

과도상태의 회전형 흡수기에서 혼합기체 중 이산화탄소 흡수량 계산 모델

백 현 중*

(2002년 6월 17일 접수, 2002년 11월 11일 심사완료)

A Mathematical Model on the Absorption Rate of Carbon-Dioxide in Mixed Gas During the Transient State of Rotary Type Absorbers

Paik, Hyun-Jong

Key Words: Carbon-Dioxide(이산화탄소), Absorption(흡수), Absorber(흡수기), Rotary Type Absorber(회전형 흡수기), Transient State(과도상태)

Abstract

A mathematical model for the prediction of carbon-dioxide absorption rate during the transient state of rotary type absorber is developed. The rotary type absorber operates using a fast rotating porous structure and clean water. The model for the transient state rotary type absorbers is based on the steady state model of packed tower absorber. The paper manipulates the operating data of an arbitrary quasi-steady state condition of rotary type absorber for the determination of the coefficients involved in the model developed. The prediction accuracy is evaluated from the measured data of rotary type absorber operated under fast transient state. The measured data include the mole fraction of carbon dioxide in mixed gas and the pressure of absorber. The relative error in carbon dioxide prediction is estimated to be 20% at maximum. The model is successfully applied for the prediction of the behavior of a closed cycle diesel engine.

기호설명

A : 기체와 물방울의 접촉면적 [m^2]
 C_m : CO_2 농도 [kg/m^3]
 C_{mo} : 물방울 외부 기체 속의 CO_2 농도 [kg/m^3]
 C_{no} : 물방울 표면에서의 CO_2 농도 [kg/m^3]
 C_n : CO_2 물분율(흡수기 내부 기체 속) [-]
 C'_n : CO_2 물분율(흡수기 내부 물 속) [-]

C_{nl} : CO_2 물분율(흡수기 입구 기체 속) [-]
 C_{no} : CO_2 물분율(흡수기 출구 기체 속) [-]
 C'_{nl} : CO_2 물분율(흡수기 입구 물 속) [-]
 C'_{no} : CO_2 물분율(흡수기 출구 물 속) [-]
 C_{ne} : 기체 속의 평형 CO_2 물분율 [-]
 dr : 반경방향 미소거리 [m]
 D : 물방울의 직경 [m]
 D : 기체 확산계수 [m^2/s]
 H : 헨리(Henry) 상수 [N/m^2]
 K : 기체 측 질량전달계수 [$kg/m^3 \cdot s$]
 L : 물과 기체의 반경방향 접촉거리 [m]
 \dot{m}_a : 혼합기체 질량속도 [kg/s]

* 회원, 국방과학연구소
 E-mail : hjpaik@add.re.kr
 TEL : (055)540-6139 FAX : (055)542-3737

- \dot{m}_l : 물 질량속도 [kg/s]
 \dot{m}_{al} : 혼합기체 질량속도(흡수기 입구) [kg/s]
 \dot{m}_{ao} : 혼합기체 질량속도(흡수기 출구) [kg/s]
 \dot{m}_{cl} : CO₂ 질량속도(흡수기 입구) [kg/s]
 \dot{m}_{co} : CO₂ 질량속도(흡수기 출구) [kg/s]
 \dot{m}_{cr} : 흡수기에서 흡수된 CO₂ 질량속도 [kg/s]
 M_a : 혼합기체 평균 분자량 [-]
 M_c : CO₂의 분자량 [-]
 M_l : 물 분자량 [-]
 P : 흡수기 내부 압력 [Pa]
 P_p : CO₂의 물방울 밖에서의 부분압 [Pa]
 r : 흡수기 내 반경방향 거리 [m]
 R_f : 흡수기 중심에서 물 분출구까지 거리 [m]
 R_M : 흡수기 중심에서 일차 회전체 바깥까지의 거리 [m]
 R_O : 흡수기 중심에서 이차 회전체 바깥까지의 거리 [m]
 $Sc = \frac{\nu}{\mathcal{D}}$: Schmidt 수 [-]
 V_g : 기체의 속도 [m/s]
 V_l : 물방울의 속도 [m/s]
 V_∞ : 기체와 물방울의 상대속도 [m/s]
 $\alpha = \frac{Hm_a M_l}{Pm_l M_a}$: 흡수기 상수 [-]
 ρ_g : 흡수기 내 혼합기체의 평균밀도 [kg/m³]
 ν : 기체의 동점성 계수 [m²/s]
 ω : 흡수기 회전체의 각속도 [rad/s]
 ω_1 : 흡수기 일차 회전체의 각속도 [rad/s]
 ω_2 : 흡수기 이차 회전체의 각속도 [rad/s]

1. 서론

여러 산업 분야에서 이용되고 있는 충전탑

(Packed tower)형 흡수기는 공기 중 오염물질의 제거를 위해 물의 기체 흡수능력을 이용한다.^(1,2) 이 흡수기는 물에 대한 용해도가 높은 기체, 예를 들어 이산화탄소를 제거하는 장치로서 유용성이 높다.

