

충전탑에서 수력학적 거동의 수학적 해석연구

A Study on the Mathematical Interpretation of Hydraulic Behaviour in Packing Tower

김 석 택

동아대학교 환경공학과

(2000년 8월 28일 접수, 2000년 12월 13일 채택)

Seuk-Taek Kim

Department of Environmental Engineering, Dong-A University

(Received 28 August 2000; accepted 13 December 2000)

Abstract

This study was carried out to interpret mathematically hydraulic behaviour in packing tower which packed 50 mm plastic Hiflow-ring with a dimension of 300 mm wide and 1,400 mm high. In view of energy saving, the recent packing, 50 mm plastic Hiflow-ring was superior to conventional packings because of low pressure drop in high loads. As relative error between numerically predicted and experimentally obtained values was less than 6% in the loading and flooding point, it found that their results appeared to be adequate. Comparison of those two values in both dry and wet packing conditions, relative errors amount to 3.96 and 5.6%, respectively. In order to evaluate the operating characteristics of packings, the type, size, and material for packings must be estimated in various system and loads. This study is able to calculate pressure drop, hold-up, gas and liquid loads using mathematical interpretation. For these calculation, the specific constants of each packings must be calculated first all. The method of mathematical interpretation in this study turned out to be superior to the existing methods because of reduced errors at loading and flooding point.

Key words : flooding point, pressure drop, liquid load, gas capacity factor, hold-up

1. 서 론

대기오염 방지시설에서 각종유해물질을 제거하는 공정에는 여러 가지 방법이 적용되고 있다. 충전탑은 물질 분리공정에 효율적으로 사용됨으로써 오염물질을 제거하는데 많은 기여를 하였다. 특히, 환경보호 측면에서는 흡수공정을 이용한 폐 가스의 처리, 탈착, 액체와 액체 추출공정에 의한 폐수처리 공

정도도 적용되고 있다(Reinhard, 1983). 충전물의 재질은 금속, 세라믹 및 플라스틱 등이며, 최근의 충전물에 대한 연구는 크게 두 가지 관점에서 이루어지고 있다. 하나는 플라스틱 재료를 사용한 격자형 충전물 연구로써 이는 제작이 쉽고 무게가 가벼우며, 또한 운전 조작이 용이하고 상대적으로 큰 비 표면적과 높은 공극률, 그리고 적은 압력손실이 작용함으로써 경제적인 적용이 가능하다(Reinhard, 1984). 현재 개발되어 사용중인 충전물로는 Hiflow-ring,

Top-pac, Envi-pac, VSP-ring, Montz-packing 등이다(Reinhard, 1987). 격자형 충전물과 규칙적인 충전물은 지금까지 사용되어 왔던 Raschig-ring, Saddles, Pall-ring과 같은 재래 충전물보다 높은 공극율을 가진다. 따라서 압력손실이 작고, 액체분포가 균일하게 됨으로써 수력학적 및 물질전달에 많은 장점이 증명되었다. 충전탑과 관련된 최근의 연구 주안점은 장치의 설치와 운전에 적은 비용으로서 고효율을 내는 방향으로 진전되고 있다(Jetzy, 1991). 그래서 충전탑이 최소의 압력손실로서 운전이 가능해야 한다고 볼 수 있다. 본 연구는 충전물을 적용하는데 있어 현재에 개발된 충전물의 우수성과 이들의 실제 운전적용에 반드시 요구되어지는 수력학적 측면을 실험과 경험식을 통하여 충전탑 내의 현상을 수학적으로 해석하는 것이다. 그 결과를 이용하여 최적의 에너지 소비로 최대의 효과를 얻을 수 있는 부하 및 범람점에서 부하량의 산정과 압력손실의 한계치를 결정하는데 있다(M. Schultes, 1994; Reinhard, 1988).

