

## 시뮬레이션 방법론을 통한 철강 산업 공정별 이산화탄소 배출량 분석

송준우<sup>1</sup>, 정석재<sup>1</sup>, 김형중<sup>1</sup>, 김경섭<sup>1</sup>, 전수영<sup>2</sup>, 박종진<sup>2</sup>, 박진원<sup>2,\*</sup>, 채운근<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>연세대학교 정보산업공학과, <sup>2</sup>연세대학교 화학공학과, <sup>3</sup>동경공업대학 화학공학과  
 (jwpark@yonsei.ac.kr\*)

## The Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions on various Iron and Steeld Industry processes using Simulation method

Jun Woo Song<sup>1</sup>, Suk jae Jeong<sup>1</sup>, Hyung jung Kim<sup>1</sup>, Kyung Sup Kim<sup>1</sup>,  
 Sooyoung Jun<sup>2</sup>, Jong Jin Park<sup>2</sup>, Jin-Won Park<sup>2,\*</sup>, Yoon-Keun Chae<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Department of Industrial & Information Engineering, Yonsei University,  
<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Yonsei University,  
<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering, Tokyo institute of Technology  
 (jwpark@yonsei.ac.kr\*)

### 서론

최근 국내에서 온실가스 배출 저감 노력이 이슈화되면서, 에너지 다소비 산업인 철강, 석유 화학, 시멘트 관련 기업들을 중심으로 다양한 형태의 온실가스 감축 연구들이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 국내의 대표적인 철강 기업인 P사를 중심으로 철강 산업 공정을 통해 수리 모형 수립을 바탕으로 시뮬레이션 방법론을 이용하였다. 시뮬레이션 방법론은 철강 산업과 같이 복잡한 공정에 의해 원료를 공급하고 제품을 생산하며, 환경 변화에 민감한 에너지 집약 산업을 분석하는데 효율적이라고 할 수 있다. 또한 시뮬레이션 방법론을 통해 철강 산업에서 세부 공정별 에너지 사용량, 제품 생산량 및 이에 따른 이산화탄소 배출량 추이를 분석하였다.

### 시뮬레이션 모형 설계

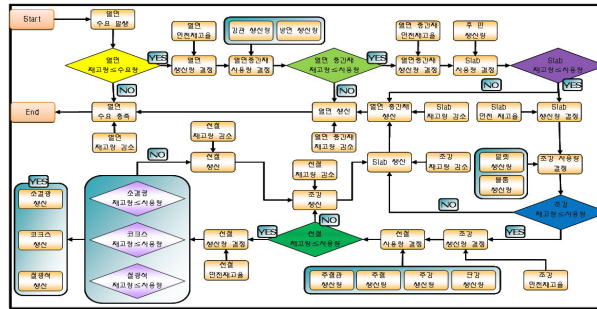
본 연구에서는 철강 산업 공정별 이산화탄소 배출량 추이를 분석하기 위해 시뮬레이션 기법이 사용되었다. 시뮬레이션은 복잡한 공정 또는 시스템(system)을 전체 시간에 발생하는 사건에 대해 실제 시스템의 반응을 모방하는 방법으로 프로세스나 시스템의 모델링을 분석하는 도구 중의 하나이다. 즉, 실제 시스템의 모델을 설계하고 시스템의 거동과 운영에 대해 실행 가능한 여러 방법을 이해하기 위하여 모델을 실험하는 일체의 과정으로써, 본 연구에서의 철강 산업의 공정별 이산화탄소 배출량 추이 분석에 효과적이라고 판단된다. 그리하여, Simulation 툴로 잘 알려진 Arena를 이용하여 철강부품 공정을 분석하고 모형을 설계 및 개발하였다. <그림 1>은 Arena를 이용한 시뮬레이션 모형을 구축함에 있어서 모델의 프로세스를 보여주고 있으며, 대표적으로 열연 제품 프로세스를 중심으로 설명하고 있다.

우선, 시뮬레이션이 시작되면, 철강 제품들은 예측된 수요에 의해 제품 수요를 발생시킨다. 열연 제품 또한 마찬가지로, 2000년부터 2006년까지 발생한 수요 데이터를 기반으로 적합한 수요 추세선을 작성하여, 주단위로 주문이 추세선의 값으로 발생하도록 처리하였다.

