

정유 산업 공정별 기술 도입에 따른 CO₂ 배출량 추이 분석

- 시스템 다이내믹스 방법론으로 -

송준우, 정석재, 김형중, 김경섭, 신승복¹, 채윤근², 박진원^{1,*}
 연세대학교 정보산업공학과, ¹연세대학교 화학공학과, ²동경공업대학교 화학공학과
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

The Analysis of the CO₂ Emissions from the Oil Refining Industry process using System Dynamics method

Jun Woo Song, Suk Jae Jeong, Hyeng Joong Kim, Kyung Sup Kim,
 Seungbok Shin¹, Yoon-Keun Chae², Jin Won Park^{1,*}
 Department of Industrial & Information Engineering, Yonsei University,
¹Department of Chemical Engineering, Yonsei University
²Department of Chemical Engineering, Tokyo institute of Technology
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

서론

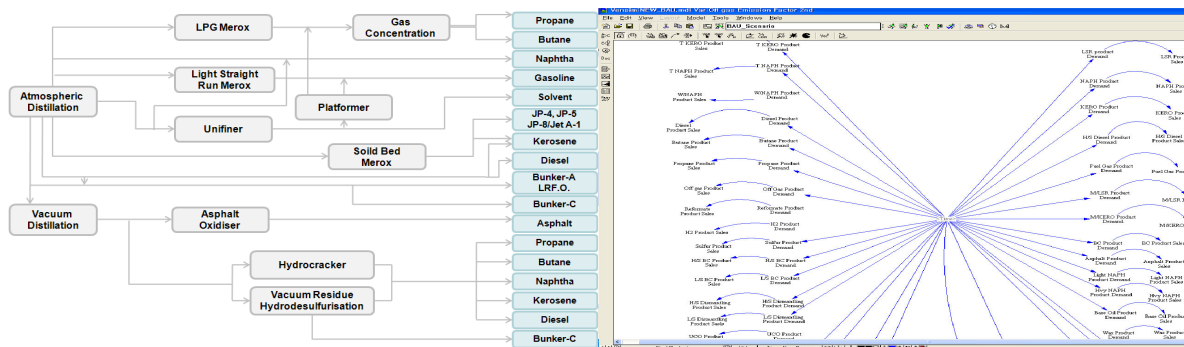
기후변화 협약이 국내 에너지 집약 산업에 어떠한 영향을 미치며, 그에 대한 대응 방안을 어떻게 마련할 것인지에 대한 관심이 증대되고 있다. 이러한 온실가스 배출 저감 노력이 이슈화되면서, 에너지 다소비 산업인 철강, 석유화학, 시멘트 관련 기업들을 중심으로 다양한 형태의 온실가스 감축 연구들이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 정유 산업 공정과 관련된 데이터를 바탕으로 시스템 다이내믹스 방법론을 이용하였다. 시스템 다이내믹스 방법론은 정유 산업과 같이 복잡한 공정에 의해 원료를 공급하고 제품을 생산하며, 환경 변화에 민감한 에너지 집약 산업을 분석하는데 효율적이라고 할 수 있다. 또한 시스템 다이내믹스 방법론을 통해 정유 산업에서 기존 기술별 및 신기술별 세부 공정별 에너지 사용량, 제품 생산량 및 이에 따른 이산화탄소 배출량 추이를 분석 및 비교하였다.