2. 연구 방법

2.1 실험장치 및 시스템분석

본 실험에 사용된 충전탑은 Pilot 규모의 장치로 그림 1에 나타나 있으며, 사용된 충전물은 50 mm

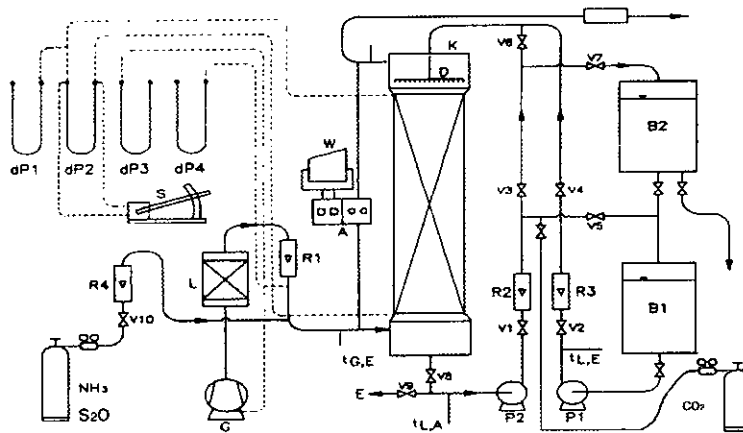
Hiflow-ring이다. 이 충전물은 격자형 충전물로 비 표면적 a 는 $120 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 충전밀도 N 은 6519 l/m^3 , 공극율 ϵ 은 $0.9235 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 의 물리적인 특징을 가진다. 충전탑의 직경은 300 mm, 높이는 1,400 mm이며 액체의 분사는 관 분배기를 이용하였고 분배밀도는 600 l/m^2 으로 조절하였다(Reinhard, 1995).

2.2 실험방법

수력학적 특성의 연구를 위한 실험은 건조압력손실과 수력학적 압력손실이 측정되었다. 수력학적 압력손실 측정시 일정한 액체부하에서 가스용량인수를 변화하고, 가스부하인수는 일정하게 하여 액체부하를 변동하면서 수 차례 반복하여 실험하였다. 실험 기간 동안 액체와 가스의 물리적 값과 시스템의 조건을 표 1에 나타내었다(Jetzy, 1990).

Table 1. The physical properties of investigated conditions.

Items	Units	Values
Gas capacity factor, F_V	$\text{kg}^{1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ S}^{-1}$	0.5~4
Liquid load, u_L	$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ hr}$	0~50
Liquid density, ρ_L	kg/m^3	995~1,000
Liquid viscosity, ν_L	m^2/s	$0.9 \sim 1.3 \times 10^{-6}$
Surface tension, σ_L	kg/s^2	72.8×10^{-3}
Gas density, ρ_V	kg/m^3	1.1~1.2
Gas viscosity, ν_V	m^2/s	$14 \sim 16 \times 10^{-6}$



dP1 ~ dP4 : U-manometer, S : Inclined-manometer, R1 ~ R4 : Rota-meter, L : Humidifier, G : Gas blower, W : Recorder, A : Gas analyzer, K : Column (Tower), V1 ~ V10 : Valve, P1, P2 : Pump, B1, B2 : Liquid storage vessel, D : Distributor

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

가스 유입구의 댐퍼로 유입가스 부하의 조절을 하였으며, 오리피스를 이용하여 풍량을 측정하였다. 본 실험에서는 가스부하인수 F_v 를 $0.5 \sim 4$ ($\text{kg}^{1/2}\text{m}^{-1/2}\text{s}^{-1}$)의 범위에서 조절하였으며, 충전탑 내의 액체(물)의 분사는 원심펌프 2대를 이용하였다. 액체부하(u_L)의 범위는 $0 \sim 50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{hr}$ 의 범위에서 조절하였으며, 압력손실의 계산과 액체부하를 설명하기 위해서 액체부하를 0, 15, 30, $46 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{hr}$ 로 조정하여 실험하였다. 유량은 로타-메타를 이용하여 측정하였으며, 각각의 실험마다 액체함량 및 액체부하, 가스부하를 측정하고, 액체함량(h_L)은 일정한 가스부하인수와 액체부하에서 약 5분간의 안정기가 경과한 후에 가스와 액체의 공급을 중단하여 충전탑 밑 부분에 모인 액체량을 정량측정 하였다(Reinhard, 1989). 충전탑 내의 압력손실은 U-마노메타 및 경사 마노메타를 이용하여 측정하였다. 실험이 진행되는 동안 가스와 액체의 출구에서 각각의 온도를 측정하고 실내 기온은 $15 \sim 32^\circ\text{C}$, 수온은 $12 \sim 23^\circ\text{C}$, 대기압은 $940 \sim 1,200 \text{ mbar}$ 의 조건이었다. 즉 충전탑 하부에서 상부로 가스를 통과시키고 상부에서 하부로는 액체(물)을 분사시켜 충전층 내에서 기액 접촉으로 물질전달이 되도록 하였으며, 이때 충전물의 구조와 재질 등에 따라서 물질전달 효율이 다를 수 있으며, 운전 조건의 변화에도 많은 영향이 있었다(김장호, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1 압력 손실

