

운동량제어 수소제트가 부양제트로 천이되는 현상에 대한 실험적 연구

원상하*, 정석호*, 김종수^{†**}

* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

** 한국과학기술연구원 대기자원연구센터

An Experimental Study on the Transition of Momentum Controlling Hydrogen Jet to Buoyant Jet

S. H. Won*, S. H. Chung* and J. S. Kim^{†**}

* School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University
San 56-1 Shinlim-Dong, Kwanak-Gu, Seoul, 154-744 KOREA

** Air Resources Research Center, Korea Institute of Science and Technology
39-1 Hawolgok-Dong, Songbuk-Gu, Seoul, 136-791 KOREA

ABSTRACT

Transition of momentum-controlling hydrogen jet to buoyant jet is experimentally investigated in order to develop a prediction model for the moving trajectory of hydrogen leaked from hydrogen devices. In the experiments, room-temperature helium, that has a similar density to the hydrogen leaked from high pressure tank, is horizontally injected through a 4mm tube and its moving trajectory is visualized by the shadowgraph method. The moving trajectories are found to be parabolic, thereby exhibiting increasing influence of the buoyancy. In analyzing the experimental results, the vertical movement is assumed to be controlled by the buoyancy while the horizontal movement is controlled by the air entrainment caused by the initial momentum. The rescaling based on this assumption yields a single curve fitting to the all experimental results.

주요기술용어 : Vapor Cloud Explosion (증기운 폭발), Momentum Controlling Jet (운동량제어제트), Buoyant Jet (부양확산), Shadowgraph (세도우그래프)

1. 서 론

[†] Corresponding author : kimjs@kist.re.kr

발효됨에 따라서 기후변화협약에 대응할 수 있는 새로운 에너지시스템을 수립하는 것이 전세계적으로 매우 중요한 과제로 떠올랐다. 여기에서 2030년대 중반경에는 석유의 생산량은 최대치를 이를 것으로 예상되고 있다. 이러한 생산량의 정점을 지난 후에는 석유자원이 시장의 상황에 능동적으로 대처할 수 있는 역량을 상실하여 핵심적인 에너지자원으로서 위치를 상실할 것으로 예상되고 있다. 이 예측에 발맞추어 수소에너지가 대기오염문제, 기후변화협약문제 및 석유자원의 불확실성에 대한 대응 방안으로 유용한 에너지전달매체로 부상하고 있다.

이와 같은 수소에너지시스템의 등장에도 절실한 필요성에도 불구하고, 수소의 안전성은 수소에너지 보급과정에서 마주칠 가장 중요한 걸림돌의 하나로 인식되고 있다. 각국에서는 이에 대한 대비책을 마련하기 위한 독자적 또는 국제적 노력을 경주하고 있다.

CNG의 보급과정에 대한 경험을 바탕으로 할 경우, 수소는 일반대중이 걱정하는 것보다는 훨씬 위험하지 않을 것으로 예측되고 있다. 비록 수소의 반응성 및 폭발성이 모든 탄화수소계 연료 가운데에서 가장 높지만, 폭발사고의 사전 조건이라고 할 수 있는 폭발성 혼합기의 축적 가능성이 수소의 가벼운 특성에 기인하는 부양확산특성으로 인해서 매우 낮기 때문이다. 이로 인해 실제적으로 대규모 저장 및 분배시설에서 폭발사고가 발생할 가능성이 희박할 것으로 판단되고 있다. 그럼에도 불구하고, 수소의 높은 반응성은 CNG의 안전시스템보다 더 높은 차원의 안전시스템을 요구하고 있다는 점에서 수소의 안전에 각별한 주의가 요구된다.

수소는 낮은 분자량에 기인하는 부양확산특성으로 개방공간에서는 폭발사고를 일으킬 수 있는 증기운의 축적가능성이 매우 희박하므로, 수소사고의 가능성은 오히려 실내공간에서 발생할 수 있는 폭발사고로 눈을 돌릴 필요가 있다. 이러한 경우, 수소의 누출 및 확산은 매우 작은 공간에서 발생하는 3차원 비정상 특성을 보이게 되어, 기존

의 대기확산에서 주로 사용되었던 가우시안 확산모델을 적용할 수 있는 타당성을 상실하게 된다¹⁾. 따라서 작은 폐쇄공간에서 수소의 누출 및 확산을 예측할 수 있는 새로운 도구가 필요하게 된다.

