

# 분리막 투과도와 분리도 인자의 시스템 설계 효과 연구 A Study of the Effect of the Permeability and Selectivity on the Performance of Membrane System Design

신미수 · 장동순<sup>†</sup> · 이용국  
Mi-Soo Shin · Dongsoon Jang<sup>†</sup> · Yongguk Lee

충남대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received August 16, 2016; Revised December 13, 2016; Accepted December 1, 2016)

**Abstract** : Manufacturing membrane materials with high selectivity and permeability is quite desirable but practically not possible, since the permeability and selectivity are usually inversely proportional. From the viewpoint of reducing the cost of CO<sub>2</sub> capture, module performance is even more important than the performance of membrane materials itself, which is affected by the permeance of the membrane (P, stagecut) and selectivity (S). As a typical example, when the mixture with a composition of 13% CO<sub>2</sub> and 87% of N<sub>2</sub> is fed into the module with 10% stage cut and selectivity 5, in the 10 parts of the permeate, CO<sub>2</sub> represents 4.28 parts and N<sub>2</sub> represents 5.72 parts. In this case, the CO<sub>2</sub> concentration in the permeate is 42.8% and the recovery rate of CO<sub>2</sub> in this first separation appears as 4.28/13 = 32.9%. When permeance and selectivity are doubled, however, from 10% to 20% and from 5 to 10, respectively, the CO<sub>2</sub> concentration in the permeate becomes 64.5% and the recovery rate is 12.9/13 = 99.2%. Since in this case, most of the CO<sub>2</sub> is separated, this may be the ideal condition. For a given feed concentration, the CO<sub>2</sub> concentration in the separated gas decreases if permeance is larger than the threshold value for complete recovery at a given selectivity. Conversely, for a given permeance, increasing the selectivity over the threshold value does not improve the process further. For a given initial feed gas concentration, if permeance or selectivity is larger than that required for the complete separation of CO<sub>2</sub>, the process becomes less efficient. From all these considerations, we can see that there exists an optimum design for a given set of conditions.

**Key Words** : Selectivity, Permeability, Hollow Fiber Membrane

**요약** : 분리막의 제조에 있어서 높은 분리도와 투과도가 요구되지만 투과도와 분리도는 반비례하는 경향이 있으므로 현실적으로 가능하지 않다. CO<sub>2</sub> 포집의 비용절감 측면에서 살펴보면 분리막의 재질 자체보다는 투과도와 분리도가 분리막의 모듈이나 시스템의 성능이 미치는 영향이 더 중요하다고 할 수 있다. 예로 들어 CO<sub>2</sub> 13%와 N<sub>2</sub> 87%인 혼합기체를 분리도를 5로 고정시킨 후 유량의 10%가 분리막을 통하여 투과된다고 가정하면 투과한 10% 중에 CO<sub>2</sub> 4.28%, N<sub>2</sub>가 5.72%로서 투과한 기체중 이산화탄소의 농도가 42.8%가 된다. 이 경우 이산화탄소의 순도는 42.8%이며 첫 번째 투과에 의해 얻은 이산화탄소의 회수량은 4.28/13 = 32.9%가 된다. 만일 투과도와 분리도를 두배로 증가시킬 경우 이산화탄소의 순도는 64.5%, 이산화탄소 회수량은 12.9/13 = 99.2%로 나타났다. 이 경우 대부분의 CO<sub>2</sub>가 회수되었으며 이것이 의미하는 바는 주입된 이산화탄소가 투과되지 않고 그대로 통과하여 빠져나가는 양은 거의 제로에 가까운 경우로서 이산화탄소 분리에는 이상적인 설계나 운전조건이라 할 수 있다. 일정한 주입농도에서 주어진 투과도에 대하여 이산화탄소를 100% 회수하는 임계 분리도가 존재함을 알 수 있으며, 임계 분리도 이상 높아질 경우 이산화탄소 회수되는 양이나 순도 향상에 별다른 영향이 없음을 시사하고 있다. 이상의 결과에서 주어진 이산화탄소의 농도에 대해서 분리막을 이용한 분리에서 이산화탄소를 100% 투과시키는 임계 투과도와 분리도가 설계와 운전조건의 최적화를 위하여 절대적으로 중요함을 알 수 있다.

