

NCCU(Non-Capture CO₂ Utilization) 기술의 CO₂ 감축 잠재량 산정

이지현 · 이동욱 · 장세규 · 박노상 · 이인영 · 장경룡 · 최종신* · 심재구†

한전 전력연구원 미래기술연구소

34056 대전시 유성구 문지로 65

*한국동서발전

44468 울산광역시 중구 중가로 395

(2014년 11월 16일 접수, 2015년 1월 2일 수정본 접수, 2015년 1월 6일 채택)

Estimating CO₂ Emission Reduction of Non-capture CO₂ Utilization (NCCU) Technology

Ji Hyun Lee, Dong Woog Lee, Jang Se Gyu, No-Sang Kwak, In Young Lee, Kyung Ryoung Jang,
Jong-shin Choi* and Jae-Goo Shim†

Future Technology Research Center, KEPCO Research Institute, 65 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

*Korea East-West Power Co., LTD(ETP), 395, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44468, Korea

(Received 16 November 2014; Received in revised form 2 January 2015; accepted 6 January 2015)

요 약

본 연구에서는 다양한 CO₂ 재활용 기술 중 경제성 및 CO₂ 감축량 효과가 큰 것으로 평가되는 CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술 대상으로 상용 플랜트 운영시 전체 CO₂ 감축량을 산정하고자 하였다. 상기 CO₂ 재활용 기술은 발전소 배가스 중에 포함된 CO₂의 탄산화 반응을 통해 상업적으로 유용한 중탄산나트륨을 제조하는 기술로서 현재 한국동서발전의 지원을 받아 한전 전력연구원에서 연구개발 진행 중이다(기술개발 사업명: NCCU, Non-Capture CO₂ Utilization). 본 기술의 CO₂ 감축량 산정을 위해 하루 100톤 CO₂ 처리 규모(연간 36,500톤 CO₂ 처리 가능, 발전 용량 기준 5 MW 급)의 상용급 플랜트를 대상으로 공정모사 프로그램(PRO/II 9.1)을 활용한 열 및 물질 수지 분석을 수행하였으며 특히 종래 유사기술과의 비교를 통한 간접 CO₂ 감축량 산정을 위해 탄산나트륨 및 중탄산나트륨 등의 제조를 위한 대표적 기술인 Solvay 공정과의 에너지 사용량을 비교 분석하였다. 분석 결과 종래 Solvay 공정은 단위 중탄산나트륨 생산을 위한 에너지 사용량이 약 7.4 GJ/tNaHCO₃으로 이를 해당 에너지를 얻기 위해 필요한 석탄 사용량 및 CO₂ 발생량으로 환산시 연간 약 48,862 톤 CO₂에 해당 된다. 반면 발전소 배가스 중에 포함된 CO₂를 활용한 중탄산나트륨 제조공정의 경우 탄산화 반응에 의한 CO₂ 직접 포집분(연간 약 36,500 톤)과 동일 화합물 생산을 위한 종래 공정(Solvay) 대비 낮은 에너지 사용량에 따른 간접적인 CO₂ 저감량(연간 약 46,885 톤) 효과로 전체 CO₂ 감축량은 약 83,385톤으로 산정되었다. 상기 분석을 통해 본 논문의 CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술은 제품 판매에 따른 경제적 효과뿐만 아니라 종래 공정에 비해 낮은 에너지 사용으로 CO₂ 저감효과가 매우 높아 대규모 CO₂ 저장 공간이 필요한 CCS(Carbon Capture & Sequestration) 기술의 대안기술로서 유망한 것으로 분석되었다.

Abstract – Estimating potential of CO₂ emission reduction of non-capture CO₂ utilization (NCCU) technology was evaluated. NCCU is sodium bicarbonate production technology through the carbonation reaction of CO₂ contained in the flue gas. For the estimating the CO₂ emission reduction, process simulation using process simulator (PRO/II) based on a chemical plant which could handle CO₂ of 100 tons per day was performed. Also for the estimation of the indirect CO₂ reduction, the solvay process which is a conventional technology for the production of sodium carbonate/sodium bicarbonate, was studied. The results of the analysis showed that in case of the solvay process, overall CO₂ emission was estimated as 48,862 ton per year based on the energy consumption for the production of NaHCO₃ (7.4 GJ/tNaHCO₃). While for the NCCU technology, the direct CO₂ reduction through the CO₂ carbonation was estimated as 36,500 ton per year and the indirect CO₂ reduction through the lower energy consumption was 46,885 ton per year which lead to 83,385 ton per year in total. From these results, it could be concluded that sodium bicarbonate production technology through the carbonation reaction of CO₂ contained in the flue was energy efficient and could be one of the promising technology for the low CO₂ emission technology.

Key words: Non-capture CO₂ utilization(NCCU), Carbonation, CO₂ Emission, Solvay process

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jgshim@kepri.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 국제적인 이슈가 되고 있는 온실가스 저감과 관련, 정부에서는 2020년까지 BAU(Business As Usual) 대비 30% 이상 온실가스 배출량을 감축하겠다는 목표를 설정하고 감축목표를 달성하기 위하여 다양한 정책을 추진 중인데 세부 추진계획으로 에너지 효율 제고와 함께 온실가스 저감을 위한 다양한 기술 수단을 다루고 있다. 그 중 주요 감축수단으로 CO₂ 포집·저장 기술(CCS, Carbon Capture & Sequestration)의 확대 및 보급을 들 수 있다. CCS 기술은 화석연료의 사용으로 발생하는 다량의 CO₂를 포집 및 저장하는 기술로써 화력발전소와 같은 대규모 배출원으로부터 CO₂를 포집한 후 지중이나 해저에 주입함으로써 CO₂를 오랫동안 대기로부터 격리시키는 방법이다[1]. 이 기술은 국제에너지기구(IEA) 등에서 기후변화 대응을 위한 가장 비용 효율적인 방법으로 평가되고 있다.