그런데 충전탑형 흡수기는 부피가 커서 공간제약조건이 있는 환경에서는 부적당하다. 로터리형 흡수기는 이러한 공간제약조건을 극복하기 위해 제안된 소형, 고효율의 흡수기이다. 로터리형 흡수기는 고속 회전하는 내부 장치로써 물방울의 크기를 줄이고 기체와 물방울의 상대속도를 증가시켜 흡수율을 향상시킨다. 또한 흡수기의 압력을 높여 기체 용해도를 증가시킨다.

회전형 흡수기는 처리해야 할 오염물질의 양에 따라 흡수율을 제어할 수 있다. 예를 들어 처리해야 할 오염물질의 양이 많은 경우엔 흡수기로 공급하는 물 유량이나 흡수기 압력을 높인다. 그리고 물 온도, 오염물질 농도 등의 변화에 의해서도 흡수율이 변하므로 회전형 흡수기의 운전은 대부분 과도상태(Transient state)에 있다.

회전형 흡수기의 압력, 물 유량, 물 온도, 오염물질(본고에서는 이산화탄소) 농도 및 혼합기체의 유량 등의 운전조건이 변하는 과도상태에서 이산화탄소 흡수량 변화를 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 이를 실제 문제에 적용하여 그 모델의 유용성을 검증하는 것이 본 논문의 목적이다. 물의 기체 흡수율에 관한 기존 연구는 대개 충전탑형 흡수기의 정상상태(Steady state) 운전에 관한 것이다.⁽³⁻⁵⁾

본 연구의 대상인 회전형 흡수기는 폐회로 디젤기관^(6,7)에 사용된 것으로 디젤기관의 배기에 포함된 이산화탄소를 제거하는 용도로 쓰였다. 폐회로 디젤기관의 배기에는 질소, 산소, 이산화탄소, 알콘이 비슷한 양으로 혼합되어 있다.

2. 이론적 배경 및 계산 모델

2.1 회전형 흡수기 작동원리

회전형 흡수기에서는 외부로부터 공급된 물이 중앙배관을 따라 올라가 흡수기 반경방향으로 분사된다. 기체는 흡수기 외부에서 유입되어 흡수기 중앙부위의 안내관을 향해 흐른다. 따라서 물

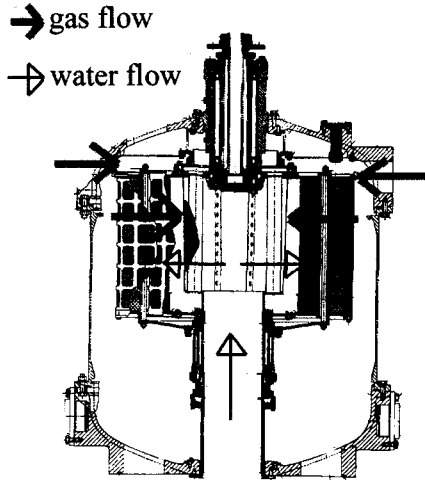


Fig. 1 Inner structure and flows direction in the rotary type absorbers

과 기체의 흐름은 흡수기 내부에서 대향류 흐름(Counter-current flow)이다. 물과 기체가 만나는 부위에는 균질한 다공성 물질로 된 이중 구조의 회전체가 외부 동력에 의해 회전한다. Fig. 1은 회전형 흡수기 내부구조와 물 및 기체의 유동 방향을 나타낸 것이다. 그림에서 기체와 물의 흐름이 서로 대향하는 부분이 이중구조의 회전체가 위치한 곳이다.

2.2 회전형 흡수기의 이론적 배경

층진탑형 흡수기와 마찬가지로 회전형 흡수기 도 기체의 확산현상을 이용한다. 기체의 확산속도는 기체의 농도 구배(Gradient)에 비례하며 아래와 같은 픽(Fick)의 법칙⁽⁸⁾에 따라 기체의 단위 면적 당 질량속도를 표현할 수 있다.

$$\frac{\dot{m}}{A} = \mathcal{D} \text{grad } C_m \tag{1}$$

물방울 주위를 흐르는 혼합기체 속 이산화탄소가 물방울로 흡수되는 질량속도는 이론적으로 다음 식으로 표현된다.⁽⁹⁾

$$\dot{m} = 2.36D^2 \mathcal{D} (C_{m\infty} - C'_{m0}) Sc^{1/3} \sqrt{\frac{V_\infty}{\nu D}} \tag{2}$$

