

# 논문분석을 통한 멤브레인 이용 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 포집기술의 연구동향 분석

이정구\*

## I. 서론

오늘날 인류의 생존과 직결되고 있는 문제 중 하나는 지구온난화이다. 인위적으로 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도의 증가는 지구온난화의 가장 큰 원인이다. 20세기 들어서 인간의 경제활동 증가로 인해 엄청난 양의 이산화탄소가 대기 중에 방출되고 있다. 석유나 석탄 같은 화석연료를 태우면 탄소(C)와 산소(O)가 결합해 이산화탄소가 생성되기 때문이다. 이로 인해 지구의 기온이 인위적으로 올라가게 되어 예기치 못한 기후 변화가 우려된다. 기후변화는 해수면의 상승, 강우량의 변화, 생태계의 구조 변화 등을 일으켜 인간과 생물의 생활환경, 인류사회에 심각한 악영향을 끼치고 있다. 최근 미국 국립해양대기국(NOAA)에 따르면 2015년 3월 지구 대기 중 이산화탄소 농도 의 월 평균치가 400.83 ppm을 기록해 대기 관측 이래 처음으로 400ppm을 넘어서 지구온난화의 위험을 알리는 경고등이 켜지는 단계라고 발표하였다.

UN은 1992년 6월 브라질 리우환경회의에서 지구온난화에 따른 이상기후현상을 예방하기 위한 목적으로 ‘기후변화에 관한 국제연합 기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)을 채택하고 회원국들이 힘을 합쳐 의무적으로 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 발생을 줄이자고 결의했으며, 우리나라는 1993년 12월에 가입했다. 1997년에는 일본 교토에서 제3차 당사국 회의가 열려 1990년 기준 평균 5.2%(선진국 기준)의 온실가스를 의무적으로 줄이자는 교토의정서가 채택되었다. 교토의정서는 온실가스를 시장에서 거래할 수 있는 시장경제 개념을 도입하였는데 그 의미가 크며, 온실가스 배출을 줄이거나 처리하는 첨단기술을 많이 보유하고 있는 국가나 기업이 세계 경제에서 우위를 차지하게 될 수 있는 계기가 되었다.

우리나라는 OECD 국가로서 2010년 기준 세계 7위의 온실가스 배출국이지만 개도국으로 분류되어 2020년까지는 이산화탄소 감축에 대한 의무를 갖지 않는다. 그러나 국제사회는 우리나라에 대해서 선진국 대열에 편입하거나 OECD 회원국으로서 중국, 인도 등과는 차별화된 감축행동을 요구하고 있다. 이에 우리나라는 2009년 8월 중기 감축목표를 제시하고 2009년 11월 대통령 주재 국무회의를 통해 2020년에 BAU 대비 온실가스 감축목표를 30%로 확정하였다. 이는 EU 개도국에 대해 요구하는 BAU 15~30% 감축 권고안 대비 최고 수준이며, 우리나라 정부의 저탄소 녹색성장을 위한 강한 의지 표명이라 할 수 있다. 또한 제18차 UN 기후변화당사국총회에서 우리나라는 인천시에 녹색기후기금(Green Climate Fund) 사무국 유치를 확정하고 2014년부터 본격적인 활동을 추진하고 있으며, 지구온난화 해결을 위한 여러 가지 대안을 강구하고 있다.

현재 전 세계 각국은 기후 변화로 초래될 수 있는 지구적 재난을 막기 위해 온실가스의 주범인 이산화탄소 배출을 저감시킬 수 있는 다양한 연구개발을 활발하게 진행하고 있다. 이산화탄소 배출 감축 및 저감 기술로는 에너지 절약, 고효율 에너지 이용기술, 신에너지 및 청정에너지와 같은 비화석 연료 사용, 재생에너지 및 화석연료간의 전환기술, 생태 또는 생물학적 처리 기술, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 포집 및 저장 기술(CCS, Carbon Capture and Storage Technology) 등이 있다. 이 중에서 이산화탄소 포집 및 저장 기술(CCS)은 연료를 연소

\* 이정구, 한국과학기술정보연구원 선임연구원, 042-869-1060, jglee@kisti.re.kr

또는 처리하는 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 대기 중에 방출하지 않고 포집, 회수하여 저장 또는 격리하는 기술로서 현재 CO<sub>2</sub>를 감축 및 저감하는데 가장 유효하고 효율적인 기술로 알려져 있다.

따라서 본 논문에는 현재 전 세계적으로 연구 및 기술개발이 활발하게 진행되고 있는 CCS 포집기술 중 막분리법인 멤브레인을 이용한 이산화탄소 포집기술의 논문 분석을 통해 멤브레인을 이용한 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 포집기술에 대한 연구동향을 제시하고자 한다.

## II. 본문

### 1. 이산화탄소 포집기술(Carbon Dioxide Capture)

CCS 기술은 에너지를 얻기 위해 사용되는 화석연료 및 기타 탄소성분의 연료를 연소 또는 처리하는 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 대기 중에 방출하지 않고 포집, 회수하여 격리하는 모든 기술을 말한다. 이러한 CCS 기술은 CO<sub>2</sub> 배출원으로부터 CO<sub>2</sub>를 포집하는 포집기술, 포집한 CO<sub>2</sub>를 땅속 또는 해양에 저장하는 저장 기술로 구분할 수 있다. 비용은 연료의 종류와 적용, 국가 상황, 환경 규제 등에 따라 다르지만 일반적으로 포집기술 비용이 전체 CSS 비용의 약 70~80%를 차지한다.