3.1.1 건조압력손실

그림 2는 순수한 공기만 통과시켜 압력손실을 측정한 결과로써 50 mm Hiflow-ring에 대한 건조압력손실을 나타내고 있다. 그림 2의 수학적 해석은 식 (1)으로 나타내어진다.

$$\frac{\Delta P_o}{H} = \psi \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{F_v^2}{d_p K} \quad (1)$$

여기서 벽 효과계수 K 는 식 (2)를 이용하여 계산하고, 직경 d_p 는 식 (3)을 이용하여 구하였다. 식 (1)에서 저항계수 ψ 는 가스상 레이놀드 수 Re_v (식 (4))의 함수로서, 그림 3의 50 mm Hiflow-ring에 대한 저항계수 ψ 와 가스상의 레이놀드 수의 함수관계를

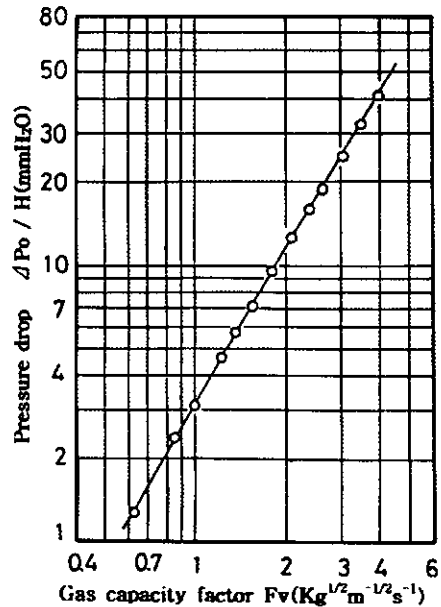


Fig. 2. Pressure drop of 50 mm Hiflow-ring as a function of the gas capacity dry column.

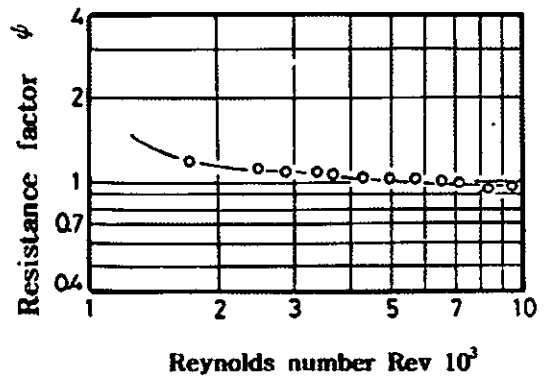


Fig. 3. Dependence of resistance factor as a function of gas Reynolds number (Re_v) for 50 mm Hiflow-ring.

이용하여 계산되어진다(Reinhard and Jetzy, 1984). 통상적으로 충전탑의 사용조건인 레이놀드 수 Re_v 가 2,100보다 큰 경우 저항계수 ψ 는 약 1.03을 나타내며, 이로부터 구하여진 이론적인 압력손실과 실제 압력손실은 그림 6에서 비교되고 있으며 평균오차는 3.96%이었다.

$$\frac{1}{K} = 1 + \frac{2}{3} \frac{1}{1-\epsilon} \frac{d_p}{d_s} \quad (2)$$

$$d_h = \frac{2}{3} \frac{\epsilon - h_L}{1 - (\epsilon - h_L)} d_p K \quad (3)$$

$$Re_v = \frac{uv d_p}{(1-\epsilon) \nu_v} K \quad (4)$$

3. 1. 2 수력학적 압력손실

가스의 부하인수 변화에 대한 50 mm Hiflow-ring의 수력학적 압력손실을 그림 4에 나타내었다(M. Schultes, 1994).

