

CCU 기술 도입의 경제적 파급효과 분석

이혜진*, 강윤영**, 김윤경***

요 약

본 논문은 온실가스인 CO₂를 활용하여 기존에 수입에 의존하던 에너지 및 원료물질을 생산하는 4가지의 CCU(Carbon Capture Utilization) 기술을 상용화할 때에 국내에 미치는 파급효과를 분석하였다. CCU 기술은 재화를 생산할 때에 CO₂, 물, 에너지를 기반으로 하며 기존의 화석연료 기반 제품 시장을 대체한다. 분석에 사용한 산업연관표는 4가지의 CCU 기술을 독립된 산업부문분류로 가지며, 이를 통해서 기술별로 경제에 미치는 실질적 영향을 반영하도록 하였다. 분석결과에 따르면 4가지의 CCU 기술을 반영한 설비를 건설할 때의 생산유발계수는 3.12, 부가가치유발계수는 0.87, 피용자보수유발계수는 0.45였다. 그리고 이 설비들을 운영할 때의 생산유발계수는 1.55, 부가가치유발계수는 0.80, 피용자보수유발계수는 0.58이었다. 건설과 운영의 성격과 중간투입재들이 상이하므로 CCU 기술이 도입된 시설들을 건설할 때의 효과와 운영할 때의 효과는 다른 경향을 보인다. 우리나라에서 CCU 기술이 상용화된다면 설비 및 부품 제조부문과 건설부문에서의 생산이 커질 것이고, 이에 따라서 추가적으로 다른 산업의 생산도 유발될 것이다.

주요 단어 : CCU, 산업연관분석, 에너지신산업, 유발효과

경제학문헌목록 주제분류 : Q43, C67

* 서울대학교 농업자원경제학과 박사과정(제 1 저자). lhyejin3@snu.ac.kr

** 서울대학교 에너지자원공학과 객원교수(제 2 저자). yykang@snu.ac.kr

*** 이화여자대학교 경제학과 교수(교신저자). yoonkkim@ewha.ac.kr

I. 서 론

국내외를 막론하고 기후변화는 주요한 논의주제이다. 세계적으로 보면 기후변화를 산업화 이전 대비 1.5℃로 제한하는 신기후체제가 출범하였다. 그리고 우리나라는 2030년까지 BAU 대비 온실가스 37%를 감축하겠다는 목표를 제시하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 다양한 방법들을 고려할 수 있으며, 그 중의 한 가지는 CO₂ 저감 기술이다.

경제활동은 화석연료를 기초로 한다. 그리고 생산공정에서 석유, 석탄 등은 주요한 원료 및 연료로서 사용된다. CO₂ 감축은 화석연료의 감소를 의미하며, 이는 경제활동의 위축으로 연결될 수 있어서 많은 나라들은 CO₂를 저감하는 다양한 감축수단들 중에서 CO₂ 저감과 산업 활성화를 동시에 달성하는 방법을 모색한다. 이러한 관점을 반영하여 파리 기후총회(COP21)에서 G20 회원국은 혁신미션(Mission Innovation) 선언을 통하여 앞으로 5년간 청정에너지 R&D를 두 배로 증대시키고, 이산화탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture Utilization, and Storage, CCUS) 기술을 중점 투자 대상 기술로 선정하는 것에 합의하였다.¹⁾ 이산화탄소 포집·활용(Carbon Capture Utilization, CCU) 기술은 CO₂를 투입요소로 활용하여 재화를 생산하는 새로운 생산공정들이므로 CO₂ 배출을 감축하면서 동시에 생산활동을 촉진한다. 이러한 점 때문에 우리나라도 혁신 미션(Mission Innovation) 선언에 참여했고, 「2030 온실가스 감축 로드맵 수정안(2018년 발표)」에서 CCUS를 에너지신산업으로 분류하고 CO₂ 1천만 톤 감축 추진을 발표하였다.

CCU 기술은 기존의 이산화탄소 포집·저장(Carbon Capture and Storage,

1) CCUS는 이산화탄소 포집, 이용 및 저장을 의미하며, CO₂를 대량 발생원으로부터 포집한 후에 압축·수송 과정을 거쳐 육상 또는 해양 지중에 저장하거나 유용한 물질로 전환하는 기술을 의미한다.

CCS) 기술에서 저장(Storage)을 제외하고 활용(Utilization) 기술을 추가한 것이다. CCS 기술은 대량 배출원으로부터 CO₂를 지중으로 격리하여 순비용으로 처리하는 기술이다. 이에 비해서 CCU 기술은 생물학적 또는 화학적 방법을 이용하여 CO₂를 다양한 화학원료, 에너지원, 건축자재 등으로 전환시키는 기술이다. CCU 기술은 에너지와 재화를 생산할 때에 화석연료를 투입요소로 사용하는 기존의 생산공정이 아니라, 대표적 온실가스인 CO₂를 투입요소로 이용하는 생산공정이다. 따라서 CCU 기술은 산업의 투입구조에 변화를 가져와서 탄소 선순환 사이클을 형성하는 기술이며, 부(負)의 가치를 갖는다고 인식되었던 CO₂의 가치를 바꾸는 기술이다.

이에 본 논문에서는 CCU 기술이 갖는 생산측면에서의 유용성을 살피기 위하여 CCU 기술의 생산활동측면에서의 파급효과를 정량적으로 추정한다. CCU 기술을 이용하여 대체할 수 있는 기존의 화석연료 기반 제품 시장은 수송 및 발전연료, 화학원료, 탄소섬유 등의 신소재까지로 매우 다양하다. CCU 기술은 CCS 기술과는 다르게 이산화탄소를 이용하여 화학제품 및 에너지를 생산하는 새로운 기술이므로 우리나라 경제에 기존과는 다른 효과를 가져 올 것이다.