CO<sub>2</sub> 포집기술에는 화력발전소의 배연가스(Flue Gas)와 같은 화석연료가 연소 후 발생하는 가스 혼합물로부터 CO<sub>2</sub>를 포집하는 연소 후 기술, 연료를 연소하기 전 미리 연료를 반응 처리하여 CO<sub>2</sub>와 수소(H<sub>2</sub>)로 전환 후 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 혼합가스를 분리 또는 연소하여 배기가스 중 CO<sub>2</sub>만을 용이하게 포집할 수 있는 연소 전 기술, 연료를 공기 대신 산소(O<sub>2</sub>)만으로 연소시키는 순산소 연소기술 등으로 구분할 수 있다.

연소 후 기술(Post-combustion)은 CO<sub>2</sub>가 분리되는 공정에 따라 크게 흡수법(Absorption), 흡착법(Adsorption), 막분리법(Membrane)으로 나눌 수 있다. 흡수법은 대량의 가스처리가 가능하고, 낮은 이산화탄소 분압에서도 처리가 가능하다는 장점이 있으나 탈기시 스팀을 사용하므로 에너지 소모가 다소 많이 요구된다. 흡수법은 물리적인 흡수법과 화학적인 흡수법으로 구분할 수 있다. 화학적인 흡수법은 이산화탄소와 반응하는 흡수제를 이용, 화학적 반응으로 흡수를 촉진시키는 방법으로 기존의 물리적 흡수보다 많은 양의 가스를 처리할 수 있으며 낮은 이산화탄소 분압하에서도 효율적인 제거가 가능해 많이 이용되는 방법이다.

이산화탄소의 분리를 위한 흡착법은 고체상의 표면과 흡착되는 흡착질간의 상호인력에 의하여 목적 성분을 분리하는 방법으로 흡착제와 흡착질의 인력 특성에 따라 물리흡착과 화학흡착으로 구분되나 대부분의 흡착과정에서 적용되는 흡착의 형태는 물리흡착이다. 물리흡착은 흡착제와 흡착질의 결합력이 화학흡착에 비하여 약하여 흡착제의 재생성이 양호하므로 이산화탄소의 분리공정에서는 대부분 물리적인 흡착 특성을 이용하고 있다. 또한 흡착법에 의한 이산화탄소의 분리 공정은 건식법으로 운전되므로 부식문제가 없으며, 설비의 가동 시간이 짧고, 조적이 간단하고 공정의 자동화가 가능하며, 장치가 흡수법에 비하여 작고, 흡착제의 수명이 길며 손실이 없다는 장점이 있어 연소 배가스로부터 이산화탄소를 분리하는데 적합한 공정이다. 그러나 이산화탄소의 농도가 낮은 경우 고농도로 농축하는 것이 어렵고 흡수법에 비해서는 에너지 소모가 적기는 하지만 역시 흡착열과 탈착열이 많으며, 대용량의 이산화탄소를 처리하는 경우 기술 축적이 제대로 되어 있지 못하다는 단점이 있다.

막분리 공정은 분리막을 이용한 기체 분리 기술로 상변화가 수반되지 않으므로 에너지의 소모가 적고, 공정의 조작 및 운전이 간단하며, 분리막 공정을 기존의 시설에 부설하여 이산화탄소의 처리량을 조절할 수 있어 분리 대상 기체에 대하여 높은 선택성과 투과성을 가진다는 장점이 있어 흡수법, 흡착법과 더불어 지구온

난화 기체 분리에 적합한 공정으로 평가받고 있다. 이산화탄소의 분리에는 세가지 종류의 막인 폴리이미드, 셀룰로우스 아세테이트, 폴리스ulfon 등의 고분자막과 알루미늄, 실리카 등의 무기막 그리고 액막을 중심으로 연구되고 있다. 이 중에서 고분자 분리막에 의한 분리 기술은 어느 정도 실용화되어 기체 분리 공정에 이용되고 있다.

## 2. 논문분석 범위 및 분석기준

본 논문은 <표 1>과 같이 분석대상 데이터베이스 및 분석범위를 선정하였다. 본 논문의 논문 분석은 약 9,000종 저널(SCI, SCIE, SSCI, A&HCI)의 Article을 대상으로 하였으며, 분석대상 DB는 Thomson ISI사에서 제공하는 인용색인 DB인 Web of Science을 사용하였다. 논문분석을 위한 Tool은 KISTI에서 구축한 정보 분석시스템인 KITAS를 사용하였다.

<표 1> 분석대상 데이터베이스 및 분석범위

검색 DB	논문분석 대상	정보분석 TOOL	분석범위(기간)
* Web of Science	* (SCI, SCIE, SSCI, A&HCI)의 약 9,000종 저널의 Article	* KITAS(정보분석시스템)	1994.01~2013.12 (20년 기준)

다음으로 <표 2>는 멤브레인을 이용한 논문분석을 위한 기술 분류 및 키워드를 나타낸 것이다.