**주제어** : 분리도, 투과도, 중공사막

## 1. 서론

작금의 지구촌 문명에서 청정에너지의 효율적인 사용과 온실가스의 감축은 가장 큰 이슈로 부각되고 있다. 이러한 감축목표에 대한 사전 준비작업의 하나로 대한민국은 2014년 1월 한국거래소(KRX)를 배출권 거래소로 지정하였으며 온실가스 배출량이 많은 525개의 업체에 대해 첫 이행 기간 3년(2015~2017년) 동안 온실가스 배출권 총량 16억 8,700만톤을 구체적으로 할당하였다. 할당받은 배출권보다 많은 탄소를 배출한 업체는 초과배출량은 한국거래소에서 매입하여 확보하든지 아니면 한국거래소 거래가격의 3배 이하의

과징금을 지불하도록 되어 있다. 2016년 6월 최종적으로 형성된 1차 년도의 온실가스 배출권 톤당 가격이 17,000원을 상회하였으므로 부족분을 확보하지 못한 기업은 이산화탄소 톤당 과징금은 17,000 × 3배 = 51,000원으로 50,000원을 상회하는 것으로 나타나고 있다. 거래소 판매 물량이 부족한 경우에는 과징금의 가격은 이산화탄소 포집 비용과 비슷한 수준이 될 것이므로 거래소 가격은 이 가격의 1/3 정도에서 결정될 것으로 판단된다. 온실가스 초과 배출을 할 경우에 배출권 톤당 가격에 따라 3~5만원 정도의 과징금을 물어야 한다면 철강, 석유화학, 발전 업체는 국가의 기간산업이면서 제조업으로서 운신의 폭이 매우 작아지게 된다.<sup>1)</sup>

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: p\_dsjang@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6677 Fax: 042-822-5610

CO<sub>2</sub>와 같은 온실가스 저감에 대한 기술로는 IGCC(석탄 가스화 복합발전, Integrated Gasification Combined Cycle)와 같은 연소 전 처리, 산화제로 공기를 사용하는 대신에 순 산소를 사용하여 이산화탄소의 분리를 용이하게 하는 순 산소 방법, 연소 후 처리 등 다양한 방법들이 있다. 온실가스에 대한 저감 기술의 응용은 단지 화력발전소 등에서 발생하는 이산화탄소에 대한 적용뿐만 아니다. 음식물쓰레기 처리공정이나 매립지 또는 바이오매스 연료 분야에서는 순도 높은 메탄 생산을 위하여 30~40% 농도의 CO<sub>2</sub>를 분리하여야 한다. 또한 수소연료전지에 사용되는 연료개질 분야 등에서 메탄을 이용하여 수소를 생산할 경우 수소 1 kg 생산에 이산화탄소 5.5 kg이 발생하기 때문에 막대한 양의 이산화탄소를 수소에서 효율적으로 분리하여야 한다. 이와 같이 혼합기체에서 특정한 기체의 효율적인 분리 기술은 매우 중요한 현안으로 대두되고 있다. 연소 후 방법에서는 습식, 건식 그리고 분리막 방법 등이 유력한 기술로서 제시되고 있다. 이러한 차원에서 산학연이 연계된 총체적인 연구 노력이 국제적으로 경주되고 있다. 그러나 2013년 미국의회가 보고서에서 제시한 바와 같이 다양한 분야에서 집중적인 연구 노력과 그에 따른 가시적인 성과에도 불구하고 상용화를 위한 시스템 구축에는 만족스러운 결과를 내고 있지 못한 것이 작금의 상황이다.<sup>2)</sup> 문제는 현재 이산화탄소 처리비용이 톤당 \$50~60 이상의 고가라는 점과 더불어 습식법의 경우 아민 용매 등의 누출 등 다양한 환경적인 문제의 발생과 장시간 운전에 따른 내구성 등에 대한 신뢰성 등이 의문으로 제시되고 있다.<sup>3)</sup>