본론

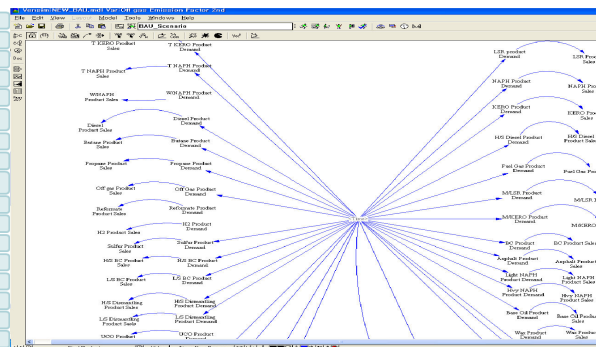
본 연구에서는 SD모델링 기법이 사용되었다. SD는 제시된 문제에 대하여 그와 직접 또는 간접적으로 관련된 변수들로 구성된 시스템을 정의하고, 변수들 간의 관계를 정량적으로 분석하여 모델화한 후, 시뮬레이션을 통하여 시스템의 동적 특성을 밝혀내 문제를 해결하는 시뮬레이션 방법론 중의 하나이다. 특히 SD 툴로 잘 알려진 Vensim을 이용하여 정유 산업의 원료, 제품 흐름을 모델링하고 이를 통해 기존 기술과 신기술에 대한 이산화탄소 배출량 추이를 분석하였다. 아래의 [그림 1]은 본 연구에서 평가한 정유 산업 공정을 통해 원료 및 제품의 흐름에 대한 모델의 범위를 도식화한 것이다. 이 그림에서 원료들이 각각의 공정을 통해 어떠한 흐름을 통하여 제품이 만들어지는지를 알 수 있으며, 각각의 공정 요소들이 공정들 서로 간에 어떠한 영향을 주고받는 지를 보여주고 있다.

기술 도입이 되지 않은 현재의 상황을 반영한 BAU(Business As Usual) 시나리오는 정유 제품별로 과거 1998년부터 2007년까지의 데이터를 수요 추세를 분석하여 수역 예측식을 산정하였다. 또한 산정된 식을 통해 주 단위로 수요가 지속된다는 가정을 바탕으로 설정된 시나리오로 각 제품 수요가 발생하였을 경우, 현재 보유 중인 재고량을 확인하여

제품의 생산 여부를 결정하고 생산이 필요한 경우 제품 생산을 위해 필요한 에너지 및 원료 투입량을 결정하게 된다. 기술 도입 시나리오의 기술 대안에서 시뮬레이션 모형의 평가 기준 년도를 2008년도로 채택하였다. 원유 정제 공정은 기술의 수명이 비교적 길고 초기 투자비용이 매우 커서 신기술의 개발 속도가 느린 편이지만 고유가 및 원유의 중질화, 환경 규제 심화로 인해 신기술 도입이 빠르게 이뤄질 것으로 예상된다. 기술의 종류, 기술별 생산 용량, 에너지 및 원료 사용 실적, 정유 제품 수요 등을 기준으로 향후 평가기간동안에 기술도입에 따른 온실가스 저감 잠재량 평가를 수행하였다. 평가 기간은 앞서 말한 바와 같이 기술의 수명이 20년을 상회한다는 가정 하에 2008년부터 2030년까지로 설정하였다. 평가의 기준이 되는 정유 제품의 수요는 1998년부터 2007년까지의 각 제품의 생산 실적, 수요 실적을 기준으로 정의하였다. 제품의 총 수요는 2007년 이후 2030년까지 시계열적으로 증가하는 형태를 따르도록 수요 추세 선을 만들었다.

