

수용액에서의 질소산화물 흡수

II. 다공판탑에서 NO_x 흡수에 의거 생성되는 HNO_3 와 HNO_2 농도

김병태 · 이후근 · 전관식 · 이건재* · 박현수

한국에너지연구소
*한국과학기술원

(1986년 10월 4일 접수, 1987년 2월 24일 채택)

NO_x Absorption into Aqueous Solutions

II. HNO_3 and HNO_2 Concentration produced by NO_x Absorption for a Sieve Tray Column

B.T. Kim, H.K. Lee, K.S. Chun, K.J. Lee* and H.S. Park

Korea Advanced Energy Research Institute

*Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received 4 October 1986; accepted 24 February 1987)

요 약

다공판탑에서 물에 의한 질소산화물의 흡수결과 생성되는 액상의 HNO_3 와 HNO_2 농도를 측정·분석하였다. NO_x 흡수가 기상의 N_2O_4 농도에 지배된다고 가정한 제 1보와는 달리 기상의 N_2O_4 뿐 아니라 N_2O_3 의 농도가 NO_x 흡수를 지배한다고 가정하여 전개한 흡수모델로 부터 얻은 이론값과 실험치를 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내었으며, HNO_2 는 농도가 높을수록 급격히 분해하는 경향을 나타내었다.

Abstract—The concentrations of HNO_3 and HNO_2 in liquid phase produced from the absorption of NO_x into water in a sieve tray column were measured and analyzed.

The mathematical model in the Part II of this study was developed in the assumption that the absorption of NO_x would be governed by the concentration of gaseous N_2O_3 as well as the concentration of gaseous N_2O_4 , but in the Part I, the concentration of gaseous N_2O_4 had been considered as the only active parameter in the absorption process of NO_x .

With the comparison between the theoretical values from this mathematical model and experimentals, they were in good agreement and HNO_2 tended to be dissociated rapidly at the higher concentration of HNO_2 .

1. 서 론

기상에서 NO_x 는 NO , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4 와 N_2O_5 로 존재하고 상온에서 NO_2 와 N_2O_4 는 기상평형상태로 존재하며 NO 와 NO_2 도 N_2O_3 와 함께 평형상태로

존재한다[1, 2].

제 1보(“다공판탑의 흡수효율”)에서는 다공판탑에서 물에 의해 NO_x 를 흡수할 경우 질소산화물의 농도, 기체유량, 액체유량, 다공판의 기공율 및 다공판탑의 단수를 변화시키면서 흡수실험을 수행하여 NO_x 흡수

Table 1. Oxidation of NO in air.

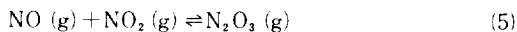
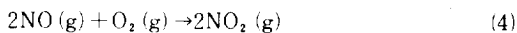
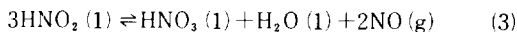
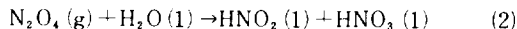
NO conc. in air (PPM)	Time for half NO to be oxidized to NO ₂ (min)
20,000	0.175
10,000	0.35
1,000	3.5
100	35
10	350 (5.84 hr)
1	3500 (58.4 hr)

효율을 측정하였는데, 흡수계산 모델을 전개할 때 다공판타에서 기상에 존재하는 질소산화물은 NO, NO₂와 N₂O₄만 고려하여 물에 의한 질소산화물의 흡수효율을 계산하였다[3]. 그러나 본 논문에서는 기상에 존재하는 질소산화물의 성분이 NO, NO₂, N₂O₄ 뿐만 아니라 N₂O₃까지 고려하여 흡수효율과 질소산화물의 흡수 후 액상으로 생성되는 산농도를 계산하여 실험결과와 비교·분석 하였다.