특히 이산화탄소 분리와 포집을 위한 첨단 연구에서는 여러 분야에서 연구자체는 크게 성공하는 것으로 보이나 성공한 연구결과가 오히려 이산화탄소의 포집 단가를 높이는 현상을 지적하고 있다. 이러한 문제 때문에 2013년 미국의회는 이산화탄소 포집을 위한 기술현황보고서에서 경제적인 상용화를 위해서는 기술상의 진정한 “breakthrough”가 있어야 함을 강력하게 강조하고 있다.<sup>2)</sup>

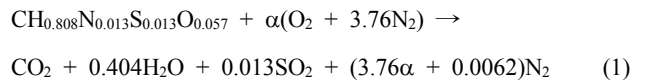
본 연구에서는 이산화탄소의 포집에서 분리막에 대한 기술에서 분리막 재질의 고유한 투과도와 분리도가 분리막 모듈이나 시스템 성능에 미치는 영향에 대하여 토론하고자 하였다. 이렇게 분리막 재질의 고유한 투과도와 분리도가 시스템 설계에 미치는 영향을 심도 있게 고려하여야 하는 이유는 분리막 재질의 분리도나 투과도가 매우 높은 재질의 개발이 매우 중요하며 대부분의 분리막 재질에 대한 연구가 이러한 방향으로 이루어지고 있기 때문이다. 그러나 이렇게 높은 투과도와 분리도를 가진 재질을 가지고 작은 직경의 중공사막을 만들어 분리막 모듈이나 시스템을 구성하였을 경우 압력 강하는 Hagen-poiseuille 법칙에 의하여 유속에 비례하고 직경의 제곱에 반비례하여 압력강하가 발생한다. 따라서 작은 직경의 관에서 유속의 증가는 높은 압력강하에 의한 동력손실이 일차적인 비용문제로 나타나며, 이차적으로는 압력강하에 따른 분리막 내부에서의 유속증가나 동공 현상 등이 투과성능의 저하 등으로 나타난다.<sup>4)</sup> 그

러므로 분리막에 의한 혼합기체의 분리가 온실가스나 기타 연료개질 분야 등에서 중요성이 높아지고 있음을 감안할 때 분리막 기본 재질의 성능에 따른 모듈이나 시스템 디자인에 대한 기본적인 연구는 중요성을 갖는다.

## 2. 이론적 연구

구체적으로 석탄 화력발전소에서 발생하는 이산화탄소 분리에서 가장 효과적이고도 실용적인 결과를 제시한 연구결과는 미국 캘리포니아 Menlo Park에 위치한 MTR (Membrane Technology and Research, Inc.)그룹의 연구결과로 보여진다.<sup>5)</sup> 이들은 US DOE와 공동 연구결과로 투기도가 1,000 GPU 이상이고 분리도가 30℃ 온도에서 50이 되는 성능이 뛰어난 분리막을 개발하였다고 보고하고 있다. 이들과 같이 높은 투기도나 분리 성능을 가진 분리막이 필요한 이유는 600 MW 용량의 석탄 화력발전소의 경우 1 기압정도의 배기가스에서 13%의 농도의 이산화탄소가 방출될 경우 배기가스의 유량은 초당 500 m<sup>3</sup>/s 이며 하루 발생하는 이산화탄소의 무게는 거의 11,000톤에 이를 정도로 매우 많기 때문이다.

석탄연소에서 석탄의 대표적인 중량비는 77.2% C, 5.2% H, 1.2% N, 2.6% S, 5.9% O, 7.9% 회재로 구성되어 있다. 이러한 경우 100% 이론공기를 가정할 경우 연소식은 아래와 같이 주어진다.