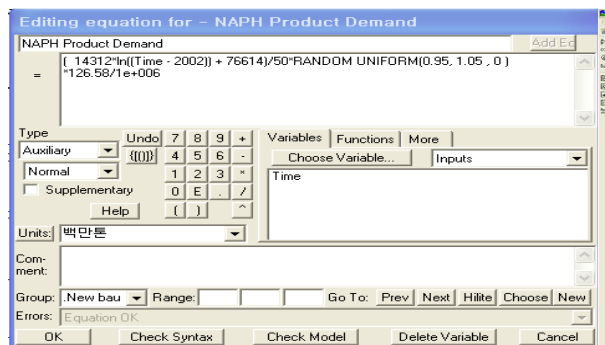


[그림 1] 정유 산업 공정 원료/제품 흐름도

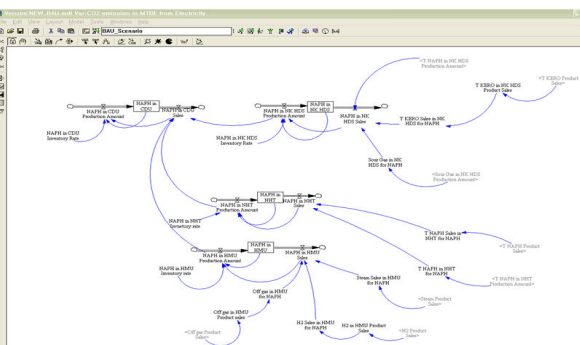


[그림 2] 정유 산업 제품별 수요 모듈

[그림 2]는 정유 산업 제품 별 수요 모듈을 나타내고 있다. 각각 제품별 수요는 [그림 3]에서 보는 바와 같이 통계청의 정유 제품에 대한 실제 수요를 바탕으로 수요 예측 식을 생성하고 해당 식을 통해 수요가 발생 하도록 하였다.

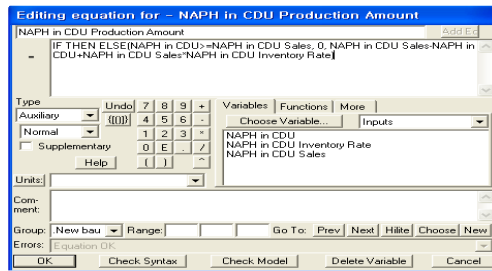


[그림 3] Naphta제품 관련 수요 계산



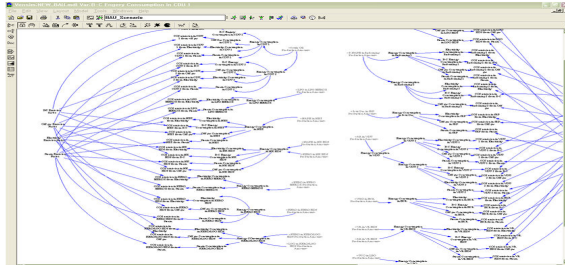
[그림 4] Naphta 흐름공정 모듈

[그림 3]은 [그림 2]에서 정유 제품별 수요 중 Naphta 제품에 관련된 수요를 계산한 것을 보여 주고 있다. 먼저, [그림 4]는 시스템 다이내믹스 모델에서 공정별로 투입되는 원료 중 Naphta 원료에 대한 전체 사용 원료 량을 구하기 위해 모델링 한 것이다.

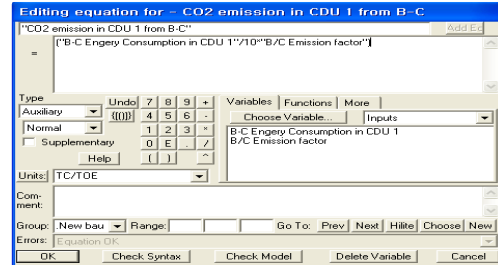


[그림 5] Naphtha 원료 투입량 산정

[그림 5]는 Naphtha 원료 투입량을 산정하기 위해 나타낸 식이다. 만약에 상압 증류 공정에서 Naphtha 원료양이 상압 증류 공정에서의 Naphtha 수요일량보다 크면, 상압 증류 공정에 Naphtha 원료를 투입할 필요가 없다. 반대로 그렇지 않다면, 현재 가지고 있는 Naphtha 원료 량과 안전 재고율을 곱한 Naphtha 안전 재고량과의 합에서 Naphtha의 수요일량을 빼주면 된다. 여기서 안전 재고율은 0.1로 가정하였다.



[그림 6] 공정별 에너지 소비 및 CO₂ 배출량



[그림 7] CO₂ 배출량 산출 방식

[그림 6]는 공정별 이산화탄소 배출량을 산출하기 위해 모델링 한 것이다. 정유 산업의 온실가스 배출은 에너지원별 소비량과 IPCC의 온실가스 배출계수를 사용해서 추정했으며 공정 가스(Off gas)의 배출계수는 국내 정유사의 상압 증류 공정가스의 조성 분석 자료를 바탕으로 [그림 7]처럼 산정하였다.