Carberry[4]와 Andrew 및 Hanson[5] 등은 NO_x가 물에 흡수되는 기구중에 N₂O₃의 흡수를 고려하지 않고 NO의 산화반응이 NO_x 흡수에 유효과정이라고 하였다. 그러나 Table 1에서 보는 바와 같이, NO의 농도가 낮을 경우 NO의 산화반응은 상당히 느린[6] 반면에, NO가 NO₂와 반응하여 N₂O₃로 되는 반응은 상당히 빠르므로[7] N₂O₄ 뿐만 아니라 N₂O₃도 NO_x 흡수를 지배한다는 Sherwood 흡수반응기구에 의하여 NO_x 흡수가 진행된다고 가정하여 다공판타에서 물에 의한 NO_x 흡수효율과 흡수 후 액상으로 생성되는 HNO₃와 HNO₂ 농도를 예측할 수 있는 수학적 모델을 전개하였다.

2. NO_x 흡수반응기구

Sherwood는 물에 의한 흡수기구가 다음과 같은 평형과 반응에 의해서 표시된다고 하였다[8].



제 1보[3]에서는 상기 반응식중 식(5)와 (6)의 반응을 무시하였으나, 상기 반응식에 의하면 NO_x 흡수는

N₂O₃의 가수분해 반응에도 지배되는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 Sherwood의 흡수기구와 같이 NO_x 흡수반응은 N₂O₄와 N₂O₃에 의해 지배된다고 가정하였다.

2-1. 분압의 계산

흡수에 관계되는 NO, NO₂, N₂O₃와 N₂O₄로 존재하는 NO_x를 Chemical NO₂(NO₂^{*})와 Chemical NO(NO^{*})의 분압으로 표시하면 제 1보[3]와는 달라 다음과 같다.

$$P_{\text{NO}_x} = P_{\text{NO}_2^*} + P_{\text{NO}^*} \quad (7)$$

제 1보[3]에서는 P_{NO₂^{*}가 P_{NO₂}와 2P_{N₂O₄}의 합으로 되어 있으나 여기서는 P_{NO₂^{*}}와 P_{NO^{*}}는 다음과 같이 정의된다.}

$$P_{\text{NO}_2^*} = P_{\text{NO}_2} + 2P_{\text{N}_2\text{O}_4} + P_{\text{N}_2\text{O}_3} \quad (8)$$

$$P_{\text{NO}^*} = P_{\text{NO}} + P_{\text{N}_2\text{O}_3} \quad (9)$$

상기식에 사용된 P_{N₂O₄}와 P_{N₂O₃}를 평형관계식으로 표시하면 다음과 같다.

$$P_{\text{N}_2\text{O}_4} = K_1 P_{\text{NO}_2}^2 \quad (10)$$

$$P_{\text{N}_2\text{O}_3} = K_5 P_{\text{NO}} P_{\text{NO}_2} \quad (11)$$

여기서 K₁과 K₅의 값을 온도의 함수로서 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_1 = 0.707 \times 10^{-9} \exp\left(\frac{6866}{T}\right) \quad (12)$$

$$K_5 = 66.15 \times 10^{-9} \exp\left(\frac{4750}{T}\right) \quad (13)$$

P_{NO₂^{*}}와 P_{NO^{*}}의 차를 P_M이라 하고 P_{NO_x}에 관해서 (8), (9), (10), (11) 식을 적용하면 미지수 P_{NO}와 P_{NO₂}로 된 다음과 같은 연립 비선형식이 된다.

$$P_{\text{NO}_x} = P_{\text{NO}} + P_{\text{NO}_2} + 2K_1 P_{\text{NO}_2}^2 + 2K_5 P_{\text{NO}} P_{\text{NO}_2} \quad (14)$$

$$P_M = P_{\text{NO}_2} + 2K_1 P_{\text{NO}_2}^2 - P_{\text{NO}} \quad (15)$$

P_{NO_x}와 P_M은 P_{NO₂^{*}}와 P_{NO^{*}}로부터 계산될 수 있는 값으로서 식(14)와 (15)를 Newton Raphson 방법에 의해서 P_{NO}와 P_{NO₂} 값을 구하여 식(10)과 (11)에 대입하면 P_{N₂O₄}와 P_{N₂O₃} 값이 결정된다.