2010년 7월 정부에서 제시한 『국가 CCC 종합 추진계획』에 따르면 2020년까지 상용화 및 국제 기술경쟁력 확보를 목표로 하는 CCS 기술개발을 계획 중인데 여기에는 CCS 기술뿐만 아니라 CO₂ 포집 및 재활용 기술(CCU, Carbon Capture & Utilization) 개발 관련 로드맵도 반영되어 있다. CCU 기술은 CCS 기술과는 달리 포집된 CO₂를 저장하지 않고 부가가치가 높은 물질로 전환하여 활용하는 기술이다.

CCS 및 CCU 기술의 공정 개략도는 다음과 같다(Fig. 1). 이중 CCU 기술은 포집된 CO₂를 따로 저장하지 않고 이를 직접 활용하거나 부가가치가 높은 물질로 전환하는 것을 특징으로 하는데, 우리나라와 같이 포집된 CO₂의 저장을 위한 대규모 저장소 확보에 어려움이 있는 상황에서 CO₂의 재활용을 통한 저장소 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 종래 CCS 기술에서 발생하는 CO₂ 저장비용을 크게 상쇄시키는 장점이 있어서 현재 진행 중인 CCS 기술개발의 새로운 대안이 될 전망이다.

CCU 기술개발 관련 미국 및 유럽 등에서는 대부분의 기술 분야에서 다양한 규모(Lab-Industry)로 진행 중에 있는데 이중 실증 규모의 기술개발 프로젝트를 수행하고 있는 기업으로는 대표적으로 미국의 Skyonic 社, Calera 社 및 네덜란드의 Twence 社 등을 들 수 있다. Skyonic 社は 2010년부터 미국 에너지부의 지원을 받아

SkyMine 프로젝트를 수행중인데 2014년 10월, 美 텍사스 주 샌안토니오의 시멘트 공장에서 배출되는 CO₂를 활용하여 중탄산나트륨, 염산, 표백제 및 염소 등을 생산할 수 있는 CO₂ 고부가화 플랜트의 운전을 시작하였다[2]. 본 플랜트에서 처리되는 CO₂ 규모는 연간 약 83,000톤이며 플랜트의 운영으로 CO₂ 저감뿐만 아니라 제조된 생산물의 판매를 통해 3년 이내 수익을 낼 수 있을 것으로 기대하고 있다. 네덜란드의 Twence 社は 2011년 7월부터 EU의 지원을 받아 총 2백만 유로 규모의 CO₂ 전환기술 프로젝트를 진행 중이다. Twence 社에서 개발 중인 기술은 자사의 폐기물 소각 발전 시에 발생하는 배가스를 가성소다와 반응시켜 중탄산나트륨(NaHCO₃)을 생산하고 이를 배가스 정제 장치에 재사용하는 것을 특징으로 한다. 해당 상용 플랜트(Waste to Energy, WTE)의 건설을 통해 연간 약 6,000톤 규모의 CO₂ 저감과 8,000톤 규모의 중탄산소다 생산이 가능할 것으로 보고하고 있다[3].

CCS 기술을 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM)로 수용하는 문제는 2005년부터 논의가 진행되어 지난 2011년 12월 남아공 더반회의에서 열린 제17차 기후변화 협약 당사국 총회에서 최종 CDM으로 수용하기로 합의되었다[4]. CCU 기술의 경우, 기술의 적용으로 탄소전환 제품이 CCU 기술을 적용하지 않은 제품에 비해 전 과정 측면에서 CO₂ 배출량이 낮다면 그 차이 만큼에 대한 온실가스 감축량 인정이 가능하다. 관련하여 최근 CDM 사업에서는 전 과정을 고려하여 사업전후의 온실가스 배출량 비교를 통해 온실가스 감축량을 산정하는 CDM 방법론이 등록된 사례가 있다 [5]. 또한 이와 관련하여 최근 환경부고시 2014-152호, “외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침”에 따라 “CO₂ 포집 및 저장 또는 재이용” 시 CO₂ 저감실적으로 인정받을 수 있게 됨으로써 향후 관련 CO₂ 활용기술개발의 활성화가 기대 된다[6].

관련하여 본 논문에서는 다양한 CCU 기술 중 사업 경제성 및 CO₂ 감축량 효과가 큰 것으로 평가되는 CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술을 대상으로 플랜트 운영에 따른 CO₂ 감축량을 산정하고자 하였다. 구체적으로는 하루 100톤의 CO₂ 처리가 가능한 상용 플랜트(연간 36,500톤 CO₂ 처리 가능, 발전용량 기준 5 MW급)를 대상으로 공정모사 패키지를 활용한 시스템 분석을 통해 열 및 물질수지를 산출하였고, 종래 유사기술과의 비교를 통한 간접 CO₂ 감축량