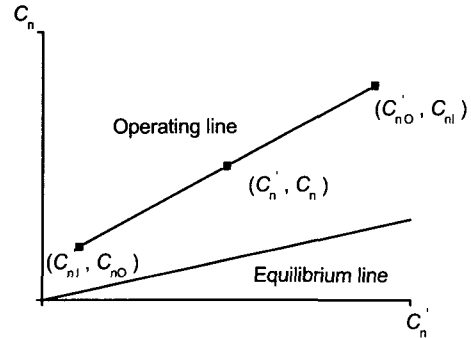


Fig. 2 Operating line and equilibrium line in absorber

식 (2)에서 물방울 표면에서의 이산화탄소 농도 C'_0 는 물방울 내에서의 이산화탄소 확산에 의해 결정된다. 물방울 표면에서의 이산화탄소 농도와 물방울 내부의 이산화탄소 농도 간의 관계는 헨리(Henry)의 법칙⁽¹⁰⁾을 따른다. 헨리의 법칙은 물방울 내부의 기체 몰분율(Mole fraction)과 물방울 외부의 기체 분압 간의 관계를 정의하는 식이다.

$$P_p = HC'_n \tag{3}$$

회전형 흡수기 내에서의 물과 기체는 대향류 흐름이다. 따라서 물의 입구와 기체 출구, 물의 출구와 기체 입구가 각각 동일한 곳에 위치한다. 그리고 물방울 내의 이산화탄소 몰분율 C'_n 과 평형을 이루는 기체 속의 이산화탄소 몰분율, C_{ne} 간의 상관관계는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ne} = \frac{H}{P} C'_n \tag{4}$$

이들 이산화탄소 몰분율간의 관계를 그림으로 정리하면 Fig. 2와 같다.⁽⁹⁾

그림에서 물은 운전선(Operating line)의 아래 부분에서 출발하여 위로 올라가면서 이산화탄소를 흡수하고, 기체는 운전선의 윗부분에서 아래

로 내려오면서 이산화탄소가 제거된다. 평형선 (Equilibrium line)은 식 (4)를 그린 것이다. 운전선과 평형선사이의 거리는 기체 속의 이산화탄소가 흡수되는 구동력(Driving force)에 해당한다.

2.3 회전형 흡수기의 흡수율 계산 모델

회전형 흡수기 가장자리에서의 질량보존식은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\frac{\dot{m}_a}{M_a}(C_{nI} - C_n) = \frac{\dot{m}_l}{M_l}(C'_{nO} - C'_n) \quad (5)$$

위 식을 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$C_n = \frac{\dot{m}_l M_a}{\dot{m}_a M_l} C'_n + C_{nI} - \frac{\dot{m}_l M_a}{\dot{m}_a M_l} C'_{nO} \quad (6)$$

한편 흡수기 내부 반경방향 임의의 위치에서 기체와 물에서의 질량 변화량이 서로 같아야 하므로 아래와 같은 식을 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{M_a} d(\dot{m}_a C_n) = \frac{1}{M_l} d(\dot{m}_l C'_n) \quad (7)$$

위의 질량 변화량은 기체 속의 이산화탄소 물분율과 이산화탄소 평형 물분율의 차이 그리고 접촉면적에 비례한다. 따라서 식 (7)은 다음 식과 같이 표현된다.^(1,9)

$$\begin{aligned} \frac{1}{M_a} d(\dot{m}_a C_n) &= \frac{1}{M_l} d(\dot{m}_l C'_n) \\ &= -KA(C_n - C_{ne})dr \end{aligned} \quad (8)$$

\dot{m}_a , \dot{m}_l 이 일정하다고 가정하면 식 (4)를 이용하여 식 (8)을 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{dC_n}{C_n - \frac{HC'_n}{P}} = -\frac{KAM_a}{\dot{m}_a} dr \quad (9)$$

따라서 식 (6)을 이용하여 식 (9)에 있는 C'_n 을

제거하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} &\frac{dC_n}{C_n(1 - H\dot{m}_l M_l / P\dot{m}_a M_a) + H(\dot{m}_l M_l C_{nI} / \dot{m}_a M_a - C'_{nO})} / P \\ &= -\frac{KAM_a}{\dot{m}_a} dr \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 흡수기 안쪽부터 바깥쪽까지 적분하면 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &\int_{C_{nO}}^{C_n} \frac{dC_n}{C_n(1 - H\dot{m}_l M_l / P\dot{m}_a M_a) + H(\dot{m}_l M_l C_{nI} / \dot{m}_a M_a - C'_{nO})} / P \\ &= -\int_{R_i}^{R_o} \frac{KAM_a}{\dot{m}_a} dr \end{aligned} \quad (11)$$

P 와 H 가 흡수기 내에서 일정하다고 가정하더라도 회전형 흡수기에서 K 와 A 가 반경방향에 따라 변하므로 식 (11)을 아직 적분할 수 없다.