2-2. 흡수속도

물에 의해 기상에 존재하는 NO₂^{*}와 NO^{*}의 흡수속도는 제 1보[3]와 달리 N₂O₃를 고려하였기 때문에 다음과 같이 표시할 수 있다[10].

$$\bar{R}_{\text{NO}_2^*} = \bar{R}_{\text{NO}_2} + 2\bar{R}_{\text{N}_2\text{O}_4} + \bar{R}_{\text{N}_2\text{O}_3} \quad (16)$$

$$\bar{R}_{\text{NO}^*} = \bar{R}_{\text{NO}} + \bar{R}_{\text{N}_2\text{O}_3} \quad (17)$$

따라서 NO_x 의 총괄 흡수속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{R}_{\text{NO}_x} = \bar{R}_{\text{NO}_2}^* + \bar{R}_{\text{NO}}^* \quad (18)$$

질소산화물중 용해도는 N_2O_4 와 N_2O_3 가 NO_2 에 비하여 대단히 커서 물에 흡수되는 주성분은 N_2O_4 와 N_2O_3 이므로 NO_2 와 NO 가 흡수되는 것은 무시할 수 있으며 기체흡수에 penetration 이론이 적용되고 물질 전달의 저항이 액막에 존재한다고 가정하면 식 (16)과 (17)은 다음과 같이 표시된다[2, 10].

$$\bar{R}_{\text{NO}_2}^* = 2 \left(\frac{\sqrt{DK}}{H} \right)_{\text{N}_2\text{O}_4} P_{\text{N}_2\text{O}_4} + \left(\frac{\sqrt{DK}}{H} \right)_{\text{N}_2\text{O}_3} P_{\text{N}_2\text{O}_3} \quad (19)$$

$$\bar{R}_{\text{NO}}^* = \left(\frac{\sqrt{DK}}{H} \right)_{\text{N}_2\text{O}_3} P_{\text{N}_2\text{O}_3} \quad (20)$$

여기서 본 실험에 사용된 $\left(\frac{\sqrt{DK}}{H} \right)_{\text{N}_2\text{O}_4}$ 값은 Dekker 등의 실험결과에서 얻은 $7.7 \times 10^{-4} \text{ kg mole/atm.m. sec}$ 이고, $\left(\frac{\sqrt{DK}}{H} \right)_{\text{N}_2\text{O}_3}$ 값은 Correaveau에 의해 제시된 $1.59 \times 10^{-3} \text{ kg mole/atm.m. sec}$ 이다[12].

2-3. 흡수반응

NO_x 의 가수분해 반응은 포말의 기액접촉면에서 일어나고 흡수속도가 기액접촉면에 비례한다. 다공판탑의 포말(froth)에서 NO_x 흡수반응시 다음과 같은 가정이 적용된다고 하자.

- (1) 다공판탑의 포말은 잘 혼합되며
- (2) 탑내의 기체는 이상기체이며 역혼합은 없고
- (3) 등온 과정이다.

제 1보[3]와는 달리 NO_2^* 외에 NO^* 을 고려하여 흡수반응을 전개하면 정상상태에서 포말의 단위 부피당 NO_2^* 와 NO^* 의 흡수반응에 따라 다공판탑의 포말을 떠나는 NO_2^* 와 NO^* 의 분압은 다음 식들과 같이 표시된다.

$$P_{\text{NO}_2, i, \text{out}}^* = P_{\text{NO}_2, i, \text{in}}^* - \frac{\bar{R}_{\text{NO}_2}^* a RT V_{\text{froth}}}{G} \quad (21)$$

$$P_{\text{NO}, i, \text{out}}^* = P_{\text{NO}, i, \text{in}}^* - \frac{\bar{R}_{\text{NO}}^* a RT V_{\text{froth}}}{G} \quad (22)$$