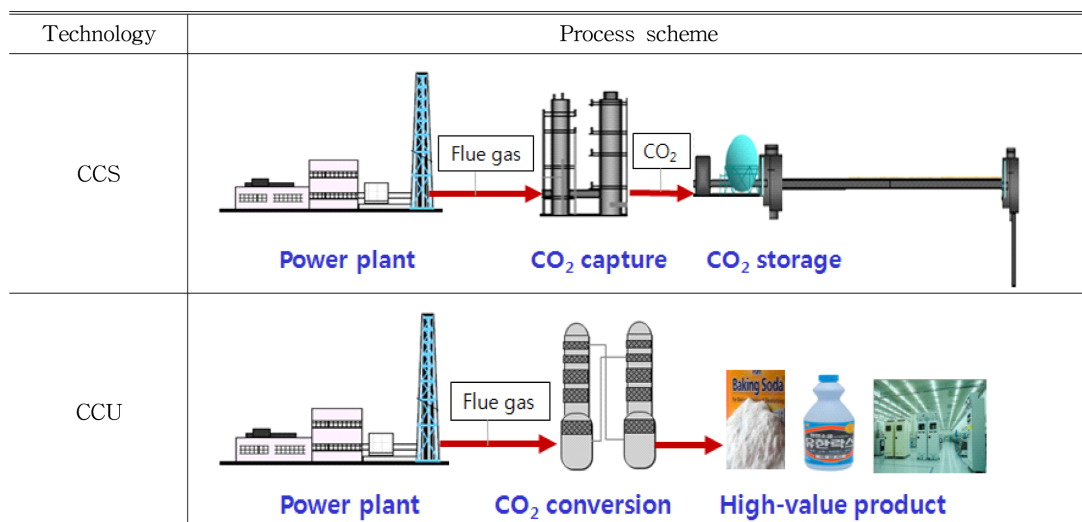


Fig. 1. General process scheme of CCS & CCU.

산정을 위해 Solvay 공정(암모니아 소다공정)과 비교한 공정 에너지 사용량 및 CO₂ 배출량 저감효과 등을 고려하여 최종 CO₂ 감축량을 산정하고자 하였다.

2. 공정 개요

2-1. 대상기술 개요: NCCU(Non-Capture CO₂ Utilization)

본 논문의 분석대상인 CO₂ 재활용 기술은 한국동서발전의 지원을 받아 한전 전력연구원에서 진행 중인 기술개발 과제(연구과제명: CO₂ 포집 및 가성소다 생산 연계를 통한 고부가 화합물 제조기술개발(I))로서, 상기 연구과제는 2013년 6월, 총 19억원의 예산으로 착수되어 2015년 현재 진행 중이며 2016년 까지 CO₂ 고부가화 플랜트 요소기술 개발 및 일일 100톤의 CO₂ 처리가 가능한 5 MW급 CO₂ 고부가화 플랜트의 개념설계 완료를 목표로 하고 있다. 기술의 개요로서, 저가의 염수를 전기분해하여 얻어진 가성소다(NaOH)와 화력 발전소에서 발생하는 다량의 CO₂를 반응시켜 산업적 활용도가 높은 중탄산나트륨(NaHCO₃, 중탄산소다 혹은 중조), 고순도 염산(HCl) 및 차아염소산나트륨(NaOCl) 등을 생산하며 특히 중탄산나트륨 생산을 위해 CO₂ 포집공정 없이 발전소에서 배출되는 배가스를 그대로 CO₂ 반응공정에 활용하는 것(NCCU; Non-Capture CO₂ Utilization)을 특징으로 한다(Fig. 2).

본 기술을 통해 만들어진 중탄산나트륨은 세제, 피혁, 배가스 처리 및 식품첨가제 등의 다양한 산업분야에서 활용이 가능하고 가성소다와 염소와의 반응에 의해 얻어지는 차아염소산나트륨은 일반 가정용 세제뿐만 아니라 화력발전소 취수부 소독용으로 활용이 가능하다. 또한 전기분해를 통해 생성되는 수소와 염소가스의 반응으로 제조되는 염산은 일반 화학 산업에 많이 활용이 되는 물질인데 특히 고순도 염화수소(순도: 99.999%)는 반도체 업계는 물론 의약, 농약, 폴리실리콘 제조공정 연관 산업에 활용이 가능한 물질로 부가가치가 매우 높다. 각각의 주요 요소 공정별 개요는 다음과 같다.

2-1-1. 탄산화 공정

본 기술에 있어 CO₂ 탄산화 공정은 다음의 그림과 같이 내부에 충전물이 포함된 충전탑 형태의 반응기로 구성이 된다(Fig. 3). 화력 발전소등에서 화석연료의 연소에 의해 발생하는 연소 배가스가 가스 블로어를 통해 충전탑 하단으로 투입이 되고 상부에서 투입되는 가성소다 수용액과의 화학반응(반응식 1 & 2)을 통해 탄산화 반응이 일어난다.

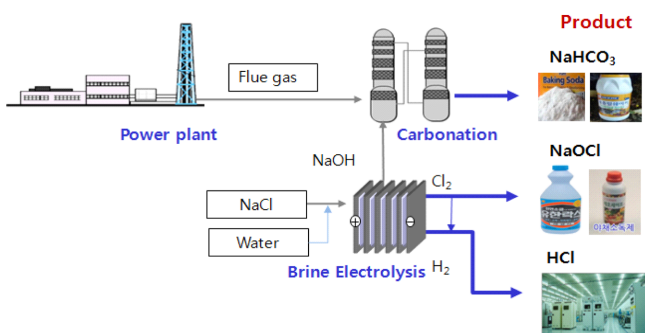
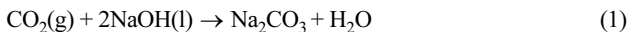


Fig. 2. Overall scheme of NCCU process.