이 식에서 α = 1.19로서 이산화탄소는 대략 17% 정도가 된다. 그러므로 잉여공기를 가지고 석탄을 연소할 경우 이산화탄소의 농도는 13~15% 정도이다. 이와 같은 농도를 가진 많은 양의 이산화탄소를 효과적으로 분리하기 위해서는 높은 투기도(permeance)와 분리도(selectivity)를 가진 분리막 개발이 요구된다는 점이 일차적인 난제라고 지적하고 있다. 이와 같이 분리막 재질분야에서는 높은 투과도와 선택도를 가진 재질을 개발하기 위하여 많은 노력을 경주하고 있으나 정량적으로 분리막의 투과도와 분리도에 따른 설계나 운전조건상의 구체적인 토론은 구체적으로 이루어지지 않고 있다.<sup>5,6)</sup> 따라서 본 연구에서는 일차적으로 분리막 재질의 투과도와 분리도에 따른 모듈이나 시스템 설계상에 나타나는 문제점을 파악하고 투과도와 분리도의 상관관계 및 일정 투과도에 대한 임계분리도에 대하여 규명하고자 한다.

본 논문에서는 독자의 이해를 돕기 위하여 분리막 관에 유입된 유량 중에서 분리막으로 통과한 투과분율(P, stage cut)과 기체에 따른 분리도에 대한 기본적인 설명을 시도하고자 한다. 분리도는 구체적으로 이산화탄소와 질소로 구성된 혼합기체의 경우 질소에 대한 이산화탄소의 분리도는 아

래와 같이 정의된다.

$$\text{질소에 대한 이산화탄소의 분리도} = \frac{(\text{투과된 이산화탄소 농도}/\text{주입 이산화탄소 농도})}{(\text{투과된 질소 농도}/\text{주입 질소 농도})}$$

구체적인 예를 들면 주입된 기체에 질소와 이산화탄소의 농도가 각각 90%와 10%라고 할 때 각각 5%씩 투과된 경우라면 분리도(S)는 아래와 같이 9가 된다.

$$\text{분리도 } S = \frac{(5/10)}{(5/90)} = \frac{5 \times 90}{10 \times 5} = \frac{450}{50} = 9$$

분리막 관련 이론에서 많이 언급되는 기본적인 용어를 아래에 구체적으로 제시하였다.

- P (stage cut); 투과분율(분리막을 통과한 투과유량/유입된 전체 유량)
- S (selectivity); (투과 이산화탄소 농도/주입 이산화탄소 농도)/(투과 질소농도/주입 질소농도)
- Permeability(투과도); 단위면적(cm<sup>2</sup>), 단위시간(s), 단위 압력(cmHg) 당 투과된 유량(cm<sup>3</sup>)에 분리막의 두께를 곱한 양으로서 Barrer 을 단위로 사용하며

$$\Leftrightarrow 1 \text{ Barrer} = 10^{-10} \frac{\text{cm} \cdot \text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}}$$

(STP condition, 1기압, 273 K)이다.

- Permeance(투기도) ; 단위면적(cm<sup>2</sup>), 단위시간(s), 단위 압력(cmHg) 당 투과된 유량(cm<sup>3</sup>)을 나타내는 물리량으로서 단위는 GPU (Gas Permeation Unit)를 사용한다.

$$\Leftrightarrow 1 \text{ GPU} = 10^{-6} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}}$$

분리막의 두께를 고려하지 않고 단위 압력당 통과한 기체의 유량 flux를 평가하는 단위이다.