식 (2)에서와 보는 같이 흡수율(혹은 K)은 기체와 물방울의 상대속도의 제곱근에 비례한다. 물과 기체의 접촉면적 A 는 회전체의 형상이 원주형이므로 물방울의 속도가 일정할 경우에 반경의 제곱에 비례한다고 볼 수 있다. 물방울의 속도가 변할 경우 A 는 레이놀즈(Reynolds) 수의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾

식 (11)의 적분을 위해 흡수기 내에서 기체와 물방울의 속도 변화를 살펴보자. 흡수기의 회전체는 반경방향으로 균질하므로, 흡수기 내 임의의 반경방향 위치 r 에서 단위높이 당 질량보존의 법칙을 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$2\pi r \rho_g V_g = \text{constant}$$

위 식에서 기체의 속도 V_g 는 반경에 반비례하는 것으로 볼 수 있다.

물방울의 속도 V_l 는 회전체의 각속도 ω 와 물방울의 반경방향 위치의 곱으로 결정되므로 다음 식과 같이 반경에 비례한다.

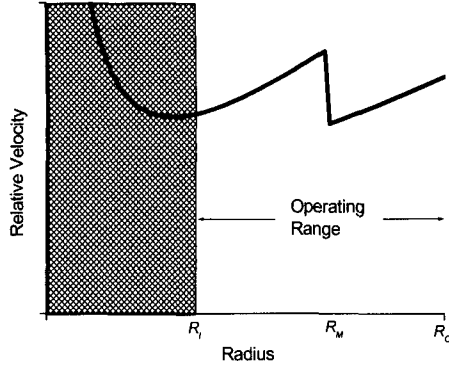


Fig. 3 Relative velocity between gas and water in the rotary type absorbers

$$V_i \propto \omega r$$

회전형 흡수기의 회전체는 이중구조로 되어 있으며 일차 회전체와 이차 회전체의 각속도가 서로 다르다. 물방울과 기체는 흡수기 내부에서 대향류이므로 물방울과 기체의 상대속도 V_∞ 는 기체 속도와 물방울 속도의 합이다. 따라서 상대속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_\infty \propto \frac{1}{r} + \omega_1 r, \quad \text{if } R_1 \leq r \leq R_M$$

$$V_\infty \propto \frac{1}{r} + \omega_2 r, \quad \text{if } R_M < r \leq R_O$$

위 식으로 표현된 상대속도 V_∞ 를 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 그림에서 운전영역 (Operating range)은 회전체가 차지하는 부분이다. 안쪽이 일차 회전체, 바깥쪽이 이차회전체 영역이다.

이상의 검토로부터 K 와 A 를 반경방향에 대한 함수로 표현 가능함을 알 수 있다. 식 (11)의 K 와 A 의 곱을 반경방향의 함수로 나타내고 이 함수가 반경에 대해 적분 가능할 때 다음과 같이 그 적분 결과를 표현하자.

$$\tilde{K}\tilde{A} = \int_{R_1}^{R_O} KA dr \tag{12}$$

또한 흡수기로 공급되는 물은 이산화탄소가 없는 청수이므로 $C'_{nl} = 0$ 으로 둘 수 있다. 따라서 식 (11)을 적분하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\tilde{K}\tilde{A}L = \frac{\dot{m}_a}{M_a(1-\alpha)} \ln \left[(1-\alpha) \frac{C_{nl}}{C_{no}} + \alpha \right] \tag{13}$$

식 (13)으로부터 흡수기 출구 기체 속의 이산화탄소 물분율에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$C_{no} = \frac{C_{nl}(1-\alpha)}{e^{\frac{\tilde{K}\tilde{A}L M_a(1-\alpha)}{\dot{m}_a}} - \alpha} \tag{14}$$

흡수기에서 흡수되는 이산화탄소의 질량속도를 구하기 위해 흡수기 출구 기체 속의 이산화탄소 물분율을 다음 식과 같이 정의하자.

$$C_{no} = \frac{\dot{m}_{cO} M_a}{\dot{m}_{aO} M_c} = \frac{\dot{m}_{cl}/M_c - \dot{m}_{cR}/M_c}{\dot{m}_{al}/M_a - \dot{m}_{cR}/M_c} \tag{15}$$

식 (15)를 흡수기 내에서 흡수된 이산화탄소 질량속도에 대해 정리하면 최종적으로 다음 식을 얻는다.

$$\dot{m}_{cR} = \frac{\dot{m}_{cl} - C_{no} \dot{m}_{al} M_c / M_a}{1 - C_{no}} \tag{16}$$

식 (16)의 C_{no} 은 식 (14)에서 구할 수 있으므로 흡수기 입구에서의 기체와 물의 상태로 부터 흡수기의 이산화탄소 흡수율을 예측할 수 있다.

