

제강·연주 공장 설계와 운영을 위한 시뮬레이터

최성훈^{1†}

A Simulator for the Design and Operation of the Steel Mill

Seong-Hoon Choi

ABSTRACT

Stiff competition and skyrocketing prices of raw materials are increasingly demanding the optimal design and operation of iron and steel mills minimizing trial and error. Computer simulation can provide the methodology in accordance with requirements. The purpose of this paper is to suggest a simulator for the design and operation of the steelmaking and continuous casting mill. The simulator was developed using Arena, popular simulation software and input and output interface based on MS Excel. It allows easy access for the maintenance and extension of the model. One of distinct features of the proposed simulator is the inclusion of complex transportation modules composed of transfer cars and overhead cranes. The simulator can be used for evaluating various alternative designs of a projected mill via throughput analysis and material flow analysis. Also, one can utilize it effectively to search for the best product mix suitable for many types of situations. It could be an invaluable tool evaluating the performance of operation patterns and improving the accuracy.

Key words : Steel manufacture, Continuous casting, Simulation

요약

치열한 경쟁과 원자재 가격 급등은 시행착오를 최소화 하면서 제철소를 최적으로 설계하여 운영할 것을 한층 더 강력하게 요구하고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 이 요구에 부합되는 방법론을 제공할 수 있다. 본 논문의 목적은 제강·연주 공장의 설계와 운영을 지원하기 위한 시뮬레이터를 제안하는 것이다. 본 연구에서 제안하는 시뮬레이터는 유지보수와 확장에 용이하도록 널리 알려진 Arena로 개발되었으며 사용의 편의성을 위하여 엑셀 기반으로 입출력 인터페이스를 설계하였다. 또한 운반 대차와 천정 크레인으로 구성되는 복잡한 운반 모듈을 포함하여 모델의 정확도를 높였다. 시뮬레이터는 생산량 분석과 물류 분석을 통하여 제강·연주 공장 설계안의 적정성을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그리고 다양한 상황별로 최적의 제품 조합을 도출하는데 적용될 수 있으며, 공정별 설비별로 작업을 배정하는 조업 운영 패턴을 평가하고 정확도를 향상시키는 도구로서 활용이 가능하다.

주요어 : 제강, 연주, 시뮬레이션

1. 서론

제강·연주 공장은 일관제철소의 중요 구성 요소이다. 본 논문의 목적은 제강·연주 공장의 설계와 운영을 지원

하기 위한 시뮬레이터를 제안하는 것이다. 먼저 철강 제조 프로세스에 대해 간략히 기술하기로 한다. 철강 제조는 제선, 제강, 연주, 압연 공정 순서로 진행된다. 제철 과정에 대해서 본 논문의 연구 범위인 제강과 연주를 중심으로 기존 문헌(포스코, 2011; 한국철강협회, 2011; 현대제철, 2011)을 참고하여 간략히 알아보기로 한다. 오늘날의 제철·제강 제조 방법은 보통 고로에서 선철(pig iron)을 만들고, 이것을 제강로에 넣어 강(steel)을 만드는 것이다.

제선 과정은 고로에 철광석, 코크스, 석회석을 넣은 후,

*본 논문은 상명대학교 2010년도 교내선발과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

접수일(2011년 2월 28일), 심사일(1차 : 2011년 5월 1일), 게재 확정일(2011년 5월 29일)

¹⁾ 상명대학교 경영공학과

주 저 자 : 최성훈

교신저자 : 최성훈

E-mail; shchoi@smu.ac.kr

고로 아랫부분의 열풍로를 통하여 고열의 공기를 불어넣어 코크스를 연소시켜서 일산화탄소를 만들고 철광석을 환원하여 탄소 함량이 높은 선철을 만든다. 선철은 용해된 상태로 용탕 풀에 피므로 하루에 몇 차례씩 출선구를 통해 유출시킨다.

고로에서 만들어진 선철은 보통 용해된 용선 그대로 용선수송차(torpedo ladle car, TLC)에 실려 기관차로 제강공장으로 운반된 후, 고철 스크랩을 배합하여 정련하며 탄소를 산화시켜 제거하고 규소, 망간, 인, 황을 적당히 감소시켜 강을 만든다. 제강 공정은 크게 용선예비처리, 전로, 노외정련의 세 작업으로 구성된다. 먼저 용선예비처리 작업에서는 용선을 TLC에서 용선 래들(charging ladle)에 부어넣고 용선에 포함된 인과 유황 성분을 제거한다. 전로 작업은 성분과 온도를 조정하기 위해 용선에 스크랩을 장입하고 부원료를 투입한 후, 고압의 고순도 산소를 불어넣어 탄소를 태우고 불순물을 제거하여 정련(취련)하는 과정이다. 조정이 끝난 용강은 출강(용강) 래들(teeming ladle)로 옮겨진다. 끝으로 노외정련(또는 2차 정련)은 최종 철강 제품의 성분을 요구조건에 맞게 조정하고 연주 작업을 위해 승온 과정을 거친다.

연주(continuous casting)는 액체 상태의 철(용강)이 고체가 되는 공정으로 용강은 연속해서 주형에 투입되고 주조기를 통과하면서 냉각 과정을 거쳐 응고되어 슬래브, 블룸, 빌릿 등의 중간 소재가 된다. 연주 이전의 작업은 히트(heat 또는 charge) 단위로 진행되나, 연주 공정에서는 캐스트(cast) 단위로 작업을 진행한다. 연속으로 작업이 가능한 히트들의 묶음을 캐스트하고 하는데, 연주 공정의 작업교체시간이 길기 때문에 연주 공정의 생산성을 높이기 위해서는 납기 등이 허용되는 한 캐스트를 크게 구성해야 한다. 캐스트의 구성과 작업설비 할당은 재료설계 프로세스와 생산계획 프로세스에서 이루어진다.

