

환경 · 에너지 시스템에 관한 수치해석적 연구 : SNCR, 보텍스튜브

Numerical Study on Energy and Environmental System : SNCR, Vortex Tube

장동순 · 신나일 · 서재동 · 신미수 · 엄태인* · 김동찬**

충남대학교 환경공학과

*대전산업대 환경공학과

**에너지기술연구소

Numerical study has been performed to develop a computer code for the design & optimal operating condition of SNCR(Selective Noncatalytic Reactor) for NO_x reduction together with the analysis of the performance of vortex tube.

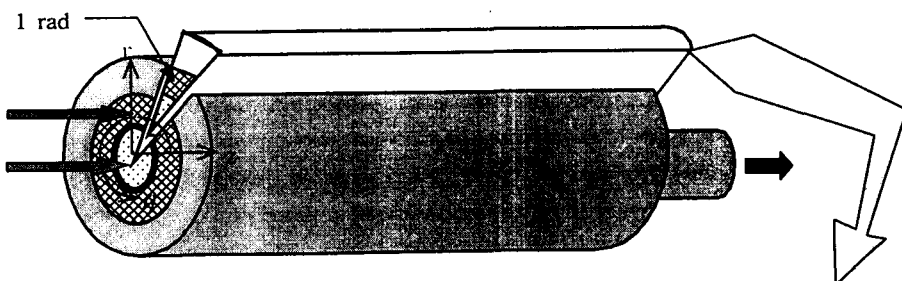
Especially for the SNCR of the scale of industrial boiler, the required mixing and residence time of NH₃ solution was successfully tested numerically by the implementation of some baffle setups in a combustor.

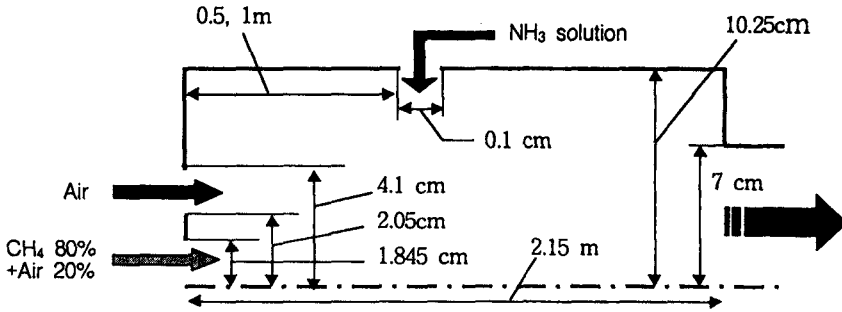
The introduction of interesting phenomena of vortex tube and similar system is made together with a theoretical hypothesis and simple cold flow simulation for the flow field analysis.

1. 서론

질소산화물 저감을 위한 선택적 비촉매 환원방법(SNCR)은 아래와 같은 여러 장점을 가진다. 단계 연소의 개념으로, SNCR 단독으로도 SCR에 상당하는 설치효과가 나타날 수 있으며, 낮은 설치비용으로 설치나 변경에 따른 비용부담이 작다. 또한 슬립 등으로 빠져나간 암모니아는 촉매로 사용될 가능성이 있다는 점 등이다.

그러나 주지하는 바와 같이 이러한 SNCR 기술이 성공적으로 적용되기 위해서는 주어진 온도영역(900~1100℃)에서 환원제로 사용되는 NH₃나 요소가 효율적으로 균일한 혼합이 이루어져야 한다는 점과 적어도 0.2초 이상의 체류시간을 동시에 만족시켜야 한다는 점이다. 이러한 장치에 대한 개념 및 구체설계가 이루어지고, 사양과 조건이 다른 상황에서 一般的인 기술적용이 이루어지기 위해서는 전산열유체 技法에 의한 컴퓨터 프로그램 개발이 실험에 대한 상호보완의 도구로서 요구된다. 본 논문에서는 원통형 산업용 연소로로서 길이가 2.5m, 직경 0.205m인 제원에 이를 적용하였으며 혼합과 체류시간의 증진을 위하여 연소로 후단에 배플을 설치하는 방법을 고려하였다(그림 1). 그리고 흥미로운 온도분리현상을 나타내는 보텍스 튜브의 역사적 배경, 실용적인 응용사례, 그리고 이것과 같은 物理的 현상이라고 생각되는 빅터 샤우버거의 물의 구심성 유동이론에 대한 제반현상과 이것을 설명할 수 있는 이론적인 가설을 제시한다.