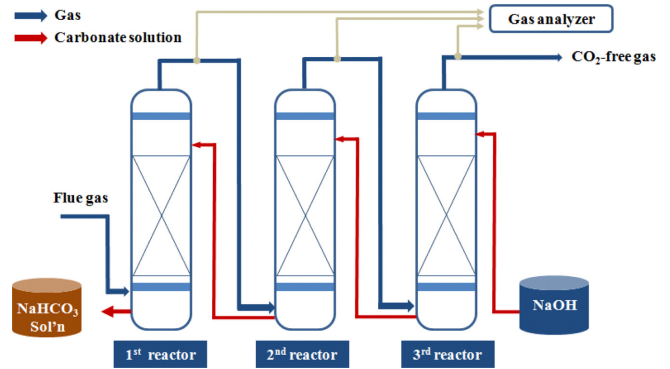


Fig. 3. CO₂ carbonation process scheme.



1차 충전탑에서 생성된 탄산나트륨(Na₂CO₃) 슬러리는 이후 슬러리 펌프를 통해 다음의 충전탑으로 이송되고 계속되는 CO₂와의 반응으로 최종적으로 중탄산나트륨(NaHCO₃)이 생성된다. 제조된 중탄산나트륨 슬러리는 이후 탈수 및 건조 공정을 거쳐 최종 분체 형태로 활용하게 된다.

2-1-2. 염수 전기분해 공정

전기분해 공정에서는 해수 등 저가의 염수를 전기 분해시켜 수산화물, 수소 및 염소를 생산한다. 상용 전기분해공정으로는 수은법(Mercury), 격막법(Diaphragm), 막분리법(Membrane) 등이 제시되고 있는데 이 중 막분리법이 설비 가동을 위한 전력비가 가장 낮으므로 본 논문의 분석을 위해서는 막 분리법이 고려되었다. 막 분리 공정의 양극(anode)에서는 CO₂와의 탄산화 반응용 가성소다(NaOH) 생산을 위한 염화나트륨이 투입되고 염소이온(Cl⁻)은 염소가스(Cl₂)로 산화된 후 염소가스 배출라인을 통해 외부로 배출된다. 상기 반응으로 통해 생성된 염소 가스는 염소 가스 단독 혹은 수소와의 반응을 통해 고순도 염화수소를 생산하는데 활용된다. 음극(cathode)에서는 물 공급라인을 통해 전기분해를 위한 물이 공급이 되는데 투입되는 물 분자는 환원되어서 수산화이온(OH⁻)이 되며 수산화이온은 다시 나트륨이온(Na⁺)과 만나 가성소다가 생산된다[7].

상기 반응에 의해 발생된 가성소다는 가성소다 배출라인을 통해 외부로 배출된 후 중탄산나트륨 제조를 위한 탄산화 반응공정의 가성소다 투입라인으로 이송된다.

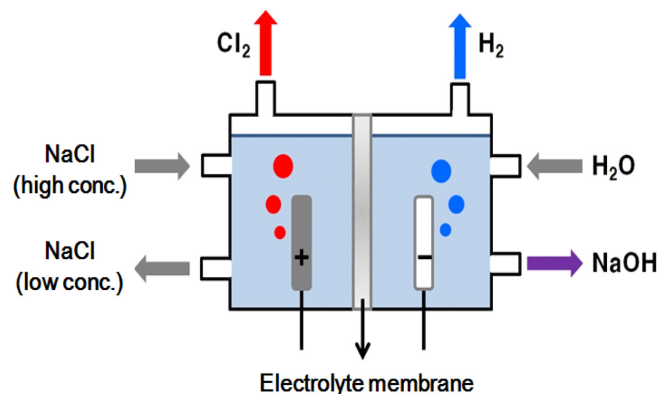


Fig. 4. Brine electrolysis process scheme.

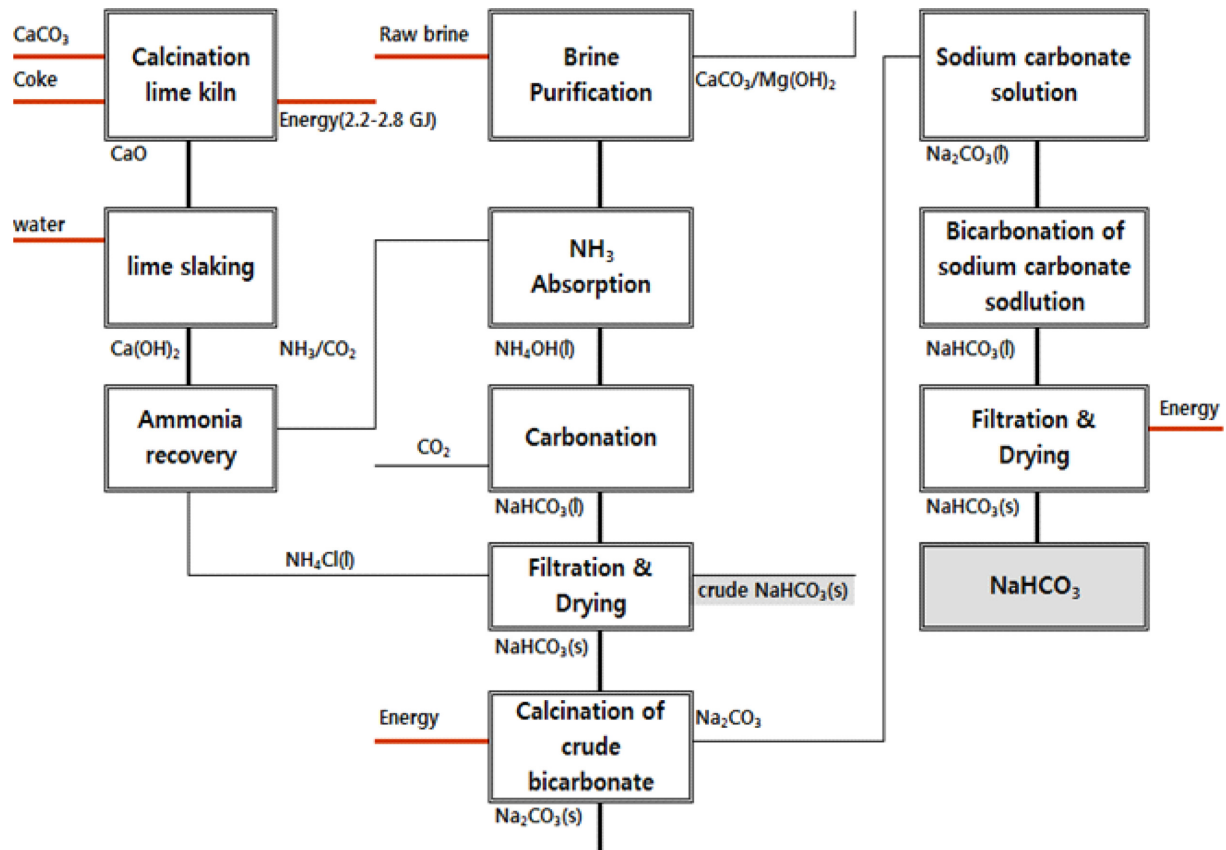
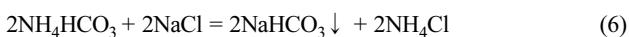
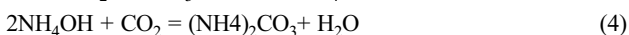