제강·연주 공장은 앞에서 기술한 용선예비처리, 전로, 노외정련, 연주 작업을 담당하는 복수의 주설비 및 부대설비와 액체상태의 용선과 용강을 담은 용선·용강 래들, 그리고 운반을 담당하는 지상 대차(transfer car)와 천정 크레인으로 구성되는 동적인 시스템으로 된다. 따라서 제강·연주 공장을 최적으로 설계하고 운영하기 위해서는 동적 시스템 분석에 적합한 시뮬레이션을 적용하는 것이 타당할 것이다(Law, 2007). 아울러 제강·연주 공장 설계안의 검토와 개선, 그리고 다양한 운영 시나리오별 최적 운영 패턴의 도출 및 검증 업무의 생산성을 올리기 위해서는 가능한 한 시뮬레이터 형식으로 개발하여 실무자가 쉽게 이용할 수 있도록 할 필요가 있다.

그동안 시뮬레이션 툴은 국내의 제철회사에서 활발하게 적용되어왔다. 우리나라의 경우 포스코는 혁신지원그룹과 기술연구소를 중심으로 국내 최초로 1980년대부터 시스템 설계 및 개선을 위해 시뮬레이션 팀을 운영하고 있다. 현대제철 또한 시스템 최적 설계와 합리적인 운영 방안을 도출하기 위해 다양한 분야에서 시뮬레이션을 적용하고 있다. 일례로 김광수(1990)는 스테인레스강 생산 공정을 대상으로 수요 패턴과 불량률 변화의 영향에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 정원웅 등(1995)과 윤종계(1996)는 시뮬레이션을 적용하여 슬래브 야드 확장과 후판 공장 설비 증설 관련 연구를 각각 수행하였다. 또한 윤종계(2001)는 포스코의 제강 1공장을 대상으로 생산 능력 분석 및 캐스트 투입 순서 결정 알고리즘의 성능 파악을 위해 프로그램으로 직접 개발한 시뮬레이션 모델을 적용하였는데, 모델 정확도에 큰 영향을 주는 운반 부분을 단순히 상수로 처리하여 지상 대차와 천정 크레인의 동적인 상황을 반영하지 못하였으며, 시뮬레이션 전용 툴을 사용하지 않은 관계로 모델 유지 보수 및 확장 측면에서 한계를 갖는다. 끝으로 고로공장과 제강공장 사이를 운행하는 기관차 및 TLC의 적정 대수를 산정하고, 운행 패턴 변화에 따른 대안 검토에 시뮬레이션을 적용한 사례도 있다(김중환 등, 1998, 1999). 최근, Vasudevan 등(2010)은 파이프 생산 제철 공장의 신뢰도와 생산성 향상을 목적으로 설계와 운영에 대해 시뮬레이션을 적용하였다.

본 연구에서 제안하는 시뮬레이터는 생산량 분석과 물류 분석을 통하여 제강·연주 공장 설계안의 적정성을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그리고 다양한 상황별로 최적의 제품 조합(product mix)을 도출하는데 적용될 수 있으며, 공정별 설비별로 작업을 배정하는 조업 운영 패턴을 평가하고 정확도를 향상시키는 도구로 활용이 가능하다.

다음 장에서는 시뮬레이터 설계 및 개발에 대하여 자세히 기술하고, 3장에서는 간단한 적용 사례를 소개하기로 한다. 그리고 마지막 장에 결론을 제시한다.

2. 시뮬레이터 설계 및 개발

2.1 개요

시뮬레이터를 위한 모델의 범위는 용선수선장, 탈황, 전로, 노외정련으로 구성되는 제강 공정에서 액체 상태의 철이 고체로 응고되는 연주 공정까지이다.

시뮬레이터의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 조업기준 정보는 연주 투입 스케줄 작성과 시뮬레이션 모델에 반영

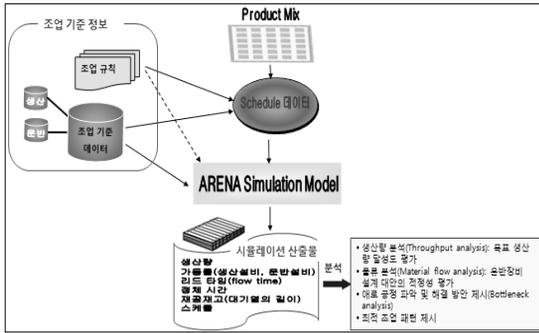


그림 1. 시뮬레이터 전체 구성도

된다. 시뮬레이션 모델은 Arena로 개발되었으며, 조업 기준 데이터와 투입계획(스케줄) 데이터, 시뮬레이션 결과는 엑셀 파일로 처리된다.

시뮬레이션 모델은 대상 시스템을 모듈로 분할하여 모듈별로 설계하고 개발한다. 모듈별 상세 내용은 2.4절에서 기술한다. 용선 수선장에서 전로까지는 용선 래들이 사용되고 2차정련에서 연주 사이에는 용강 래들이 사용되므로 크게 두 부분으로 나누고 각각에 대하여 운반설비를 포함하지 않는 모델과 포함하는 모델로 구분하였다. 그리고 나서 모듈별로 설계, 개발, 검증, 수정 과정을 거치면서 점진적으로 확장하는 방법을 적용하였다.

2.2 입력 데이터 및 산출물 정의

입력 데이터는 조업 기준 데이터, 투입계획, 시뮬레이션 옵션으로 구분되는데, 쉽게 사용하면서 유연성을 높이기 위해 엑셀 파일을 이용하였다. 시뮬레이션 실행 초기에 데이터 입력 모듈에서 이 엑셀 파일의 데이터를 읽어 들인다. 조업 기준 데이터는 표 1, 2와 같이 작업시간과 운반시간으로 대별된다. 본 연구에서는 조업 시간을 상수로 처리하였으나, 현장의 실측 데이터를 통해 확률분포를 얻게 되면, 확률분포를 사용하는 모델로 확장할 수 있을 것이다.