<표 2> 분석대상의 기술 분류 및 키워드

대분류	중분류	소분류(13개)	키워드
멤브레인	분리막 소재	고분자분리막	Polymer, Polymeric
		무기막	Inorganic, Ceramic, Zeolite, Carbon, Silica, Metal organic
		혼성막	Hybrid, MMM(Mixed matrix membrane)
		기타 막 (촉진수송,이온성액체)	Facilitated transport, Ionic liquid
	분리막 공정	연소배가스 회수공정	Post combustion
		천연가스 정제공정	Natural gas
		바이오가스 정제공정	Bio gas
		기타 공정(막접촉공정)	Contactator, Adsorbent, Absorbent
	분리막 모듈	중공사형	Hollow fiber, Capillary
		평판형	Flat sheet, Plate &Frame
		나권형	Spiral wound
		관상형	Shell & Tube, Tubular
		기타 모듈(모노리스형 모듈)	Monolith

기술 분류 및 키워드는 CCS 멤브레인 전문가 그룹인 대학교수 및 국가연구소의 박사급 연구원의 자문을

받아 작성하였다. 검색식의 구성은 먼저 CCS 멤브레인에 대한 공통 검색식을 작성하였으며, 그 다음으로 세부 기술별 검색식을 작성하였다. 공통검색식과 세부 기술별 검색식을 연산자(AND)를 이용하여 검색 결과를 수행하였다. <표 3>은 멤브레인을 이용한 이산화탄소 포집기술의 세부 기술별 검색식을 나타낸 것이다.

<표 3> 멤브레인을 이용한 이산화탄소 포집 기술의 세부 기술별 검색식

세부기술	검색식
CCS 멤브레인(공통)	(TS=(("carbon dioxide*" or carbondioxid* or carbon_dioxid* or carbon-dioxid* or CO2 or acid-gas* or "acid gas*" or acid_gas* or acid-gas*) and (CCS or ((carbon or CO2) near/5 (captur* or eliminat* or seperat* or separat* or remov* or absor* or adsor* or desor* or collect*))) and (membran* or *membrane or filtration* or filter* or film*)) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=1994-2014
고분자막	TS=(polyme* or polymer* or polymeric*)
무기막	TS=(inorgani* or cerami* or zeolit* or silica* or Metalorganic* or metal-organic* or "metal organic*")
혼성막	TS=(hybrid* or MMM or ("Mixed* matrix* membran*"))
기타막 (촉진수송, 이온성 액체)	TS=(("Facilit* transport*") or ("ion* liquid*"))
연소배가스 회수공정	TS=(post-combustion* or "post combustion*" or postcombustion* or pcc)
천연가스 정제공정	TS=("natural* gas*" or naturalgas* or natural-gas*)
바이오가스 정제공정	TS=(bio-gas* or biogas* or "bio* gas*")
기타공정(막접촉)	TS=(contact*)
중공사형(모세관) 모듈	TS=((Hollow* fiber*) or (capillar*))
평판형 모듈	TS=(flat sheet* or flat-sheet* or "flat* sheet*" or "plate* frame*" or plate frame*)
나권형모듈	TS=(spiral wound* or spiral-wound* or "spira* wound*")
관상형 모듈	TS=(shell tub* or (shell-tub*) or tubular* or ("shell* tub*")
모노리스형 모듈	TS=(monolith*)

<표 4>는 논문분석 검색 및 데이터 분석건수를 나타낸 것이다. 노이즈 제거는 노이즈 처리 기준을 세워놓고 초록 및 기술개요에 대한 스크리닝(Screening) 과정을 거쳐 관련성이 낮은 논문들을 제거하였다. 검색건수 총 3,815건에서 노이즈 건수를 제거한 총 2,308건의 논문을 대상으로 논문분석을 수행하였다. 논문분석 건수는 교신저자 기준으로 분석된 것이며, 공동연구 저자로 포함된 논문은 본 논문분석에서 제외 시켰다.

<표 4> 논문분석 검색 및 데이터 분석건수

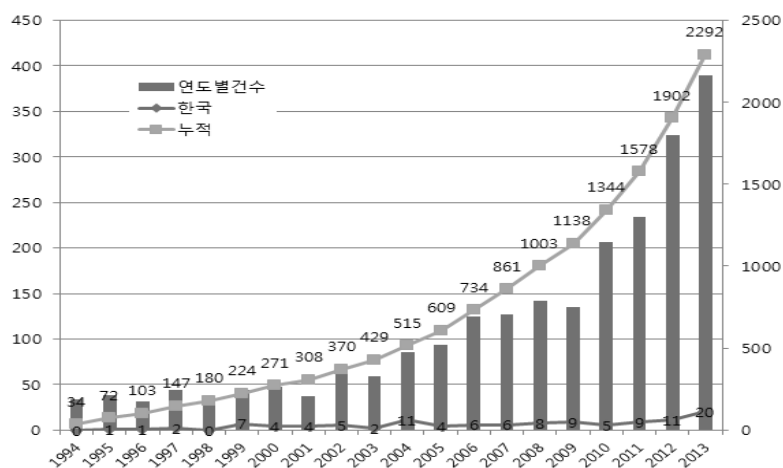
대분류	중분류	소분류(13개)	논문검색 (3,815건)	논문분석 (2,308건)	노이즈제거 (1,507건)
멤브레인 (2,308건)	분리막 소재 (1,430건)	고분자분리막	1,009건	414건	559건
		무기막	914건	673건	241건
		혼성막	274건	110건	164건
		기타막(촉진수송,이온성액체)	333건	233건	100건
	분리막 공정 (354건)	연소배가스 회수공정	119건	113건	6건
		천연가스 정제공정	254건	177건	77건
		바이오가스 정제공정	62건	34건	28건
		기타 공정(막접촉공정)	198건	30건	168건