<그림 1> 원통형 연소로 도식도

2. 수치해석 모델 및 방법

일반적인 지배방정식

기상상태의 일반적인 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi + S_{\phi,p} \quad \text{---- (1)}$$

식(1)에서 S_ϕ 는 기상에서의 一般的인 생성項을 나타내며, $S_{\phi,p}$ 는 환원제로 사용되는 암모니아나 요소수용액의 존재에 따른 질량, 엔탈피, 운동량 생성항을 나타낸다. Γ_ϕ 와 S_ϕ 에 대한 表現式을 표 1에 나타내었다.

<표 1> 원통좌표계에서의 Γ_ϕ and S_ϕ 표현

	ϕ	Γ_ϕ	생성항 (S_ϕ)
Axial Momentum	u	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$
Radial Momentum	v	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}$
Tangential Momentum	w	μ_{eff}	$-\left(\frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{\rho v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) w$
Kinetic Energy	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{kl} - \rho \epsilon$
Kinetic Energy Dissipation Rate	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{kl} - C_2 \rho \epsilon)$
Specific Enthalpy	h	Γ_h	$\dot{w}_{fu} H_{fu} - L_{H_2O} \dot{w}_{vol}$
Fuel Mass Fraction	m_{fu}	Γ_{fu}	$-\dot{w}_{fu}$
Oxygen Mass Fraction	m_{O_2}	Γ_{O_2}	$-\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} \cdot M_{O_2} \cdot n_{O_2}$
CO ₂ Mass Fraction	m_{CO_2}	Γ_{CO_2}	$\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} \cdot M_{CO_2} \cdot n_{CO_2}$
H ₂ O Mass Fraction	m_{H_2O}	Γ_{H_2O}	$\frac{\dot{w}_{fu}}{M_{fu}} \cdot M_{H_2O} \cdot n_{H_2O} + \dot{w}_{vol} \cdot (1 - x_{NH_3})$

[계속]

N ₂ Mass Fraction	m_{N_2}	Γ_{N_2}	-
NO Mass Fraction	m_{NO}	Γ_{NO}	$-\frac{\dot{w}_{NH_3}}{M_{NH_3}} \cdot M_{NO} \cdot n_{NO} + S_{NO}$
NH ₃ Mass Fraction	m_{NH_3}	Γ_{NH_3}	$-\dot{w}_{NH_3} + \dot{w}_{vol} \cdot x_{NH_3}$
\dot{w}_ϕ : ϕ 의 반응에 의한 단위체적, 단위시간당의 생성량, M_ϕ : ϕ 의 분자량 x_{NH_3} : 주입 NH ₃ 수용액의 농도, \dot{w}_{vol} : 휘발율, L_{H_2O} : H ₂ O 기화열 S_{NO} : 단위체적 단위시간당 NO 생성량			
$G_k = 2\mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}}{r} \right)^2 \right] + \mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\bar{w}}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right]$ $C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k, \sigma_\epsilon=0.9, \sigma_t=1.22$			

수치해석 알고리즘 및 난류반응 모델

수치해석 알고리즘은 검사체적에 기초한 Patankar의 방법을 사용하였으며 압력, 속도 연계는 SIMPLEC 알고리즘을, 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을, 난류반응 모델은 eddy breakup 모델에 온도나 화학 반응속도를 고려한 방법을 택하였다.

한편 액적의 지배방정식은 각각 아래와 같이 나타내어진다.

액적 방정식

액적의 운동방정식은 아래와 같은 라그랑지안 형태로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 난류에 의한 액적 궤적의 영향은 고려하지 않았다.

(1) 운동방정식

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha(u_g - u_p) \quad \text{----- (2)}$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha(v_g - v_p) + \frac{w_p^2}{r_p} \quad \text{----- (3)}$$

$$\frac{dw_p}{dt} = \alpha(w_g - w_p) + \frac{v_p w_p}{r_p} \quad \text{----- (4)}$$

$$\text{여기서 } \alpha = \frac{18\mu_g C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad \text{----- (5)}$$

(2) 휘발화 방정식

휘발화율은 입자의 가열속도 Q_p 에 좌우되나 본 연구에서는 시간에 따라 일정분율로 증발함을 가정하였다.