관련 부서 사이의 커뮤니케이션을 원활히 하고, 입력 오류 최소화화 데이터 관리의 효율성 증대를 위해 작업 내용별로 산출근거를 명시하여 관리하는 방식으로 입력 데이터 부분을 처리하였다. 참고로 표 1, 2에 열거된 항목과 작업시간은 실제로 존재하는 공장의 것이 아니고 예로 들기 위해 가상으로 작성된 것이다. 본 논문에서 제안하는 시뮬레이터는 운영 시나리오별 최적 운영 패턴의 도출 및 검증을 주요 목적으로 하고 있으므로 설비 고장에 따른 운영 시나리오 도출을 위해 고장이나 정기보수(정수)

표 1. 작업시간 조업 기준 데이터 예

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	KR					LD1 Converter			
2	Item	Time	Sum	Note	Item	Time	Sum	Note	
3	Sampling	2.0			Hot metal Charging	3.0	3.0		
4	Stirring	14.0	20.0	OT1	Blowing	10.0			
5	Sampling	2.0			Sampling	2.0	16.0	OT1	
6	Transfer	2.0			Tapping	4.0			
7	Slag Skimming	5.0	5.0	OT2	Slag off	3.0	3.0	PT1	
8	Sum	25.0			Preparation	3.0	3.0	PT2	
9					Sum	25.0			
10	LF1								
11	Item	Time	Sum	Note	LD2 Converter				
12	1st Bubbling	5.0	23.0	OT1	Item	Time	Sum	Note	
13	Arccing	18.0			Hot metal Charging	3.0			
14	Sampling	2.0			Blowing	12.0			
15	2nd Bubbling	4.0	6.0	OT2	Sampling	2.0	21.0	OT1	
16	Sum	29.0			Tapping	4.0			
17					Slag off	1.0	1.0	PT1	
18					Preparation	6.0	6.0	PT2	
19					Sum	28.0			
20									
21	범례:								
22	OT: Operation Time								
23	PT: Preparation Time(다음 히트생산을 위한 준비시간)								
24	● : 전로작업 완료전 탈황공정에서 투입될 히트가 있다면 선호출하는 시점								

표 2. 운반시간 조업 기준 데이터 예

	B	C	G	H	I	J	K	L	M
1	구분	운반설비명	작업내용	세부내용	시간	총시간	세부내용	시간	총시간
19	크레인	tc1_Charging	Move_1,01	권하	1.40	3.90	권하	1.00	2.90
20				Hooking	0.50		De-hooking	0.90	
21				권상	2.00		권상	1.00	
22			Move_1,02	권하	1.00	4.00	장입	3.00	3.00
24				Hooking	1.00				
25				권상	2.00				
26		Move_1,03			0.00	권하	1.50	3.00	
28						De-hooking	0.50		
29						권상	1.00		
30		tc1Tapping	Move_2,01	권하	0.50	7.80	권하	0.90	2.10
32				Hooking	6.30		Ladle 안치	0.20	
33				권상	1.00		De-hooking	0.50	
34			Move_3,01	권하	0.60	1.40	권하	1.80	5.40
101				Hooking	0.50		경동	3.10	
102	권상			0.30	권상		0.50		
103	tc1CCM	Move_3,02	권하	1.10	3.40	권하	0.90	3.30	
104			Hooking	0.50		Turret 안치	1.10		
105			권상	1.80		De-hooking	0.40		
106		Move_3,03			0.00	권하	0.50	2.20	
107						De-hooking	1.00		
108						권상	0.70		
109									
110									
111									

는 옵션으로 반영한다.

투입계획 데이터는 자주 변경되는 성격의 데이터므로 조업 기준 데이터용 엑셀 파일과는 별도의 엑셀 파일을 통해 시뮬레이션 실행 초기에 입력된다. 여기에는 히트 번호, 캐스트 번호 등의 기본 데이터와 경로 설정과 작업시간 결정을 위한 데이터가 포함된다. 참고로 투입계획 데이터에 포함되는 항목 목록이 표 3에 예시되어 있다.

입력 데이터의 마지막 항목은 옵션 입력 데이터이다.

옵션은 크게 세 가지로 유형으로 구분될 수 있는데, 첫 번째는 시뮬레이션 실행 속도와 관련된 옵션으로 애니메이션 수준, 리포트 출력 여부, 스케줄 출력 기간을 설정할 수 있도록 하였다. 두 번째는 TLC 도착 간격, 용선·용강 래들 개수 등과 같은 수치 지정 옵션이다. 마지막은 대체 설비 사용 방식, 전로 운영 방식 등 조업 규칙과 관련된 것들로 미리 옵션별로 모델과 사용자 정의 VBA 코드를 이용하여 모델링 한 후, 모델에 포함시켜서 사용자가 지정할 수 있도록 하였다. 옵션 데이터도 조업 기준 데이터와 마찬가지로 엑셀 시트에서 설정한 후, 시뮬레이션 초기에 입력되어 모델에 반영된다.

이제 시뮬레이션 산출물에 대하여 설명하기로 한다. 시뮬레이터의 실행 결과는 쉽게 분석할 수 있도록 항목별로 워크시트에 나누어서 출력된다. 표 4에 시뮬레이션 산출물 항목과 그 내용이 정리되어 있다. 호기별, 공정별 생산량 통계와 생산 설비와 운반 설비에 대한 가동률 통계가 계산 근거와 함께 가동률 워크시트로 출력된다.

히트 체류시간, 히트 작업시간 상세 분석, 히트 대기시간 상세분석 리포트를 이용하여 애로 공정과 정체의 주요 원인을 정확하게 파악할 수 있다. 참고로 히트 작업시간

표 3. 투입계획 데이터

구분	항목 예
기본 데이터	히트 ID, 캐스트 ID, 캐스트 내 주조 순서
경로, 설비 지정 데이터	2차 정련 코드, 연주기 호기
연주 작업시간 계산 데이터	슬래브 두께, 주조 폭, 강종

표 4. 시뮬레이션 산출물 항목

산출물 구분	항목 예
가동률	생산량, 생산 및 운반 설비 가동률
히트 체류시간	작업, 이동, 정체시간
히트 작업시간 상세분석	순작업, 부수작업 시간
히트 정체시간 상세분석	대차, 크레인, 설비 정체시간
상세 스케줄	공정별, 설비별 작업 시작시각과 종료시각
크레인 가동률 검증	크레인 이동작업별 이동구간, 이동 소요 시간, 작업 내용
재공재고 추이도	용선 및 용강 재공재고 추이
주조 단락	주조 단락 발생 상황 출력

은 하나의 히트를 처리하기 위해 필요한 순작업과 부수작업(공정 내에서의 이동과 같이 피할 수 없는 지연)에 대한 것이며, 히트 정체시간은 정체가 어느 부분에서 얼마만한 크기로 발생하는 지를 파악하기 위하여 대차, 크레인, 차공정의 설비 대기의 세 가지 요소 시간으로 구분한 것이다. 주조 단락에 대해서는 2.4절의 연주 프로세스 모듈에서 설명하기로 한다.