여기서 첨자 i는 다공판탑의 단수를 말하며, in은 포말로 들어오는 상태를 나타내고 out은 포말을 떠나는 상태를 나타낸다. 또 a는 기액접촉면적으로서 Kochetov[13]가 제시한 값을 사용하였다. 또한 NO_x 가 흡수되어 포말에서 생성되는 HNO_3 와 HNO_2 농도는 흡수반응기구에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$C_{\text{HNO}_3, i, \text{out}} = C_{\text{HNO}_3, i, \text{in}} + \bar{R}_{\text{N}_2\text{O}_4} \cdot \frac{a V_{\text{froth}}}{L} \quad (23)$$

$$C_{\text{HNO}_2, i, \text{out}} = C_{\text{HNO}_2, i, \text{in}} + (\bar{R}_{\text{N}_2\text{O}_4} + \bar{R}_{\text{N}_2\text{O}_3}) \frac{a V_{\text{froth}}}{L} \quad (24)$$

2-4. HNO_2 분해반응

다공판탑의 포말에서 N_2O_4 와 N_2O_3 의 가수분해반응에 의해서 생성된 HNO_2 는 다음과 같은 가정하에서 식 (3)과 같이 다공판탑의 포말에서 분해된다. (1) 포말은 잘 혼합되고, (2) 기체는 이상기체이며, (3) 액체의 유량변화는 거의 없고, (4) 질산농도는 일정하다. HNO_2 분해반응은 비교적 빠른 분해반응이고 평형상수는 다음과 같이 표현된다.

$$K = \frac{[C_H^*] [C_{\text{NO}_2}] P_{\text{NO}}}{[C_{\text{HNO}_2}]^3} \quad (25)$$

Abel과 Schmid[14]에 의해 측정된 K_3 값은 다음 식으로 표현된다.

$$K_3 = 13.3 \exp \left\{ 5393.3 \left(\frac{1}{285.5} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (26)$$

Henry 법칙이 적용된다고 가정하면 HNO_2 가 분해되어 포말을 떠나는 순간에 생성되어 있는 NO 의 양은 HNO_2 의 분해평형 관계식으로 부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$C_{\text{NO}} = \frac{P_{\text{NO}}}{H_{\text{NO}}} = \frac{1}{H_{\text{NO}}} \left\{ \frac{K_3 [C_{\text{HNO}_2}]^3}{[C_H^*] [C_{\text{NO}_2}]} \right\}^{1/2} \quad (27)$$

HNO_2 가 분해되어 생성되는 C_{NO} 를 사용하여 식 (3)과 같이 HNO_2 가 분해되고 흡수액에 생성된 HNO_3 와 분해 후 남아있는 HNO_2 가 포말을 떠나는 상태로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\text{유출 } C_{\text{HNO}_3} = C_{\text{HNO}_3, \text{out}} + 1/2 C_{\text{NO}} \quad (28)$$

$$\text{유출 } C_{\text{HNO}_2} = C_{\text{HNO}_2, \text{out}} - 3/2 C_{\text{NO}} \quad (29)$$

2-5. 다음 단으로 들어가는 NO_x 분압의 계산

HNO_2 의 분해반응에 의해 생성된 NO 의 일부가 탑 공간에서 O_2 와 산화반응을 하여 NO_2 로 되는데 이 때의 전환율 X_{NO} 는 다음 식과 같이 표시할 수 있다 [10].

$$K_4 (P_{\text{NO}, \text{in}}) (P_{\text{O}_2, \text{in}}) \left\{ 1 - \left(\frac{P_{\text{NO}, \text{in}}}{2P_{\text{O}_2, \text{in}}} + 2 \right) X_{\text{NO}} + \left(\frac{P_{\text{NO}, \text{in}}}{P_{\text{O}_2, \text{in}}} + 1 \right) X_{\text{NO}}^2 - \frac{P_{\text{NO}, \text{in}}}{2P_{\text{O}_2, \text{in}}} X_{\text{NO}}^3 \right\} \cdot \tau = X_{\text{NO}} \quad (30)$$

