 atm condition).

	Upper fan not working	Upper fan working	Change in upper region geometry
Total Mass	103.1 kg	98.7 kg	80.5 kg

이러한 결과를 통해 현재와 같은 상부의 환기구에서 상부 환기팬의 역할은 그리 크지 않다고 볼 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 상부 환기구의 구조를 변경하여 순환영역을 감소시키고 현재의 환기효율을 증가시킬 수 있는 구조를 제안하였다. 변형된 상부 환기구구조가 누출가스의 국부 체류 가능성을 줄이고 원활한 환기를 유도함으로써 위험성을 완화시켜줄 수 있는 구조로 판단된다.

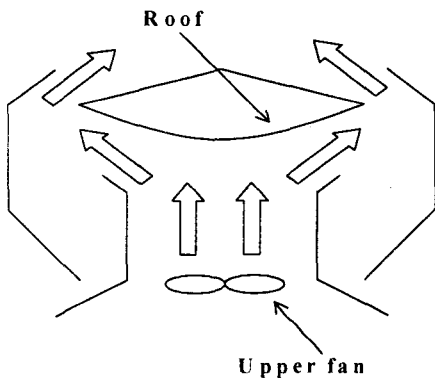


Fig. 8. Improved design and ventilation path.

4. 결 론

본 연구에서는 지하 반밀폐공간에서 천연가스 누출 시, 그 확산거동 및 강제송풍에 따른 내부유동을 전산모사하여 해석하였다. 지하 공급관리소 내 4개 상부 환기팬의 유·무에 따른 환기효율성에 대해 비교 분석함으로써 개선사항을 도출하였고 이에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 현재 주어진 환기시스템에서의, 상부 환기팬 작동에 따른 환기효율성 향상은 그리 크지 않다. 그 이유로는 상부 환기팬 주위의 유동을 살펴볼 때, 환기팬에서 빠져 나온 유체입자들이 환기팬 주위에서 계속 순환을 일으키며 외부로 빠져나가지 못하고 있음에 기인한다고 할 수 있다.
- 2) 향후 지하 공급관리소 건설시, 현재와 같은 상부 환기구구조를 유지하고자 한다면 본 연구에서 제안한 상부 환기구의 구조로 변경하여 순환영역을 줄이면 현재의

환기효율을 크게 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 하부영역 중 강제송풍기가 직접적으로 영향을 미치지 못하는 부분은 상대적으로 유동정도가 약하므로 그쪽에서 가스가 누출될 경우에는 환기효율이 상당히 떨어질 것으로 예상된다. 따라서 공간의 상황에 따라 송풍기의 적정 위치를 결정해 환기가 가장 잘 될 수 있는 유동형태를 만들어 주는 것이 중요하며, 지하공간의 크기와 설비의 위치와 형태에 따른 송풍기의 최적 위치결정에 관한 연구가 향후 진행되어야 할 것이다.

Nomenclatures

Q_m = 누출량 (kg/s)

C_0 = 누출계수

A = 누출 단면적 m^2

P_0 = 누출압력 Pa(N/m²)

ν = 열 용량비 (비열비) C_p / C_v

M = 기체 분자량

R_g = 이상기체 상수 (J/mol K)

T_0 = 누출전 온도 (°K)

참 고 문 헌

1. Etheridge, D., Sandberg, M., "Building Ventilation: Theory and Measurement", 1996, John Wiley & Son
2. Darby, S, Pool, G. "An Experimental Study of Natural Gas Accumulation Following High and Low Pressure Releases Under Ventilated and Unventilated Conditions", GRC R 1811, July 1997
3. "원관내 유동에서의 복사 및 강제대류 열전달에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 1990.11. Vol.14, No.6, pp.1652-1660 1225-5963
4. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., "Transport Phenomena", 1960, John Wiley & Sons
5. Shapiro, Ascher, H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid

- Flow - Volume I", 1953, John Wiley & Sons
6. E. Espi, Ph. Berene, P. Duverneuil "Using CFD to understand the air circulation in a ventilated room", Computers chem. Eng. Vol. Suppl., pp. s751-s754, 1998
 7. Tetsuaki Takeda, Makoto Hishida, "Studies on molecular diffusion and natural convection in multicomponent gas system", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 3, pp. 527-536, 1996
 8. "분사가스의 확산거동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 Vol. 13, No.6, 1989, p.1215-1222
 9. Incropera, F.P., De Witt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 1990, John Wiley & Sons
 10. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 1980, Hemisphere Publishing Corporation
 11. Cumber, P.S., Fairweather, M., Falle, S.A.E.G, Giddings, J.R., "Predictions of Impacting Sonic and Supersonic Jets", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, 1997, pp. 83-89
 12. Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", 1990, Prentice Hall PTR