에너지 사용량						
공정별	2008	2010	2015	2020	2025	2030
CDU_1	2,076	1,860	1,735	1,779	1,659	1,684
CDU_2	1112.34	996.53	929.59	952.79	888.96	902.22
VDU_1	201.25	185.47	175.02	176.62	165.42	168
VDU_2	187.941	173.211	163.46	164.96	154.486	156.897
VR HDS	106.23	101.49	96.99	97.48	90.64	92.21
SRP	1,0619	1,042	1,1081	1,199	1,2678	1,2821
RFCC	0.1423	0.1374	0.1414	0.1479	0.1566	0.1543
Refining_1	0.636	0.65	0.594	0.578	0.565	0.581
Refining_2	0.06904	0.06459	0.05894	0.05733	0.05612	0.05773
FRU	2.00E+02	1.98E+02	2.04E+02	2.06E+02	2.21E+02	2.10E+02
NK HDS	0.5165	0.4694	0.4781	0.5124	0.5439	0.5425
NHT	0.211	0.1863	0.1676	0.1688	0.1648	0.1679
MTBE	0.016	0.0164	0.0167	0.0173	0.0181	0.0199
LPG MEROX	0.0051	0.0048	0.0045	0.0044	0.0045	0.0043
LGO HDS	0.426	0.4251	0.4626	0.4714	0.4933	0.4974
KERO/LGO	1.5489	1.5594	1.6906	1.7507	1.8155	1.8412
KERO MEROX	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
KERO HDS	0.0017	0.0013	0.0009	0.0006	0.0005	0.0004
HMU	0.0381	0.0374	0.0338	0.0326	0.0321	0.0332
HCR	0.3178	0.3054	0.3264	0.3402	0.3456	0.3568
GasCon	0.0575	0.0544	0.0528	0.0511	0.0517	0.0515
AR HDS	153.71	145.09	137.87	138.82	128.96	132.44
TOTAL	3,842	3,467	3,243	3,315	3,093	3,142

[표 1] 공정별 에너지 사용량

[표 1]은 각 공정별로 에너지 사용량 및 기간별로 사용될 에너지 량을 산출하였다. 공정별 에너지 사용량은 각 공정별로 발생하고 사용되는 공정가스, 전력, 스팀, B-C유에 대한 에너지 사용량을 모두 더한 값을 각 공정별 에너지 사용량으로 하였다.