폐쇄공간에서 발생하는 수소의 부양확산에 대한 3차원 비정상 수치모사도구로서 Lagrangian 수치모사 기법이 제시된 바가 있다²⁾. Lagrangian 확산모델은 공기보다 무거운 유해화학물질의 3차원 대기확산을 모사하기 위한 도구로서 개발되었다³⁻⁴⁾. 이 모델은 부양확산에 대해서는 중력에 의한 영향을 반전시켜서 활용할 수 있음을 보여준 바가 있다. 특히 Lagrangian 수치모사에서는 계산격자를 생성시킬 필요가 없다. 또한 특성길이의 차이에서 발생하는 Numerical Stiffness가 없어서 일반 사용자가 간단한 메뉴조작을 통해서 정교한 3차원 수치모사를 실시할 수 있는 장점이 있다. 그럼에도 불구하고, 현재의 Lagrangian 수치모사는 확산물질이 유동장과 상호작용이 없는 피동적 확산에만 적용될 수 있어서 초기의 운동량이 큰 경우에는 적용될 수 없는 결정적 단점이 있다. 특히 수소가 고압용기에서 누출될 경우의 Reynolds 수는 작지 않은 것으로 추산되고 있으며, 결과적으로 누출된 수소제트의 초기상태는 운동량에 의해서 제어되는 능동적 제트로 분류될 수 있다. 따라서 주변 공기와 충분히 희석된 이후에나 부력에 의해서 제어되는 피동적 부양제트로 천이될 것이다.

본 연구에서는 운동량에 의해서 제어되는 수소제트가 부력에 의해서 제어되는 피동적 부양제트로 천이되는 과정을 연구하여, Lagrangian 수치모사기법을 이용한 수소의 부양확산에 대한 수치모사의 초기조건으로 활용될 수 있는 천이과정을 밝혀냄과 동시에 누출된 수소가 폐쇄공간 내에서 도달할 수 있는 위치를 예측하여 정확한 수소-공기의 예혼합증기운의 형상에 바탕을 둔 수소사고의 위험성평가에 구체적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험내용 및 방법

2.1. 실험조건의 설정

본 연구에서는 제트의 누출물질로 헬륨을 선정하여 실험이 수행되었다. 수소제트의 천이현상에 헬륨을 매체로 사용한 이유는 (1) 실험의 안정성 뿐만 아니라 (2) 실제 누출된 수소의 물성치가 헬륨에 더욱 가깝기 때문이다. 따라서 실험에 들어가기에 앞서 수소의 누출상태에 대한 고려를 하였다. 먼저 수소의 누출을 예측을 가장 일반적인 저장형태인 고압가스탱크에 대해서 적용하였다. 높은 압력의 가스가 작은 구멍을 통해서 누출될 경우, 구멍의 최소단면적 구간에서 초킹상태로 누출되게 된다.1) 파열된 구멍의 초킹조건은 정체엔탈피와 엔트로피의 보존관계를 통해서 얻을 수 있다. 누출량을 예측하기 위해서는 고압조건에서 수소의 물성치가 필요하게 되며, 본 연구에서는 NIST의 물성치 DB를 활용하고 있다.5) NIST의 DB는 수소의 물성치를 400K 및 1200기압까지 제공하고 있다.