2.4 흡수율 계산 모델의 물리적 의미

먼저 흡수기의 물 유량이 증가할 경우 식 (6)

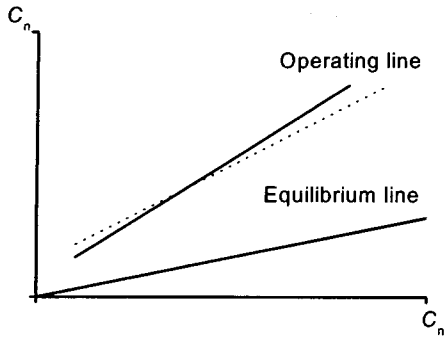


Fig. 4 Displacement of operating line as increase of water flow rate

에서 \dot{m}_l 이 커져 운전선의 기울기가 증가한다. 아울러 흡수기 출구 물에 포함된 이산화탄소의 농도가 감소하고 흡수기 출구 기체 속의 이산화탄소 농도도 감소하므로 다음의 Fig. 4에서와 같이 운전선이 원래 위치(점선)에서 이동(실선)한다. 운전선과 평형선 간의 거리가 흡수기 가장자리에서 증가하고 이로 인해 흡수기 내 이산화탄소 흡수량이 증가한다.

다음은 흡수기 압력이 증가하는 경우이다. 흡수기 압력이 증가하면 식 (4)에서 기울기가 감소하고 이로 인해 평형선이 먼저 다음의 Fig. 5에서와 같이 아래 방향으로 이동한다. 이 경우 운전선과 평형선 간의 거리가 증가하여 흡수기의 기체 흡수효율이 높아진다. 결과적으로 흡수기 출구 물에 포함된 이산화탄소의 양이 증가하고 이는 흡수기 출구 기체에 포함된 이산화탄소의 양이 감소한 것에 해당한다. 이로써 운전선이 아래 방향으로 이동한다.

물 온도의 감소는 흡수기 내부 압력의 증가와 비슷한 결과를 낳는다. 물의 온도가 감소하면 식 (4)에서 헨리 상수가 감소하므로 앞서 압력이 증가한 경우와 바와 동일하게 평형선의 기울기가 감소한다. 이로 인한 흡수율 변화와 물과 기체에 포함된 이산화탄소 농도 변화는 앞서 압력증가의 경우와 동일하다.

지금까지 살펴본 운전조건에 따른 이산화탄소 흡수율의 변화는 식의 복잡성으로 인해 즉각적으로 드러나지 않지만 본 논문에서 개발된 최종 식

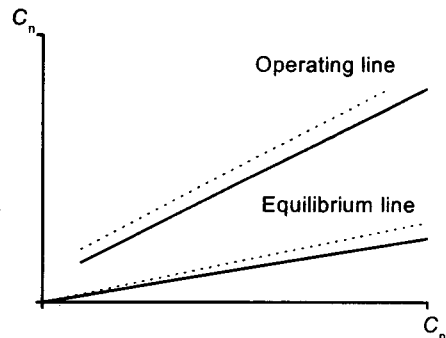


Fig. 5 Displacement of operating line and equilibrium line as increase of pressure.

(16)에 모두 반영되어 있다.

2.5 과도상태에서의 $\tilde{K}\tilde{A}L$ 재평가

식 (14)에 나타난 $\tilde{K}\tilde{A}L$ 값은 흡수기의 제원과 운전조건이 변하지 않는 한 상수로 둘 수 있지만 운전조건이 변하는 과도상태에서는 재평가 되어야 한다.

과도상태에서의 흡수능력 예측을 위해 우선 임의의 한 기준조건에서 $\tilde{K}\tilde{A}L$ 값을 식 (13)에 의해 구한다. 기준조건이라 함은 어느 특정한 기계적 제원의 흡수기가 임의의 과도상태 운전조건에 있는 상태를 의미한다. 과도상태 운전조건의 측정은 실용적 이유로 인해 준정상상태(Quasi-steady state)에서 이루어진다.