대분류	중분류	소분류(13개)	논문검색 (3,815건)	논문분석 (2,308건)	노이즈제거 (1,507건)
	분리막 모듈 (524건)	중공사형	600건	366건	234건
		평판형	34건	33건	1건
		나권형	13건	12건	1건
		관상형	93건	93건	0건
		기타모듈(모노리스형 모듈)	21건	20건	1건

### 3. 멤브레인을 이용한 이산화탄소 포집기술의 논문분석

#### 1) 연도별 논문 동향분석

CCS 멤브레인의 연도별 논문 동향을 살펴보면 1990년대 50건 내외의 논문을 발표하였으나, 2006년 이후부터 100건 이상의 논문 발표가 이루어 졌고, 2010년부터 큰 폭으로 학술활동이 진행된 것으로 나타났다. 이러한 경향은 2012년부터 미국에 이어 중국이 활발하게 논문을 발표하면서 전체 CCS 멤브레인분야 논문 증가율에 영향을 미친 것으로 분석되었다. (그림 1)은 CCS 멤브레인 연도별 논문발표 추이를 나타낸 것이다.

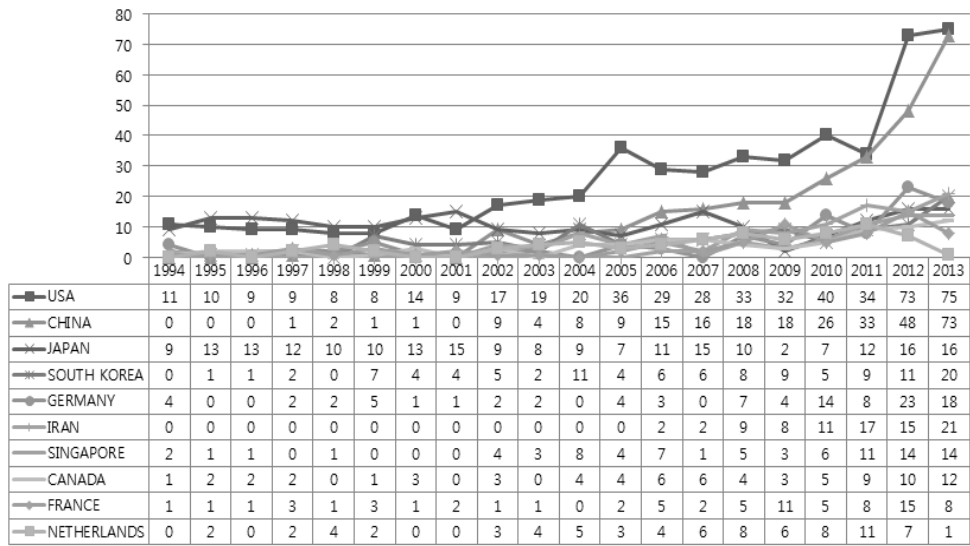


(그림 1) CCS 멤브레인 연도별 논문발표 추이

한국의 경우 2004년 소폭으로 증가하다가 2013년에 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. 2004년의 경우 한국화학연구원 4건, 연세대학교 4건, 한양대학교 2건, 부산대학교 1건으로 나타났으며, 2013년에는 한양대학교 5건, 성균관대학교 3건, 한국에너지기술연구원 2건, 한국화학연구원 2건으로 나타났다.

#### 2) 국가별/연도별 논문 동향분석

국가별/연도별 논문 동향을 살펴보면 미국 514건, 중국 282건, 일본 217건, 한국 115건, 독일 100건, 이란 85건, 싱가포르 85건, 캐나다 77건, 프랑스 76건, 네덜란드 76건으로 조사되었다. 미국은 꾸준히 논문을 발표해 오다가 2012년 이후 큰 폭으로 상승하였으며, 중국은 2010년 이후부터 꾸준히 증가 추세를 보이는 것으로 나타났다. 2000년 중후반부터 논문발표가 큰 폭으로 증가한 이유는 지구 온난화로 인한 기후변화 대응이 국제 및 국내의 중요한 의제로 부상하여 이에 따른 연구가 활발하게 이루어진 것으로 예측된다. (그림 2)는 CCS 멤브레인 국가별/연도별 논문발표 추이를 나타낸 것이다.

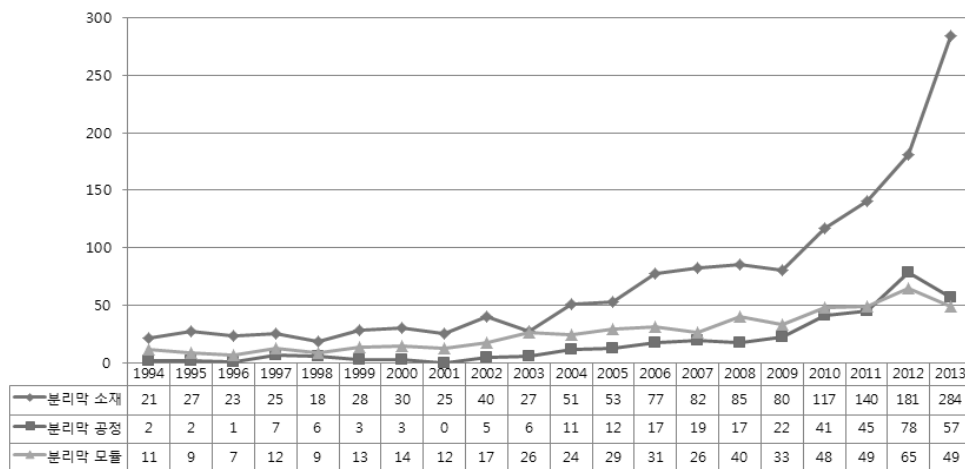


(그림 2) CCS 멤브레인 국가별/연도별 논문발표 추이

### 3) 세부기술별/연도별 논문 동향분석

세부기술별/연도별 논문 동향을 살펴보면 중분류의 분리막 소재분야 1,414건(62%), 분리막 모듈분야 524건(23%), 분리막 공정분야 354건(15%) 순으로 나타났다. (그림 3)은 CCS 멤브레인의 세부기술별/연도별 논문발표 추이를 나타낸 것이다.

