



# 역류가스 흡수에 의한 대기오염 방지기술

김 장 호 / 동아대학교 공과대학 환경공학과 부교수  
김 일 배 / 동아대학교 공과대학 환경공학과 석사과정

## I. 서 론

오랫동안 환경보호 뿐만아니라 화학공업에서 발생하는 유해가스물질을 제거하여왔다. 충전탑을 사용한 물질분리과정의 주요 사용범위와 방법은 정류, 흡수, 탈착, 액체-액체 추출과 같은 과정과 방법을 사용하고 있으며, 현재 충전탑을 환경오염방지에 사용하기 위해서 더욱더 새롭고 획기적인 기술들이 개발되고 있다. 충전탑에서 사용하는 충전물들은 합성수지, 금속, 세라믹으로 제작되는 Pall-Ring, Intalox sattel, Hiflow-Ring 등을 사용하고 있다. 본 연구는 충전탑내에 충전물을 충전했을때의 수력학적인 물질전달을 고찰하였으며 환경공학측면과 화학공업의 측면에서 충전탑을 실용화 하기 위해 흐름의 동력학적인 실험을 통하여 가스상 또는 액체상에 있어서의 물질전달과 관련한 물리적 법칙 압력손실, 액체함량 등을 측정하였다. 실험에 사용된 충전물의 형태와 기술적인 자료를 각각 그림 1과 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 합성수지로된 충전물에 있어서 조사된 기술적 자료

충진물	d 10 <sup>3</sup> (m)	N <sub>0</sub> (1/m <sup>3</sup> )	a <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ε <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	무게 (kg/m <sup>3</sup> )
Hiflow-Ring*	25	45500	192	0.92	63
	50	6400	110	0.93	59
	90	1250	65	0.97	34
Pall-Ring*	25	51000	220	0.89	85
	30	6700	110	0.92	70
Intalox-Sattel*	50	8500	120	0.91	75

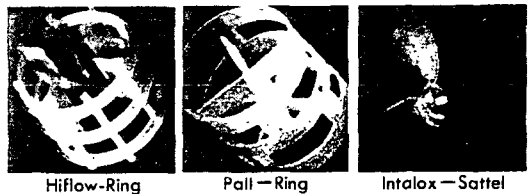


그림 1. 합성수지로 된 실험 충전물

표 1에서 d; 충전물 직경, N<sub>0</sub>; 충전물 밀도, a; 고유 표면적, ε<sub>0</sub>; 공극율이다.

## II. 본 론

### 1. 실험 시스템

정상상태 조건하에서 충전탑내의 공기/물 시스템의 수력학적인 연구는 충전탑 지름  $d_s$ 를 300mm와 400mm로 각각 다른 충전높이에서 실행하였다. 물질 분리의 측정은 충전탑 지름 300mm와 400mm로 각각 다른 충전높이에서 암모니아-공기/물 시스템 및 이산화탄소-공기/물 시스템을 사용하여 실행하였다. 암모니아-공기/물 시스템에서 물질전달저항은 가스측에 우세하게 놓여져 있으며, 이산화탄소-공기/물 시스템은 액체상에 물질전달저항이 강하게 놓여져있다. 실험에 사용된 시스템과 충전물들에 대한 기술적인 자료를 표 2에 상세하게 나타내었다.

〈표 2〉 조사된 충전물과 사용된 시스템

Parameter	System	10 <sup>3</sup> d	합성수지로된 충전물	d <sub>s</sub> (m)	H(m)	N (1/m <sup>3</sup> )
압력손실 $\Delta P_o/H$ $\Delta P/H$	공기/물 1bar, 286K	25	Hiflow-Ring	0.3	0.9	45500
		50		0.3	1.40	6880
		50		0.45	1.45	7226
		90		0.45	2.0	1340
		50	Pall-Ring	0.45	1.25	6870
		50	Intalox-Sattel	0.45	1.20	9875
가스상 물질 전달의 저항	NH <sub>3</sub> 공기/물 1bar, 28K	25	Hiflow-Ring	0.3	0.9	45500
		50		0.3	1.35	6450
		50		0.45	2.0	1340
		25	Pall-Ring	0.22	0.9	54500
		50		0.3	1.35	6425
		50	Intalox-Sattel	0.3	1.0	9331
액체상	공기/물 CO <sub>2</sub> , 1bar, 295, 9K	25	Hiflow-Ring	0.3	1.40	46100
		50		0.3	1.33	6395
		25	Pall-Ring	0.3	0.85	55180
		50		0.3	1.33	6765