액체의 분사로 인하여 충전층 내의 공극은 액체함량 만큼 적어지게 된다. 따라서 공기의 통과면적은 그만큼 줄어들게 되므로 식 (5)에서의 공극율은 $\epsilon - h_L$ 로 대입함으로서 액체가 분사된 충전층의 압력손실을 수학적으로 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{H} = \phi_L \frac{1 - (\epsilon - h_L)}{(\epsilon - h_L)^3} = \frac{F_v^2}{d_p K} \quad (5)$$

식 (5)에서 이론적으로 압력손실을 구하기 위해서는 저항계수 ϕ_L 는 결정해야 하며, 저항계수는 이미 고찰한 것처럼 액체 레이놀드 수의 함수로서 표

현되어진다. 그림 5은 실험결과에 근거한 저항계수 ϕ_L 와 액체 레이놀드 수 Re_L 관계를 도시하였고, 액체 레이놀드 수 Re_L 은 액체함량을 확산하여 계산하였다. 그림 6에 근거한 저항계수 ϕ_L 는 수치해석을 통하여 액체상의 레이놀드 수가 10보다 큰 경우에는 식 (6)에서 액체 레이놀드 수의 -0.05 승에 비례한다.

$$\phi_L = C_p Re_L^{-0.05} \quad (6)$$

위 식에서 충전물의 고유상수인 C_p 는 본 실험에 이용된 50 mm Hiflow-ring에 대해서는 0.72로 나타났으며, 이 값의 오차는 2.8%로 나타났다. 이들로부터 구하여진 이론적인 값과 실제측정치는 그림 6에 나타나 있으며 평균오차는 5.6%이었다(Jetzy, 1990).

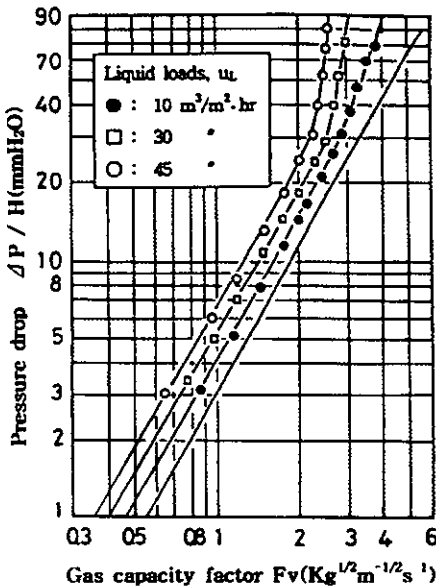


Fig. 4. Pressure drop of 50 mm Hiflow-ring as a function of the gas capacity factor for various liquid loads.

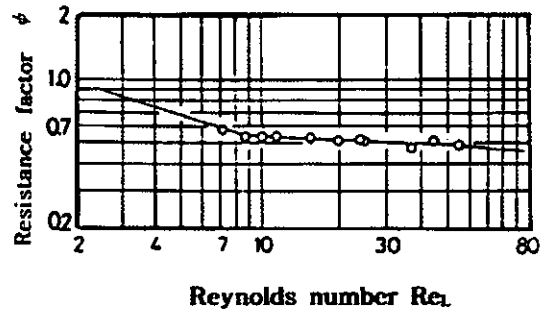


Fig. 5. Dependence of resistance factor as a function of liquid Reynolds number Re_L for 50 mm Hiflow-ring.

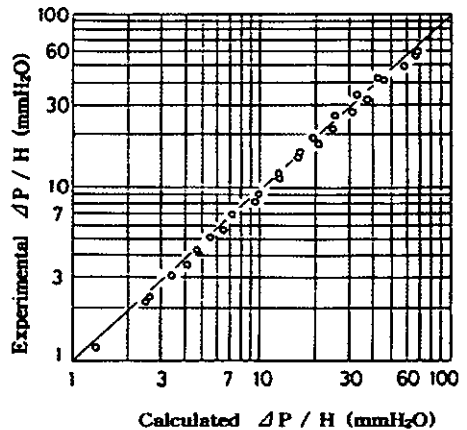


Fig. 6. Comparison of the pressure drop calculated with observed pressure drop.