상업중류공정		2008	2010	2015	2020	2025	2030
기존기술	CDU1 - 상업중류 without pre-flash	146.388	131.138	122.33	125.374	116.981	118.73
신기술	상업정제탑 Side Cooler의 heat Duty 분배를 통한 열회수 향상기술	155.401	139.221	129.863	133.107	124.191	126.04
	상업중류탑에 Side reboiler 설치	146.315	131.084	122.265	125.329	116.935	118.67
	상업중류공정에서 수소 회수용 Membrane Separator 설치	145.605	130.444	121.685	124.719	116.375	118.10
	Pinch Technology를 이용한 열교환기 설계	149.39	133.828	124.835	127.968	119.389	121.17
	Heavy Gas O의 폐열회수 공정	146.974	131.656	122.819	125.893	117.45	119.20
	열교환기 재배열	146.315	131.084	122.265	125.329	116.935	118.67
상업중류공정							
기존기술	VDU2 - 상업중류공정 with steam stripping	13.5219	12.4622	11.7604	11.868	11.1159	11.287
신기술	고성능 Internal Type 교체 기술(상업중류-with Steam stripping)	13.495	12.436	11.735	11.843	11.092	11.264
	감압전사유에서 Overhead 증기의 폐열회수	13.421	12.368	11.671	11.779	11.032	11.204
탈황공정							
기존기술	경유수첨탈황공정	0.029487	0.029386	0.03201	0.03262	0.03413	0.0343
신기술	흡착식경유탈황	0.078211	0.078811	0.08573	0.08744	0.09146	0.0922
상업중류공정							
기존기술	RFCC - 접촉증질유분해공정	0.004079	0.003845	0.00397	0.00411	0.00437	0.0043
신기술	분리공정 효율향상기술	0.004293	0.004059	0.00418	0.00443	0.00469	0.0045
가스회수공정							
기존기술	가스회수공정	0.000471	0.00044	0.000433	0.00042	0.000425	0.00042
신기술	Valve Tray를 고성능 structured packing으로 교체	0.0005345	0.00052	0.000503	0.000488	0.000494	0.00049
	Thermally Divided Wall Column	0.00058	0.000552	0.000536	0.000519	0.000526	0.00052
	Depropanizer의 증류탑 효율 재계산을 통한 환류비 감소	0.000499	0.000472	0.000458	0.000444	0.000449	0.00044
	Glycol Dehydrator의 주입온도 변화를 통한 용매능력 향상	0.000499	0.000472	0.000458	0.000444	0.000449	0.00044
Reforming 2 - 접촉개질 공정(연속식)							
기존기술	Reforming 2 - 접촉개질 공정(연속식)	0.005591	0.005285	0.00487	0.00477	0.00464	0.0047
신기술	Reforming Unit에서 환류 가스량 감소	0.005591	0.005285	0.00487	0.00477	0.00464	0.0047
감압전사유탈황공정							
기존기술	VR-HDS - 감압전사유탈황공정	8.0044	7.6464	7.3068	7.3433	6.8292	6.9478
신기술	Vacuum Gas O의 탈황설비에서 열회수 시스템 개선	8.2686	7.8979	7.5485	7.585	7.0533	7.1749

[표 2] 기존 기술 및 신기술에 대한 CO₂ 배출량 비교

[표 2]은 시스템 다이내믹스에서 각각의 공정 별로 기존 기술과 신기술의 이산화탄소 배출량을 2008년부터 2030년까지 통계청 자료를 근거로 한 수요 추계 식을 통하여 구하였다. [표 2]를 보면 공정별 기존기술과 신기술과의 온실 가스 배출량이 거의 차이가 없는 것으로 보인다. 여기서 공정별 신기술이 단순히 온실가스 저감만을 위해 만들어진 기술이 아니라는 것을 알 수 있다.

결론

본 연구는 정유 산업에서 각 공정별 신기술이 도입 되었을 시 이산화탄소 배출 저감 효과를 분석하기 위해 시스템 다이내믹스 방법론을 이용하여 에너지 사용량 변화, 제품 생산량의 이산화탄소 배출량의 변화를 분석하였다. 분석 결과 전체 공정 별로 BAU 시나리오와 많은 차이를 나타내지 못하고 있다. 각각의 공정에 대한 신기술이 단순히 온실가스 저감을 목적으로 만들어졌다고 확신을 할 수 없기에 기존 기술과 신기술에 대한 온실가스 저감효과가 많이 나타나지 않는 것으로 판단된다. 하지만 각 공정별 신기술 도입 시 온실가스 배출량 추이를 분석하는데 상당히 도움이 될 것으로 판단한다.

참고문헌

1. 김도훈 외, 시스템 다이내믹스, 대영문화사(1999)
2. Jhon D. Sterman., Business Dynamics, McGraw-Hill, New York(2000)
3. Price L, Michaelis L, Worrell E, Khrushch M., 1998, Sectoral trends and driving forces of global energy use and greenhouse gas emissions, Miligation Adapt Strategies Global Change, **2**, pp 263-319
4. Matthias R, Anthony A., Vintage structure dynamis and climate change policies: the case of US iron and steel, Energy Policy 30, 541-552
5. 통계청, www.nso.go.kr
6. 한국에너지경제연구원, 산업부문 온실가스 감축 및 에너지 절약 잠재량 추정, 2006
7. 에너지 관리공단, 에너지 기술 DB 구축사업, 2003