여기에서  $\Delta P_o/H$ ; 건조 충전층 압력손실,  $\Delta P/H$ ; 관수된 충전층 압력손실,  $d_s$ ; 충전탑 직경, H; 충전높이, N; 충전밀도(m<sup>3</sup>당 충전물 갯수)

### 2. 수력학적 고찰

충전탑내의 건조 충전층 압력손실  $\Delta P_o/H$ 와 관수된 충전층 압력손실  $\Delta P/H$ 가 가스 부하인수  $U_g$ 와 고유액체부하  $U_L$ 에 따르는 수력학적인 내용이

측정되었다. 가스 부하인수  $U_g$ 가 5m<sup>1/2</sup>·S<sup>-1</sup>·kg<sup>1/2</sup>까지, 액체부하  $U_L$ 이 최대 70m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)까지 증가된다. 그림 2, 3, 4에 Hiflow-Ring 25, 50, 90mm의 충전물 압력손실을 측정하여 그 결과를 나타내었다. 50mm 충전물들을 가지고 관수되지 않은 충전층의 압력손실을 비교하여 그림 5에 나타내었으며, 그림 6에는 고유액체부하를 20m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)로 고정하여 압력손실을 비교하여 나타내었다.

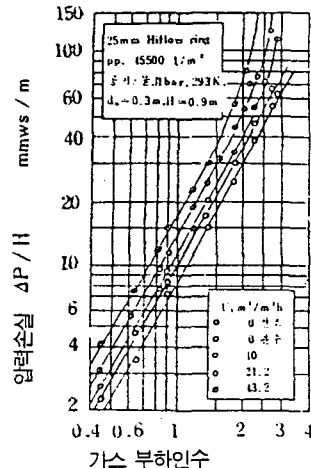


그림 2. 합성수지 PP로 제작된 25mm Hiflow-Ring에 대한 유효한 건조 압력손실과 관수된 충전층의 압력손실.

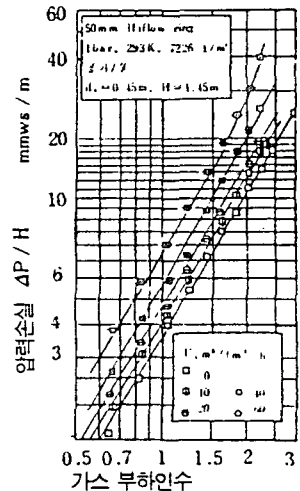


그림 3. 합성수지 PVDF로 제작된 50mm Hiflow-Ring에 대한 유효한 건조 압력손실과 관수된 충전층의 압력손실.

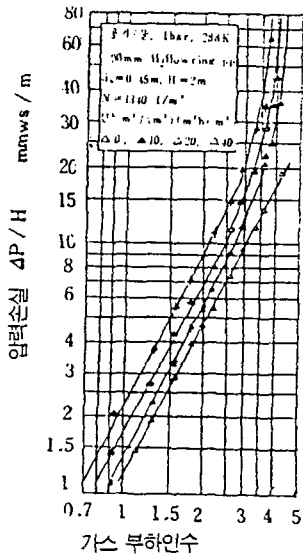


그림 4. 합성수지 PP로 제작된 90mm Hiflow-Ring에 대한 유한한 건조 압력손실과 관수된 충전층의 압력손실.