$$\frac{dm_p}{dt} = \min\left(\frac{Q_p}{L}, B\right) \quad \text{----- (6)}$$

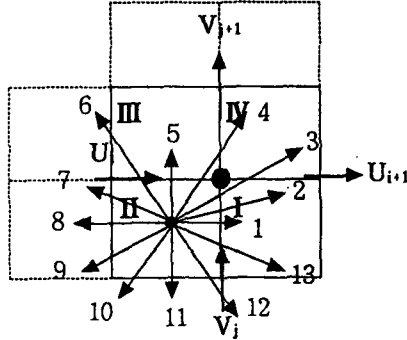
(3) 에너지 방정식

본 연구에서는 아래와 같이 주어지는 액적의 온도 변화는 계산하지 않았다.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p N_u K_g (T_g - T_p) - H \left(\frac{dm_p}{dt} \right) + L \frac{dm_p}{dt} + Q_r \quad \text{----- (7)}$$

액적궤적 추적도식도

액적의 궤적추적을 위한 격자점내에서의 운동양상은 아래와 같은 13개의 추적을 가상하였다.

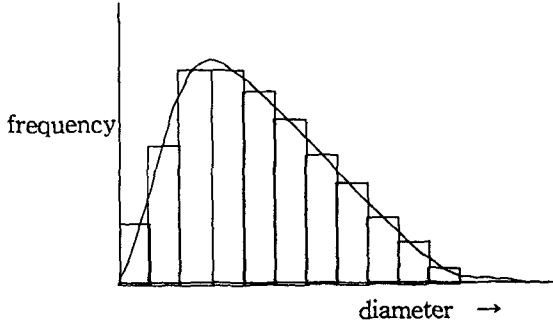


액적 분류

액적무화는 아래와 같은 평균 직경과 분포식에 기초하여 계산할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 일차적으로 몇 개의 직경분포에 따른 임의의 질량분포를 가정하였다.

$$\text{평균직경} : (D_{jk})^{j-k} = \frac{\int_0^\infty D^j f dD}{\int_0^\infty D^k f dD} \quad \text{-----}(8)$$

$$\text{분포함수} : f = a D^p \exp(-bD^n) \quad \text{-----}(9)$$



<그림 2> log-normal 분포에 대한 유한그룹으로 분류

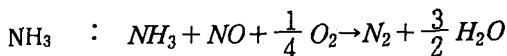
Thermal NOx 생성식

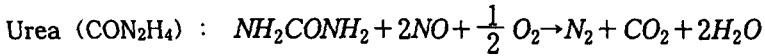
Thermal NOx의 생성은 난류와 화학반응속도로 주어지는 Damkoler 수가 1에 가깝기 때문에 이에 대한 수학적 모델은 쉽지 않다. 본 연구에서는 일차적으로 현상학적인 경험식을 이용하여 복잡한 화학반응식을 대신하여 계산하였다.

$$\frac{dNO}{dt} = \frac{1.8 \times 10^{21} \rho^{\frac{3}{2}} m_{N_2} m_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{T^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{69000}{T}\right)} \quad \text{-----}(10)$$