위에 설명에서 투과도와 투기와 같은 분리막 단위에 대해서 혼동하는 경우가 있으므로 아래에 구체적으로 설명한다. permeability는 두께가 다른 두 분리막(예를 들어 물질 A는 0.1 mm이고 물질 B는 1 cm로 가정) 같은 투기도로서 1 GPU 즉  $10^{-6} \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}}$  을 나타낼 때 0.01 cm 두께를 가진 물질 A의 투과도는 100 Barrer이고 1cm 두께를 가진 물질 B는 10,000 Barrer이 된다. 즉 단위 압력당 같은 유량 flux를 가질 때 두께를 곱하여 두께가 두꺼운 물질이 투과도가 좋을음을 분별하는 단위이다. 아래 Fig. 1에 제시한 예를 보기 바란다.

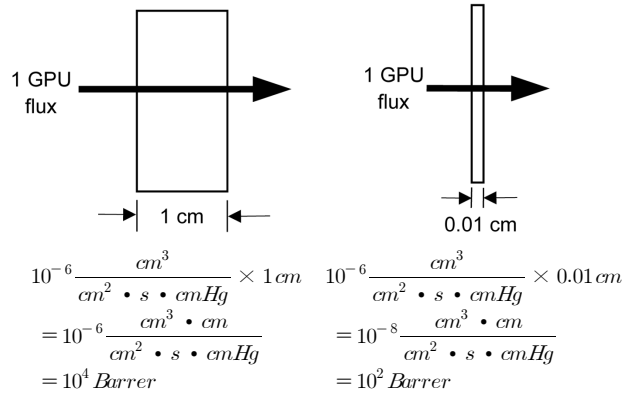


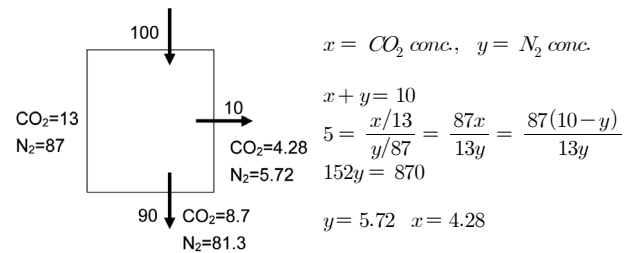
Fig. 1. Comparison of permeability with membrane thickness.

### 3. 연구결과 및 고찰

이산화탄소와 질소로 이루어진 혼합기체에서 분리막을 통한 이산화탄소의 분리성능은 분리막의 투과분율(P)과 기체에 따른 분리도(S)가 중요하다. 아래의 Table 1에 제시한 바와 같이 혼합기체가 100이라는 유량이 주입될 때 주입되는 유량의 10%가 분리막을 통하여 투과되면 투과부 쪽에 분리도가 높은 이산화탄소는 투과부쪽에 농축되고 통과부 쪽에서는 희박한 이산화탄소의 농도를 가진 90%의 질소 및 이산화탄소의 혼합기체가 통과한다. 이 때 이산화탄소와 질소의 분리도가 5라고 가정하면 아래에 제시한 결과가 나타난다. 즉 전체 들어오는 혼합기체 100% 중에서 분리막을 투과한 양은 10%이고 그대로 통과한 양은 90%이다. 이 때 분리막을 투과한 10%중에서 이산화탄소는 4.28%이고 질소는 5.72%로서 투과한 기체 중에서 이산화탄소의 농도는 42.8%가 된다. 즉 이 결과를 정리하면 13%의 이산화탄소의 농도를 가진 배기가스를 이 분리막을 통과시켰을 때 투과도는

Table 1. Membrane performance with stage cut 10% and selectivity 5 for the mixture of 13% CO<sub>2</sub> concentration in a coal-fired flue gas

Membrane performance	Stage cut (P)	Selectivity (S)	Feed composition (%)	
			CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
	1/10	5	13	87



CO <sub>2</sub> recovery amount	Recovered CO <sub>2</sub> purity	Exit CO <sub>2</sub> concentration
32.9%	42.8%	9.7% (8.7/90)

**Table 2.** Membrane performance with stage cut 16.7% and selectivity 5 for the mixture of 13% CO<sub>2</sub> concentration in a coal-fired flue gas