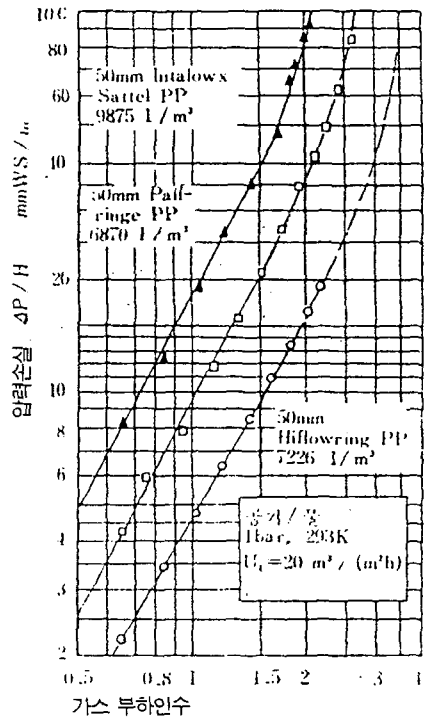


그림 6. 동일한 형태의 Pall-Ring과 50mm Hiflow-Ring 충전물로 채워진 관수된 충전층의 압력손실 ΔP/H의 비교.

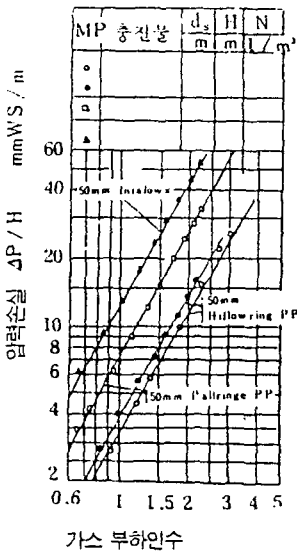


그림 5. 동일한 형태의 Pall-Ring과 50mm Hiflow-Ring 충전물로 채워진 충전층에 대한 건조 압력손실 ΔP<sub>0</sub>/H의 비교.

$$\frac{F_{V-FI}}{\sqrt{\rho_L - \rho_V}} = U_{V-FI} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}} \quad \text{[m/s]} \quad (1)$$

$$\frac{L}{V} = \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} \quad (2)$$

범람용량인수는 공식(3)과 같이 나타내어진다.

$$F_{V-FI} = F_{VFI} \left( \frac{a \sqrt{\epsilon^2}}{d \sqrt{\epsilon^2}} \right)^{0.5} \quad \text{[m}^{-1/2} \cdot \text{kg}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

$$F_v = U_v \cdot \sqrt{\rho_v \cdot m^{-1/2} \cdot kg^{-1/2} \cdot S^{-1}}$$

공식(3)에서  $a\sqrt{\epsilon}$  은 충전탑내의 충전밀도 N에 대한 충전인수이며,  $a\sqrt{\epsilon}$  은 다른 충전밀도 N에 대한 충전인수이다. 이러한 수력학적인 실험을 통하여 격자형 충전물들이 가지는 기하학적인 구조는 매우 낮은 압력손실을 나타냄을 알 수 있다.

### 3. 물질교환

#### ① 암모니아-공기/물 시스템

암모니아가 섞인 공기로 부터 물에의한 암모니아의 흡수에 대해 요구된 전달단위수 NTUov는 충전탑의 저부 액체에서 즉,  $Y_u$ 와  $X_u$ , 그리고 충전탑의 상부 가스에서 즉,  $Y_o$ 와  $X_o$ 에서 측정된 암모니아의 농도로 부터 공식(4)의 방법에 의해 계산된다.

$$NTU_{ov} = \frac{Y_u - Y_o}{\Delta Y_o^* - \Delta Y_u^*} \cdot \ln \frac{\Delta Y_u^*}{\Delta Y_o^*} \quad (4)$$

여기에서  $\Delta Y_o^*$ 는 충전탑 저부에서의 전체 Driving force(·도차)로써 공식(5)에 나타내었으며,  $\Delta Y_u^*$ 는 충전탑 상부의 농도차이며 공식(6)에 나타내었다.

$$\Delta Y_o^* = Y_o - Y_o^*, \quad Y_o^* = m_{11} \cdot X_o \quad (5)$$

[kmol/kmol]

$$\Delta Y_u^* = Y_u - Y_u^*, \quad Y_u^* = m_{11} \cdot X_u \quad (6)$$

[kmol/kmol]

이 총농도차(Overall driving force)는 평형상태 곡선의 기울기  $m_{11}$ 로 부터 결정된다. 전달단위높이 HTUov는 공식(7)로 부터 결정되며 또한 이것은 액체부하  $U_L$ 과 증기용량인수  $F_v$ 에 의존한다.