여기서 반응속도 상수 K_4 는 온도의 함수인 다음 식으

로 표시할 수 있다 [3].

$$K_4 = 10^{\left(\frac{645}{T} - 0.75\right)} \quad (31)$$

식(30)에서 X_{NO} 를 구한 후 다음 단으로 들어가는 NO_2^* , NO^* 와 O_2 의 분압은 각각

$$P_{NO_2^*, i+1, in} = P_{NO_2^*, i, out} + P_{NO} X_{NO} \quad (32)$$

$$P_{NO^*, i+1, in} = P_{NO^*, i, out} - P_{NO} X_{NO} \quad (33)$$

$$P_{O_2, i+1, in} = P_{O_2, i, in} \left(1 - \frac{P_{NO, i, in}}{2P_{O_2, i, in}} X_{NO}\right) \quad (34)$$

이 된다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험을 위해 사용된 실험장치는 제 1보[3]에 기술되어 있으며, 흡수탑의 입구와 출구에서 일정량의 기체를 연속적으로 채취하여 탑 입구와 출구의 NO_x 농도를 측정하였으며, 입구와 출구에서의 NO_x 농도가 약 30분 정도 변화가 없을 때를 정상상태에 도달하였다고 가정하여 흡수효율을 측정하였으며, 흡수탑출구에서 액상의 시료를 채취하여 C_{H^+} 와 C_{HNO_2} 를 측정하였다. NaOH 용액으로 중화정정하기 위해서 흡수액 적당량을 채취하여 C_{H^+} 를 측정하였고, HNO_2 농도를 측정하기 위해서는 흡수탑 출구에서 채취된 액상시료 1ml를 적당량 희석시킨 후 1-5ml volumetric flask에 넣은 후 Saltzman 용액을 20ml 넣고 증류수를 가하여 25ml로 만든 다음 약 40분 정도 발색시켜 Spectrophotometer(Beckman-spectra 20, wave length 550 μ m)를 이용하여 HNO_2 농도를 측정하였다 [15].

4. 결과 및 토의

N_2O_4 뿐 아니라 N_2O_3 도 NO_x 흡수반응을 지배한다는 Sherwood 흡수반응기구를 이용하여 다공판탑의 포달과 공간에서의 NO_x 흡수반응을 근거로 전개한 수학적 모델의 결과를 Table 2에 표시된 실험조건하에서 제 1보[3]에 기술한 실험장치를 이용하여 얻은 실험결과와 비교하였다.

기체유량 $1.16 \times 10^{-4} m^3/sec$ 이고, 액체유량 $8.33 \times 10^{-6} m^3/sec$ 일 때, 5단 다공판탑에서의 NO_x 흡수효율과 N_2O_3 을 고려하여 계산한 흡수효율 결과를 Fig. 1에 도시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 계산된 흡수효율은 제 1보[3]에서 NO_x 중 N_2O_3 를 고려하지 않

Table 2. Experimental condition.

No. of stage	5
Perforation of plate	1%
Height of stage	25.4 cm
Concentration range of NO_x	6,000-50,000 PPM
Gas flow rate	$0.5-2.5 \times 10^{-4} m^3/sec$
Liquid flow rate	$8.33 \times 10^{-4} m^3/sec$
Temperature of gas	298 K
Temperature of Liquid	288 K