분리막 소재분야의 소분류 연구동향을 살펴보면 고분자 분리막은 90년대부터 꾸준히 증가하다가 2013년에 급격히 학술활동이 증가하였는데 이는 미국(23건), 중국(17건)이 주도하고 있는 것으로 나타났다. 미국은 Texas 대학, Washington 대학, Georgia 공대를 중심으로, 중국은 Dalian 대학, Chinese Acad Sci, Shandong 대학을 중심으로, 한국은 한양대를 중심으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 무기막은 중국(29건), 미국(24건), 호주(9건), 한국(6건)으로 나타났으며, 무기막 분야는 중국이 미국보다 더 많은 논문을 발표하고 있는 것으로 나타났다. 미국은 Arizona 대학, 중국은 Chinese Acad Sci, Nanjing 대학, 한국은 성균관대학교를 중심으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.



(그림 3) CCS 멤브레인 세부 기술별/연도별 논문발표 추이

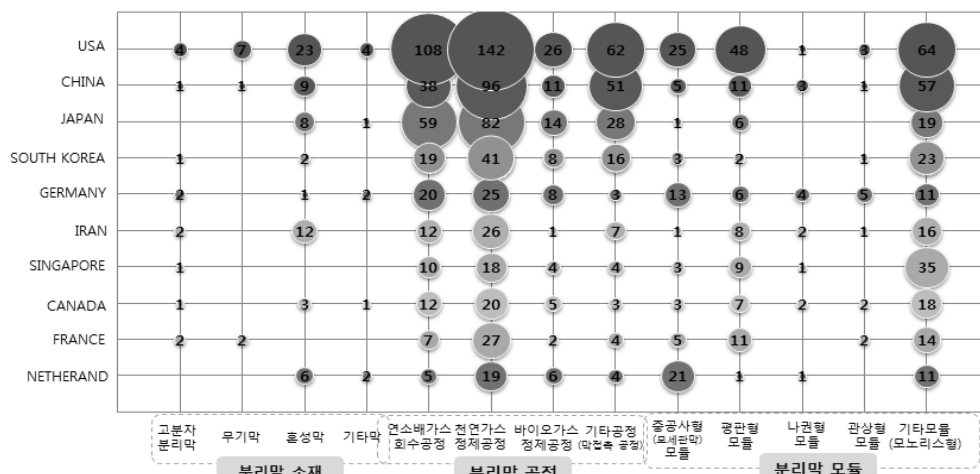
분리막 공정분야의 소분류 연구동향을 살펴보면 연소배가스 회수공정은 2010년부터 꾸준히 증가하였고, 2012년에 가장 활발하게 연구 활동이 진행되었다. 이는 미국(8건), 프랑스(8건), 독일(5건) 순으로 나타났으며, 미국은 Princeton 대학, Georgia 공대, 프랑스는 Lorraine 대학, 독일은 Forschungszentrum Julich를 중심으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 천연가스 정제공정은 미국의 경우 GeorgiaA 공대, 싱가포르의 Singapore 대학을 중심으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

분리막 모듈분야의 소분류 연구동향을 살펴보면 중공사형 모듈은 1990년대부터 지속적으로 연구가 진행되어 왔으며 2012년에 연구가 가장 활발히 진행되었다. 말레이시아(9건), 미국(6건), 중국(5건)으로 나타났으며, 말레이시아는 Malaysia 공대, 중국은 China Univ Sci & Technol, 한국은 한양대학교를 중심으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 관상형 모듈은 미국의 경우 Florida 대학, Maryland 대학, Colorado 대학에서, 인도는 CSIR에서 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

#### 4) 국가별 세부기술 포트폴리오 논문 동향분석

국가별 기술 포트폴리오의 세부기술별 연구활동을 살펴보면 미국은 천연가스 정제공정(142건), 연소배가스 회수공정(108건), 모노리스형 모듈(64건), 막접촉 공정(62건), 평판형 모듈(48건), 바이오 가스 정제공정(26건) 분야에서 연구가 활발하게 진행되고 있는 것으로 나타났다. 중국은 천연가스 정제공정(96건), 모노리스형 모듈(57건), 막접촉 공정(51건), 연소배가스 회수공정(38건) 분야에서, 일본은 천연가스 정제공정(82건), 연소배가스 회수공정(59건), 막접촉 공정(28건), 모노리스형 모듈(19건) 바이오가스 정제공정(14건) 분야에서 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

한국의 경우 천연가스 정제공정(41건), 모노리스형 모듈(23건), 연소배가스 회수공정(19건), 막접촉 공정(16건), 바이오가스 정제공정(8건) 분야에서 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다. (그림 4)는 국가별 기술 포트폴리오 논문 연구동향을 나타낸 것이다.