Fig. 1은 300K의 저장온도의 탱크에서 초킹조건에서 초기조건에 대한 압력비, 온도비, 밀도비 및 음속을 초기저장압력에 따라서 변화하는 관계를 나타내고 있다. 저장된 수소를 이상기체를 가정할 경우, 초킹조건은

$$P_0/P_{CH} = \{(\gamma + 1)/2\}^{\gamma/(\gamma-1)} \approx 2 \quad (1)$$

$$T_0/T_{CH} = (\gamma + 1)/2 \quad (2)$$

$$\rho_0/\rho_{CH} = \{(\gamma + 1)/2\}^{1/(\gamma-1)} \quad (3)$$

로 주어질 수 있다. 여기에서 T 는 온도, P 는 압력, ρ 는 밀도를 나타내며, 하첨자 “0” 및 “CH”는 각각 초기저장상태 및 초킹상태를 나타내며, γ 는 비열비로서 매우 넓은 범위에 걸쳐서 1.4에 매우 가까운 값을 나타낸다. 정확한 물성치를 통해서 얻어진 초킹조건의 압력 및 온도는 이상기체를 이용한 경우와 거의 유사한 예측을 제시하고 있지만, 밀도는 고압조건에서 Fugacity가 1에서 벗

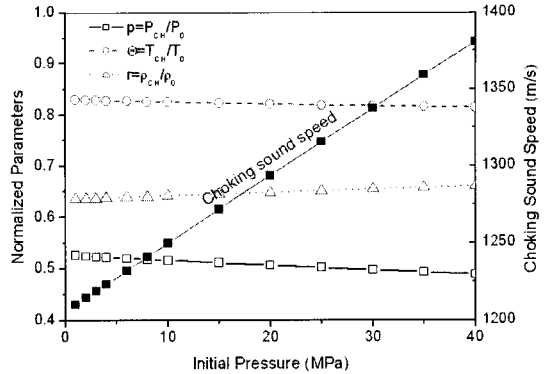


Fig. 1. Variation of hydrogen choking state with storage pressure

어남에 따라서 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 밀도의 예측에 각별한 주의가 필요하다. 또한 초킹조건에서 음속 (a)은 우리에게 잘 알려진 $a_{CH} = \sqrt{\gamma RT_{CH}}$ 대신에 $a_{CH} = \sqrt{\gamma P_{CH} / \rho_{CH}}$ 를 채택할 경우, 매우 정확한 근사치를 얻을 수 있다. 따라서 밀도에 대한 보정만 실시할 경우, 이상기체식을 이용한 누출량의 예측도 매우 정확한 누출율을 제공할 수 있다.

위의 누출률 예측조건을 고압의 수소저장탱크의 조건인 300K 350기압에 적용할 경우, 초킹상태의 압력은 약 175기압 온도는 250K 정도로 예측된다.

한편 누출된 수소제트는 제일 먼저 대기압으로의 단열팽창하게 된다. 단열팽창은 열역학적인 현상에 의해서 제어되므로 제트의 열 및 물질전달보다 먼저 발생하게 된다. 단열팽창후의 상태는 에너지보존을 통해서 확인될 수 있으며,

$$U_{CH} = U_{Jet} + WU_{Jet} + \frac{P_{atm}}{\rho_{Jet}} (1/\rho_{Jet} - 1/\rho_{CH}) \quad (4)$$

로 주어질 수 있다. 고압의 용기에서 누출된 후에는 아직도 압력이 높으므로, 대기압과 비교하여 밀도가 매우 높은 상태를 유지하고 있다. 따라서

이러한 조건을 적용하면, 위의 식 (4)는

$$U_{CH} \approx H_{Jet} \quad (5)$$

로 더욱 단순화될 수 있다. 또한 위의 식에 이상 기체방정식과 함께 초킹조건 및 에너지 보존식을 적용할 경우, 초기제트의 온도는

$$T_{Jet} = T_0 / 2 / \gamma (1 + \gamma) \quad (6)$$

의 근사식으로 주어질 수 있게 된다. 식 (6)을 적용할 경우, 300K, 350기압으로 저장된 수소가 대기로 누출될 경우, 약 180K의 온도를 보일 것으로 예측된다. 결과적으로 누출된 수소의 밀도는 수소보다는 오히려 헬륨에 더 가까운 물리적 상태를 나타내기 때문에, 본 연구에서는 수소의 확산에 상온의 헬륨으로 대체하여 실험을 수행하였다.