분석에서는 CCU 기술을 설비가 도입·설치되는 부분과 설비가 운영되는 부분으로 구분하여 산업 내에 포함시킨다. 이는 설비가 도입·설치될 때에 필요로 하는 투입구조와 설비가 운영될 때에 필요로 하는 투입·배분구조가 상이하다는 점을 반영하기 때문이다. 더하여 배분구조도 상이하다. 도입·설치된 설비는 CCU 기술을 구현하는 산업부문의 고정자본으로 배분되지만, 설비가 운영되어 생산하는 재화는 기존에 생산되던 동일 재화처럼 다른 산업부문의 중간재 또는 최종수요부문의 최종재로 배분된다. 본 논문에서 추정하는 파급효과는 생산유발효과, 부가가치유발효과, 피용자보수유발효과이다.

본 논문은 다음과 같이 구성한다. II에서는 CCS를 대상으로 한 선행연구를 정리한다. 아직까지 CCU 기술이 본격적으로 시행되지 않아서 CCU 기술과 관련한 선행연구를 대신하여 CCS를 대상으로 한 선행연구를 살핀다. III과 IV

에서는 투입산출분석과 CCU 기술 반영의 산업연관표를 구축한다. V에서는 CCU 기술의 상용화가 갖는 파급효과를 추정한다. VI에서는 결론을 제시한다.

II. 선행연구

국내외에서 이루어진 관련 선행연구들은 CCS를 대상으로 하고 있다. 이는 CCU 기술이 개발단계에 있어서 분석을 위한 기초자료가 충분히 확보되지 않았기 때문이다. 따라서 CCS 또는 CCU를 대상으로 한 경제적 측면의 효과를 분석한 선행연구는 적다. 국내 선행연구들은 CCS를 대상으로 하였으며, 이 연구들도 CCS의 일부 요소기술만을 대상으로 한 경제성 분석을 실시하고 있다.

Koelbl et al.(2016)은 네덜란드 전력시스템에 CCS 기술을 도입하였을 때의 효과를 분석하기 위해서 각 전력기술의 균등화발전단가(Levelized Cost of Electricity, LCOE)를 반영하여 산업연관분석을 실시하였다.²⁾ 이 연구는 발전 기술을 세분화하고 CCS 장착 화력발전시설을 하나의 신규 부문으로 구성하였다. 그리고 CCS에 의한 탄소비용 저감, 장치 관련 투입 비용 증가 등에 의한 전력가격 변동성이 가져오는 유발효과를 분석하였다. 분석을 위하여 이 연구는 환경비용 등과 같은 외부비용을 반영한 국제환경산업연관표 EXIOPOL 2001에 IEA Blue Map 시나리오의 에너지수요, 발전량, 발전용량, 에너지집약도, 경제성장, 에너지효율개선 등의 전망치를 반영한 지역별 에너지 시스템모델 TIMER4을 구성하였다. 그리고 TIMER4에서 2050년 전력생산량, 에너지 수출입 비율, LCOE 등을 도출하여 2가지 시나리오(CCS 및 NO-CCS)별 IO 모델 EXIOPOL 2050을 구축하였다. EXIOPOL 2050은 다양한 발전기술들을 반영하고 있다. CCS 시나리오는 19개 기술을,³⁾ NO-CCS 시나리오에서는

2) 이 연구는 CCS 기술 도입 여부에 따른 차이를 분석하고 있지만, 거시변수들의 피드백 메커니즘을 포함한 TIMER 모형에 기반하여 IO를 이용하였다. 따라서 분석 결과에는 CCS 도입에 의한 효과 외에 거시경제의 변화에 의한 효과도 포함되어 있다.

CCS 도입 발전기술을 제외한 14개 기술을 포함한다. 기술별 투입구조는 전과정평가기법(Life Cycle Assessment, LCA)을 기반으로 한다.⁴⁾

분석결과에 따르면 탄소가격을 세금으로 하는 경우에 NO-CCS 시나리오의 부가가치계가 더 크다. 이는 풍력 등 신재생에너지사업에 의한 건설효과에 기인한다. 그리고 CCS 시나리오에서 CCS를 도입하면 연료 수요가 증가하여 광업 등과 같은 상류부분산업의 부가가치가 더 커진다.

우리나라의 CCS를 대상으로 분석한 선행연구로 이지현 외(2016)와 김지환·최정현(2017)이 있다. 이지현 외(2016)는 우리나라 보령화력발전소를 대상으로 국내외 문헌을 참조하여 CO₂ 포집비용을 추정하였다. 분석에서는 500MW급 표준 석탄화력발전소를 기준으로 연 3백만톤 규모의 CO₂ 포집을 가정하였으며, Bolland(2003)의 Power factor를 활용하여 CO₂ 포집시설 운영을 위한 소요 스팀량을 전력손실로 환산하고 신보령 1,2 호기 건설비 및 IEA(2010)의 우리나라 발전소 운영비를 참고하여 LCOE를 제시하였다.

김지환·최정현(2017)은 우리나라 유·가스전 저장소의 특성치에 따른 자본비용, 에너지비용, 관측 및 측정비용, 폐기비용 등이 반영된 CO₂ 저장비용을 산정하였다. 이 연구는 국내에 대규모 실증사업이 추진되지 않아서 실측자료가 충분하지 않다는 점을 근거로 해외의 실측자료 사례들을 참고하였다. 또한 우리나라 동해-1 가스전의 가스 생산 설비를 재활용한다고 가정하고, CO₂ 주입과 관련된 비용을 추산하였다.

3) 19개 발전기술은 태양광, 지열, 수력, 풍력, 원자력, 바이오매스, 중유, 천연가스, 석탄, NGCC(w/, w/o CCS, 석탄 IGCC(w/, w/o CCS), 바이오매스 IGCC(w/, w/o CCS), Advanced 기력 바이오매스(w/, w/o CCS), Advanced 기력 석탄(w/, w/o CCS)로 구성되어 있다.

4) 전과정평가기법(Life Cycle Assessment, LCA)은 시뮬레이션을 이용하여 특정기술에 대한 공정을 확립하고, 공정에서의 물질 및 에너지 수지에 기반한 가상의 설비 규모를 파악한다.