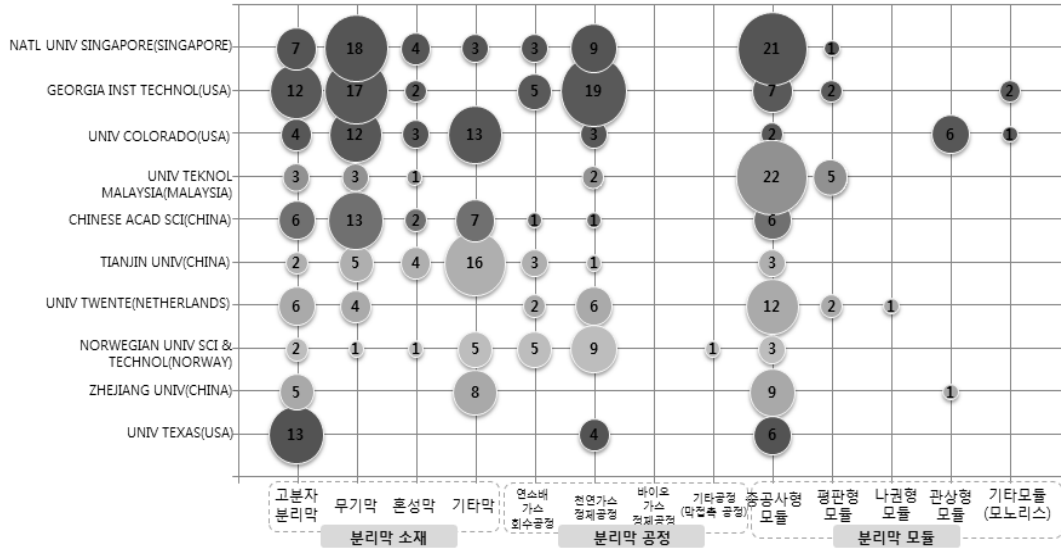


(그림 4) CCS 멤브레인 국가별 세부기술 포트폴리오 논문 연구동향

#### 5) 기관별 세부기술 포트폴리오 논문 동향분석

(그림 5)는 CCS 멤브레인 기관별 기술 포트폴리오 논문 연구동향을 나타낸 것이다. 기관별 기술 포트폴리오의 세부기술별 연구활동을 살펴보면 고분자 분리막은 Texas 대학(미국), Georgia 공대(미국), Singapore 대

학(싱가포르), Twente 대학(네덜란드), Chinese Acad Sci(중국)에서, 무기막은 Singapore 대학(싱가포르), Georgia 공대(미국), Chinese Acad Sci(중국), Colorado 대학(미국) 에서 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

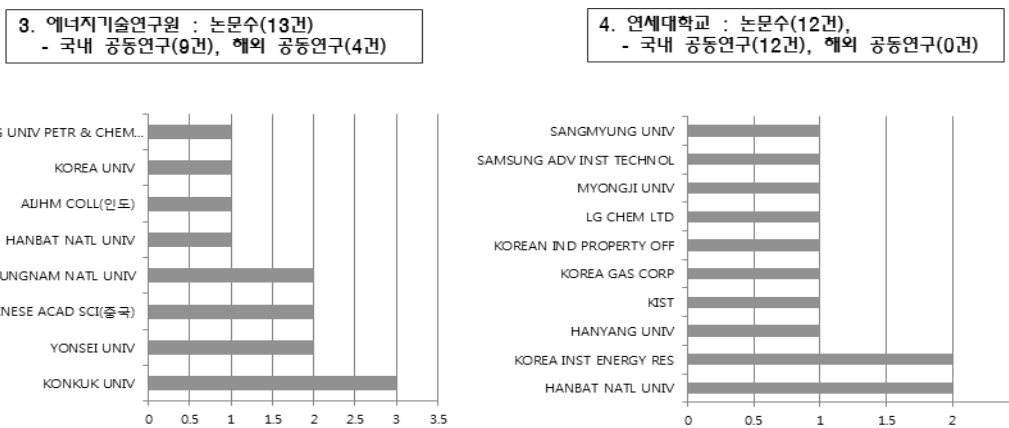


(그림 5) CCS 멤브레인 기관별 세부기술 포트폴리오 논문 연구동향

천연가스 정제공정은 Georgia 공대(미국), Norwegian 대학(노르웨이), Singapore 대학(싱가포르), Twente 대학(네덜란드)에서, 증기사형 모듈은 Malaysia 대학(말레이시아), Singapore 대학(싱가포르), Twente 대학(네덜란드), Zhejiang 대학(중국), Georgia 공대(미국)에서 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

### 6) 국내 주요기관 공동연구 논문 동향분석

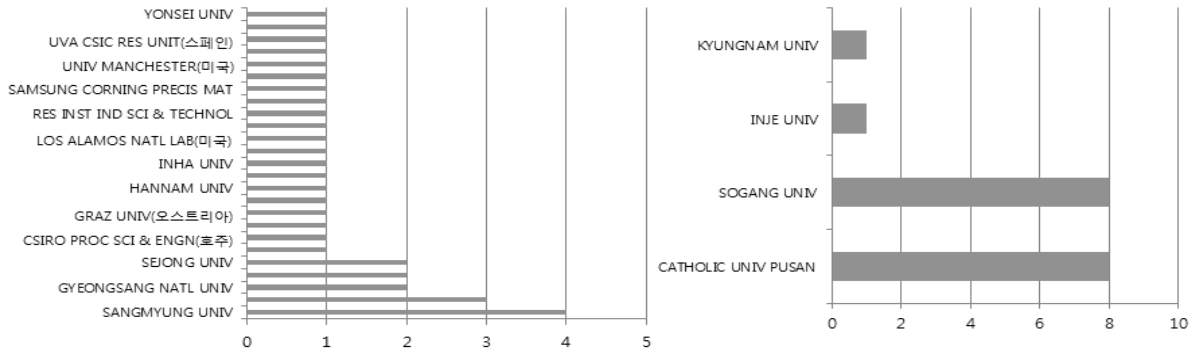
국내 주요기관별 공동연구 논문 동향을 살펴보면 한양대학교는 국내 공동연구 17건, 해외 공동연구 16건으로 CCS 멤브레인 분야에서 가장 활발하게 공동연구를 하는 것으로 나타났다. 부산대학교는 국내 공동연구 18건, 한국에너지기술연구원은 국내 공동연구 9건, 해외 공동연구 4건, 연세대학교는 국내 공동연구 12건으로 나타났다. (그림 6)은 CCS 멤브레인 국내 주요기관의 공동연구 논문의 동향분석을 나타낸 것이다.