위의 관계식을 이용하더라도, 초킹상태의 수소는 음속에 가까운 약 1300m/sec의 높은 속도로 분출되게 된다. 그러나 이러한 수소의 운동은 주변의 대기와의 상호작용으로 매우 급격히 감소되게 되나, 이러한 아음속영역에서 발생하는 제트의 천이현상은 매우 복잡한 수치모사를 요구하므로, 여기에서는 초킹상태에서 누출된 이후에 작은 튜브를 거쳐서 충분히 감속된 후에 대기로 배출된다고 가정하여, 바로 튜브에서 대기로 토출되는 저속의 헬륨 수평제트에 대한 실험을 수행하고 있다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 상온의 헬륨을 내경 4mm의 원형관에서 수평으로 분사한 후에 부력에 의해서 수직방향으로 전환되는 궤적을 추적하여 부양제트의 천이현상을 관찰하였다.

부양제트의 운동궤적을 추적하기 위해서 Fig. 2와 같은 가시화 시스템이 채택되었다. 실험에서 채택된 가시화 방법은 Shadowgraph기법으로서, 밀도의 구배를 가시화하기 된다. Shadowgraph의

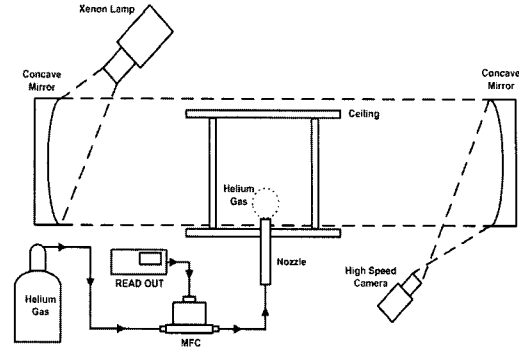


Fig. 2. Schematics of visualization for buoyant helium Jet

광원으로는 제논 램프가 사용되었으며, 가시화된 장면은 고속카메라를 이용하여 녹화된 후에 헬륨 제트의 운동궤적이 측정되었다.

고압의 헬륨가스는 MFC를 통해서 유량을 제어할 수 있으며, 수평으로 분사된 헬륨제트는 약 30cm×30cm의 면적에 대해서 가시화를 할 수 있다. 실험에서 채택된 헬륨의 분사속도는 4m/s ~ 13m/s의 범위를 갖고 있으며, 이에 해당되는 Reynolds수는 130~420정도의 범위에 해당된다. 즉, 운동량이 점성항 보다 매우 큰 상태이므로, 제트의 초기 운동 특성은 운동량에 의해서 제어될 것임을 보여주고 있다. 보다 유용한 실험결과를 생산하기 위해서는 더 큰 분사속도가 채택될 필요가 있지만, 가시화 면적이 제한되어 분사속도의 증가를 제한하고 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

수행된 실험에서는 4mm 직경의 관에서 분사된 헬륨의 초기분사속도를 변화시키면서 대기에 주입하여, 제트가 부양확산으로 천이되는 경향을 보여주고 있다. Fig. 3은 Shadowgraph를 통해서 촬영한 헬륨제트의 천이과정에 대한 사진들로서, 부력에 의해서 제트의 궤적이 포물선 형태로 변하는 과정을 보여주고 있다.