2.3 개체 정의

구체적인 시뮬레이션 모델 설계는 개체 정의에서 시작된다. 제강·연주 공장 시뮬레이션 모델의 주요 개체는 히트, 용선 및 용강 래들 개체이며 보조 개체에는 데이터 입력, 산출물 출력, 크레인 할당, 슬래그 처리를 담당하는 개체가 있다. 각 개체에 대한 설명이 표 5에 정리되어 있다.

2.4 시뮬레이션 모델 구성 모듈

목적에 부합하는 시뮬레이션 모델을 시행착오를 최소화 하면서 개발하기 위해서는 시뮬레이션 소프트웨어(여기서는 Arena)를 이용하여 컴퓨터에 입력하기 전에 개념 모델 설계가 선행되어야 한다. 그러나 현장에서는 개념 설계의 중요성이 간과되고 있으며, 실무 차원에서 사용할 만한 개념 설계용 틀이 없는 것이 현실이다. 특히 시뮬레이션 소프트웨어가 컴퓨터 언어 기반의 코딩 방식에서 그래픽 입력 방식으로 발전되면서 개념 설계 단계가 생략되거나 간소화 되고 있다. 과연 ‘그래픽 입력 방식이 대규모 모델 개발의 생산성 향상에 도움이 되고 있는 것인가’에 대해서는 의문이 든다. 여기서는 본 연구자가 개발한 활동 흐름도(activity flow diagram)(Rossetti, 2009)에 기반

표 5. 개체 정의

개체명	설명
히트	용선·용강에 해당되는 핵심 개체로 시스템 전체에서 활동
용선 래들	용선 래들에 해당되는 개체로 용선수선장에서 전로 사이에서 활동
용강 래들	용강 래들에 해당되는 개체로 전로 이후부터 연주 공정사이에서 활동
데이터 입력	데이터를 엑셀시트에서 읽어 들여서 변수 값 설정
산출물 출력	시뮬레이션 완료 후, 결과를 정리하여 정해진 엑셀시트로 출력
크레인 할당	크레인 선택 모듈에서 대기하고 있는 히트 개체 제어
슬래그 처리	생산이 진행됨에 따라 발생하는 슬래그를 처리

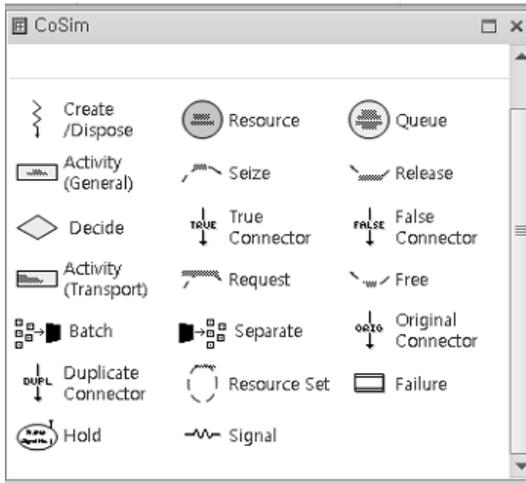


그림 2. CoSim Visio 스텐실

을 두는 개념 모델링 방법론, CoSiM(Conceptual Simulation Model Design)을 적용하였다. CoSiM은 개념 모델링에 필요한 구성 요소들을 템플릿화 하여 그림 2와 같이 MS Visio의 스텐실(stencil)로 통합하였다. CoSiM 스텐실을 활용하면 MS Visio를 이용하여 다양한 상황에 대해 효율적으로 개념 모델링 작업을 수행할 수 있다. CoSiM은 Arena 사용자를 위한 개념 모델 설계용으로 개발되었지만, 다른 시뮬레이션 소프트웨어 사용자도 충분히 활용할 수 있는 범용성을 갖추고 있다. 그림 3에 CoSiM을 이용하여 전로 프로세스의 개념 모델을 설계한 사례가 제시되어 있다.

히트 개체가 제강·연주 공장에 도착하여 용선 및 용강 래들 개체와 결합하여 거쳐 가는 공정을 모듈로 구분하여 모델을 개발하였다. 주요 모듈에는 용선수선장, 탈황 프로세스, 전로 프로세스, 2차정련 프로세스, 연주 프로세스가 포함된다. 그리고 대차와 크레인을 이용하여 각 공정 사이를 이동하는 것을 표현하는 운반 모듈이 있다. 운반 모듈은 유사성이 커서 각 공정과 분리하여 별도의 모듈로 모델링 하였다.

이외에 새로운 히트 개체를 생성하는 모듈, 시뮬레이션 초기에 데이터를 읽어 들여 입력하는 모듈, 그리고 시뮬레이션이 종료되면 결과를 정리하여 출력하는 기능을 담당하는 모듈이 있다. 여기서는 주요 모듈을 중심으로 설명하기로 한다.