수요가 발생하고 나면, 최종 제품인 열연 재고량과 비교하여 현재 보유중인 재고량이 수요보다 크다면, 재고에서 수요를 충족시켜준 수요량만큼 현재 보유중인 재고에서 빼주면 된다. 하지만, 현재 보유중인 재고가 발생한 수요보다 적다면, 기업은 해당 제품의 생산량을 결정하게 된다. 이때, 열연 제품 생산에 필요한 에너지와 원료 및 중간 제품들에 대한 재고 수준을 파악하여, 만일 최종 제품을 생산하는데 필요한 에너지와 원료 및 중간 제품이 부족하다면, 이에 대한 생산을 수해하게 된다. 이러한 흐름을 계속 진행하여, 최종 제품으로부터 에너지

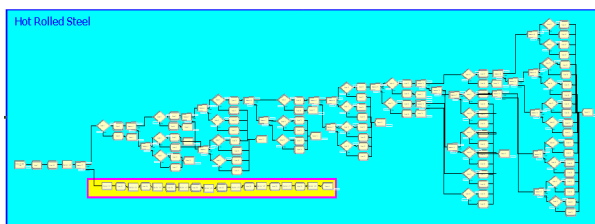
및 원료까지의 Backwarding 방법으로 진행하게 된다.

이때 고려할 수 있는 사항으로써, 제품의 재고가 부족할 경우, 얼마만큼 생산량을 결정할 것인가에 대한 의사 결정이 필요하다. 이는 다양한 생산 정책을 반영할 수 있는 부분이기도 하다. 본 연구에서는 각 제품별로 연간 재고 수준을 기준으로 하여, 이를 최소한 보유해야 할 안전 재고 값으로 판단하고, 제품 생산량을 결정할 때, 안전 재고율을 고려한 값만큼 더 생산하도록 모델링 하였다.



<그림 1> 철강 모델 프로세스

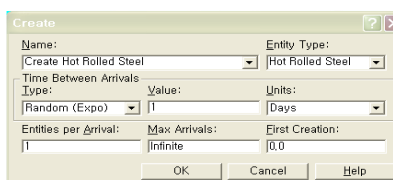
철강 공정을 시뮬레이션 툴인 Arena를 통해 모델링을 진행하게 된다. 여러 공정 중 대표 공정으로 열연 공정을 보면 <그림 2>와 같다. 열연 제품 생산을 위해 필요한 중간 제품인 Slab와 나머지 에너지 및 원료의 재고를 파악하게 되고, 만일 Slab이 충분하지 않다면, 열연 제품 생산에 앞서 Slab 생산이 발생하게 되고, Slab 생산을 위해 필요한 Crude Steel이 충분한지 여부를 체크하게 된다. 만일 Crude Steel 충분하지 못하면, Crude Steel 생산을 위한 Pig & Reduce Iron(복합 선철) 재고를 파악하게 되고, 충분치 않다면, 이를 생산하는데 필요한 코크스와 소결광의 재고를 파악하여 코크스 및 소결광의 생산 여부를 확인하게 된다. <그림 2>에서 아래 노란색으로 표시된 로직은 각 중간 제품을 생산하는 데 필요한 생산 시간을 반영하기 위해 모델링 되었다. 그리하여, <그림 3>에서는 각 중간 제품 생산 시간을 결정하는 모듈을 설명하고 있다. 단위당 생산 시간에 생산되는 양을 곱하여 산정 하였다.



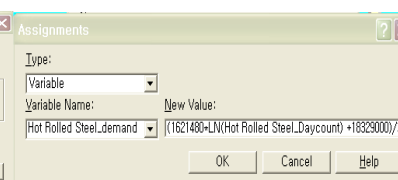
<그림 2> 철강 제품 생산 전체 프로세스 (열연 제품)