수평으로 분사된 헬륨제트의 궤적을 측정한 결

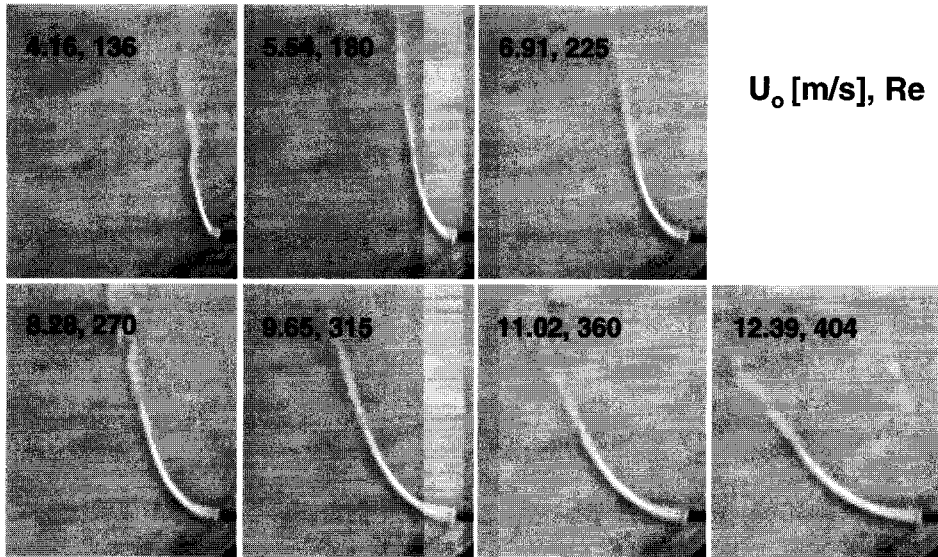


Fig. 3. Horizontally injected helium jets visualized by shadowgraph. (The numbers at the left corner are the injection velocity and reynolds number)

과가 Fig. 4에 도시되어 있다. Fig. 4의 결과에서 보여지는 바와 같이 헬륨제트의 모든 궤적은 포물선과 매우 잘 일치하는 것을 보여주고 있으며, 단지 초기의 분사속도에 따라서 2차함수의 증가율에서만 차이를 보이고 있을 따름이다. 이와 같이 속도에 관계없이 유사한 특성을 보인다는 점에서 하나의 관계식으로 정립할 수 있을 수도 있다.

3.1. 상관변수

헬륨제트의 부양확산을 제어하는 과정에는 여러 가지의 변수가 관여되어 있다. 수평방향 (x)의 운동을 제어하는 주요 변수로는 초기의 분사속도 (U)가 있으며, 부력에 의해서 영향을 받는 수직방향 (y)의 운동은 중력가속도 (g)와 밀도비의 차 ($1-r=1-\rho/\rho_{air}$)가 관여할 수 있다. 여기에서 밀도비의 차는 공기와 부분적으로 혼합된 헬륨의 부력의 상대적 기여도를 나타낸다. 또한 제트의 순간 직경 (D)도 제트의 운동에 관여하는 중요한 변수의 하나이다. 한편 실험조건에 대한

Reynolds 수가 비교적 큰 값이므로, 점성계수의 역할은 비교적 작을 것이므로 여기에서는 고려하지 않고 있다.

위에서 제시된 변수들에 대해서, 수직방향의 운동과 수평방향의 운동에 관련된 변수들을 각각 조합할 경우, 운동궤적은

$$\frac{y}{(1-r)g} = f\left(\frac{x}{U}\right) \quad (7)$$

의 형태로 주어질 수 있다.

3.2. 제트의 운동궤적

헬륨제트가 튜브에서 분사된 직후의 운동은 초기의 분사속도 및 부력에 의해서 제어될 것이다. 따라서 수평방향의 운동과 수직방향의 운동은

$$x = Ut \quad (8)$$

$$y = \frac{1}{2}(1-r_{Jet})gt^2 \quad (9)$$

의 궤적을 나타낼 것이다. 여기에서 밀도비에

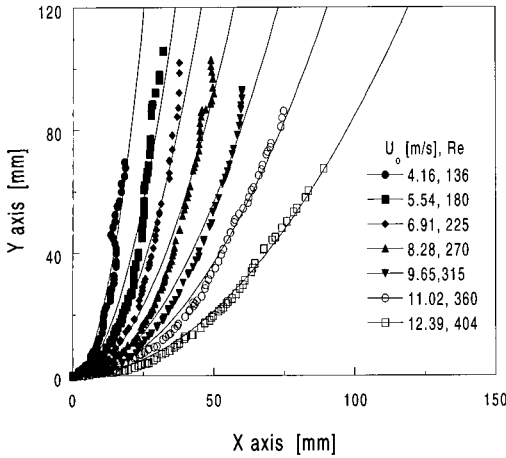


Fig. 4. The parabolic jet trajectory data extracted from Fig. 3.

주어진 하첨자 “Jet”는 제트의 초기분사조건을 나타낸다. 위에 주어진 관계는 바로 실험에서 관찰된 포물선 형태의 운동패적과 일치한다.