Ⅲ. 유발효과분석

유발효과를 분석하기 위한 IO 모형은 원자재, 공급물품, 급여 등의 프로젝트 지출에 의한 직접효과 외에, 경제를 통해서 나타날 간접효과와 유발된 변화들도 알려준다.⁵⁾ 직접효과와 파급효과들의 합은 총효과이며, 직접효과에 대한 총효과의 비율은 총효과승수 또는 승수효과라고 한다.

유발효과분석은 투입구조와 수입계수를 고정으로 가정하고 최종수요의 증가액 1단위가 주어졌을 때에 이 수요를 충족시키기 위하여 각 산업의 생산 및 소비과정에서 직·간접적으로 야기되는 산출의 정도를 추정한다. 생산유발계수표는 산업간의 거래행렬을 이용하여 j 부분의 생산을 위한 i 부분 생산물 투입계수 $a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j}$ 로 구성된 투입계수표(A)의 레온티에프 역행렬로 얻어지며, 최종수요(F)의 변화가 중간수요와 중간투입에 가져 오는 파급효과를 나타낸다. 따라서 생산유발계수표를 이용하면 최종수요의 변동에 따른 생산유발효과를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I-A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} n \times 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} n \times n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} n \times 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I-A \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} n \times 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} n \times n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} n \times 1 \end{pmatrix}$$

식(2)에서 $(I-A)^{-1}$ 는 생산유발계수행렬이다. $(I-A)^{-1}$ 에서 각 요소(C'_{ij})는 j 산업에 부과된 최종수요에 대해서 산업 i 로부터 요구된 직접, 간접, 유

5) Elder and Butcher(1989)

발산출이다. j 산업의 산출에 대한 최종수요 1 단위의 변화로 부터 만들어지는 총변화는 행합 $\sum_j C_{ij}$ 이다.

부가가치유발효과분석은 해당 산업에 대해서 1단위의 최종수요가 발생하였을 때에 유발되는 부가가치의 정도를 추정한다. 부가가치는 산업연관표 내에 있는 부가가치부문을 이용하며, 피용자보수, 영업잉여, 고정자본소모, 생산세, 보조금으로 구성된다. 부가가치증수(Value-added Multiplier, VAM)는 식(3)을 이용하여 추정한다. 여기에서 (v) 는 부가가치계수의 벡터이다. 부가가치를 구성하는 피용자보수가 증가하면 소비가 증가하고, 이 소비에 의해서 생산이 촉진된다. 이 과정은 수렴할 때까지 무한히 반복된다.

$$\begin{pmatrix} VAM \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I-A \end{pmatrix}^{-1} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} 1 \times n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \times n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} n \times n \end{pmatrix}$$

피용자보수유발계수(Compensation of Employees, CE)는 생산유발계수와 피용자소득계수(S)의 곱으로 도출된다. 피용자보수가 증가하여 유발된 소비증가액은 소비지출유발액이며, 이는 피용자보수유발액에 평균소비성향을 곱하여 도출한다. 소비증가액을 배분할 때에는 최종수요부문의 민간소비지출의 상품구성을 활용하므로 각 산업부문의 재화 및 용역에 대한 수요액이 산출되고, 이는 다시 생산을 유발한다.

$$\begin{pmatrix} CE \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I-A \end{pmatrix}^{-1} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} 1 \times n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \times n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} n \times n \end{pmatrix}$$

IV. 4가지 CCU 기술 반영의 산업연관표

1. 4가지 CCU 기술의 정의

CCU 기술은 크게 2가지 방법으로 구분된다. 한 가지는 화학적 포집 및 전환이다. 이는 CO₂를 화학적 방법으로 포집하여 화학적 전환을 한다. 다른 한 가지는 생물학적 CO₂ 고정화 및 전환이다. 이는 미세조류와 같은 바이오매스를 배양할 때에 CO₂를 포함한 배기가스 스트림을 활용하여 CO₂를 생물학적으로 고정화하고, 배양된 바이오매스를 수확·건조하여 유용자원으로 변환시킨다.

본 연구에서 분석대상으로 하는 CCU 기술은 4가지이다. 첫째, CCU 기술 1은 생물학적 방법으로 고체 바이오매스원과 에탄올을 생산하는 기술이다. 고체 바이오매스원은 석탄화력발전소에서 혼소할 수 있으며, 에탄올은 수송용 휘발유를 대체할 수 있다. 둘째, CCU 기술 2는 태양열 등의 고온 열을 활용하여 포집된 CO₂를 합성가스로 변환한 후에 DME와 합성항공유를 생산하는 기술이다. DME는 디젤을, 합성항공유는 항공유를 대체한다. 셋째, CCU 기술 3은 포집된 CO₂를 전기화학적 방법을 적용하여 합성가스, 에틸렌, CO를 생산하는 기술이다. 합성가스는 천연가스 발전소에서 혼소할 수 있으며, 에틸렌 및 CO는 석유화학산업의 주요 화합물이다. 넷째, CCU 기술 4는 포집된 CO₂에 촉매를 활용하여 생분해성 플라스틱(폴리카보네이트), 폼알데히드 등의 범용 화학물질을 생산하는 기술이다. CCU 기술별 투입요소와 산출물은 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 분석대상 CCU 기술별 투입요소와 산출물

기술	투입물	산출물
CCU 1	전력, 광에너지, 영양분(N), 라임	석탄혼소용 바이오매스
	전력, 스팀, 셀룰로오스, 아밀라아제, 황산, 이스트, 영양분(N)	에탄올
CCU 2	전력, 고온열, 용수	DME
	전력, 고온열, 용수	항공유
CCU 3	전력, 스팀, 용수, 천연가스	H2-lean 합성가스
	전력, 스팀, 용수	에틸렌
	전력, 스팀, 용수	CO
CCU 4	전력, 스팀, 수소	포름알데히드
	전력, 스팀, 프로필렌옥사이드, 글리세롤	폴리카보네이트 (PC)