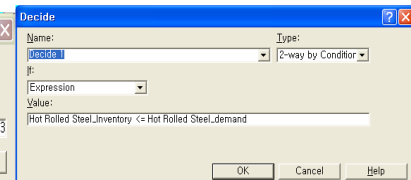
<그림 3> 열연 제품 생산 시간 결정 모듈



<그림 4> 열연 제품 수요 발생 모듈



<그림 5> 열연 제품 수요량 산정 모듈



<그림 6> 열연 제품 수요량과 재고량 비교 모듈

<그림 4>는 열연 제품 생산을 위한 중간재 열연 제품의 수요가 1일에 한번씩 발생하는 것으로 처리한 부분을 보여주고 있다. 각 제품별로 수요는 매일 발생하는 것을 원칙으로 했으며, 시물레이션의 특성을 반영하기 위해 확률 적인 요소를 고려하여 지수분포의 1일 값으로 처리하였다. <그림 5>는 열연 제품의 수요량을 산정하는 모듈이다. 수요량은 철강제품 수요 데이터를 기반으로 하여 연간 수요량을 예측 모형식을 산출하였다. 수요 예측 식을 기반으로 연간 수요량을 산정하고, 시물레이션에서 고려한 수요 발생일수가 1일이므로, 1일 수요량으로 다시 환산하여 수요량이 발생하도록 처리하였다. <그림 6>은 열연 제품의 수요가 발생했을 경우, 현재 보유중인 재고가 충분한지 여부를 비교하는 로직이다. 제품의 수요가 충분할 경우에는 현재 재고에서 수요량을 충족하고 재고량을(현재 재고량 - 현재 수요량)의 값으로 변동하게 되고, 그렇지 않은 경우에는 생산 이벤트를 처리하게 된다.

**시물레이션 분석 결과**

2000년부터 2006년까지 철강협회로부터 제공받은 철강 제품 수요를 기반으로 시물레이션 모델을 통해 에너지 및 원료, 그리고 중간재의 생산량을 산정하였다. 통계에 의하면, 2000년의 철강부문 에너지사용은 총 584PJ이었다. 한편 본 연구에서는 공정별 수요에 기반하여 생산량을 결정하는 모듈을 수행한 결과 2007년도 총 에너지 소비는 1151.61PJ로 나타났다.

시물레이션 모형의 결과와 통계자료와의 차이가 발생하는 이유는 시물레이션 모형에서는 생산량을 결정할 때, 현재 보유하고 있는 재고를 파악하여, 생산 여부를 판단하였기 때문에, 수요가 발생하는 시점에서 무조건 생산이 발생한 형태가 아니다. 따라서 통계치와의 다소 차이가 발생하고 있는 것으로 보인다.

[표 1] 에너지 / 원료별 사용량

[표 2] 중간제품 생산량

Unit : 천TOE							Unit : 천Ton						
원료별 사용량	Year						중간제품 사용량	Year					
	2007	2010	2015	2020	2025	2030		2007	2010	2015	2020	2025	2030
Energy / Material							중간제품						
Electric	2.91	3.51	3.63	3.70	3.76	3.81	Bloom	5,405.34	5,543.53	5,579.73	5,665.24	5,753.31	5,830.16
anthracite	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	Slab	46,122.97	47,609.97	49,107.43	50,262.43	51,152.75	51,836.00
BC Oil	3.57	3.66	3.77	3.85	3.92	3.97	billet	11,698.25	11,612.01	11,556.95	11,678.54	11,720.99	11,741.20
byproduct gas	8.98	10.9	11.3	11.5	11.6	11.83	Cokes	26,145	27,110	28,783	29,247	29,708	30,063
coke breeze	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	sinter ore	77,260	79,081	81,148	82,518	83,627	84,765
coking coal	8.14	28.0	29.7	30.2	30.7	31.10	Pig Iron	69,094	70,053	71,823	73,224	74,221	75,096
Iron Ore	1.99	2.04	2.09	2.13	2.16	2.19	Crude Steel	63,826	64,712	66,327	67,666	68,597	69,415
LNG	0.40	0.41	0.42	0.43	0.43	0.44							
Scrap	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07							
Total	26.77	49.31	51.73	52.64	53.42	54.2							

[표 1]에서 보는바와 같이 BAU 시나리오에서 2007년도의 총 에너지 소비는 26.77 천TOE에서 2030년에 54.2 천TOE로 증가하는 것으로 나타났다. 에너지원별로 보면 Iron Ore나 Anthracite의 증가량은 둔화되는 반면, Coking coal의 증가량은 매우 큰 것으로 예상되었다.