그러나 위의 관계는 제트가 앞으로 전진함에 따라서 주변의 공기가 유입되고, 이에 따라서 제트의 밀도가 변함과 동시에 더 이상 유효하지 않게 된다. 따라서 다른 제어 메카니즘이 작동되어야 한다.

먼저 수직방향의 운동에 대해서 고려해보기로 하자. 부양확산되는 기체의 Puff는 수직방향으로 비교적 일정한 속도로 상승하는 것으로 관찰되고 있거나, 시간에 따라서 변화하더라도 그 속도의 변화가 매우 느린 것으로 관찰되고 있다.6~7) 따라서 순간직경이 D 이고 두께가 δ 인 구간을 고려할 경우, 부력과 항력이 거의 균형을 이루는 상태에 머물고 있다고 할수 있으며, 이러한 균형조건으로부터 다음의 관계식이 얻어질 수 있다.

$$(1-r)g \frac{\pi D^2 \delta}{4} \approx \frac{C_D}{2} v^2 \pi \delta D \quad (10)$$

여기에서 C_D 는 항력계수이며, v 는 수직방향의 속도이다. 따라서 제트의 수직방향속도는

$$v = \left(\frac{(1-r)gD}{2C_D} \right)^{1/2} \quad (11)$$

로 주어진다.

결과적으로 수직방향의 위치는 시간에 정비례하여 증가하는 특성

$$y \sim vt \quad (12)$$

을 보여주며, 또한 수직방향의 속도가 일정한 경우에는, 밀도비의 차와 제트의 직경 사이에는

$$(1-r)D \sim Constant \quad (13)$$

의 근사식이 성립될 수 있다. 이와 같은 관계는 초기의 제트 단면적보다 단면적이 충분히 큰 제트의 위치에서는 공기의 희석정도에 의해서 제트의 직경과 순간밀도가 결정되는 것을 보여주고 있다.

한편 수평방향의 운동은 제트와 주변공기의 상호작용에 의해서 제어된다. Peters와 Gottgens의 이론적 해석에서는 중력이 제어하는 제트에서는 제트의 직경은 수평거리에 비례하여 증가함을 보여주고 있으며⁸⁾,

$$D \sim x \quad (14)$$

의 관계가 성립한다. 또한 제트에서 운동량 보존 조건으로 부터 $u^2 D^2 \sim constant$ 의 관계가 성립하며⁹⁾, 여기에 식 (14)를 적용할 경우

$$u \sim 1/x \quad (15)$$

의 관계도 성립된다.

수평방향의 Puff의 위치를 $x \sim t^\alpha$ 로 가정할 경우, 수평방향의 속도 u 는

$$u = dx/dt \sim \alpha t^{\alpha-1} \quad (16)$$

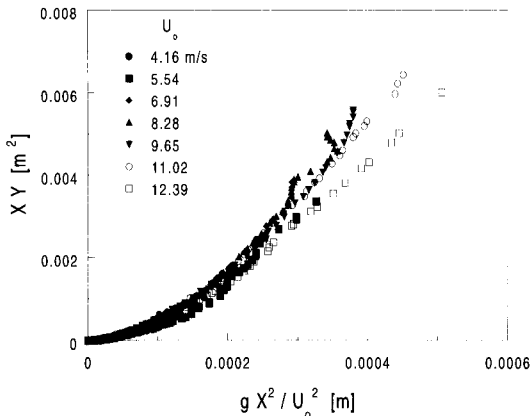


Fig. 5. Rescaled jet trajectories merging in a curve.

로 주어지며, 지수 α 는 위의 관계식을 고려하여 결정될 상수이다. 여기에 위의 식 (15)의 조건을 적용할 경우, $u \sim 1/x \sim t^{-\alpha}$ 이므로, 식 (16)의 지수와 같아지기 위해서는 $\alpha = 1/2$ 의 관계가 성립하여야 한다. 따라서 시간에 비례하여 증가하는 수직방향의 위치와 비교하면, $y \sim x^2$ 의 포물형의 궤적이 얻어질 수 있다.