$$HTU_{ov} = \frac{H}{NTU_{ov}} \quad [m] \quad (7)$$

$$HTU_{ov} = f(F, U_L) \quad (8)$$

압력손실  $\Delta P/H$ 는 물질전달 측정에서 결정되며, 전달단위당 압력손실  $\Delta P/NTU_{ov}$ 는 공식(9)의 관계로부터 얻어질 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{NTU_{ov}} = \frac{\Delta P}{H} \cdot HTU_{ov} \quad [mmWS] \quad (9)$$

이러한 공식들을 사용하여 25mm Hiflow-Ring, Pall-Ring으로 측정된 암모니아 흡수의 결과를 그림 7에 나타내었으며, 50mm 충전물들에 대한것은 그림 8에 나타내었고, 그리고 90mm Hiflow-Ring에 대한것은 그림 9에 나타내었다. 이 실험의 결과에 따르면 Hiflow-Ring의 낮은 압력손실로 인하여 송풍기의 동력을 적게 소모시키므로 에너지 비용이 적게 든다.

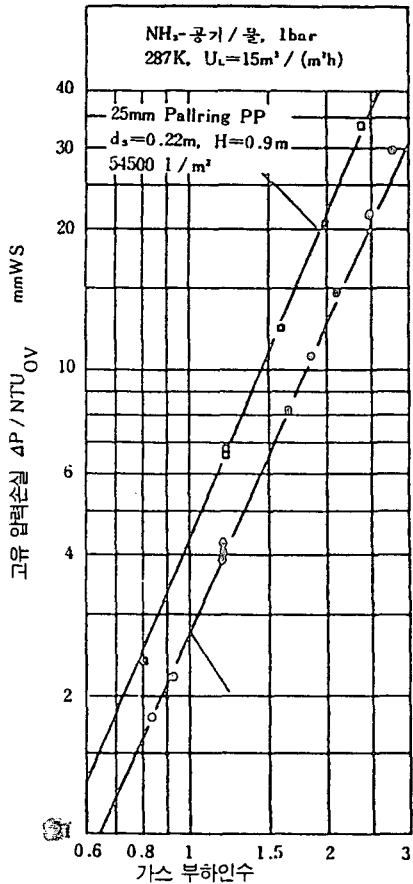
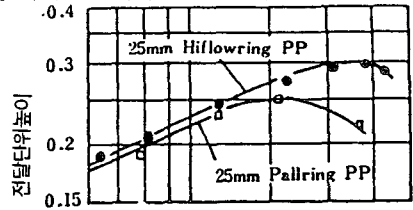


그림 7. 합성수지 PP로 제작된 25mm Hiflow-Ring과 Pall-Ring 충전물에 대해 유효한 가스 부하인수  $F_v$ 의 함수로써 고유압력손실  $\Delta P/NTU_{ov}$ .

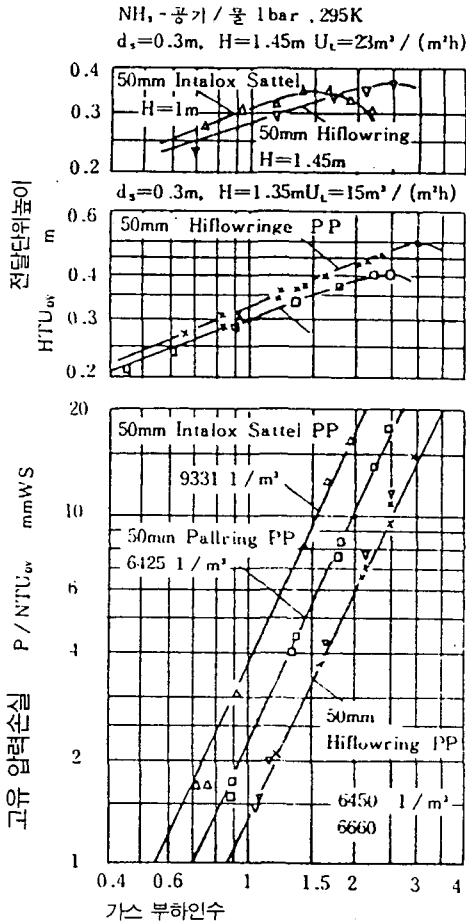


그림 8. 합성수지 PP로 제작된 50mm Hiflow-Ring 충전물에 대해 유효한 가스 부하인수  $F_v$ 의 함수로써 고유 압력손실  $\Delta P/NTU_{ov}$ .