2. 4가지 CCU 기술의 설비건설 및 설치에 대한 투입 및 산출구조

CCU 기술의 유발효과를 추정하려면 분석대상으로 하는 CCU 기술들의 투입구조와 배분구조를 파악해야 한다. 이에 CCU 기술들의 설비건설 비용 및 투입구조를 한국이산화탄소포집및처리연구개발센터(2018)의 ECC 2030 예비타당성조사 대응 신규사업기획 연구 결과로부터 인용한다. 한국이산화탄소포집및처리연구개발센터(2018)는 LCA를 적용하여 CCU 기술의 설비 건설 및 설치에 대한 투입구조를 파악했다.

$$A\text{설비의 단가} = B\text{설비의 가격} \times (A\text{설비의 규모} / B\text{설비의 규모})^{\beta} \quad (5)$$

$\beta=0.6$ (화학적 포집 및 전환) 또는 0.9 (생물학적 CO₂ 고정화 및 전환)

설비별 비용은 국내외 문헌으로부터 도출된 기준단가에 스케일 업(scale-up) 계수를 적용하여 추정하였다. 화학적 방법에 의한 CO₂ 포집 및 전환에서의 스케일 업 계수는 six-tenth 법칙(Turton et al., 2013)을 따른다. 생물학적 방법에 의한 CO₂ 포집 및 전환에서는 모듈화된 공정의 특성을 반영하여 0.9를 적용하여 최종설비투자액을 구성하였다. 이 비용은 장치별 설치비용도 포함한다.

<표 2>는 CCU 기술별 설비 건설에 대한 투입구조를 한국표준산업분류 9차 개정안에 따라서 구분한 것이다. CCU 기술의 설비 건설에 대한 투입구조는 크게 기계, 공사, 경비로 구분된다. 기술별로 차이는 있지만, 비중을 보면 기계가 28~40%, 공사가 37~50%, 경비가 19~25%를 차지한다. 이는 다시 설비별(예, 가스분리정제설비, 열회수시설, 추출기, 펌프, 필터프레스, 계측설비, 배가스처리설비, 고체액체분리정제설비 등), 공사별(예, 기계공사비, 전기/계측공사비, 토목공사비, 건축공사비, 부대공사비, 설계용역비 등), 경비별(사업주체 경비, 수송/관세 등, 예비비, 건설이자 등)로 세분화된다. 분석에서는 이 세부 항목들을 해당 또는 가장 근접한 산업부문으로 배분한다. 그리고 설비건설에서 산출되는 것은 설비이며, 설비는 고정자본에 해당되므로 산업연관표 내 최종수요 중의 고정자본형성에 배분한다.

〈표 2〉 CCU 기술의 설비 건설에 대한 투입구조

항목	부문산업명
기계	20132. 합성염료, 유연제 및 기타착색제 제조업
	23326. 콘크리트관및기타구조용콘크리트제품제조업
	25122. 금속 탱크 및 저장 용기 제조업
	25122. 설치용 금속탱크 및 저장용기 제조업
	25913. 금속압형제품 제조업
	27213. 물질 검사, 측정 및 분석기구 제조업
	28122. 배전반 및 전기자동제어반 제조업
	29131. 액체 펌프 제조업
	29132. 기체 펌프 및 압축기 제조업
	29150. 산업용 오븐, 노 및 노용 버저 제조업
	29173. 산업용 송풍기 및 배기장치 제조업
	29176. 증류기, 열 교환기 및 가스 발생기 제조업
	29199. 그외 기타 일반목적용 기계 제조업
	29241. 토목공사 및 유사용 기계장비 제조업
	29242. 광물처리 및 취급장비 제조업
	29299. 그외 기타 특수목적용 기계 제조업
공사	42202. 건물용 기계.장비 설치 공사업
	42311. 일반 전기 공사업
	42121. 토공사업
	42131. 철골 및 관련 구조물 공사업
	41221. 도로 건설업
	72129. 기타 엔지니어링 서비스업
경비	52941. 항공 및 육상 화물취급업
	64110. 중앙은행
	65302. 사업 통제업
	72129. 기타 엔지니어링 서비스업

주: 산업분류는 한국표준산업분류 9차 개정안임.

자료: 한국이산화탄소포집및처리연구개발센터, 2018

3. CCU 기술별 운영에 대한 투입구조 및 산출구조

CCU 기술을 운영하여 생산되는 산출물은 기술별로 상이하다. CCU 기술로 생산하는 산출물들은 바이오연료, 에탄올, DME, 항공유, 합성가스, 에틸렌, 포름알데히드, 폴리카보네이트 등이며, 대부분 ‘017 기초화학물질’ 및 ‘016 석탄 및 석유제품’에 포함된다. CCU 기술로 산출물을 생산하면, 생산공정은 산업부문들이 기존에 갖추고 있던 공정과는 다르겠지만 생산된 산출물은 동일하므로 기존의 산업부문이 생산한 산출물과 동일하게 배분될 것이다. 이에 CCU 기술 반영의 산업연관표에서 CCU 기술이 생산한 산출물은 해당 산출물의 기존 배분구조를 따르는 것으로 설정한다. 이를 위해서 <표 3>은 CCU 기술별로 생산된 산출물이 해당되는 산업부문분류를 기재하고 있다.

CCU 기술을 운영할 때의 투입비용은 크게 고정비, 직접생산비, 일반경비로 구분된다. 이 항목들은 다시 세제, 보험, 재료비, 용수비, 에너지비용, 유지보수비, 인건비, 관리감독비, 운전부대비용, 개발비, 관리비 등으로 세분화된다. 이 항목들은 산업연관표의 산업부문분류에 맞추어서 해당 산업부문 또는 근접한 산업부문으로 배분한다. 운전비용 중의 에너지비용으로서 연속공정의 경우에는 산업용 전기를, 불연속적 운전이 가능한 공정의 경우에는 태양광 등과 같은 신재생에너지원을 활용한다고 가정한다. CCU 기술별 특정 필수 재료비, 용수비, 스팀비용의 단가는 국내외 문헌을 참고하여 추정한다.