Membrane performance	Stage cut (P)	Selectivity (S)	Feed composition (%)	
	1/6	5	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
			13	87

CO <sub>2</sub> recovery amount	Recovered CO <sub>2</sub> purity	Exit CO <sub>2</sub> concentration
54.92%	42.75%	7.03% (5.86/83.3)

**Table 3.** Membrane performance with stage cut 20% and selectivity 5 for the mixture of 13% CO<sub>2</sub> concentration in a coal-fired flue gas

Membrane performance	Stage cut (P)	Selectivity (S)	Feed composition (%)	
	1/5	5	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
			13	87

CO <sub>2</sub> recovery amount	Recovered CO <sub>2</sub> purity	Exit CO <sub>2</sub> concentration
65.77%	42.75%	5.56% (4.45/80)

10%이고 투과한 기체 중에서 이산화탄소의 순도(purity)는 42.8%이며 전체 이산화탄소 양중에서 분리막을 통하여 농축된 이산화탄소의 회수량(CO<sub>2</sub> recovery)은 4.28/13 = 33%가 된다.

보통 이산화탄소의 포집에서 요구되는 조건이 이산화탄소의 순도가 90%는 필수적이고 회수율은 가급적이면 높은 것이 선호된다는 점에서 13% 농도를 가진 배기가스에 대해 분리막의 투과분율 10%와 이산화탄소 분리도 5는 만족스럽지 못한 결과를 보여주고 있다. 특히 분리막에서 포집되지 않고 그대로 통과하는 이산화탄소의 농도가 총 13% 중 8.72%로 67%에 해당하는 매우 많은 양의 이산화탄소가 그대로 방출된다. 그러므로 회수율을 높이기 위해서는 그대로 통과한 가스는 이단분리를 하거나 재순환시켜 다시 포집과정을 거칠 필요가 있음을 알 수 있다. 그러므로 분리도와 투과도의 변화가 포집 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보기로 하자. 다음에는 분리도를 5로 고정시킨 후 투과도를 16.7% (1/6) 증가시킨 경우를 살펴보기로 하자.

**Table 2**에서 제시한 바와 같이 투과도가 증가한 경우 이산화탄소의 회수율은 32.9%에서 56.54%로 크게 증가하였음을 나타내고 있으나 이산화탄소의 순도는 42.8%에서 44.1%로 거의 변화하지 않음을 보여주고 있다. 즉 분리도가 일정할 때 투과도의 증가는 회수되는 이산화탄소의 양은 증가시키나 농도에는 큰 영향을 주지 못함을 나타내고 있다.

투과도에 따른 이산화탄소 순도와 회수량의 변화를 확인하기 위하여 위와 동일한 방법으로 투과도를 20% (1/5)로 증가시키고, 분리도 5로 고정된 경우에 대한 계산 결과를 **Table 3**에 나타냈는데 회수농도, 즉 이산화탄소의 순도는 42.75%로 거의 변화가 없는데 반하여 포집된 이산화탄소의 양은 65.77%로 증가하는 것을 알 수 있다.

이산화탄소의 농도를 13%로 주어진 이산화탄소의 초기 농도에 대하여 투과도를 20%로 고정시킨 경우에 대하여 분

**Table 4.** Membrane performance with stage cut (P) and selectivity (S)

Operating variable		CO <sub>2</sub> purity (%)	CO <sub>2</sub> recovery (%)
P = 10	Selectivity (S) 3	31.0	23.84
P = 16.7		31.0	39.77
P = 20		31.0	47.61
P = 30		31.0	71.43
P = 10	Selectivity (S) 5	42.8	32.9
P = 16.7		42.8	54.93
P = 20		42.8	65.77
P = 30		42.8	98.68
P = 10	Selectivity (S) 7	51.2	39.31
P = 16.7		51.2	65.7
P = 20		51.2	78.7
P = 30		51.2	100(↑)
P = 10	Selectivity (S) 10	59.9	46.1
P = 16.7		59.9	76.9
P = 20		59.9	92.15
P = 30		59.9	100(↑)
P = 10	Selectivity (S) 12	64.2	49.38
P = 16.7		64.2	82.46
P = 20		64.2	98.77
P = 30		64.2	100(↑)