NO와 환원제 반응식

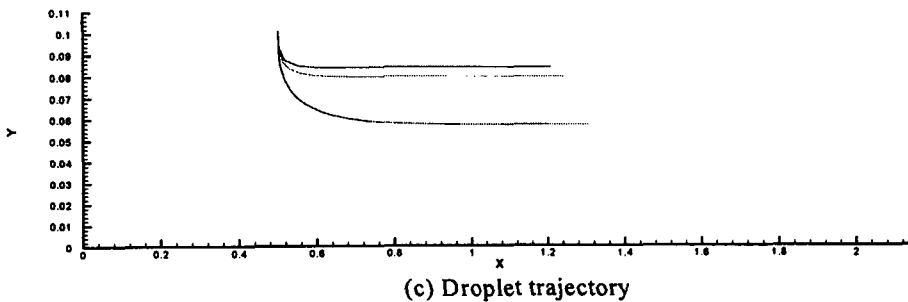
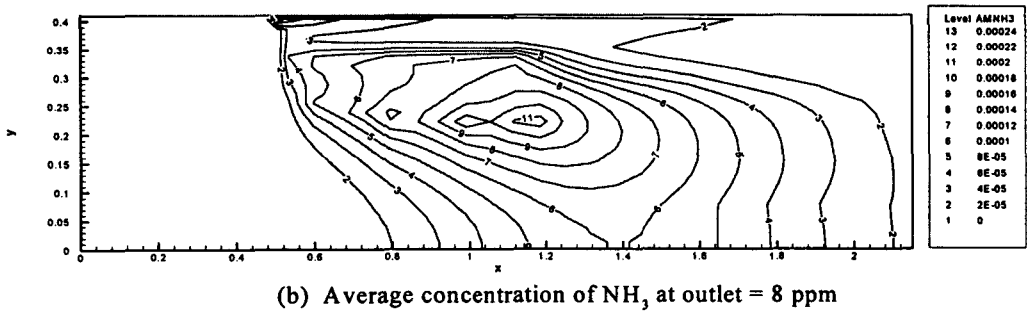
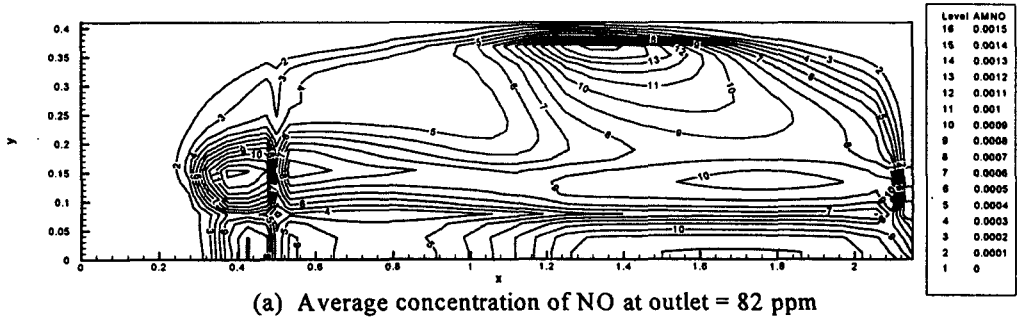
환원제 반응에 대한 화학적 당량식은 아래에 제시하였다. 본 연구에서는 일차적으로 온도가 900 - 1100℃의 영역에서 위의 반응이 난류에서의 붕괴에 의해 이루어짐을 가정하였다. 그러나 이 온도영역을 벗어날 경우에 이러한 반응은 일어나지 않는다고 가정하였다.





3.1 SNCR 계산 결과 및 토론

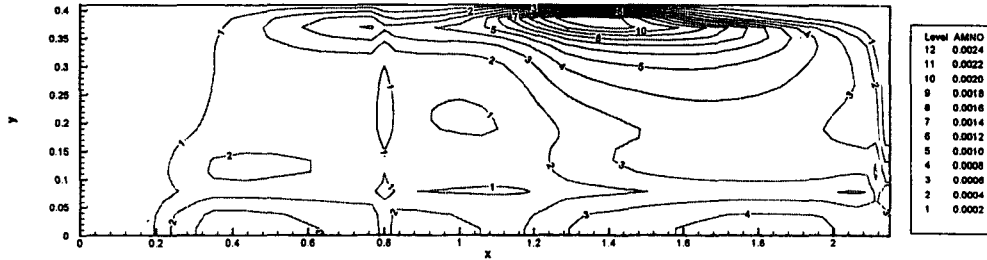
컴퓨터 프로그램 개발에 따른 계산결과 NH_3 , NO 의 농도 등은 물리적으로 합당한 영역에 해당하는 농도 결과를 얻었다. 구체적인 예를 들면 아래에 나타낸 바와 같이 NO 의 최대농도는 1500ppm이며 출구에서의 농도는 82ppm 등으로 실제 연소로에서 나타날 수 있는 농도와 근사한 값을 나타내었다. 이를 바탕으로 개념 및 고도설계에 의한 SNCR 시스템 현장설치의 구체적 조건제시가 가능하도록 제반 변수연구를 수행하였다.



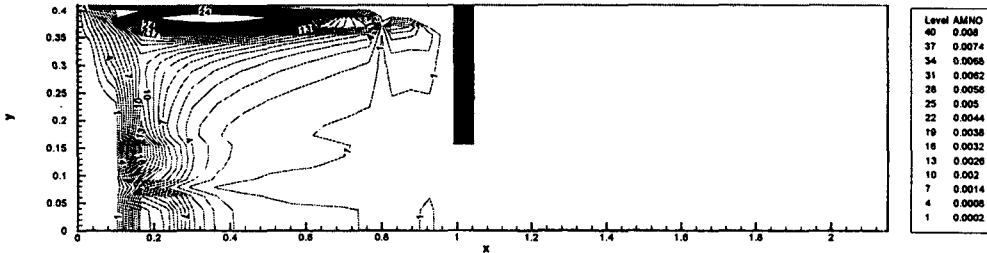
<그림 3>

(NH_3 inlet location = 0.5m, NH_3 inlet velocity = 2.0m/s,
 CH_4 inlet velocity = 6.11m/s, 130% theoretical air, TFLOW = 0.4E-3kg/s)