기준조건에 대해 $\tilde{K}\tilde{A}L$ 값을 구하면 $\tilde{K}\tilde{A}L$ 값에 영향을 미치는 운전변수의 변화가 일어나지 않는 한 이 값을 과도상태에 그대로 적용한다. $\tilde{K}\tilde{A}L$ 값에 영향을 미치는 운전변수로는 흡수기로 공급되는 물 유량, 흡수기 압력 및 물 온도 등이다. 폐회로 디젤기관에서는 이산화탄소 흡수율을 조절하기 위해 물 유량과 흡수기 압력을 제어변수로 삼는다. 흡수기로 공급되는 물 온도는 제어변수가 아니나 기후변화 등의 이유로 변할 수 있다. 이들 세 가지 변수는 운전 중에도 쉽게 측정가능하다. 이러한 운전조건 변화가 생겼을 경우에는 \tilde{K} 와 \tilde{A} 값을 각각 아래와 같이 수정한다.

$$\tilde{K} = \tilde{K}^R \left(\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_l^R} \right)^j \left(\frac{P}{P^R} \right)^k \left(\frac{T^R}{T} \right)^l \quad (17)$$

$$\tilde{A} = \tilde{A}^R \left(\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_l^R} \right)^m \quad (18)$$

여기서 위첨자 R 은 기준조건에서의 값을 의미하며, 지수 j, k, l, m 은 상수이다. L 은 운전조건의 변화에 무관하나 편이상 묶어놓았다. 기준조건에서 벗어난 운전조건에서의 $\tilde{K}\tilde{A}L$ 값은 위의 두 식을 결합함으로써 구한다.

$$\tilde{K}\tilde{A}L = (\tilde{K}\tilde{A}L)^R \left(\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_l^R} \right)^n \left(\frac{P}{P^R} \right)^k \left(\frac{T^R}{T} \right)^l \quad (19)$$

여기서 $n = j + m$ 이다. 지수 n, k, l 은 실험적으로 얻을 수 있으며 흡수기의 기계적 제원에 따른 고유한 값을 가질 것이다. 본 연구에 쓰인 값은 $n=1.61, k=0.73, l=1.0$ 으로서 실험치와 예측치의 비교에 의한 시행착오법으로 구했다. 이들 지수들은 계산 모델이 대상 흡수기에 대해 잘 들어맞도록 조절해주는 역할을 겸한다.

그런데 회전형 흡수기의 기계적 제원을 몇 개의 무차원 상수로 표현할 방법이 연구되어 있지 않으므로 이들 지수들을 모든 회전형 흡수기에 적용 가능한 수치나 상관식으로 일반화시키기는 어려울 것으로 보인다.

3. 계산 및 결과분석

3.1 실험장치의 구성

폐회로 디젤기관은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 디젤엔진의 배기를 흡수기로 연결하여 이산화탄소를 제거한 후 적당량의 산소와 알곤을 첨가하여 엔진의 흡기로 되돌려 보내는 장치이다. 기체농도와 관련된 실시간 측정치는 산소 농도와 시스템 압력이며 측정위치는 흡수기 출구(Outlet)이다. 이산화탄소 농도는 필요시마다 기체를 샘플링하여 측정되며, 측정에 따른 시간지연과 계측기 오차를 보상하기 위해 수차례 측정을 반복

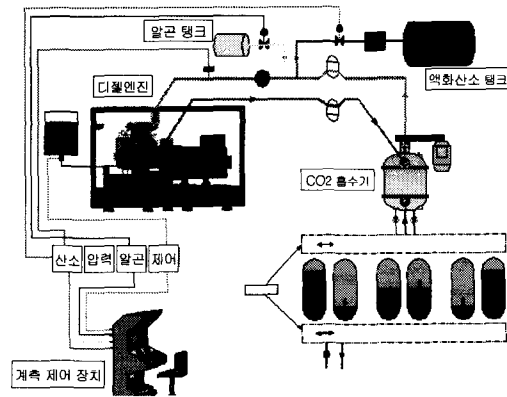


Fig. 6 System configuration of the closed cycle diesel

한 후 평균한 값을 사용한다. 측정위치는 흡수기 입구(Inlet)와 출구이다. 이산화탄소 농도 측정에는 Hitech Instruments 사 제품의 Hitox-IR 600 계측기가 사용되었다. 이 계측기의 오차범위는 $\pm 2\%$ 이다. 측정 시간지연은 계측기 고유의 시간 지연 이외에도 측정장치 구성방법, 샘플링 가스 유량 등에 따라 좌우되므로 정량적 제시가 어렵다. 압력 계측기는 Druck 사 제품의 PDCR 130 Series로 오차 범위는 $\pm 1.5\%$ 이다.