CCU 기술로 생산된 제품은 판매되므로 매출이 발생하게 된다. 이 매출액은 국가 온실가스 감축잠재량 산정에서 도출한 2030년 제품 생산량, 국내외 문헌들의 제품 판매단가, 2017년 할인율 4.5%를 적용하여 추정한다.⁶⁾ 석탄혼소용 미세조류 바이오매스의 단가는 유사제품인 우드펠릿의 단가를 기준으로 사용한다. 합성가스의 단가는 천연가스 가격을 열량 대비로 환산하여 추정한다. 인건비는 CCU 기술의 공정이 석유화학산업과 유사하다는 점을 고려하여

6) 본 연구에서 인용한 제품 단가들의 출처는 각주 8)~16)와 같다.

산업통상자원부(2006)⁷⁾가 제시한 한국석유화학산업의 노동생산성 및 비용을 이용한다.

〈표 3〉 4가지 CCU 기술의 생산품과 해당 산업부문분류

기술	기술별 산출품	판매단가	산업연관표의 부문분류 (중분류 기준)
CCU 1	석탄혼소용 바이오매스	277,982(원/ton) ⁸⁾	003 임산물
	에탄올	617,504(원/ton) ⁹⁾	017 기초화학물질
CCU 2	DME	769,996(원/ton) ¹⁰⁾	016 석탄 및 석유제품
	항공유	785,791(원/ton) ¹¹⁾	016 석탄 및 석유제품
CCU 3	H2-lean 합성가스	11,863(원/GJ) ¹²⁾	017 기초화학물질
	에틸렌	1,549,415(원/ton) ¹³⁾	017 기초화학물질
	CO	916,397(원/ton) ¹⁴⁾	017 기초화학물질
CCU 4	포름알데히드	1,108,208(원/ton) ¹⁵⁾	017 기초화학물질
	폴리카보네이트(PC)	2,263,158(원/ton) ¹⁶⁾	017 기초화학물질

주: 판매단가는 2017년 기준임.

- 7) 산업자원부, 2006, "3. 석유화학산업의 발전방향과 관련하여", 산업통상자원부 보도자료
 8) <https://www.pellet.org/wpac-news/global-pellet-market-outlook-in-2017>
 9) <https://www.grains.org/ethanol-reports/20170906/ethanol-market-and-pricing-data-september-6-2017>
 10) <http://www.sunsirs.com/uk/prodetail-684.html>
 11) <https://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/index.aspx>
 12) IEA(2015)
 13) <http://www.motie.go.kr/motie/py/sa/todayeconomyindexprice/todayEconomyIndexPri.jsp>
 14) <http://www.reportsnreports.com/reports/1018624-global-carbon-monoxide-market-research-report-2017.html>
 15) <https://www.icis.com/resources/news/2005/12/08/592331/chemical-profile-formaldehyde/>
 16) 국내 석유화학회사 내부자료 참조

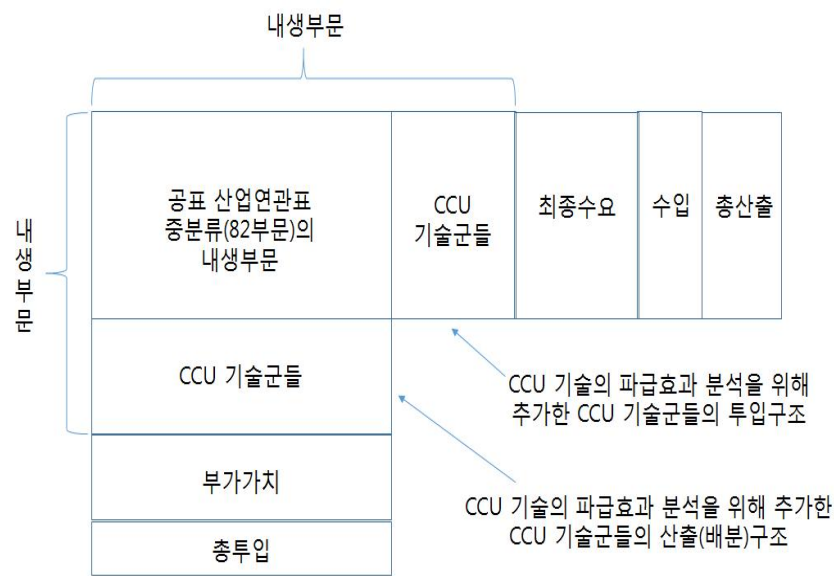
4. 4가지 CCU 기술을 반영한 산업연관표

CCU 기술이 갖는 유발효과분석을 위하여 내생부분에 4가지의 CCU 기술을 독립된 산업부문으로 갖는 산업연관표를 구성한다. 산업부문분류의 수는 분석하려는 대상의 투입구조와 산출구조에 대한 기초자료의 범위에 따라서 달라진다. <표 1>과 <표 2>에 제시되었듯이 CCU 기술별 투입구조로서 파악된 기초자료는 소수의 비용항목들만을 가지므로 기본분류(328부문) 또는 소분류(161부문)를 사용하더라도 많은 항목에서 투입량과 산출량이 0으로 나타나게 된다. 이에 비해서 대분류(30부문)를 사용하면 산업부문간의 통합으로 석유화학산업, 철강산업, 비금속제조업 등의 산업에 대한 파급효과를 파악하기 어렵다. 이에 분석에서는 중분류(82부문)의 산업부문분류를 이용한다. 중분류(82부문)의 산업부문분류에 4가지의 CCU 기술을 포함시키므로 총 86부문의 산업부문분류를 갖는 산업연관표를 구성한다. 산업부문분류는 부록에 제시한다.

분석용 표는 설비건설부문과 운영부문을 분리하여 각각 작성한다. 이는 설비건설과 운영의 성격이 상이하기 때문에 투입구조, 산출구조, 고용이 동일하지 않다는 점을 반영하는 것이다.

공표 산업연관표에 4가지의 CCU 기술들을 신설하였으므로 산업연관표의 행과 열의 균형조정방법을 사용하여 산업연관표의 균형을 확보한다. 행렬의 균형조정(Matrix balancing)법으로는 KEO-RAS¹⁷⁾를 이용한다.