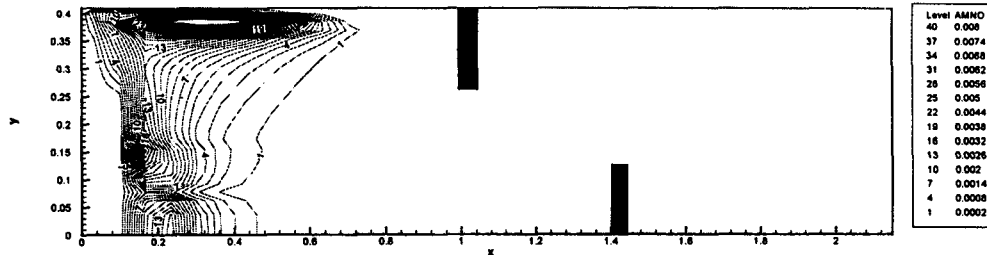
이러한 노력의 일환으로 산업용 보일러의 경우 NO_x 제어를 위한 SNCR의 설치시에 충분한 체류시간과 혼합이 제대로 되지 않는 점이 산업용 보일러의 SNCR 적용에 치명적인 문제점으로 나타나고 있는 것을 감안하여 다음과 같은 배플을 설치하여 이러한 문제점 해소의 가능성을 제시하였다. 아래 그림 4에 제시한 바와 같이 배플이 없는 경우에는 출구에서의 NO의 농도가 162ppm이었으나 배플을 설치했을 경우 어떤 경우에도 출구에서의 NO농도는 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.



(a) without any baffle, $C_{NO,out} = 162ppm$



(b) with a baffle



(c) with two baffles

<그림 4> Mass fraction of NO distribution w/ or w/o baffle

(NH₃ inlet location = 0.8m , NH₃ inlet velocity = 2.0m/s,
130 % theoretical air, TFLOW = 0.4E-3kg/s)

3.2 보텍스 튜브에 대한 현상 이론적 해석

(1) 현상과 역사적 배경

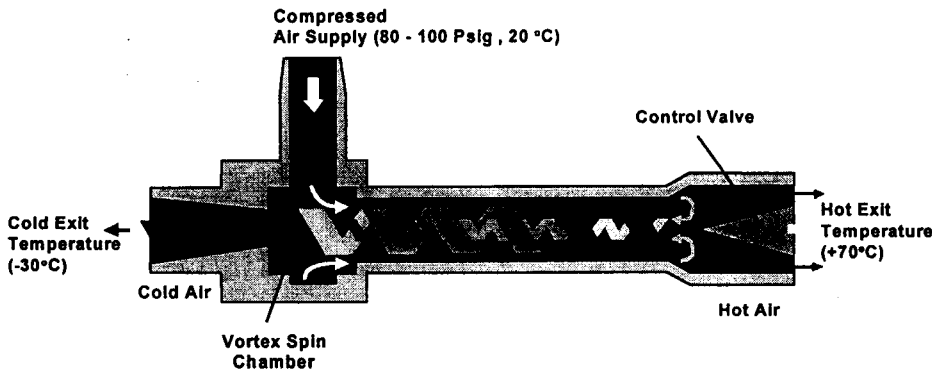
보텍스 튜브는 선회 회전을 시킨 관 내부에서 찬 공기와 뜨거운 공기가 각각 다른 출구로 분리되어 나타나는 관을 지칭한다(그림5). 이러한 보텍스 튜브는 1928년 George Ranque라는 프랑스의 물리학 생이 보텍스 형태의 펌프를 가지고 실험하다가 우연히 한쪽에서는 찬 공기가 다른 쪽에서는 더운 공기가 나가는 실험에서 발견하였다.