1. 한양대학교 : 논문수(33건),  
- 국내 공동연구(17건), 해외 공동연구(16건)

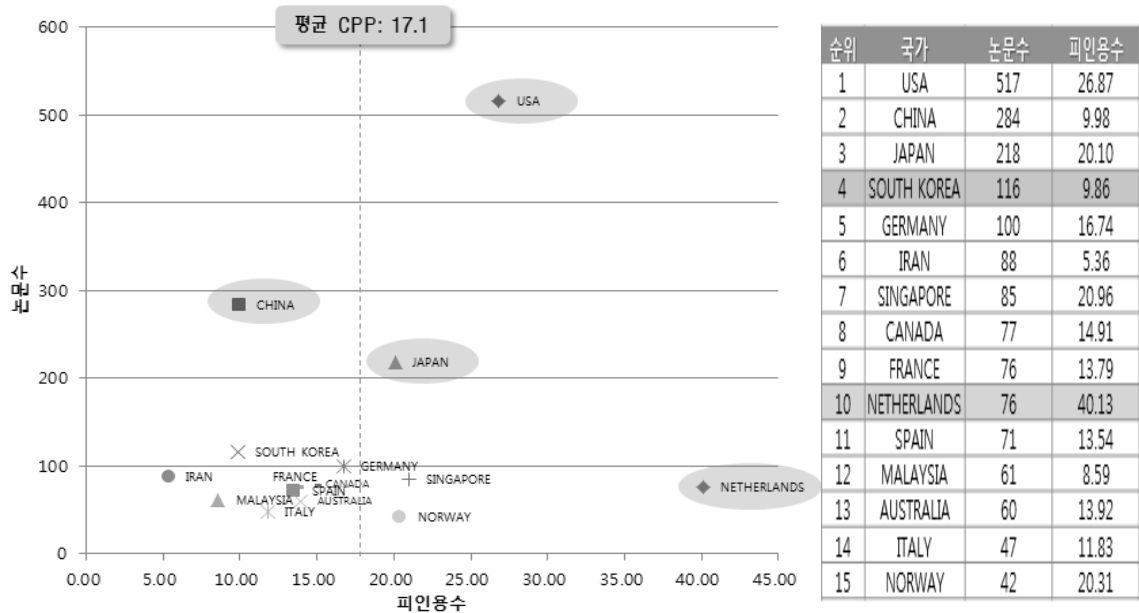
2. 부산대학교 : 논문수(18건)  
- 국내 공동연구(18건), 해외 공동연구(0건)



(그림 6) CCS 멤브레인 국내 주요기관의 공동연구 논문 동향분석

### 7) 국가별 피인용수 논문 동향분석

논문당 피인용도(Citations per Paper)는 논문 1건당 평균 피인용수로 이 값이 클수록 논문의 품질이 우수함을 의미한다. (그림 7)에서 보듯이 국가별 논문 평균 피인용수(CPP)는 17.1이다. 네덜란드(40.13), 미국(26.87), 싱가포르(20.96), 노르웨이(20.31), 일본(20.1)은 평균 CPP가 17.1 이상의 논문 수준을 보이는 국가로 나타났다. 반면에 독일(16.74), 캐나다(14.91), 오스트레일리아(13.92), 프랑스(13.79), 이탈리아(11.83), 스페인(13.54) 등은 평균 CPP에 미치지 못하는 국가로 나타났다. 우리나라 CPP(Citations per Paper)는 9.86으로 나타났다. (그림 7)은 국가별 피인용수 논문의 동향분석을 나타낸 것이다.



(그림 7) CCS 멤브레인 국가별 피인용수(CPP) 논문 동향분석

### III. 결론

세계적으로 연구가 활발하게 진행되고 있는 CCS 포집기술 중 멤브레인을 이용한 이산화탄소 포집기술의 논문 분석을 위해 1994년부터 2013년까지 20년 동안 발표된 Web of Science의 SCI, SCIE, SSCI 등 9,000종의 저널을 대상으로 CCS 멤브레인 분야 논문 2,308편을 분석하였다.