Fig. 5. Process block diagram for the manufacture of soda ash by the solvay process.

2-2. 종래기술: Solvay 공정 개요

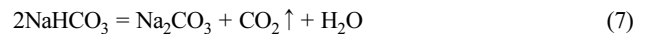
종래 탄산나트륨 및 중탄산나트륨 제조를 위한 기술은 크게 Solvay 공정, Trona 및 Nahcolite 기반 공정, Nepheline 합성 공정, 가성소다의 탄산화반응 공정 등으로 분류가 될 수 있으나 이 중 가장 대표적인 기술은 암모니아 소다 공정으로도 일컬어지는 Solvay 공정을 들 수 있다. 2004년 유럽소다산업협회(ESAPA, European Soda Ash Producers Association) 보고서에 따르면 2000년 기준으로 Solvay 공정에 의한 탄산나트륨 제조법이 전체 공정의 약 50% 이상을 차지하는 것으로 제시되고 있다[8]. 상기 공정은 염화나트륨(NaCl)과 석회석(CaCO₃)을 주원료로 사용하고 암모니아를 부원료로 만드는 것을 특징으로 하는데 본 기술의 가장 큰 장점은 지구상에 많이 분포된 원료(염화나트륨 및 석회석)를 활용하여 산업적으로 이용이 많은 탄산나트륨 혹은 중탄산나트륨을 생산할 수 있다는 것이다. Solvay 공정 개요는 Fig. 5와 같다.

공정에서의 반응은 다음과 같다. 일차로 염화나트륨(NaCl) 수용액과 암모니아를 반응시켜서 ammoniated brine을 생성한다. 이어서 ammonium brine과 CO₂와의 반응을 통해 암모늄 바이카보네이트((NH₄)₂CO₃)가 생성된다. 생성된 암모늄 바이카보네이트((NH₄)₂CO₃)와 CO₂와의 반응으로 암모늄 클로라이드(NH₄Cl)가 생성된다[8].

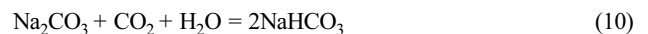


이어서 상기 반응식 6에 의해 침전된 중탄산나트륨은 필터를 거

쳐서 모은 후 다음의 반응식 7에 의해 탄산나트륨(Na₂CO₃)으로 전환된다.



Solvay 공정에서 반응을 위한 CO₂는 석회석(CaCO₃)의 열분해를 통해서 얻어지고, Ca(OH)₂와의 반응으로 NH₃가 회수된다. 상기 석회석의 열분해는 950~1,100 °C에서 진행이 되어 대단히 많은 에너지가 투입이 된다.



제시된 바와 같이 종래 탄산나트륨 및 중탄산나트륨 제조를 위한 Solvay 공정은 CO₂ 발생을 위한 석회석의 열분해(Lime kiln) 및 기타 공정에서 상당히 많은 에너지가 소비되는데 유럽소다산업협회 보고서에 따르면 탄산나트륨 제조공정에 있어서 에너지 사용량이 전체 비용의 약 30%를 차지하는 것으로 보고되고 있다[8].

3. 공정 분석

3-1. 대상 공정

CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술을 대상으로 한 전체 CO₂ 감축량 산정에 앞서서 대상공정의 처리 용량 및 기타 주요 조건은 다음과 같다. 플랜트 규모는 앞서 제시된 바와 같이 하루에 100톤의 CO₂를 처리할 수 있는 플랜트(연간 36,500톤 CO₂ 처리 가능)로 하였으며

Table 1. Baseline condition

Part	Unit	Figure
Feed flue gas	CO ₂ flow rate	m ³ /hr 2,700
	ton/d	100
	N ₂ flow rate	m ³ /hr 15,300
	CO ₂ concentration	vol% 15
	Gas temperature	°C 40
	Gas pressure	bar 1.0
Carbonation	Carbonator stage	- 7
	Carbonator temperature	°C 40
	Carbonator pressure	bar 1.0
	Compressor pressure	bar 1.5
Electrolysis	Electrolysis temperature	°C 40
	Energy consumption	kWh/tCl ₂ 2,500
	Heat duty	MW 8.3
Drying	Dryer temperature	°C 70