그러나, 그 이후에 독일의 물리학자인 Rudolph Hilsch가 이 장치에 대한 과학적 논문을 잡지에 발표 함으로 널리 알려졌다. 이러한 장치에 대한 예측은 일찍이 19세기의 위대한 물리학자인 James Clerk Maxwell 에 의하여 이루어졌다. 즉, 열이라는 것은 분자들의 운동에 의한 것이므로 만일 작은 요정 (friendly little demon)의 도움을 얻는다면 어느 날 우리는 찬 공기분자와 더운 공기분자를 나누는 장치가 가능할 것이라고 하였으며 보텍스 튜브는 이러한 예측에 대한 실증적인 결과라 할 수 있다.

이와 같은 역사적 배경 때문에 보텍스 튜브는 'Ranque' 보텍스 튜브, Hilsch 튜브, Ranque-Hilsch 튜브, 그리고 '맥스웰의 요정' 등 다양한 이름으로 알려져 있다.

어떠한 이름으로 불리든지 간에 이 보텍스 튜브는 압축공기를 사용하여 더운 공기와 찬 공기를 분리 시키므로 다양하고 저렴한 산업용 국소 냉각장치로서 각광을 받아 오고 있다.

이것에 대한 완전히 정립된 이론은 현재 없는 것으로 알려지고 있으나 많이 인용되는 것이 각 운동량의 열로 전환되었다는 이론과 원심력과 점성저항에 의한 열의 발생 또는 오리피스 단열팽창에 의한 냉각 등이 거론되고 있다. (http://exair.com/vortextube/vt_theory.htm)



<그림 5> Vortex Tube with EXAIR Co. data.

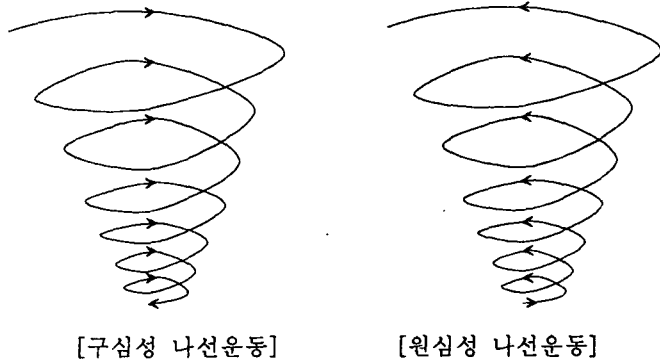
(2) 보텍스 튜브 현상 해석을 위한 빅터 샤우버거의 구심성 나선운동

빅터 샤우버거는 음양 운동의 하나로서 구심성 나선운동이 일어날 경우 온도하강과 함께 속도의 증가가 일어나는 현상에 대한 많은 경험적 사실을 제시하였다. 이러한 격물치지의 관찰에 의해 샤우버거는 라인 강의 홍수예방이론, 밀도가 물보다 높은 뗏목 이동장치의 건설, 심지어는 음의 저항력을 가지는 관의 실험, 그리고 많은 공학 장치에 대한 일화를 들 수 있다.

이러한 구심성 나선운동이 설득력을 지니는 이유로는, 자연에 DNA, 성좌, 토네이도, 조개의 형상, 사행천 등 수많은 나선운동이 존재할 뿐만 아니라 자연에 존재하는 형상은 이러한 형태의 에너지 유동이 존재한다는 점을 시사하는 것에서 큰 의미를 찾을 수가 있다. 즉 나선운동이 존재함으로써 그와 유사한 물질적 형상이 존재한다면 보텍스 튜브에서 일어나는 온도하강과 그에 따른 열분리의 기본적인 단서를 제공할 가능성이 크다고 볼 수 있다.