리도를 12으로 증가시킨 경우에는 위의 **Table 4**에서 보듯이 순도는 64.2%로 증가하였으며 주입된 이산화탄소의 거의 대부분이 투과되어 이산화탄소의 회수율이 약 99%로서 거의 모든 이산화탄소가 회수됨을 알 수 있다. 이것이 의미하는 바는 주입된 이산화탄소가 투과되지 않고 그대로 통과하여 빠져나가는 양은 거의 제로에 가까운 경우로서 이산화탄소 분리에는 이상적인 설계나 운전조건이라 할 수 있다. 만일 이 경우 분리도를 10보다 더 큰 20으로 높인다고 해

도 이산화탄소의 주입농도가 13%로 고정되어 있기에 순도는 더 나아지지 않는다. 그러므로 이론적으로는 주어진 투과도에 대하여 이산화탄소가 100% 투과되는 임계 분리도가 존재함을 알 수 있다. 앞의 계산결과에 의하면 투과도가 1/5 (20%)일 때 임계분리도는 대략 12 정도됨을 보여주고 있다. 그리고 주어진 투과도에 대하여 분리도가 임계 분리도 이상 높아질 경우 이산화탄소 회수되는 양이나 순도 향상에 아무런 의미가 없음을 시사하고 있다. 여기서 언급할 것은 이와같은 주어진 투과도에 대한 임계 분리도의 개념은 이상적인 이론값으로서 실제 상황에서는 이산화탄소의 막을 통한 분리가 막 양단사이에 존재하는 이산화탄소의 분압농도차에 따른 현상학적인 확산법칙에 의하여 기술되기 때문이다. 그러나 현 단계에서는 이러한 분압 농도차에 의한 효과를 고려하지 않았다.

만일 이 경우 분리도를 12으로 고정하고 투과도를 임계값인 1/5 (20%) 즉 20%에서 30%로 증가시킬 경우 이산화탄소는 모두 투과되어 회수율은 100%로 변화가 없으나 투과도가 증가하였기 때문에 질소 투과도가 증가하여 투과부의 이산화탄소의 순도가 감소하는 부작용이 발생함을 쉽게 알 수 있다. 아래 표에 이러한 사항들을 정리하여 나타내었다. 위의 결과를 정리하면서 다시 강조하는 중요한 사항은 1단 분리에서 분리도 5일 때 투과도가 30%이면 CO<sub>2</sub>가 통과부에서 거의 0%가 되어 일단 분리에서 많은 양의 배기가스를 이산화탄소 없는 상태로 대기 중에 방출할 수 있음을 보여 주고 있다 만일 이 경우 투과도가 30%를 상회하면 불필요한 양의 질소가 분리막을 투과하게 되므로 포집된 이산화탄소의 농도를 희석시키게 된다. 즉 13% 농도에서 운전 모듈에서 분리도가 5일 때 투과도가 30%를 상회하면 포집된 이산화탄소의 농도는 오히려 낮아진다. 반대로 주어진 투과도에서 분리도가 필요이상으로 높아지게 되면 투과도에 비하여 한계치 이상의 높은 분리도는 기존의 존재하는 이산화탄소의 농도 제약 때문에 높은 투과 성능을 발휘하지 못하게 된다. 이상의 결과에서 주어진 이산화탄소의 농도에 대해서 분리막을 이용한 분리에서 이산화탄소를 100% 투과시키는 임계 투과도와 분리도가 설계와 운전조건의 최적

화를 위하여 절대적으로 중요함을 알 수 있다.