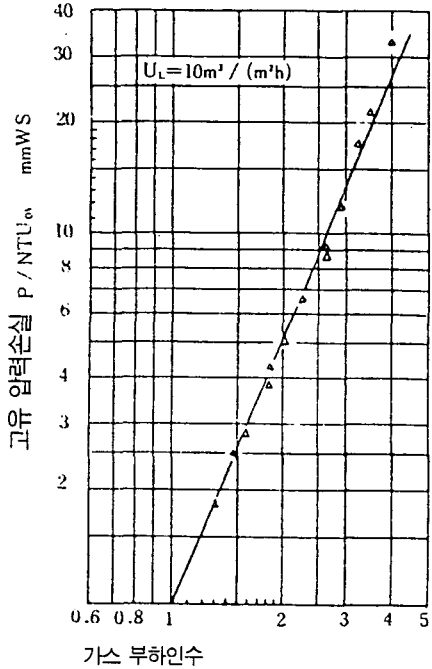
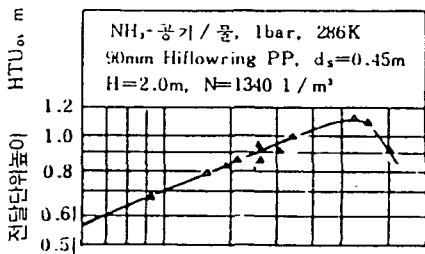


그림 9. 합성수지 PP로 제작된 90mm Hiflow-Ring 충전물에 대해 유효한 가스 부하인수의 함수로써 전달단위높이 HTU<sub>0v</sub>와 고유 압력손실  $\Delta P/NTU_{ov}$ .

## ② 이산화탄소-공기/물 시스템

충진탑 상부의 농도  $C_0$ 와 하부의 농도  $C_u$ 에서 측정된 이산화탄소로 부터 전달단위상수  $C_0$ 와 지수  $n$ 을 표 3의 a)에 나타내었다. 이것은 범람한계 65% 범위에 적용되었고 선형대수를 통해 계산된 결과이다.

결과적으로 동일 운전조건하에서 측정된 체적물 질전달계수  $\beta_i \cdot a$ 가 Pall-Ring보다는 Hiflow-Ring이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 표 3의 b)는 가스 상내의 측정에서 사용된 인자들을 나타낸 것이다.

NTU<sub>i</sub>관계는 공식(10)과 같이 결정되고 공식(11)은 전달단위높이를 나타낸것이다. 이와같은 결과에 따라서  $\beta_i \cdot a$ 는 공식(12)와 같이 HTU<sub>i</sub>과 U<sub>L</sub>의 관계로 부터 결정된다. 이러한 공식들에 따르는 평가 결과를 그림(10)에 나타내었다.

$$NTU_i = \ln \frac{C_0}{C_u} \quad (10)$$

〈표 3〉 충전탑 지름 0.3m로부터 조사된 근거로 충전물 충전탑 흡수물질전달에 의한 공식, 유효한 합성수지로된 25,50mm Hiflow-Ring과 Pall-Ringe.

a) 액체상 내의 물질전달  $F_v \leq 0.65F_{v,r}$

$$(13) \beta_L \cdot a = C \cdot U_L^{0.65} (1/S)$$

$$U_L \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h}), D_L \text{ m}^2/\text{s}$$