았을 때와 약간의 차이는 있으나 거의 비슷한 경향을 나타내었으며, 실험치가 이론치에 비하여 높게 나타났으나 NO_x 농도가 낮을수록 제 1보의 이론치가 더 잘 일치하고 NO_x 농도가 높을수록 본 연구의 이론치가 더 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 2, 3, 4, 5에서는 흡수액의 유량을 $8.33 \times 10^{-6} m^3/sec$ 로 고정하고 기체유량을 0.50×10^{-4} 에서 $2.42 \times 10^{-4} m^3/sec$ 로 변화하면서 NO_x 주입농도에 따라 흡수액이 다공판탑에서 유출되는 즉시 액상에 존재하는 C_{H^+} 와 C_{HNO_2} 를 측정하여 본 연구에서 전개한 이론치와 제 1보에서 전개한 이론치와 비교한 결과로서 흡수용액 중의 산농도 변화를 나타내고 있다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 NO_x 농도의 증가와 더불어 산농도가 증가하며 일정한 NO_x 주입농도에서는 공기유량이 증가할수록 액상의 산농도도 높아지는 경향을 알 수 있다. 또한 실험결과는 제 1보에서 전개한 산농도에 C_{H^+} 는 거의 일치하나 C_{HNO_2} 는 크게 차이가 있는 것을 알 수 있으며 본 연구에서 전개한 산농도에는 C_{H^+} 는 물론 C_{HNO_2} 도 실험결과에 잘 근접하는 것을 보여주고 있다. 그러므로 본 연구에서 NO_x 흡수모델에 N_2O_4 뿐

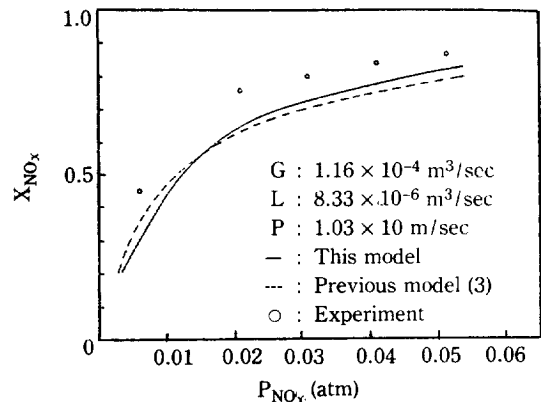


Fig. 1. Experimental NO_x removal efficiency and those predicted by the model for varying NO_x feed concentration.

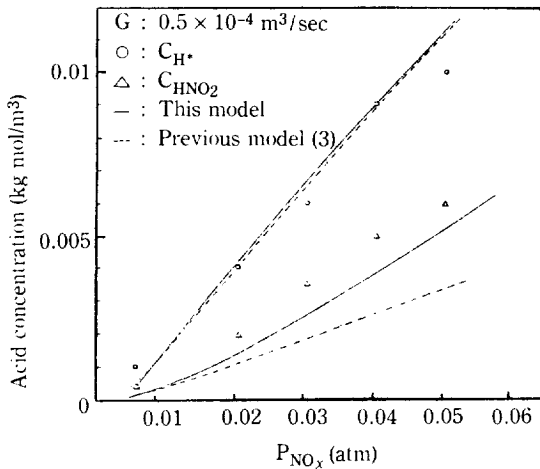


Fig. 2. Effluent acid concentration vs. input partial pressure of NO_x .

아니라 N_2O_3 까지 고려하여 전개한 수학적 모델은 NO_x 흡수에 의한 산농도 예측에 더 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 N_2O_3 을 고려하는 것이 NO_x 흡수 효율을 계산하는데 타당하다고 생각된다. 이들 그림에서 보는 바와 같이, C_{H^+} 가 C_{HNO_2} 보다 더 높게 나타났는데 이러한 이유는 C_{H^+} 가 C_{HNO_3} 와 C_{HNO_2} 을 합한 전체 산농도를 나타내기 때문이다. 상기 실험에서 HNO_2 는 앞서 흡수 반응기에서 언급된 바와 같이 불안정한 상태로 존재하여 분해되기 때문에 HNO_2 농도 측정에서 실험적 오차가 존재할 수 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 흡수효율에서도 실험치가 이론치에 비해 높게 나타났으므로 Fig. 2, 3, 4, 5에