Fig. 2에는 이산화탄소의 초기 농도에 대하여 이산화탄소 100% 투과를 위한 임계 P와 S의 상관관계를 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 초기농도가 고정되어 있다면 이산화탄소를 100% 투과시키는 임계 투과도와 분리도가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 이산화탄소의 포집에서 분리막에 대한 기술에서 분리막 재료의 고유한 투과도와 분리도가 분리막 모듈이나 시스템 성능에 미치는 영향에 대한 연구의 일환으로 초기농도가 일정할 때 분리도와 투과도의 상관관계를 연구 하였다. 연구 결과 분리도가 일정할 때 투과도의 증가는 회수되는 이산화탄소의 양은 증가 시키지만 회수되는 이산화탄소의 순도에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 반면 이산화탄소의 초기 농도를 석탄 화력발전소 배기가스의 일반적인 이산화탄소 농도인 13%로 가정한 경우 투과도를 고정시키고 분리도를 변화시켰을 때 분리도가 증가할 수록 회수되는 이산화탄소의 양도 증가되고 이산화탄소의 순도도 일정수준까지는 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 이산화탄소의 초기 주입농도가 고정되어 있는 경우 주어진 투과도에 대하여 이산화탄소가 100% 회수되는 이론적인 임계 분리도가 존재함을 알 수 있었다.

이상의 결과에서 주어진 이산화탄소의 농도에 대해서 분리막을 이용한 분리에서 이산화탄소를 100% 투과시키는 임계 투과도와 분리도의 개념이 설계와 운전조건의 최적화를 위하여 절대적으로 중요함을 알 수 있다. 분리막에 의한 혼합기체의 분리가 온실가스나 기타 연료개질 분야 등에서 중요성이 높아지고 있음을 감안할 때 분리막 기본 재료의 성능에 따른 모듈이나 시스템 디자인에 대한 기본적인 연구는 분리막 재료 자체에 대한 연구와 마찬가지로 중요성을 가짐을 알 수 있다.

#### Acknowledgement

본 연구는 대전 녹색환경기원센터에서 시행한 환경기술연구개발 사업(2016)의 연구비 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

#### References

1. Korea Exchange, Status of Caebon Dioxide emission trading market and Action plan, Korea Exchange conference, (2016).

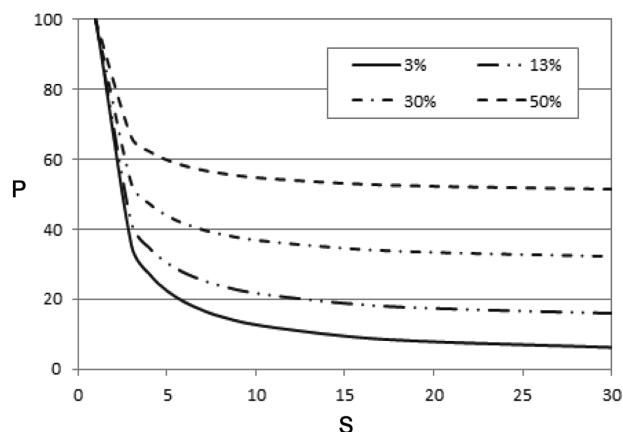


Fig. 2. Relation of Critical P & S with initial CO<sub>2</sub> concentration,

2. Folger, P., Carbon Capture, A Technology Assesment, CRS (Congressional Research Service) Report(2013).
3. Luis, P., "Use of monoethanolamine (MEA) for CO<sub>2</sub> capture in a global scenario, Consequences and alternatives," *Desalination*, **380**, 93~99(2016).
4. Shin, G., Kim, G., Bhang, G. and Jang, D. S., Arstroma CO<sub>2</sub> separation membrane mechanism and system design, Arstroma Research Report 2015 No.1(July 2015).
5. Merkel, T. C., Lin, H., Wei, X., Baker, R., "Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes et al.," *J. Membr. Sci.*, **359**, 126~139(2010).
6. Toy, L., Kataria, A., Gupta, R. P., CO<sub>2</sub> capture membrane process for power plant flue gas, RTI International final technical report(2012).