이는 유연탄을 연료로 사용하는 석탄화력발전소의 발전용량 기준으로 환산 시 약 5 MW급에 해당한다(500 MW급 초임계 석탄화력발전소 기준 일일 약 1만톤의 CO₂가 배출됨[9]). 대상공정의 기준조건은 Table 1과 같다. 배가스의 조건은 석탄화력발전소에서 발생되는 배가스와 동일한 CO₂ 농도(통상 14~15%)를 갖도록 하였으며, 배가스 압력 및 온도는 일반적인 석탄화력 발전소 탈황탑 후단의 조건을 참고하였고 기타 전기분해공정에서 소비되는 에너지 사용량은 클로르 알칼리(Chlor-Alkali) 전기 분해 공정관련 문헌 데이터등을 활용하였다[10].

3-2. 분석방법

배가스 중의 CO₂를 활용한 중탄산나트륨 제조공정의 에너지 사용량 예측 및 이를 통한 CO₂ 저감량 산정을 위해 상기 제시된 조건 하에서 공정모사 패키지(PRO/II 9.1)의 분석결과를 활용하였다[11]. 그리고 종래기술인 Solvay 공정의 경우 자세한 운전 조건 등의 데이터를 확보가 어려우므로 2004년 유럽소다산업협회(ESAPA, European Soda Ash Producers Association)에서 제시된 주요 에너지 성능자료를 참조하였다[8]. 특히 분석에 있어서 Solvay 공정의 운영을 위한 에너지 사용량은 단위 중탄산나트륨 생산을 위한 에너지 값으로 제시되어 있어 이를 탄산나트륨 사용을 위한 에너지로의 전환이 필요하다. 이의 계산을 위해 상기 2-2절의 반응식 (10)에 따라 탄산나트륨과 중탄산나트륨의 생성 몰비를 바탕으로 중탄산나트륨 제조를 위한 에너지를 산출한 후 상기 데이터를 활용한 예상 에너지사용량을 분석하였다. 이러한 방법에 따라 계산된 Solvay 공정 하에서 단위 중탄산나트륨 제조를 위한 에너지(혹은 전력) 사용량은 Table 2와 같다.

Table 2. Energy consumption of the Solvay Process

Parts	Process energy consumption	
	GJ/t Na ₂ CO ₃	GJ/t NaHCO ₃
Fuels (lime kiln)	2.50	1.577
Fuels (soda ash), including electricity	9.25	5.835
Sum	11.75	7.412
Comment	Conversion from GJ/t Na ₂ CO ₃ to GJ/t NaHCO ₃ using reaction 10	

Table 3. Key assumptions for the estimation of CO₂ emission

Parts	Unit	Figure
Power plant	Combustion	- PC (Pulverized Combustion)
	Boiler Energy efficiency	% 41
	Load factor	% 95
	Type	- Brown coal (Lignite)
	Coal Heat rate	GJ/ton 25
	Carbon %	wt% 64.50

다음으로 공정 운영을 위한 에너지 사용에 따른 CO₂ 발생량의 예측은 상기 발전 용량의 확보를 위해 필요한 원료(석탄) 투입량 및 원료의 탄소함량 자료를 기준으로 산출하였으며 자세한 내용은 식 (12)-(14)와 같다.

$$\text{에너지 투입량(MW)} = \text{순 발전량(MW)} / \text{발전효율(\%)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{연간 에너지 투입량(GJ/y)} &= \text{에너지 투입량(MW)} \\ &\times \text{Load factor} \times 24 \times 365 \times 3600/1,000 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{연간 원료(석탄) 투입량(Ton/y)} &= \text{연간 에너지 투입량(GJ/y)} \\ &/ \text{연료 발열량(GJ/ton)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{연간 CO}_2 \text{ 발생량(Ton/y)} &= \text{연간 연료(석탄) 투입량} \\ &\times \text{연료내 탄소함량(wt\%)} / 100 \times 44/12 \end{aligned} \quad (14)$$

상기 계산에 있어서 대상 석탄화력발전소 및 연료의 일반 조건은 Table 3과 같다.

3-3. 분석 결과

3-3-1. CO₂ 고부가화 공정 모사 결과

앞서 제시된 바와 같이, 상기 제시된 조건 및 규모 하에서 플랜트 공정모사 분석을 수행하였다. 공정 모사 분석에는 가스처리 공정 모사에 많이 활용되는 Invensys사의 공정모사 패키지(PRO/II 9.1)를 활용하였다. 분석에 적용된 열역학 모델은 산성가스 처리 공정 등에 범용으로 많이 사용되는 Soave-Redlich-Kwong method를 적용하였고 탄산화공정의 경우 각각 일반적인 가스분리 충전탑(이론 단수 7단)으로 가정한 RadFrac model을 적용하여 계산하였다. 염수 전기분해 공정의 경우 conversion reactor model을 구성하여 분석하였는데 전기분해를 위해 투입되는 열용량(heat duty)은 상업용 염수 전기분해 셀의 일반적인 성능치(단위 염소 생산을 위한 에너지 투입량: 2,500 kWh/tCl₂)를 활용하였다(Fig. 6).

상기 제시된 분석결과를 바탕으로 공정 내 각 파트에서 소비되는 에너지 사용량을 산출하였다. 분석결과 전체 공정 중 가장 에너지 사용량이 많은 공정은 가성소다, 수소 및 염소가스 생산을 위한 염수 전기분해공정(에너지 소비량: 2,500 kWh/tCl₂ 혹은 8.3 MW)으로 분석되었으며 다음으로 탄산화 반응공정 이후 탈수기를 거친 중탄산나트륨(wet power 형태)의 건조를 위한 건조공정(0.45 MW) 및 배가스를 충전탑으로 투입하기 위한 송풍기 구동 전력비(0.16 MW) 순이었다. 전체적으로 5 MW급 플랜트 운영을 위해 약 8.9 MW급의 전력소비가 예상되었다.