용선 수선장 모듈: 고로로부터 도착한 용선을 용선 래들에 붓는 작업을 표현하기 위해 히트 개체와 용선 래들 개체를 묶은 후(Arena의 Batch 사용), 대차를 통해 크레인 적재(loading) 지점으로 이동한다. 탈황 설비가 가용하

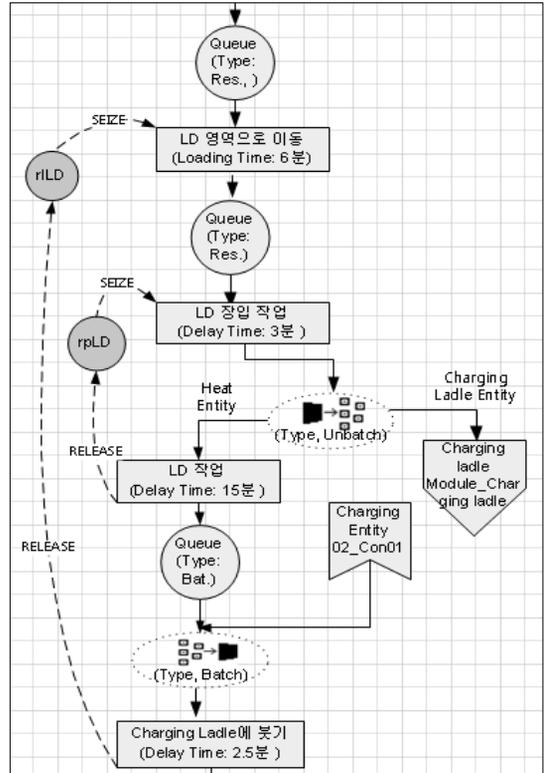


그림 3. 전로 프로세스 개념 모델

면 크레인을 사용해서 가용한 탈황 설비 앞으로 이동하여 대차에 양하(unloading)된다.

탈황 프로세스 모듈: 설비에 따라 배제(slag skimming) 작업과 본 작업(샘플링, 교반작업)이 별도의 장소에서 진행되는 경우에는 공정 내에서 대차로 이동하는 부수작업이 필요하다. 탈황 프로세스의 작업이 완료되면, 전로 운영 옵션에 따라 가용한 전로를 할당하고 크레인을 이용하여 전로 작업 공정으로 이동한다.

전로 프로세스 모듈: 전로는 공정 구성에 따라, 탈린, 탈탄, 일반 LD 전로로 사용될 수 있다. 탈린과 탈탄을 구분하여 별도의 전로에서 작업을 수행할 수 있고, 두 작업을 하나의 전로에서 수행할 수도 있다. 물론 작업 내용에 따라 작업 소요시간이 상이하고 스크랩이 장입되는 전로의 위치 또한 변경될 수 있다. 정수 또는 예기치 못한 정지에 대비하여 다양한 형태의 작업 패턴을 고려할 수 있고, 각 패턴에 대한 성능을 예측하는 것이 필요하다. 전로 운영 방식은 옵션 데이터에서 설정할 수 있다.

그림 3은 CoSiM을 이용하여 설계한 탈린 전로 프로세스 개념 모델의 일부이다. 탈황 프로세스를 완료한 후, 탈

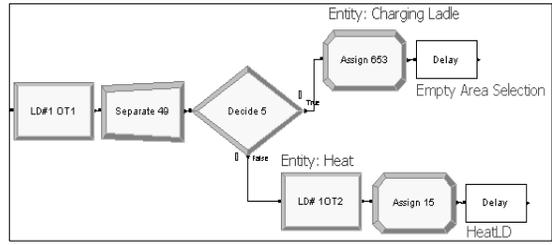
린 전로 프로세스가 다음 공정으로 선택되면, 먼저 논리적 자원(rLD)을 할당받아야 한다. 자원을 획득하면 이동 후, 물리적(실체) 자원(rpLD)을 할당 받고 장입을 수행한다. 논리 자원과 물리 자원을 사용하는 이유는 이동전에 사용할 자원을 확보해야 하는 상황을 모델링 하면서 자원의 가동률을 정확히 산출하기 위해서이다. 이제 히트 개체와 용선 래들이 분리된다. 분리된(빈) 용선 래들 개체는 용선 수선장으로 이동하며, 히트 개체에 대해 탈린 작업이 수행된다. 참고로 작업시간 15분은 가상으로 예시된 값이다. 작업이 완료된 히트 개체는 탈탄 전로나 LD 전로 작업에서 회수되어 대기 중인 용선 래들 개체와 배치로 묶인 후, 다음 탈탄 전로 공정으로 운반된다.

탈린 전로 프로세스에 대한 Arena 플로차트의 일부가 그림 4에 예시되어 있다. 그림 4(a)는 용선이 탈린 전로에 장입을 마친 후, 히트 개체가 용선 래들에서 분리되고 탈린 작업이 진행되는 부분이다. 그림 4(b)는 탈린 작업을 마친 히트 개체와 용선 래들 개체가 다시 배치로 합쳐진 후, 전로 운영 방식 옵션에 따라 작업한 전로의 위치에서 크레인을 호출하는 부분이다.

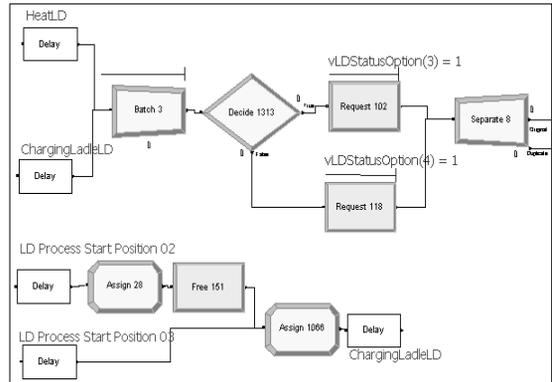
탈탄 전로, 일반 LD 전로 작업의 경우에는 먼저 스크랩 장입 작업이 수행된다. 지면 관계상 기술하지 않았지만, 전로 프로세스가 종료되면, 버블링(bubbling) 프로세스를 거친 후에 2차 정련 코드에 따라 추가 프로세스가 진행된다.

2차 정련 프로세스 모듈: 여기에는 LF(Ladle Furnace) 공정과 RH(Reinstahl Hutten Werke Heraus, 진공탈가스) 공정이 포함된다. LF 공정이 완료되면, 2차 정련 코드에 따라 연주기로 이동하거나, RH 공정을 추가로 거친 후, 연주기로 이동한다.