17) 이 방법은 KEO(Keio Economic Observatory)에서 개발하여 사용하는 방법으로 라그랑주승수법을 기초로 한다. 잠정 생산액에 예측시점의 투입계수를 곱했을 때에 그 행 방향의 합계와 열 방향의 합계를 각각 잠정 중간수요액과 잠정 중간투입액과 일치하도록 하는 조건 하에서 기준시점의 투입계수와 예측시점의 투입계수와의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 최소자승법에 의한 방법이다. 이 방법은 발산가능성을 갖지 않는다. 상세한 과정은 김윤경·홍선경(2013)을 참조한다.



〈그림 1〉 CCU 기술 반영 산업연관표

V. 실증분석

1. 가정

분석에서는 다음과 같은 가정을 설정한다. 첫째, 기준년도는 최신 공표 산업연관표를 이용하기 위하여 2014년으로 설정한다. 2016년에 공표된 우리나라의 2014년 산업연관표는 기초가격¹⁸⁾을 기준으로 한다.

18) 일본, 미국은 생산자가격 기준의 표를, 유럽은 기초가격 기준의 표를 공표한다. 기초가격은 생산된 재화 또는 서비스의 한 단위당 생산자가 구매자로부터 수취하는 금액에서 그 생산물 단위의 생산 또는 판매에 따라 발생하는 조세(생산물세)를 차감하고 생산물 보조금을 더한 가격이다. 기초가격 = 생산자가격 - 생산물세 + 보조금

둘째, 4가지의 CCU 기술은 각각 도입되지만, 같은 시점에 도입·설치되고 동시에 운영된다고 가정한다. 설비가 도입·설치되는 과정과 설비가 운영되는 과정은 성격이 상이하므로 CCU 기술별로 이 두 과정을 구분한다.

셋째, 실제로 설비건설은 1년 이상의 기간을 필요로 하지만, 분석에서는 설비건설이 1년에 모두 이루어진다고 가정한다. 본 분석에서 가정한 설비건설액은 전망치이므로 변동될 수 있다. 이에 유발효과분석의 결과를 금액 기준이 아니라 설비건설비 총액 대비 유발효과액의 계수로 도출한다. 이 계수는 설비건설액이 변화하더라도 산업연관분석의 선형성에 따라서 동일하게 유지된다.

넷째, 운영과 관련된 운전유지비, 매출 등은 연간화 비용을 고려한다. 운영은 다년간에 이루어지지만 운전유지비와 운영을 위한 투입구조는 운영기간에 변화하기 어렵다. 이를 고려하면 누적 유발액은 1년간의 운영에 의한 유발액에 운영년수를 곱하여 도출할 수 있다. 유발계수는 1년간의 경우와 다년간의 경우가 동일하다.

〈표 4〉 2017년 기준 4가지 CCU 기술의 설비건설액, 매출액, 운영비

단위: 백만원

기술	기술별 산출품	설비건설액	매출액	운영비
CCU 1	석탄혼소용 바이오매스	1,204,320	153,519	173,298
	에탄올	1,003,474	251,978	
CCU 2	DME	172,438	123,276	115,051
	항공유	113,377	54,979	
CCU 3	H2-lean 합성가스	368,964	37,794	126,924
	에틸렌	185,245	105,006	
	CO	335,890	88,509	
CCU 4	포름알데히드	219,502	116,231	186,470
	폴리카보네이트 (PC)	78,381	452,632	
계		3,681,591	1,433,924	601,743

〈표 4〉는 2017년 기준의 CCU 기술별 설비건설액, 매출액, 운영비이다. 설

비투자액은 LCA를 기반으로 추정된 설비 규모별 단가로부터 도출한다. 매출액은 각 CCU에서 생산된 제품별 생산량과 <표 3>의 제품별 단가를 곱하여 산정한다. 운영비는 <표 1>의 투입물별 수량과 단가에, 법인세, 보험 등의 고정비를 반영한다.

2. 4가지 CCU 기술의 영향력계수 및 감응도계수

생산유발계수표의 각 열의 합은 그 열 부분에 대한 최종수요 1단위에 의해서 초래되는 산업 전체에 대한 생산과급의 크기이다. 한 산업부문의 생산물에 대한 최종수요가 1단위 증가하였을 때에 전산업부문에 대한 영향은 후방연쇄효과라고 한다. 영향력계수는 이 후방연쇄효과 크기를 전산업의 평균에 대한 상대적 크기로 나타낸 계수이다.

생산유발계수표의 각 행의 합은 각 부분에 대한 최종수요 1단위가 있을 때에 그 행부분에서 직간접으로 필요로 하는 공급량을 나타낸다. 모든 산업부문의 생산물에 대한 최종수요가 각각 1단위씩 증가하였을 때에 특정 산업이 받는 영향은 전방연쇄효과라고 한다. 감응도계수는 이 전방연쇄효과 크기를 전산업의 평균에 대한 상대적 크기로 나타낸 계수이다.

CCU 기술 관련 설비건설은 설비의 제조, 설치, 공사 등으로 다른 산업에 대한 수요를 발생시키므로 영향력계수가 크지만, CCU 기술들의 설비건설 자체가 최종재이므로 다른 산업이 CCU 기술들의 설비건설에서의 수요를 발생시키지는 않으므로 감응도계수가 크지 않다(<표 5> 참조). 설비건설에서 4가지 CCU 기술의 영향력계수는 1.267~1.465이며, 이는 023 플라스틱제품, 033 특수목적용 기계, 042 자동차 등과 유사하다. 감응도계수는 0.498 이다. 영향력계수측면에서 4가지의 CCU 기술은 다른 산업부문에 대해서 2차 산업에 해당하는 영향 정도를 갖는다.