상기 분석자료를 바탕으로 본 논문의 분석대상인 CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술의 잠재 CO₂ 저감량은 다음과 같이 산출되었다. 본 기술의 CO₂ 저감량은 탄산화 반응에 의한 직접 CO₂ 저감량과 종래 기술 대비 에너지 사용량 저감에 따른 간접 CO₂ 저감량으로 구분하여

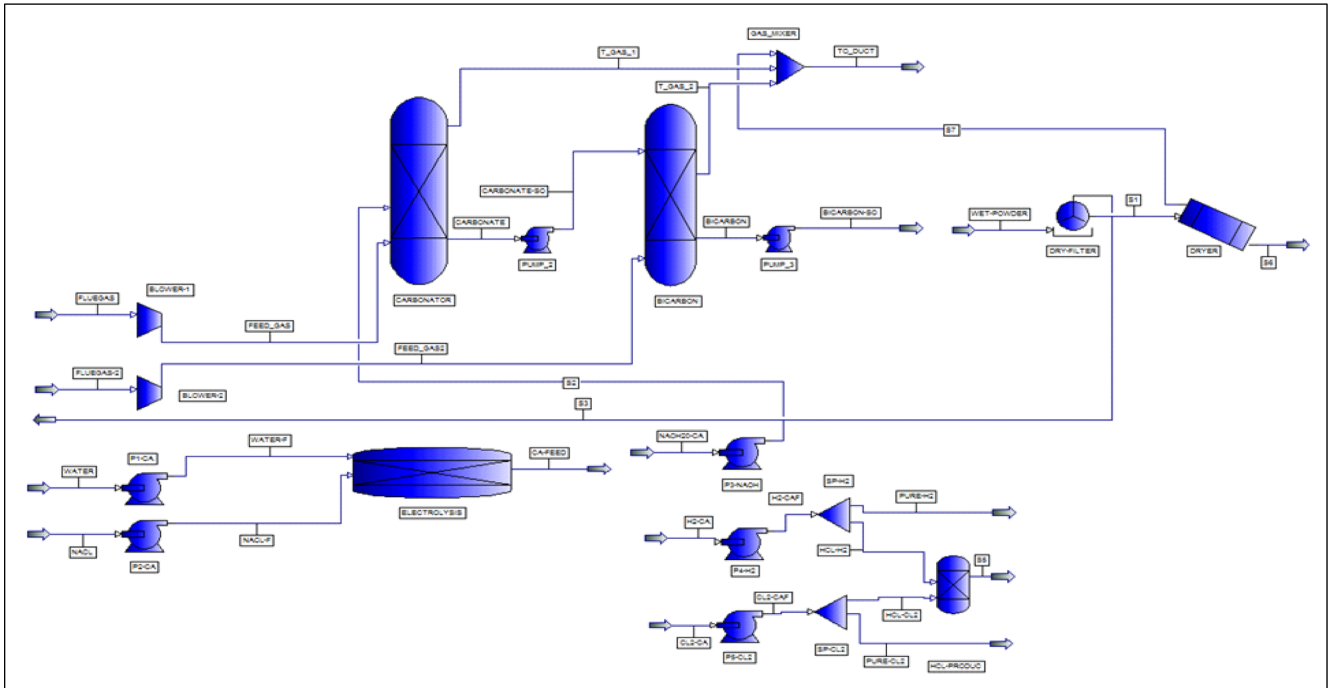


Fig. 6. Process model by PRO/II 9.1.

Table 4. Energy consumptions of the NCCU process

Parts	Unit	Figure
Pumps	kW	15
Blower	kW	157
Electrolysis	kW	8,300
Others (Drying, De-watering)	kW	450
Sum	kW	8,922

볼 수 있다. 앞서 제시된 바와 같이 CO₂ 직접 저감량의 경우 배가스 중의 CO₂와 전기분해공정에서 공급되는 가성소다의 탄산화 반응에 의한 일일 100톤 CO₂(연간 36,500톤 CO₂ 처리 가능)로 산정할 수 있다. 그리고 간접 CO₂ 저감량의 경우 앞서 분석된 공정모사결과 및 중탄산나트륨 제조를 위한 종래기술의 에너지 사용량 분석을 통해 산정이 가능하다(전기분해 공정은 본 논문에서 다루고 있는 기술과 종래 전기분해 공정과 성능차이가 없는 것으로 가정하여 분석에서 제외하고 중탄산나트륨 제조공정에 한정하여 산정됨). 분석결과 종래 기술(Solvay 공정)의 경우 단위 중탄산나트륨 생산을 위해 약 7.4 GJ의 에너지가 소비되는 것으로 분석되었는데 이를 CO₂ 발생량으로 환산하면 연간 약 48,862톤에 해당된다. 이에 비하여 본 논문의 CO₂를 활용한 중탄산나트륨 생산기술은 동일한 양의 중탄산나트륨 생산을 위한 에너지 사용량이 0.3 GJ/tNaHCO₃으로 종래 기술대비 10% 이하로 매우 낮아서 전체 CO₂ 발생량은 연간 약

1,977톤에 불과하여 이를 CO₂ 발생량 저감 효과로 산출시(= 간접 CO₂ 저감량) 연간 약 46,885톤에 해당되는 것으로 분석되었다. 결국 상기 분석결과를 바탕으로 하면 본 논문의 CO₂ 활용기술은 직접 CO₂ 저감량 36,500 톤과 간접 CO₂ 저감량(46,885 톤)을 반영하여 연간 약 83,385톤의 CO₂ 저감효과가 있는 것으로 분석되었다(Table 5).