3. 2 부하점

앞에서 설명한 바와 같이 부하점에서는 역류가스의 전단력의 증가로 인하여 충전물 표면에서의 액체속도는 0이 되며 부하점에서의 가스속도와 액체함량은 수식화되어 구하여진다. 부하점에서의 가스속도를 평가하기 위해서는 점도의 함수 $f(\eta_L)$, 저항계수 ζ_s 에 대한 값을 알아야 한다. 저항계수 ζ_s 는 식 (7)을 이용하여 구하여지며 저항계수 ζ_s 가 결정되기 위해서는 흐름인수와와의 함수 관계를 이용한 그림 7의 실험결과 그래프에 의해 해석되어 구하여지며 \dot{L} 은 액체의 몰유량(Kmolls), \dot{V} 는 기체의 몰유량(Kmolls)이다.

$\dot{L}/\dot{V}\sqrt{\rho_V\rho_L}\leq 0.4$ 의 조건을 만족하는 경우 지수 n_s 는 -0.326을 가지며, 본 실험에 사용한 50 mm Hiflow-ring 실험결과, 충전물의 특징상수 C_s 는 1,921을 나타내었으며, 평균오차는 2.1%로 나타났다(Reinhard and Kim, 1995).

$$\zeta_s = \frac{g}{C_s^2 \left[\frac{\dot{L}}{\dot{V}} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} \left(\frac{\eta_L}{\eta_V} \right)^{0.4} \right]^{2n}} \quad (7)$$

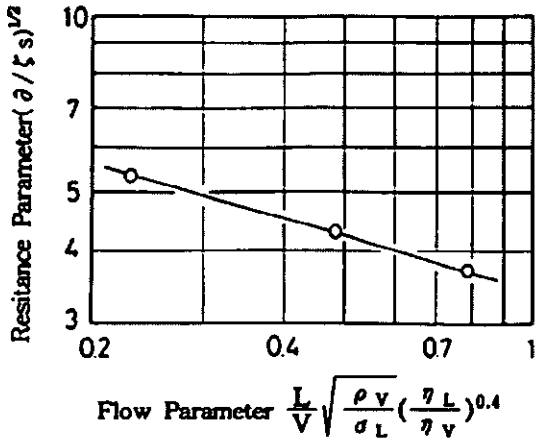


Fig. 7. Logarithmic dependence of the resistance parameter as a function of a flow parameter at the loading point.

3. 3 범람점

충전물에 대한 범람점은 일정한 액체부하 (u_L)에서 가스부하 (u_V)의 함수 또는 일정한 가스부하 (u_V)

에서 액체부하 (u_L)의 함수로 실험적으로 수식에 의해 계산된다. 본 연구에서는 수학적 해석에 의한 범람점에서의 부하를 평가하기 위해서는 식 (8), (9), (10)이 적용되어지며 식 (9)에서의 저항 계수는 계산되어야 하며 저항계수를 구하기 위해서는 흐름 인수의 함수로서 실험에 의해서 구하여진다. 그림 8은 50 mm Hiflow-ring에 대한 식 (8)에서 저항계수 (ζ_{FI})을 구하기 위한 것이며, 이때 상수 (n_{FI})는 $\dot{L}/\dot{V}\sqrt{\rho_V\rho_L} \leq 0.4$ 을 만족하는 범위에서 -0.914의 값을 가지며 본 실험 결과에 따르는 충전물에 의존하는 상수 (C_{FI})는 2.897을 나타내었으며, 측정오차는 3.2%이었다.

$$\zeta_{FI} = \frac{g}{C_{FI}^2 \left[\frac{\dot{L}}{\dot{V}} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} \left(\frac{\eta_L}{\eta_V} \right)^{0.2} \right]^{2n_{FI}}} \quad (8)$$

$$u_{V,FI} = \sqrt{\frac{2g(\epsilon - h_{L,FI})^{3/2}}{\zeta_{FI} \epsilon^{1/2}}} \sqrt{\frac{h_{L,FI}}{a}} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_V}} \quad (9)$$

$$h_{L,FI}^2 = (3h_{L,FI} - \epsilon) = \frac{3}{g} \frac{\dot{L}}{\dot{V}} \frac{\rho_L}{\rho_V} a^2 \epsilon \frac{\eta_L}{\rho_L} u_{V,FI} \quad (10)$$