연주 프로세스 모듈: 연주 작업은 캐스트로 단위로 진행된다. 즉, 특정 캐스트가 시작되면 해당 캐스트에 소속되어 있는 히트들이 순서를 유지하면서 연속해서 동일 연주기에서 처리되어야 한다. 만일 히트들의 작업 순서가 바뀔 경우 ‘순서 위반’ 주조 단락(cast breakage)이 발생한다. 그리고 한 히트의 작업이 끝난 후, 일정시간(예를 들어 5분) 이내에 다음 히트가 도착하지 않으면, 연주 작업에 문제가 발생하므로 ‘시간 위반’ 주조 단락으로 처리한다. 한 캐스트의 주조가 끝나면, 60분 이상의 셋업이 발생한다. 이때 새로운 캐스트 내의 히트들이 주조 단락이 발생하지 않도록 하면서 연속해서 주조 작업을 수행할 수 있도록 일정 개수(예를 들면 2개)의 히트 개체가 기다리게 된다. 주조 단락이 발생하면, 주조 단락 보고서에 출력되어 스케줄을 수정하는데 활용된다.



(a)



(b)

그림 4. 전로 프로세스 Arena 플로차트의 일부

연주 작업시간은 투입계획 데이터를 통해 입력된 슬래브 두께, 주조 폭, 강종(표 3 참조)를 이용하여 결정된다. 작업을 마친 히트 개체는 용강 래들 개체와 분리되어 시스템을 빠져나가고, 용강 래들 개체는 슬래그 풋(slag pot) 위치에서 슬래그 제거 작업을 수행한 후, 용강 래들을 점검하고 수리하는 경동대로 이동한다.

운반 모듈: 히트와 래들 개체가 결합된 개체를 운반하는 수단은 지상 대차와 천정 크레인이다. 대차는 트랙 위에서 원격 조정으로 이동하며, 크레인은 안에 타고 있는 운전 작업자의 조작을 통해 베이(bay) 위에서 움직인다. 운반시간 데이터는 표 2와 같이 항목별로 세분화 하여 모델에 반영된다. 참고로 운반 설비의 속도와 가감속은 정해진 값이므로 Arena 모델에서 직접 입력하였다. 대차는 공정 내에서의 개체 운반과 더불어 임시 대기 장소의 역할을 담당한다. 크레인은 선택, 이동, 간섭, 대기, 이동의 5개 로직으로 세분화 하여 모델링 된다.

3. 적용 사례

이제 시뮬레이션을 실행한 예를 살펴보기로 하자. 모델은 Arena 버전 13.50으로 개발되었으며, 엑셀이 설치되

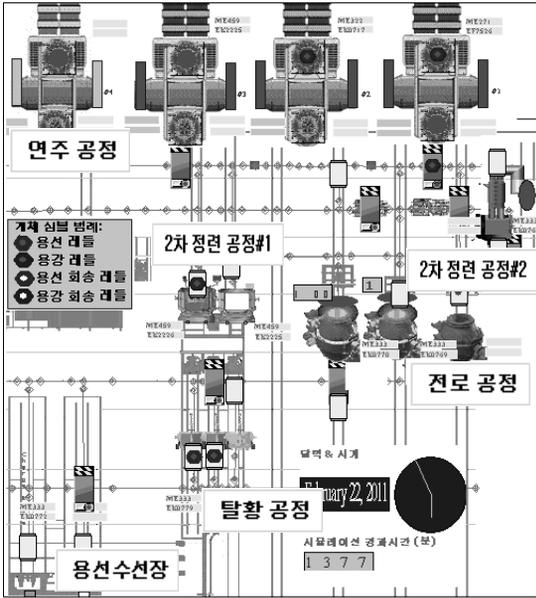


그림 5. 애니메이션 화면의 일부

어 있어야 한다. 1회 실행 속도가 보고서 출력을 포함하여 2~3분 내외이므로 하드웨어에 대한 요구 사항은 특별히 없다.

본 연구의 시뮬레이터는 설계와 운영을 동시에 고려하는 모델로 설계되었으므로 실제에 준하는 정교한 투입계획을 입력 데이터로 준비해야 하며, 2일 정도의 물량을 투입하는 종료형 시뮬레이션(terminating simulation) 형식을 취한다. 그런데 작업 중인 재공재고를 초기 시스템 상태로 반영하지 않으면 가동률과 생산량 통계량 수집과 관련하여 초기 편의 문제가 발생한다. 여기서는 시뮬레이션이 시작된 이후에 작업물이 도착하여 각 설비별로 처음으로 작업을 시작하는 시간 이후부터 1,440분(즉, 일일) 동안 수집한 데이터를 이용하여 통계량을 산출한다(표 6의 총가동 시간 부분 참조).

그림 5는 #1 전로를 탈린 전로로 사용하고 #2와 #3 전로를 탈탄 또는 일반 LD 전로로 사용하는 전로 운영 옵션을 적용하는 경우, 시뮬레이션 시작 이후 1,377분 시점의 애니메이션 화면의 일부이다. 탈황 작업 중인 개체와 전로 작업 중인 개체가 각각 2개이고, 주조 작업이 진행 중인 개체가 3개임을 보여주고 있다. 설비의 우측(또는 좌측)에 현재 작업 중인 개체의 캐스트 ID와 히트 ID가 표시되고 있다.

가동률 및 생산량 보고서가 표 6에 예시되어 있다. 출강 히트수와 연주 히트수는 모두 95개이다. 이 예에서 출

표 6. 가동률 및 생산량 보고서

생산 설비 가동률					
설비명	가동률 (%)	설비군별 평균 가동률(%)	작업시간 (분)	총가동 시간 (분)	생산량 (히트수)
#1 탈황	58.6	60.7	843.3	1,450.1	33
#2 탈황	61.1		887.9	1,453.3	29
#3 탈황	62.5		900.0	1,440.6	33
#1 전로	80.4	88.6	1,165.1	1,449.2	47
#2 전로	92.2		1,332.6	1,445.3	46
#3 전로	93.1		1,351.8	1,452.1	49
#1 노외정련	62.8	66.1	912.0	1,452.2	51
#2 노외정련	69.4		999.4	1,440.0	60
#1 연주기	86.9	86.5	1,260.3	1,450.3	23
#2 연주기	84.0		1,215.7	1,447.6	26
#3 연주기	82.5		1,168.0	1,440.0	24
#4 연주기	92.7		1,334.9	1,440.0	22