상기 분석결과를 통해 본 논문에서 다루는 CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술은 직접 판매가 가능한 중탄산나트륨 생산을 통한 매출발생 뿐만 아니라 동일한 규모의 CO₂ 포집플랜트와 비교하여 CO₂ 저감량 효과가 매우 큰 것으로 확인되었다. 이러한 CO₂ 저감량은 향후 CDM 사업등과 연계시 회사의 수익에도 직접적인 영향을 줄 수 있다. 특히 2015년 이후 탄소배출권 거래가 시행됨에 따라 CDM 사업이 국내외로 활성화가 되면 제품생산에 따른 매출 발생분을 제외한 순수한 CO₂ 저감을 통해서만 연간 약 8억 3천만원의 경제적 효과를 창출 할 수 있을 것으로 기대된다(2014년 10월 현재 정부에서 제시한 CO₂ 배출권 가격(톤 CO₂ 당 만원) 반영시). 물론 탄소시장 상황에 따라 배출권 가격이 올라가게 되면 이의 경제적 효과는 더욱 높아질 것이다.

5. 결 론

CO₂ 탄산화 반응을 통한 중탄산나트륨 제조기술의 잠재 CO₂ 감축량 산정을 위해 종래 중탄산나트륨 제조를 위한 대표적인 기술인

Table 5. Summary results

Key performance data	Unit	Technology		Comment
		This study	Conventional: Solvay process	
Direct CO ₂ reduction	tonCO ₂ /yr	36,500		
Indirect CO ₂ reduction	tonCO ₂ /yr	46,885		
- Energy consumption*	GJ/tNaHCO ₃	0.3	7.41	Brine electrolysis not considered
- CO ₂ production for the electricity generation	tonCO ₂ /yr	1,977	48,862	- 46,885
Total CO ₂ reduction		83,385		Direct+Indirect CO ₂ reduction

Solvay 공정을 대상으로 공정분석을 수행하고 이의 결과를 바탕으로 개발기술의 CO₂ 저감효과를 산출하였다. 하루 100톤의 CO₂를 처리할 수 있는 규모의 상용 플랜트(연간 36,500톤 CO₂ 처리 가능, 발전 용량 기준 5 MW급)를 대상으로 열 및 물질수지를 포함한 공정 분석을 수행한 결과 중래 탄산나트륨/중탄산나트륨 제조를 위한 Solvay 공정은 단위 중탄산나트륨 생산을 위한 에너지 사용량이 약 7.4 GJ/tNaHCO₃로 이때 CO₂ 발생량은 연간 약 48,862톤에 해당하는 것으로 산출되었다. 반면 발전 배가스 중에 포함된 CO₂를 활용한 중탄산나트륨 제조기술의 경우 중래 공정에 비해 에너지 사용량이 매우 낮을 뿐만 아니라 CO₂ 직접 포집분(연간 약 36,500톤) 반영시 전체 CO₂ 감축량은 약 83,385톤으로 산정되었다. 상기 분석을 통해 본 논문의 CO₂ 활용 중탄산나트륨 제조기술은 제품 생산에 따른 수익 발생 뿐만 아니라 중래 공정에 비해 에너지 사용량이 매우 낮아서 CO₂ 저감효과가 매우 높아 대규모 CO₂ 저장공간이 필요한 CCS (Carbon Capture & Sequestration) 기술의 대안기술로서 유망한 것으로 분석되었다.

감 사

본 연구는 2013년도 한국동서발전의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

1. Lee, J. H., Kwak, N.-S., Lee, I. Y., Jang, K. R., Jang S. G., Lee, K. J., Han, G. S., Oh, D.-H. and Shim, J.-G., "Test Bed Studies with Highly Efficient Amine CO₂ Solvent(KoSol-4)," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(2), 267-271(2013).
2. <http://skyonic.com/skymine>.
3. http://www.twence.nl/en/actueel/Dossiers/Dossier_Bicarbonat/120411_Producing_sodium_bicarbonat.docx/.
4. CMP, 2011, Modalities and procedures for carbon dioxide capture and storage in geological formations as clean development mechanism project activities, Decision-/CMP.7, UNFCCC.
5. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, A study on the estimation of greenhouse gas emission through the CCU technology application, 2013. 12.
6. Ministry of Environment Notification # 2014-152. Guideline for the evaluation of the business validity and the certification of the reduction, 2014. 9. 4.
7. Lee, J. H., Lee, D. W., Jang, S. G., Kwak, N.-S., Lee, I. Y., Jang, K. R., Choi, J.-S. and Shim, J.-G., "Economic Evaluations for the Carbon Dioxide-involved Production of High-value Chemicals," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(3), 347-354 (2014).
8. European Soda Ash Producers Association, Process Brief for Soda Ash, No.3(2004).
9. Lee, J. H., Kwak, N.-S., Lee, I. Y., Jang, K. R. and Shim, J.-G., "Performance and Economic Analysis of Domestic Supercritical Coal-Fired Power plant with Post-Combustion CO₂ capture Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(2), 365-370(2012).
10. Jerzy Chilstunoff, Advanced Chlor-Alkali Technology, DOE Award 03EE-2F/ED190403, Los Alamos National Laboratory(2004).
11. PRO/II 9.1 version, Invensys SimSci, 2011.