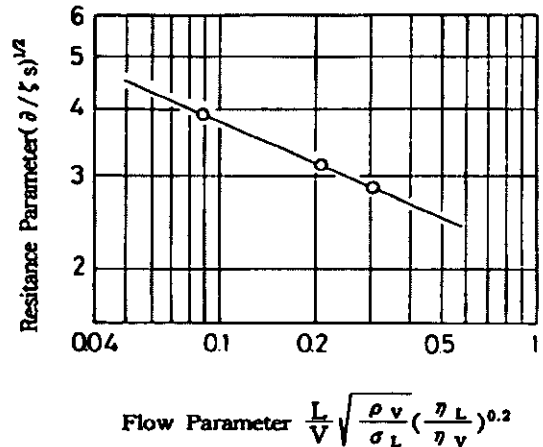


Fig. 8. Logarithmic dependence of the resistance parameter as a function of a flow parameter at the flooding point.

4. 결 론

Plastic 50 mm Hiflow-ring를 충전한 충전탑을 이

용한 흡수실험을 수행하여 충전탑 내에서의 수력학적인 거동을 수학적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 50 mm Hiflow-ring는 재래 충전물보다 높은 부하에서도 훨씬 낮은 압력손실에서 운전이 가능함으로 경제적으로 적용할 수 있다.

2) 부하점과 범람점의 가스속도와 액체함량에 대한 수학적 해석의 결과치 실제측정치는 평균 6% 이내의 오차를 가지므로, 충전탑 내의 수학적 해석에 대한 타당성을 입증할 수 있었다.

3) 수학적으로 해석된 압력손실과 실제 압력손실의 비교는 건조압력손실의 경우에는 3.96%의 오차를 나타내었으며, 액체를 통과시켰을 경우에는 5.6%의 오차를 보임을 알 수 있었다.

4) 수력학적 측면을 수학적 해석에 의해서 압력손실, 액체함량, 가스 및 액체부하 값을 계산할 수 있으며, 이러한 해석은 단지 충전물의 고유값을 결정해야만 가능하고 수학적 해석치는 양호한 결과로 평가되었다. 따라서 종래의 관련식에 의한 계산의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

김장호 (1998) "유해가스처리공학" 21세기사.
 Jetzy Mackowiak (1990) Determination of Flooding Gas Velocity and Liquid Hold-up at Flooding in Pack-

ed Column for Gas/Liquid System, Chem Eng. Technol., 13, 184-196.

Jetzy Mackowiak (1991) "Pressure Drop in Irrigated Packed Columns", Chem. Eng. Process, pp. 93-105.

M. Schultes (1994) "Absorption von Schwefeldioxid mit natronlauge in Fullkorperkolonen, Verfahrens- und Umwettechnik", Ruhr-Universitat Bochum, pp. 182-198.

Reinhard Billet (1983) Energieeinsparung bei The Rmischen Stofftrennverfahren, Anwen-dungen im Technologischen Umweltschutz, Dr, Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg.

Reinhard Billet and Jetzy Mackowiak (1984) "Hiflow-ring, ein Hochleistungsfullkorper fur Gas/Flussig-Systeme" Chemie-Tecknik, Nr. 12.

Reinhard Billet (1987) Packed Column Analysis and Design, Glitsch Inc. Dallas/Texas.

Reinhard Billet (1988) Theory and Practice of Packed Column, Korea Institute of Energy and Resources, Tasjon/Korea.

Reinhard Billet (1989) "Packed Column Analysis and Design", Vol. 1, 2. Published by Ruhr-University Bochum Department for Thermal Separation Processes.

Reinhard Billet and J.H. Kim (1992) 충전탑기술, 세종출판사.

Reinhard Billet (1995) "Packed Towers in Processing and Environmental Technology" VCH published Inc.,

Reinhard Billet and J.H. Kim (1995) 충전탑기술, (주) 동호.