4가지 CCU 기술들의 운영도 설비건설의 경우와 유사하다. 각 기술은 운영

하기 위해서 필요한 생산요소들을 구매하므로 다른 산업에 영향을 미친다. 그러나 4가지 CCU 기술에서 생산하는 재화들은 다른 산업부문에서 생산한 재화들과 대체관계를 가지므로 다른 산업의 수요로부터 큰 영향을 받지 않는다. 운영에서 4가지 CCU의 기술의 영향력계수는 0.702~0.959이며, 037 기타전자부품, 046 전력 및 신재생에너지 등과 유사하다. 감응도계수는 0.519~0.533이다. 영향력계수에서 보면 4가지의 CCU 기술은 다른 산업부문에 대해서 전력 산업 정도의 영향을 갖는다.

〈표 5〉 4가지 CCU 기술의 영향력계수 및 감응도계수

	계수	CCU 1	CCU 2	CCU 3	CCU 4
설비 건설	영향력	1.317	1.304	1.298	1.465
	감응도	0.498	0.498	0.498	0.498
운영	영향력	0.702	0.959	0.828	0.713
	감응도	0.553	0.521	0.519	0.533

3. 4가지 CCU 기술의 유발효과

유발효과분석은 직접효과, 1차 파급효과, 2차 파급효과를 고려한다. 직접효과는 설비건설을 위하여 이루어진 투입으로 발생하는 수요에 의한 효과이다. 1차 파급효과는 특정산업이 원재료를 다른 산업으로부터 구입하는 것에 의해서 발생하는 생산유발효과이다. 1차 파급효과에서 생산이 유발되면 부가가치 중에서 고용자소득만이 증가하는 것이 아니라, 영업잉여도 증가한다. 2차 파급효과는 1차 파급효과에 의해서 유발된 생산으로부터 만들어지는 부가가치의 일부가 가계소비지출이 되면서 다시 생산을 유발해서 생기는 효과이다.

투입액과 유발액간의 관계를 이용하여 유발계수들을 도출한 결과는 다음과 같다. 생산유발효과를 보면 총생산유발효과액은 설비건설에서 11,521,971 백만 원

과 운영에서 2,228,220 백만 원이다. 생산유발계수는 수요액(설비건설 3,681,591 백만 원, 운영 1,433,924백만 원) 대비 설비건설에서는 3.13, 운영에서는 1.55이다. 설비건설의 생산유발계수는 1차 유발효과 2.69와 2차 유발효과 0.44의 합인 3.13이다. 생산유발이 발생하는 산업들은 4가지 CCU 기술을 도입할 때에 필요한 설비 생산 및 건설을 담당하는 산업들이다. 운영의 생산유발계수는 1차 유발효과 1.49와 2차 유발효과 0.07의 합인 1.55이다.

〈표 6〉 4가지 CCU 기술의 설비건설 및 운영에 의한 유발효과

	CCU 투자액 (백만 원)	생산유발계수			부가가치유발계수			피용자보수유발계수		
		1차	2차	계	1차	2차	계	1차	2차	계
설비 건설	3,681,591	2.686	0.444	3.130	0.674	0.195	0.869	0.372	0.082	0.454
운영	1,433,924	1.486	0.068	1.554	0.772	0.030	0.802	0.571	0.013	0.584

부가가치유발계수를 보면 다음과 같다. 설비 건설의 부가가치유발계수는 1차 유발효과 0.67과 2차 유발효과 0.19의 합인 0.87이다. 운영의 부가가치유발계수는 1차 유발효과 0.77과 2차 유발효과 0.03의 합인 0.80이다.

피용자보수유발계수는 다음과 같다. 설비 건설의 피용자보수유발계수는 1차 유발효과 0.37과 2차 유발효과 0.08의 합인 0.45이다. 운영의 피용자보수유발계수는 1차 유발효과 0.06과 2차 유발효과 0.01의 합인 0.07이다.

4가지의 CCU 기술의 설비 건설과 운영에 대한 유발효과를 분석한 결과에 따르면 생산유발계수와 부가가치유발계수는 운영에 비해서 설비 건설에서 더 컸다. 이는 운영의 경우는 설비 건설의 경우에 비해서 중간투입재가 다양하지 않아서 다른 산업들과의 연관관계가 많지 않지만, 설비 건설의 경우는 운영의 경우에 비해서 다른 산업들과의 연관관계가 더 깊기 때문이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 대표적 온실가스인 CO₂를 활용하여 에너지 및 원료물질을 생산하는 4가지의 CCU 기술이 국내에 미치는 유발효과를 산업연관분석을 이용하여 추정하였다. 설비건설과 운영은 필요로 하는 중간투입재와 산출물이 상이하므로 분석에서는 2가지를 분리하였다. 그리고 경제에 미치는 유발효과는 생산유발효과, 부가가치유발효과, 피용자보수유발효과로 구분하였다. 분석에 사용한 산업연관표는 4가지의 CCU 기술을 독립된 산업부문분류로 가지며, 이를 통해서 기술별로 경제에 미치는 이질적 영향을 반영하도록 하였다.

설비건설의 경우를 보면, CCU 기술에 의한 설비를 건설할 때에 생산유발계수는 3.12, 부가가치유발계수는 0.87, 피용자보수유발계수는 0.45였다. 운영의 경우를 보면 CCU 기술을 도입한 설비들을 운영할 때에 생산유발계수는 1.55, 부가가치유발계수는 0.80, 피용자보수유발계수는 0.58였다.

CCU 기술의 설비를 도입·건설할 때의 효과와 운영할 때의 효과는 다른 효과를 갖는다. 운영에 비해서 설비건설의 경우에 생산유발효과와 부가가치유발효과는 컸지만, 피용자보수유발계수효과는 작다. 이에 비해서 운영은 피용자보수유발계수효과는 컸지만, 생산유발효과와 부가가치유발효과는 작았다. 이는 건설과 운영의 성격 및 각 과정에서 투입해야 하는 중간투입재들이 상이하고, 설비건설의 경우가 운영에 비해서 다른 산업과의 연관관계가 더 복잡하고, 운영의 경우에 중간투입재가 다양하지 않기 때문이다. 이와 같은 분석결과를 고려할 때에 우리나라에서 CCU 기술이 상용화된다면 설비 및 부품 제조부문과 건설부문에서의 생산이 커질 것이고, 이에 따라서 추가적으로 다른 산업의 생산도 유발될 것이다.