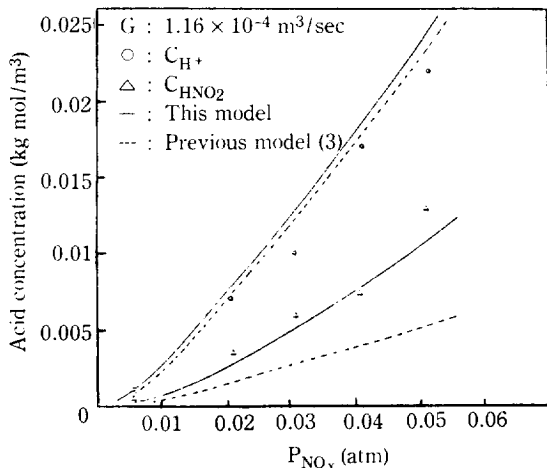


Fig. 3. Effluent acid concentration vs. input partial pressure of NO_x .

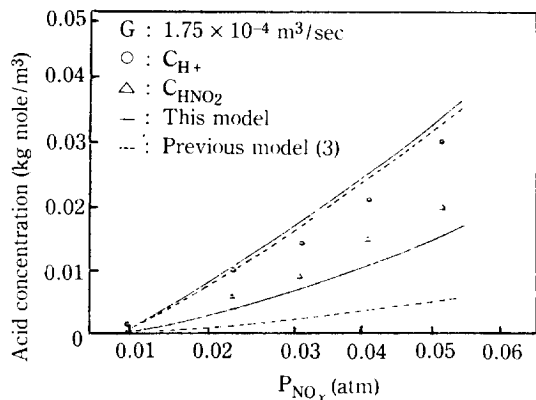


Fig. 4. Effluent acid concentration vs. input partial pressure of NO_x .

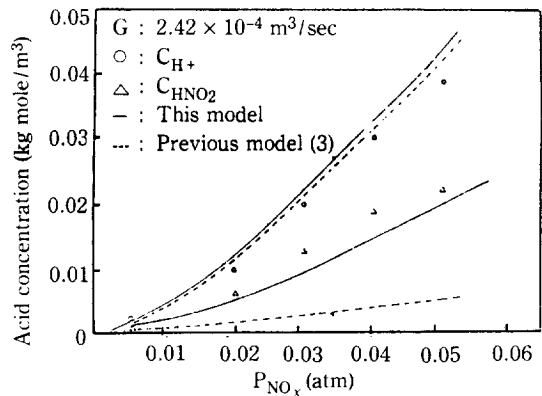


Fig. 5. Effluent acid concentration vs. input partial pressure of NO_x .

서 흡수액의 산농도도 실험치가 더 높게 나타나야 하는데 C_{HNO_2} 는 이론치에 비해 약간 높게 나타났으나 C_{H^+} 는 실험치가 더 낮게 나타났다. 이와 같은 차이는 C_{HNO_2} 분석시 흡수액을 시료로 채취한 직후 바로 희석하여 Saltzman 용액을 가함으로서 안정한 NO_2^- 착화합물을 형성하는데 반하여 C_{H^+} 분석 시료는 희석하지 않고 중화정정을 하게 되는데 중화정정시 불안정한 HNO_2 의 일부가 분해되기 때문인 것으로 생각된다.

이와 같이 C_{HNO_2} 가 급격히 분해되는 현상을 살펴 보기 위하여 NO_x 흡수 실험에서 유출되는 흡수액을 비이커에 넣은 후 정지상태에서 시간이 경과함에 따라 흡수액중 C_{HNO_2} 의 변화량을 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 C_{HNO_2} 농도가 높을수록 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하고 낮은 농도일수록 완만하게 감소하는 경향을 나타냄으로서 위의 C_{H^+} 에 관한 이론치와 실험치의 비교 결

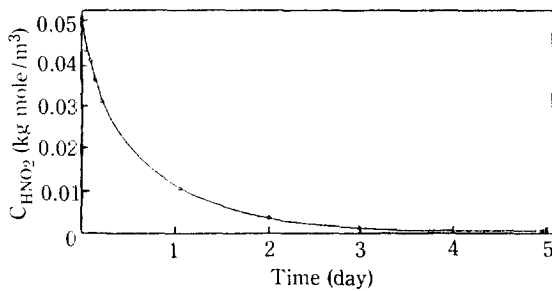


Fig. 6. The variation of effluent nitrous acid concentration with the increasing time.