래들 가동률				
래들명	평균 사용대수	최소 사용대수	최대 사용대수	모든 투입대수
용선 래들	7.2	1.0	12.0	16
용강 래들	8.2	1.0	13.0	15

운반 설비 가동률				
설비명	가동률 (%)	설비군별 평균 가동률(%)	작업시간 (분)	총가동 시간 (분)
용선 크레인	62.9	56.1	912.8	1,451.2
용강 크레인	32.2		467.8	1,452.7
공래들 회수 크레인	63.4	47.5	913.0	1,440.0
연주 크레인	65.7		954.6	1,453.0
용선 수선장 대차	41.9	47.5	603.4	1,440.0
탈황 대차	63.0		908.5	1,442.1
전로 대차	56.3		810.7	1,440.0
공래들 회수 대차	33.5		482.8	1,441.3
2차정련 대차	42.6	613.4	1,440.0	

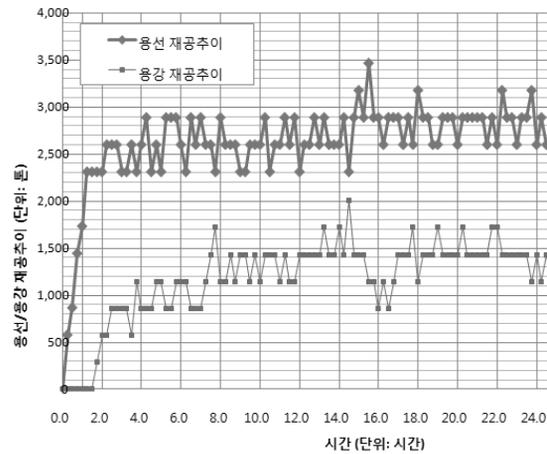


그림 6. 용선·용강 재공재고 추이도

강 히트수는 #2와 #3 전로의 생산량 합이 된다. 노외정련(2차 정련)의 경우 두 설비를 모두 거치는 히트가 있으므로 생산량을 단순히 합하면 95개보다 많게 나온다. 래들 가동률을 보면, 용선 및 용강 래들의 평균 사용대수는 각각 7.2대, 8.2대로 예상된다.

그림 6은 용선 및 용강 재공재고에 대한 추이도이다. 추이도를 이용하면 애니메이션을 계속해서 관찰하지 않

표 7. 히트 정체시간 상세 분석 보고서

No.	Heat ID	#1 용선 수선장			#1 탈황			#1 전로			#1 노외정련		
		대차	크레인	설비	대차	크레인	설비	대차	크레인	설비	대차	크레인	설비
전체 평균		1.20	2.13	14.07	0.00	1.41	9.26	23.79	6.33	7.89	0.00	7.27	15.09
6	EF7470		1.51			6.12	0.85						
8	EK0728		0.54						6.54	8.94			
9	EF7471	1.20	0.46										
16	EF7473		3.34			1.77	5.58					3.06	
19	EF7474		3.86										
22	EF7475		5.27										
74	EK2264		7.74	0.55				23.79	5.02	17.49			
76	EF7843		4.79	11.12								9.60	
79	EF7844		0.46	9.79									
82	EF7845		0.46	41.06		1.18	10.79					9.01	12.48
88	EF7847		0.46	5.79								9.01	17.70
90	EK2269		0.54	14.68					7.09	8.80			
93	EF7525		0.54	18.70					5.70	8.95			
96	EF7526		0.54	19.55		0.36	4.44		6.79	7.29			

표 8. 스케줄 보고서

No.	Cast ID	Heat ID	탈황			#1 전로			#2, #3 전로			연주기		
			호기	시작	완료	호기	시작	완료	호기	시작	완료	호기	시작	완료
4	ME263	EF7470	1	2/21 8:5	2/21 8:36				3	2/21 8:47	2/21 9:23	1	2/21 10:9	2/21 10:48
7	ME263	EF7471	3	2/21 8:42	2/21 9:12				3	2/21 9:24	2/21 10:0	1	2/21 10:48	2/21 11:27
8	ME325	EK0728	2	2/21 8:23	2/21 8:53	1	2/21 8:59	2/21 9:25	2	2/21 9:40	2/21 10:11	2	2/21 11:8	2/21 11:43
13	ME263	EF7473	1	2/21 9:55	2/21 10:26				3	2/21 10:38	2/21 11:14	1	2/21 12:6	2/21 12:45
16	ME263	EF7474	3	2/21 10:32	2/21 11:2				3	2/21 11:14	2/21 11:50	1	2/21 12:45	2/21 13:24
18	ME263	EF7475	2	2/21 11:9	2/21 11:40				3	2/21 11:50	2/21 12:26	1	2/21 13:24	2/21 14:3
75	ME341	EF7843	3	2/21 21:36	2/21 22:7				3	2/21 22:44	2/21 23:20	1	2/22 0:46	2/22 1:25
76	ME467	EK2264	2	2/21 21:6	2/21 21:37	1	2/21 21:53	2/21 22:43	2	2/21 23:5	2/21 23:36	3	2/22 0:57	2/22 1:36
78	ME341	EF7844	2	2/21 22:2	2/21 22:33				3	2/21 23:22	2/21 23:58	1	2/22 1:25	2/22 2:4
80	ME341	EF7845	1	2/21 23:11	2/21 23:42				3	2/21 23:59	2/22 0:35	1	2/22 2:4	2/22 2:43
88	ME341	EF7847	2	2/22 0:19	2/22 0:50				3	2/22 1:11	2/22 1:47	1	2/22 3:22	2/22 4:1
92	ME467	EK2269	3	2/22 0:43	2/22 1:14	1	2/22 1:23	2/22 1:49	2	2/22 2:05	2/22 2:36	3	2/22 4:12	2/22 4:51
97	ME271	EF7525	2	2/22 1:19	2/22 1:50	1	2/22 2:00	2/22 2:26	2	2/22 2:40	2/22 3:11	1	2/22 5:1	2/22 5:36
100	ME271	EF7526	1	2/22 1:56	2/22 2:27	1	2/22 2:37	2/22 3:03	2	2/22 3:17	2/22 3:48	1	2/22 5:36	2/22 6:11

아도 시스템의 전반적인 상태를 파악할 수 있다.