3.2 이산화탄소 농도변화

이산화탄소 농도(몰분율)는 운전기간 중 3~35% 사이를 변했고 폐회로 디젤기관의 운전상태가 비교적 안정되었던 750초, 1500초 2500초 부근에서 10초 간격으로 5회 측정된 결과를 평균하여 사용하였다.

농도 측정치와 계산치는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 전반적으로 잘 일치하고 있다. 2500초 부근에서 예측치는 흡수기 입구의 측정치를 기준으로 최대 5% 포인트 정도 차이가 나며 이를 측정치에 대한 상대오차로 환산하면 17% 차이에 해당한다. 이 차이는 예측모델의 부정확성과 이산화탄소 계측기의 오차가 합해진 값으로 판단된다. 2500초에서 흡수기 입구농도의 차이가 다른 측정치에 비해 증가되었으나 흡수기 운전조건의 빠른 변화로 인해 오차가 일시적으로 커진 때문인 것으로 판단된다. 다음 절의 Fig. 8에서 보는

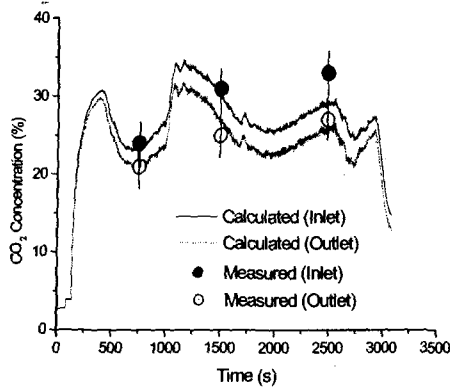


Fig. 7 Comparison between the calculated value and the measured value of carbon dioxide concentration

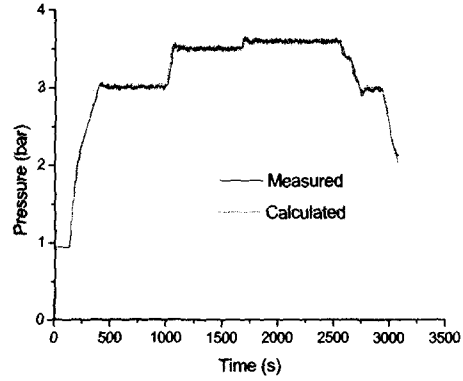


Fig. 8 Comparison between the calculated value and the measured value of absorber pressure

바대로 2500초 부근에서 압력이 급격히 감소하기 시작하였다. 반면 흡수기 출구에서의 이산화탄소 농도는 전 구간에 걸쳐 잘 일치하고 있다.

3.3 흡수기 압력변화

압력은 비교적 정확하고 시간지연 없이 측정 가능하다. 흡수기 내에서의 압력은 흡수기 내 혼합기체 총량에 의해 결정되고, 혼합기체 중 이산화탄소를 제외한 헨리 상수가 큰 다른 기체들은 거의 흡수되지 않아 농도의 변화가 적다. 따라서 흡수기 압력변화 예측능력은 이산화탄소 농도 예측능력에 크게 좌우된다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 1~3.5bar의 변동 폭을 보인 압력 측정치와 예측치가 매우 잘 일치한다. 폐회로 디젤기관의 설계 및 분석을 목적으로 사용된 이산화탄소 흡수율 모델의 유용성은 압력변화 예측능력에 의해 평가 될 수 있다. 왜냐하면 이산화탄소 농도는 흡수기 압력을 목표치 내로 제어하기 위한 수단이기 때문이다. 본 연구를 통해 개발한 모델이 성공적으로 이용될 수 있음은 Fig. 8에서 확인된다고 볼 수 있다.

압력예측의 정확성을 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 8의 측정치와 계산치의 차이를 백분율로 환산하여 Fig. 9에 나타내었다.

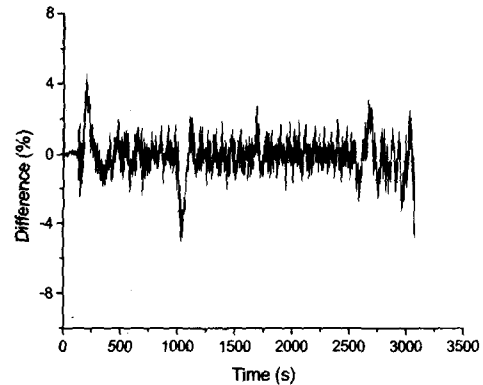


Fig. 9 Difference between the calculated value and the measured value of absorber pressure

Fig. 9에서 보면 측정치와 계산치의 차이는 최대 5% 이내이다 그리고 그 차이가 시간에 따라 거의 일정한 범위 내에 있으므로 계산 모델에 구조적인 결함은 없는 것으로 판단된다.