따라서 제트의 직경에 반비례하여 감소하는 부력의 효과를 고려하여 제트의 궤적을 다시 도시한 그림이 Fig. 5이다. Fig. 5에서 Y축에 나타난 x 의 효과는 직경에 반비례하여 감소하는 $(1 - \gamma)$ 의 효과를 보여주고 있다. 이와 같은 효과가 고려될 경우, Fig. 5에 하나의 곡선으로 중첩된 천이제트의 운동궤적은 $Y \sim X^{1.5}$ 로 주어지게 된다.

이와 같이 하나의 관계식을 보여주는 제트의 천이 궤적은 수소의 안전과 관련하여 매우 유용하게 사용될 수 있다. 즉, 수소장치에서 발생하는 누출에 대비하기 위한 후드의 설계에서부터 수소 누출 검지센서의 위치 선정 등 다양한 안전장치의 설계에 기준으로 활용될 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 비교적 큰 운동량을 갖고 분사된 수소제트가 부양제트로 천이되는 과정을 모사

하기 위해서 수소가 분사된 후의 물성치와 유사한 헬륨의 수평제트를 이용하여 실험을 수행하였다. 수행된 실험에서 헬륨의 수평제트는 포물선 형태의 궤적을 보이면서 수직방향의 운동이 강화되는 형태로 천이되고 있음을 관찰하였으며, 이를 부력이 제어하는 수직방향의 운동과 초기운동량에 의한 공기의 유입이 제어하는 수평방향의 운동으로 분리하여 각각의 운동특성을 파악하였다. 이로부터 실험이 실시된 분사조건들에 대해서 하나의 궤적으로 표현할 수 있는 천이제트의 관계식을 유도하였다.

본 연구를 통해서 부양제트의 궤적에 관한 관계식이 얻어졌음에도 불구하고, 아직도 구체적인 제트의 운동특성에 대해서 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 먼저 본 연구에서는 가시화면적으로 제한으로 인해서 적용된 분사속도가 아직 충분하지 않은 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방안으로 본 연구결과에 의해서 검증된 수치해석 프로그램을 이용한 분사속도범위의 확장을 시도할 필요가 있다.

본 연구의 결과를 보강하기 위한 또 다른 실험의 방향은 노즐직경의 영향에 대한 실험이다. 본 연구에서는 제트의 운동궤적이 분사노즐의 직경에 영향을 받고 있지 않는 것을 보여주고 있다. 그림에도 불구하고, Fig. 5에 나타난 궤적의 비례상수 등이 분사노즐의 함수일 수도 있으므로, 다양한 분사노즐의 직경에 대한 연구가 필요할 수 있다.

이와 같이 적용이 가능한 분사속도 및 분사노즐의 직경을 확장할 경우, 누출된 수소제트의 거동을 정확히 예측할 수 있는 도구로서 수소의 안전성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구(논문)은 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Center for Chemical Process Safety, Use of Vapor Cloud Dispersion Models, AIChE, New York, 1996.
- 2) 이창훈, 한국형 실시간 확산모델 개발, 한국과학기술연구원, 2004.
- 3) Puttock, J. : "Comparison of Thorney Island Data with Predictions fo HEGABOX/HEGADAS," J. Hazardous Materials Vol. 16. 1987, pp. 439-455.
- 4) 김종수, 유해화학물질사고 국가비상대응정보시스템 (NERIS) 개발, 환경부, 2004.
- 5) NIST, Thermodynamic and Transport Properties of Pure Fluids, 2000.
- 6) Center for Chemical Process Safety, Guidelines fro Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explostions, Flash Fires, and BLEVEs, AIChE, New York, 1994.
- 7) Lihou, D. A. and Maund, J. K. : "Thermal Radiation Hazard from Fireballs," J. Chem. E. Symp. Ser. No. 171, 1982, pp. 191-225.
- 8) Peters, N. and Gottgens, J. : "Scaling of Buoyant Turbulent Jet Flames," Combust. Flame Vol. 85, 1991, pp. 206-214.
- 9) Schlichting, H., Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, New York, 1979.