[표 2]는 최종 제품을 생산하기 위한 강 반제품의 생산량에 대한 결과를 보여주고 있다. 고려한 중간 제품은 연속주조 공정을 통해 생산되는 Billet, Slab 및 Bloom 생산량과 Cokes & Sintering Ore, Pig Iron, Crude Steel로 구분되어 진다. 결과를 보면, 강반제품인 Bloom과 Slab 및Billet의 변동은 크게 발생하지 않은 것으로 보아, 강 반제품의 공급 점유율은 안정 상태에 놓여 있는 것으로 판단된다. 이들의 공급 점유율은 각각 9%, 73%, 18%정도인 것으로 확인되었다. 최종 제품 생산량을 추정해 본 결과, 조강류, 판재류, 주강, 단강의 2030년 대비 총 생산량은 85,538.961 천Ton으로 추정되었으며, 이는 2007년 76,469.107 천Ton보다

10.6%정도의 증가 추세가 있는 것으로 판단되었다. 조강류(Long Product)는 2007년에 16,336.22 천Ton이 생산되는 것으로 나타났으며, 2030년에는 16,728.08 천Ton이 생산 될 것으로 예측되어 2.34%가 상승할 것으로 기대된다. 한편, 판재류(Flat Product)는 2007년에 57,420.37 천Ton에서 2030년 65,911.38fh 생산량이 증가하여, 이는 12.9% 정도의 증가 추세를 보이는 결과이다. 한편 주물류(Cast Iron Products)는 2007년 1,471.61 천Ton에서 1,339.40 천Ton으로 오히려 감소세가 있는 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 철강 부문의 공정별 온실가스 배출량을 상대적으로 분석하는데 주목적이 있으며, 절대적인 배출량의 계산이나 전망이라고는 보기가 어렵다. 즉, 이러한 결과는 설계된 기술 시스템과 IPCC 배출계수가 아닌 실제 공정 배출계수를 도입할 경우에, 좀 더 정확한 결과를 예측할 수 있다고 본다. 시뮬레이션 분석을 통하여 이산화탄소 배출량을 추정해 본 결과, [표 3]과 같은 결과가 나왔다. [표 3]에서 보는 바와 같이 각 공정별로 온실가스 배출 점유율을 살펴보면, 2010년 기준으로 압연 공정이 37%정도가 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 이는 전체의 약 80%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 압연 공정과 제선 및 소결광 공정에 이산화탄소 저감 기술의 도입이 불가피하다고 할 수 있다.

[표 3] 이산화탄소 배출량

unit : 천Ton

이산화탄소 배출량	Year					
	2007	2010	2015	2020	2025	2030
철강 공정						
Cokes	932	3,310	3,514	3,570	3,627	3,670
Sintering	4,755	4,868	4,995	5,079	5,148	5,217
Iron Making	4,417	4,501	4,618	4,696	4,767	4,825
Steel making	511	518	531	542	550	556
Continuous Casting	125	128	131	134	136	137
Rolling and Finishing	6,305	6,458	6,632	6,765	6,885	6,972
Stainless	419	440	467	489	507	523
<b>TOTAL PROCESS</b>	<b>17,463</b>	<b>20,222</b>	<b>20,887</b>	<b>21,275</b>	<b>21,618</b>	<b>21,900</b>

## 참고문헌

1. 문일경 외, "Arena를 이용한 시뮬레이션", 교보문고(2005)
2. 장현준 외, "21세기 환경 변화에 대한 철강 산업의 대응방안", 에너지경제연구원(2000)
3. Price L, Michaelis L, Worrell E, Khrushch M., 1998, Sectoral trend and driving forces of global energy use and greenhouse gas emissions. Mitigation Adapt Strategies Global Change, 3, pp263-319.
4. International Iron and Steel Institute., 1997, Steel statistics of developing countries, 1996, ed. IISI:Brussels.
5. Matthias R, Anthony A., Vintage structure dynamics and climate change policies: the case of US iron and steel, Energy Policy 30, 541-552
6. H.Chang-qing., et al., 2006. Emission Mitigation of CO<sub>2</sub> in Steel industry: Current Status and Future Scenarios. Journal of Iron and Steel Research. 13, 38-42.