본 논문에서 개발된 모델의 정확도를 보수적으로 평가하기 위해 Fig. 9의 차이가 모두 이산화탄소 농도 예측의 오차로 인해 발생하였다고 가정하였다. 압력 예측의 5% 차이가 모두 이산화탄소의 농도예측 차이에서 비롯되려면 예측치는

실측치 $\pm 5\%$ 에 해당한다. 오차를 (실측치-예측치)/실측치로 정의하고, Fig. 7에서 이산화탄소 농도가 대개 25% 부근이므로 이를 실측치로 삼으면, 이산화탄소 흡수 모델의 상대오차는 최대 20%일 것으로 평가된다.

이상의 논의를 요약하면, 이산화탄소의 농도가 3~35% 정도로 급격히 변하고 있고 실시간 계측은 불가능한 상황에서 어느 순간 이산화탄소 농도의 실제 값이 30%일 경우, 본 모델에 의하면 상대오차 20% 이내인 24~36% 범위 내의 값으로 계산하게 될 것이다. 그리고 이러한 계산은 계측기에 의한 측정과 달리 시간지연 없이 연속적으로 가능하다.

4. 결론

정상상태의 충전탑형 흡수기에 적용 가능한 모델을 기초로 과도상태의 회전형 흡수기의 이산화탄소 흡수율을 예측하는 계산모델을 개발하였다. 흡수기의 과도상태란 혼합기체의 유량, 혼합기체 속의 이산화탄소 농도, 흡수기 내부 압력, 흡수기로 공급되는 물의 유량 그리고 물 온도 등이 시간에 따라 변화하는 상황을 의미한다.

본 논문에서 개발된 모델은 급격한 변화를 보이는 과도상태에 대해서도 적용 가능하며, 이산화탄소 농도 3~35%, 압력 1~3.5bar의 범위에 걸쳐 편향되지 않은 예측능력을 보였다. 본 모델은 이산화탄소의 농도는 20%의 상대오차 범위 내로 예측할 수 있으며, 흡수기 내부 혼합기체의 양에 의해 좌우되는 압력 변화에 대해서는 5% 이내의 오차로 예측 가능한 것으로 평가되었다.

이 모델은 폐회로 디젤기관에서의 이산화탄소 농도와 흡수기 압력 변화를 예측하는 수단으로 성공적으로 활용되었다.

참고문헌

- (1) Arthur C. Stern, 1977, *Air Pollution*, 3rd Ed.
- (2) Hobler, T., 1966, *Mass Transfer and Absorbers*, Pergamon, Oxford, England.
- (3) Vural Evren, Tuncay Cagatay and Ahmet R. Ozdural, 1999, "Carbon Dioxide-Air Mixtures: Mass Transfer in Recycling Packed-Bed Absorption Columns Operating Under High Liquid Flow Rates," *Separation and Purification Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 89~96.
- (4) Adisorn Aroonwilas, Amornvadee Veawab and Paitoon Tontiwachwuthikul, 1999, "Behavior of the Mass-Transfer Coefficient of Structured Packings in CO₂ Absorbers with Chemical Reactions," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 38, No. 5, pp. 2044~2050.
- (5) Vladimir D. Stevanovic, 1997, "An Analytical Model for Gas Absorption in Open-Channel Flow," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, No. 8, pp. 1187~1194.
- (6) Bas Bonnier, Carl Prins, Allyn Boyes, Hubert Ohmayer and John Pearson, 1997, "Low Signiture Closed Cycle Diesel AIP System for Submarine," *UDT 97*, Hamburg Germany, pp. 119~124.
- (7) Chung, S.H., Paik, H.J. and Kim, I.G., 2000, "Development of the Control System of Closed Cycle Diesel Engine," *The 3rd Seminar on Naval Wapon Systems Development*, Agency for Defense Development, Chinhae Korea, pp. 98~101.
- (8) Skelland, A.H.P., 1974, "Diffusional Mass Transfer," John Wiley and Sons, New York, pp. 9~12.
- (9) Martin Crawford, 1976, "Air Pollution Control Theory," McGraw-Hill, New York, pp. 463~494.
- (10) Loren G. Hepler and Wayen L. Smith, 1975, "Principles of Chemistry," Macmillian Publishing Co, New York, p. 78.
- (11) Brauer, H. and Varma, Y.B.G., 1981, "Air Pollution Control Equipment," Springer-Verlag, Berlin, p. 290.