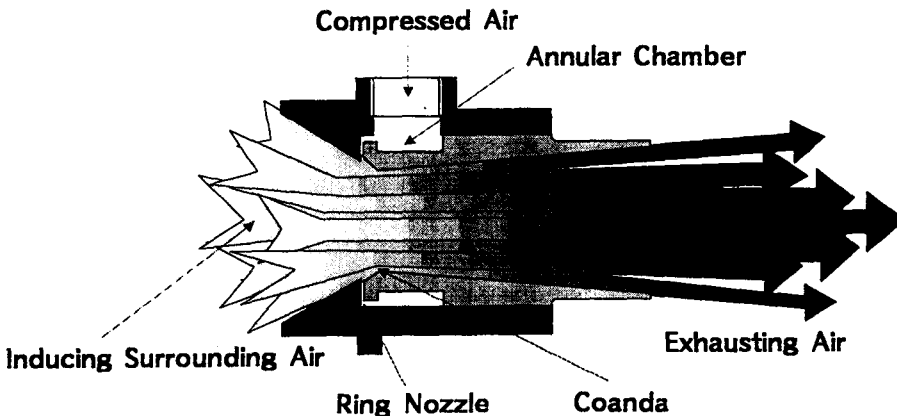
(3) 구심성 나선운동에 대한 이론적 해석

빅터 샤우버거의 관찰을 이론적으로 나타내면 공기나 물이 구심성 나선운동을 하게 되면 무질서한 열운동(熱運動, Brownian motion)이 일정한 방향으로 정열을 하게 되며, 이 결과 온도가 낮아지면서 속도는 증가한다. 이는 분자 운동론으로 주어지는 온도 정의를 나타내는 아래의 식에 의해 유추할 수 있다. 즉, 온도는 분자들의 열운동 에너지에 비례하며, $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$, 이 식에서 m, v, T, k 는 각각 분자의 질량, 속도, 절대온도와 볼츠만 상수를 나타낸다. 온도가 낮아진 만큼 발생한 현열(sensible heat)은 주위와의 열전달 조건에 따라 (1) 열전달이 강력할 때에는 보텍스관(vortex tube)과 같이 찬 공기와 더운 공기의分離에 사용되는 工學的 도구에 사용될수 있고, (2) 이 현열의 일부가 운동에너지로 바뀔 경우 공기흡입 증폭장치나 호수나 바다에서 갑자기 솟아오르는 용오름 현상의 원인이 될 수도 있으며, 또는 (3) 싸이클론 집진기 등과 같이 열전달에 의한 열손실이 매우 클 때에는 주위에 아무런 가시적인 결과도 나타나지 않을 수도 있다. 열운동이 극단적인 질서를 띠하게 되면 작동 물질의 相變化까지 유도되며 기체나 액체가 한 단계 아래의 액체나 고체로 변하게 되면 이 경우 극단적인 압력 감소에 의한 폭발에 반대되는 응폭현상이 일어난다고 한다. 구심성운동이 속도 증가를 일으키는데 反하여 자연에서 원심성 나선운동이나 직선운동이 일어나게 되면 마찰 등에 의해 그 운동에너지는 쉽게 소진된다.(그림6)



<그림 6> 자연의 기본적 운동으로서 구심성, 원심성 나선운동

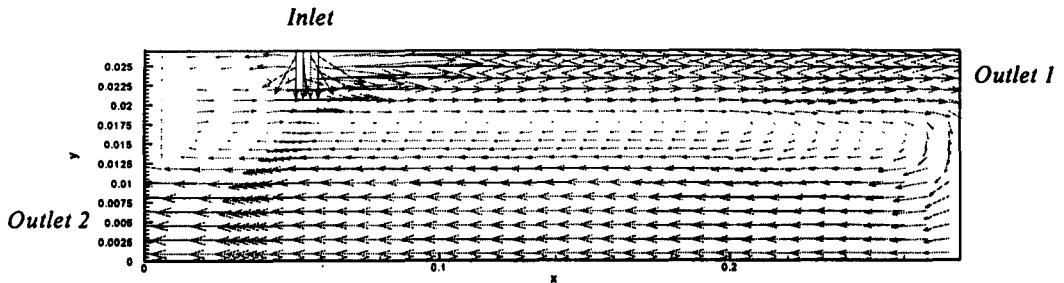
다음 그림 7은 구심성 나선운동의 다른 예로서 EXAIR사의 공기의 초효율 증폭장치로서 들어간 공기의 최대 75배가 흡입되는 장치를 나타내며 이것 또한 구심성 나선운동에 의한 온도하강에 따른 에너지 증폭현상의 하나로 판단된다.



<그림 7> Air 증폭기

(4) 구심성 나선운동에 대한 냉간유동해석

아래 그림 8에는 구심성 나선운동이 일어나는 냉간유동의 수치해석 결과를 나타내고 있다.



<그림 8> Vector plots of vortex tube

(Length=0.279m, Radius=0.027m, $V_{inlet,air} = 5m/s$, $V_{inlet,air} = 60m/s$)

참고문헌

- [1] EXAIR社, http://exair.com/vortextube/vt_theory.htm
- [2] Coats, C. Living Energy, Gateway Books, Bath, UK.(1990)
- [3] 유상구역, 살아있는 에너지, 양문출판사(1998)
- [4] 장동순, 동양사상과 서양과학의 접목과 응용, 청흥출판사(1999)