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 김윤경 · 홍선경, 2013, 해외석유·가스개발사업 반영의 산업연관표 작성 및 유발효과 분석방법 연구, 자원경제학회
- 김지환 · 최정현, 2017, 유가스전 생산설비를 활용한 한국의 CCS 저장비용 예비추정 연구, 한국자원공학회 Vol.54, No.5 (2017) pp.533-540
- 이지현, 광노상, 이동욱, 심재구, 이정현, 2016, CCS(Carbon Capture & Sequestration) 기술 · 경제성 평가 분석, Journal of Climate Change Research 2016, Vol. 7, No. 2, pp. 111~120
- 한국은행, 2000, 「산업연관분석해설」, 한국은행
- 한국은행, 2016, 「2014년 산업연관표」, 한국은행
- 한국이산화탄소포집및처리연구개발센터, 2018, ECC 2030 기술개발 계획, 과학기술정보통신부 예비타당성조사 대응 기획보고서
- Bolland, O. and H. Undrum, 2003, A novel methodology for comparing CO2 capture options for natural gas-fired combined cycle plants. Advanced Environmental Research 7:901-911.
- Elder, E. E. and W. R. Butcher, 1989, Including the Economic Impact of Cost Paying in Regional Input-Output Analysis, Western Journal of Agricultural Economics, 14(1), 78-84
- Koelbl B.S., M. A. van den Broek, H. C. Wilting, M. W. J. L. Sanders, T. Bulavskaya, R. Wood, A. P. C. Faaji, and D. P. van Vurren, 2016, Socio-economic impacts of low-carbon power generation portfolios: Strategies with and without CCS for the Netherlands, Applied energy 183, 257-277
- IEA, 2010, Projected costs of generating electricity, OECD Publishing, Paris
- IEA, 2015, World energy Outlook, OECD Publishing, Paris
- Miller, R. E. and P. D. Blaire. P. D., 1985, Input-Output Analysis, Prentice-Hall, US
- Turton, R., R. C. Bailie, W. B. Whiting, J. A. Shaeiwitz, and D. Bhattacharyya, 2013, Analysis, synthesis, and design of chemical processes, Pearson, USA.

부 록

〈CCU 기술 4가지를 반영한 산업부문분류표〉

코드	상품명	코드	상품명
001	작물	044	기타 운송장비
002	축산물	045	기타 제조업 제품 및 임가공
003	임산물	046	전력 및 신재생에너지
004	수산물	047	가스, 증기 및 온수
005	농림어업 서비스	048	수도
006	석탄, 원유 및 천연가스	049	폐수처리
007	금속 및 비금속광물	050	폐기물 및 자원재활용서비스
008	식료품	051	건물건설 및 건축보수
009	음료품	052	토목건설
010	담배	053	도소매서비스
011	섬유 및 의복	054	육상운송서비스
012	가죽제품	055	수상운송서비스
013	목재및목제품	056	항공운송서비스
014	펄프 및 종이제품	057	창고 및 운송보조서비스
015	인쇄 및 복제	058	음식점 및 숙박서비스
016	석탄 및 석유제품	059	통신서비스
017	기초화학물질	060	방송서비스
018	합성수지 및 합성고무	061	정보서비스
019	화학섬유	062	소프트웨어 개발 및 컴퓨터관리서비스
020	의약품	063	출판서비스
021	비료 및 농약	064	영상, 오디오물 제작 및 배급
022	기타 화학제품	065	금융서비스
023	플라스틱제품	066	보험서비스
024	고무제품	067	금융 및 보험 보조서비스
025	유리 및 유리제품	068	주거서비스
026	기타 비금속광물제품	069	부동산서비스

CCU 기술 도입의 경제적 파급효과 분석

코드	상품명	코드	상품명
027	철강1차제품	070	기계장비 및 용품 임대
028	철강가공제품	071	연구개발
029	비철금속괴 및 1차제품	072	사업관련 전문서비스
030	금속 주물	073	과학기술관련 전문서비스
031	금속제품	074	사업지원서비스
032	일반목적용기계	075	공공행정 및 국방
033	특수목적용기계	076	교육서비스
034	전기장비	077	의료 및 보건
035	반도체	078	사회복지서비스
036	전자표시장치	079	문화서비스
037	기타 전자부품	080	스포츠 및 오락 서비스
038	컴퓨터 및 주변기기	081	사회단체
039	통신, 방송 및 영상, 음향기기	082	수리 및 개인 서비스
040	가정용 전기기기	083	CCU 기술 1
041	정밀기기	084	CCU 기술 2
042	자동차	085	CCU 기술 3
043	선박	086	CCU 기술 4

ABSTRACT

Economic Induced Effect Analysis of Carbon Capture Utilization Technology in Korea

Hyejin Lee*, Yoonyoung Kang**, Yoon Kyung Kim***

This study analyzed induced effect of four kind of Carbon Capture Utilization(CCU) technology, which produce energy and raw material with greenhouse gas of CO₂, water and energy. These products substitute conventional fossil fuel based products. For Manufacture, Construction and Installation of 4 kinds of CCU technologies, induced production multiplier is 3.12, induced value-added multiplier is 0.87 and induced employee compensation multiplier is 0.45. And for Operation of 4 kind of CCU technologies, induced production multiplier is 1.55, induced value-added multiplier is 0.80 and induced employee compensation multiplier is 0.58. Induced effects of Manufacture, Construction and Installation, and Operation of 4 kind of CCU technologies were different because the process and intermediate goods are different. Commercialization of CCU technology in Korea brings bigger production in both manufacturing sector and construction sector directly, and also induce additional product in other sectors.

Key Words : Carbon Capture Utilization, Input-Output analysis, energy new industry, induced effects

* Ph. D. candidate, Department of Agricultural & Resource Economics, Seoul National University(first author). lhyejin3@snu.ac.kr

** Visiting Professor, Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University(second author). yykang@snu.ac.kr

*** Professor, Department of Economics, Ewha Womans University(corresponding author). yoonkim@ewha.ac.kr