10 <sup>3</sup> d (m)	충진물 (합성수지)	C·10 <sup>-4</sup>	n	H (m)	유효한 범위
25	Hiflow-ring	3.19	0.824	0.85	F·0.65F <sub>v,r</sub>
25	PP	2.95	0.824	1.40	
50		2.1	0.787	1.35	U <sub>L</sub> =0.012m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> s)
25	Pall-ring	2.95	0.824	0.85	1bar, 293K
50	PP	1.9	0.787	1.35	

b) 가스상내의 물질전달  $U_L \cdot 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h}) F_v \cdot 0.65 F_{v,r} \cdot 0.4 F_m^{-1/2} \text{ kg}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$

$$(15) \beta_L \cdot a = C \cdot F_m^{0.67} (1/S)$$

$$U_L \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s}), D_L \text{ m}^2/\text{s}, F_m^{-1/2} \text{ kg}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$$

10 <sup>3</sup> d (m)	충진물 (합성수지)	C·10 <sup>-4</sup>	n	m	측정점의 수	(%)	lit.
25	Hiflow-ring	3.6	0.682	0.33	15	+6.4	Autor
50	PP	5.18	0.675	0.46	22	+5	Autor
25	Pall-Ring	4.0	0.845	0.33		±10	(I)
50	PP	4.0	0.67	0.33	10	±10	Autor
50		5.78	0.667	0.46	11	±5	Autor

$$HTU_L = \frac{H}{NTU_L} \text{ [m]} \quad (11)$$

$$\beta_L \cdot a = \frac{U_L}{HTU_L} \text{ [1/s]} \quad (12)$$

### III. 결 론

본 논문에서는 합성수지 PP로 제작된 Hiflow-Ring을 사용한 처리기술 특성을 소개하였다. 충전물을 공기/물, 암모니아-공기/물, 이산화탄소-공기/물의 세가지 물질시스템을 가지고 실험을 실행하였다. Pall-Ring과 Intalox Sattel, Hiflow-Ring 충전물들을 정상상태 조건하에서 일반적으로 비교해 보면 Hiflow-Ring이 높은 부하에서 각 전달단위에 있어서 실제로 낮은 압력손실과 우수한 분리작용을 나타낸다. 규칙적인 유입온도에서 낮은 에너지 비용으로

a) CO<sub>2</sub>-물 / 공기, 1bar, 295.9K, F<sub>v</sub>=0.55m<sup>-1/2</sup>kg<sup>1/2</sup>s<sup>-1</sup>

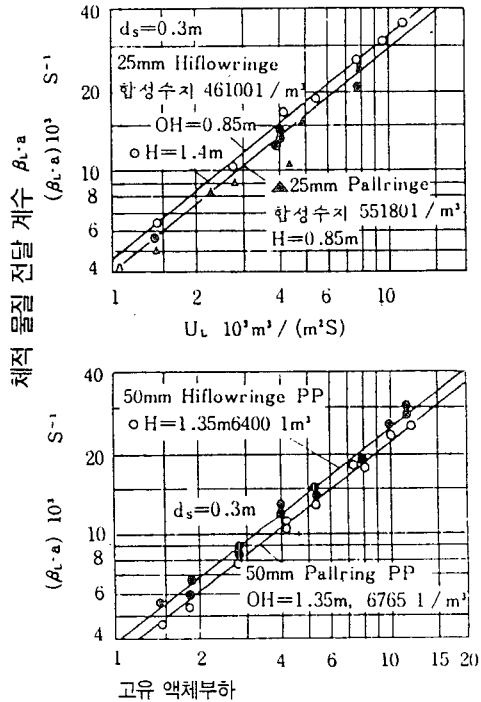


그림 10. 합성수지로 제작된 25,50mm의 Hiflow-Ring과 Pall Ring충진물을 사용한 고유 액체부하의 함수로서 액체상내에서의 체적물질전달계수의 측정. 매개변수 ; 가스 부하인수 F<sub>v</sub>, 유효범위 : F<sub>v</sub> ≤ 0.65F<sub>v,r</sub>.

흡수를 실행할 수 있다. 이것에 대한 평가는 간단하게 주어진 공식에 따라서 가능하며 흡수에 의한 체적물질전달계수  $\beta_L \cdot a$  또는  $\beta_L \cdot a$ 가 실제적으로 모든 부하범위에서 계산되어진다. Hiflow-Ring은 낮은 압력손실  $\Delta P/NTU_{ov}$ 의 결과가 나타나므로 집약적인 단위의 흡수에 있어서 에너지 비용을 최소화 시키는데 이바지한다.