과를 뒷받침해 주고 있다.

5. 결 론

1. 질소산화물중 N_2O_4 뿐 아니라 N_2O_3 도 NO_x 흡수에 크게 기여한다는 Sherwood의 흡수반응기구에 의거 수학적으로 전개한 흡수모델로부터 계산한 NO_x 흡수효율과 산농도는 실험결과와 잘 일치하였다.

2. NO_x 흡수에 의해 생성된 HNO_2 는 농도가 높을수록, 시간이 경과함에 따라 급격히 분해하고 농도가 낮을수록 서서히 분해하였다.

3. 본 연구에서 전개한 NO_x 흡수계산 모델은 다공판탑 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

NOMENCLATURE

- a : Interfacial area per unit volume of froth [m^2/m^3]
 C_i : Liquid-phase concentration of component i [$kg\ mole/m^3$]
 D : Diffusivity [m^2/sec]
 G : Gas flow rate [m^3/sec]
 H : Henry's law constant [$m^3\cdot atm/kg\ mole$]
 K_i : Reaction rate constant for reaction i
 L : Liquid flow rate [m^3/sec]
 NO^* : $NO + N_2O_3$
 NO_2^* : $NO + 2N_2O_4 + N_2O_3$

NO_x : $NO_2^* + NO^*$

P_i : Partial pressure of gas component i [atm]

R : Gas constant [$m^3\cdot atm/kg\ mole\ ^\circ K$]

\bar{R}_i : Local absorption rate per unit area for component i [$kg\ mole/m^2\cdot sec$]

T : Absolute temperature [K]

V : Volume of froth [m^3]

X : Conversion fraction of NO

τ : Residence time [sec]

REFERENCES

- Dean, J.A.: "Langes Handbook of Chemistry", 11th ed. (1973).
- Hofzyer, P.J. and Kwanten, F.J.G.: "Process for Air Pollution Control", 2nd. ed., pp. 164-187, Chemical Rubber Co., Cleveland (1972).
- 이후근, 정명수, 전관식, 박현수: 화학공학, **24**, 255 (1986).
- Carberry, J.J.: *Chem. Eng. Sci.*, **9**, 189 (1959).
- Andrew, S.P. and Hanson, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **14**, 105 (1961).
- First, M.W. and Viles, F.J.: *J. of the Air Pollution Control Association*, **21**, 122 (1971).
- Wayne, L.G. and Yost, D.M.: *J. Chem. Phys.*, **19**, 41 (1951).
- Sherwood, T.K., Pigford, R.L. and Wilke, C.R.: "Mass Transfer" Chap. 8, McGraw-Hill (1975).
- Counce, R.H.: *AIChE J.*, **29**, 26 (1983).
- 김병태: "다공판탑을 이용한 NO_x gas 흡수에 관한 연구", Master's Thesis in Nuclear Engineering, KAIST (1986).
- Dekker, W.A., Snoeck, E. and Kramers, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **11**, 61 (1959).
- Corriveau, C.E., Jr.: The Absorption of NO into water, Master's Thesis in Chemical Engineering, Univ. of California, Berkeley (1971).
- Kochetov, N.M. and Rodiono, A.I.: *J. of Appl. Chem. of the USSR*, **50**, 2496 (1976).
- Abel, E. and Schmid, H.: *Z. physik Chem.*, **132**, 56 (1928), **134**, 279 (1928), **136**, 135 (1928), **136**, 419 (1928).
- Saltzman, B.E.: *Analy. Chem.*, **26**, 1949 (1954).