CCS 멤브레인 분야 논문은 1990년대 50건 내외의 논문을 발표하였으나 2000년 후반부터 큰 폭으로 연구 활동이 진행된 것으로 나타났다. 이는 지구온난화로 인한 기후 변화 대응이 국제 및 국내의 중요한 의제로 부상하여 이에 따른 연구가 활발하게 이루어진 것으로 예측된다. 또한 2010년 이후부터 미국에 이어 중국이 활발하게 논문을 발표하면서 전체 CCS 멤브레인 분야의 논문 증가율에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

국가별로 살펴보면 미국, 중국, 일본, 한국, 독일, 이란, 싱가포르, 캐나다, 프랑스, 네덜란드 순으로 연구가 활발하게 진행되고 있는 것으로 나타났으며, 기관별로는 GEORGIA 공대, SINGAPORE 대학, COLORADO 대학, CHINESE ACAD SIC, MALAYSIA 공대, TIANJIN 대학, TWENTE 대학, NORWEGIAN 대학, TEXAS 대학, ZHEJIANG 대학 순으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 세부기술별로 살펴보면 분리막 소재인 경우 무기막, 고분자 분리막 순으로, 분리막 공정인 경우는 연소배가스 회수공정, 천연가스 정제공정, 바이오가스 정제공정 순이며, 분리막 모듈의 경우 중공사형 모듈, 관상형 모듈, 평판형 모듈 순으로 연구가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

CCS 멤브레인 분야의 국가별 논문 평균 피인용수(CPP)는 17.1이다. 네덜란드(40.13), 미국(26.87), 싱가포르(20.96), 노르웨이(20.31), 일본(20.1)은 평균 CPP 17.1 이상의 논문 수준을 보이는 국가로 나타났다. 반면에 독일(16.74), 캐나다(14.91), 오스트레일리아(13.92), 프랑스(13.79), 이탈리아(11.83), 스페인(13.54) 등은 평균 CPP에 미치지 못하는 국가로 나타났으며, 우리나라의 CPP (Citations per Paper)는 9.86으로 나타나 연구가 더욱 활발하게 진행되어야 할 것으로 분석되었다.

추후 연구에서는 최신의 논문정보를 수집하여 동일한 절차에 따라 연구를 수행해야 할 것이다. 또한 기술 발전의 대리변수로 특허를 대상으로 분석을 수행한 후 논문 및 특허 기술의 상관관계를 분석함으로써 2020년 발표될 신기후체제에 대한 전략을 마련하고 기술개발 전략을 제시할 필요가 있다.

### 참고문헌

- 한국이산화탄소포집 및 처리연구개발센터 (2012), “더워지는 지구 그 원인과 대책”.
- 청문각 (2013), “이산화탄소 포집, 저장 및 전환기술”.
- 한국항공우주연구원 (2007), “항공우주 상식 하늘의 경계”.
- 임경택, 배도용, 신남철 (1996), “지구환경과학”.
- 한겨레신문 (2015.05.06.), “지구촌 이산화탄소 농도 400ppm 넘었다, 온난화 ‘빨간불’, NOAA”.
- 한국과학기술정보연구원 (2013), “KITAS 사용자 매뉴얼”.
- 한국과학기술기획평가원 (2010), “이산화탄소 포집저장(CCS) 기술 현황과 정책동향”.
- 오성남, “기후변동에 대한 자연재해와 기후일탈의 예견”, 한국과학기술정보연구원.
- 위정호, 김정인 (2008), “국내 전력발전 및 산업 부문에서 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술을 이용한 이산화탄소 배출 저감”, 대한환경공학회지 30권 9호.
- 조규태, 장래하, 유영한 (2013), “지구온난화와 환경요소인 광, 토양수분, 영양소가 상수리나무와 굴참나무의

- 생태 지위에 미치는 영향”, KJEE 46(3).
- 김태현, 정중채, 우창화 (2010), “기체분리용 고분자 멤브레인의 최근 개발 동향”, Membrane Journal, Vol. 20, No 4.
- 백일현, (2008), “청정발전 연계 고압 이산화탄소 분리형 연소전 이산화탄소 회수 기술개발 연구”, 한국에너지기술연구원.
- 서봉국, 김정훈 (2011), “연소후 이산화탄소 분리(CCS)를 위한 분리막 연구동향”, KIC News, Vol. 14, No. 3.
- 이정구 (2015), “멤브레인을 이용한 이산화탄소 포집기술의 특허정보분석과 기술전략”, 한국기술 혁신학회 춘계학술대회 발표 논문집.
- 김경호, “이산화탄소 포집 및 저장”, 한국과학기술정보연구원, Market Report.
- 박호범, 이영무, “이산화탄소 분리용 고투과 선택성 막소재의 개발”.
- 박상도 (2009), “이산화탄소 포집 및 저장기술”, 물리학과 첨단기술.
- 교육과학기술부, “이온성 액체를 이용한 차세대 이산화탄소 포집 기술 정보수집”.
- Wigley, T.M.L, R. Richels (1996), “Nature”.
- IPCC Spercial Report (2005), “Carbon Dioxide Capture and Storage”.
- IEA Report (2012), “Energy Technology Perspectives”.
- R.W. Baker (2002), “Membrane Technology and Application”.
- M. Mulder (21996), “Basic Principle of Membrane Technology”.
- E.S. kim, D.U. Park (2002), “CO<sub>2</sub> 저감 비즈니스”, 한국과학기술정보연구원.
- J.S. Kim (2002), “CO<sub>2</sub> 회수처리기술과 각국의 연구개발 전략”, 한국과학기술정보연구원.
- T.C. Merkel, H. Lin, X. Wei and R. Baker (2010), J. Membr. Sci. 359, 126.
- H.P. Heish (1996), “Inorganic membranes for separation and reaction”.
- Ed. J.T. Houghton, G.I. Jenkins and J.J. Ephraums (1990), Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press.
- R. Gupta (2005), “Presentation at GCEP energy workshop carbon capture and sequestration”, Stanford University.