히트 정체시간 상세 분석 보고서의 일부가 표 7에 제시되어 있다. #1 용선수선장을 통해 투입된 히트 중에서 #1 탈황, #1 전로, #1 노외정련 설비를 사용한 경우의 정체시간을 대차, 크레인, 후공정 설비로 구분하여 상세 분석한 것이다. 이 보고서를 이용하면 어느 부분에서 정체가 많이 발생하는지를 정확히 파악할 수 있다. 또한 모델 개발 과정에서는 이 보고서를 이용하여 시뮬레이션 모델과 산출물의 정확도를 체크하였다.

표 7에 있는 히트들에 대해 탈황, 전로, 연주 작업 스케줄 부분만 발췌하여 정리한 것이 표 8이다. 표 7과 표 8의 히트 ID 순서가 다른 이유는 정체시간 상세 분석 보고서가 작업 시점에 작성되는 반면에 스케줄 보고서는 연주 작업이 완료되어 최종적으로 작업이 종료된 순서대로 작성되기 때문이다. 제강·연주공장에 먼저 투입되었더라도 거치는 공정이 다르기 때문에 완료되는 순서는 늦어질 수

있다. 표 8에서 히트 ID EK0728은 #1 전로에서 탈린 작업을 거친 후, #2 전로에서 탈탄 작업을 수행하였음을 알 수 있다.

4. 결론

무한 경쟁과 지하자원 고갈 등으로 원자재 확보와 아울러 원자재 가공 전통산업의 생산성 향상이 화두로 대두되고 있다. 향후, 원자재의 안정적인 확보와 원자재 가공 전통산업의 안정 없이는 우리나라의 주력 산업은 불안정한 위치에 놓일 가능성이 클 것으로 예상된다. IT·서비스 산업 이외에 제철과 같은 전통 산업에도 좀 더 관심을 가져야 할 것으로 사료된다. 본 논문은 일관제철소의 제강·연주 공장 시뮬레이터를 제시하였다. 시뮬레이터는 용선 예비처리, 전로, 노외정련, 연주 공정으로 구성되며, 사용 편의성을 높이기 위해 입출력 매체를 엑셀로 처리하였으

며, 시뮬레이션을 위해 필요한 다양한 항목들을 옵션으로 설정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제안하는 시뮬레이터의 기대 효과는 다음과 같다. 먼저 생산능력 관점에서 제강·연주 공장 설계안의 적정성을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. 이를 통하여 각 생산설비 규모의 적정성, 운반 장비인 대차와 크레인, 용선·용강 레들의 적정대수를 산정할 수 있다. 그리고 제강 공장의 최적 운영 방안을 도출하고 검증하는 틀로서 활용 가치가 크다. 아울러 공장에 투입되어 작업 중인 재공재고에 대한 정보를 반영하도록 모델을 확장하면 공정별 설비별로 작업을 배정하는 스케줄을 생성하거나 평가하는 도구로 활용될 수 있을 것이다.

향후 연구 방향으로는 첫째 제강 공장의 최적 운영 패턴 설계 시스템과의 연계를 고려할 수 있다. 제철소는 고가의 장비가 투입되고 24시간 가동하는 공장으로서 생산성을 최대한 높이기 위한 조업 패턴과 제품 조합의 설정에 대한 연구가 필요한데, 이때 본 논문에서 제안하는 시뮬레이터와 연계하면 대안에 대한 성능을 신속하고 정확하게 예측할 수 있으며, 애니메이션을 통하여 시스템에 대한 통찰력 향상과 부서간의 커뮤니케이션 증대 면에서 적지 않은 효과를 기대할 수 있다. 둘째로 고로에서 제강공장 사이의 용선 운반 및 용선 임시 보관을 담당하는 TLC 적정대수 산정과 TLC 운영 방안 연구를 지원하는 틀로 확장될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 김광수(1990), “스테인레스 스틸 생산공정의 시뮬레이션 연구”, *RIST 연구논문*, 제4권 제4호, pp. 203-207.
2. 김재련(1996), *컴퓨터 시뮬레이션*, 박영사, 서울.
3. 김종한, 김영호, 박진우(1998), “시뮬레이션을 이용한 기관차 용선수송 작업 능률향상 방안에 관한 연구”, *한국시물*

- 레이션학회 '98 춘계학술대회 논문집, 1998.5.2., 세종대학교, 서울.
4. 김종한, 박상혁, 위현곤(1999), “시뮬레이션을 이용한 용선수송작업 능률향상 방안에 관한 연구”, *RIST 연구논문*, 제13권 제3호, pp. 343-349.
5. 윤종계(1996), “포항제철소 2후판공장 열처리설비 증설관련 생산배분 분석”, *한국시뮬레이션학회 1996년 춘계학술대회논문집*, 1996.5, pp. 80-83.
6. 윤종계(2001), *제강공장의 생산능력 분석 및 Cast Sequencing 알고리즘 개발*, 석사학위논문, 포항공과대학교.
7. 정원용, 최영대(1995), “AIM을 이용한 Yard Simulation”, *한국시뮬레이션학회 1995년 춘계학술대회논문집*, 1995.5, pp. 59-59.
8. 포스코(2011), <http://www.posco.co.kr/> (검색일: 2011.02.22.)
9. 포스코경영연구소 철강용어 DB(2011), <http://www.posri.re.kr/PosriDB/Dic/Steel/SteelWordList.asp> (검색일: 2011.02.22.)
10. 한국철강협회(2011), <http://www.kosa.or.kr/> (검색일: 2011.02.22.)
11. 현대제철(2011), <http://www.hyundai-steel.com/> (검색일: 2011.02.22.)
12. Law, Averill M. (2007), *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill Inc, NY.
13. Pegden, C. Dennis (2005), “Future Directions in Simulation Modeling”, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, Orlando, December 4-7, 2005.
14. Rossetti, Manuel D. (2009), *Simulation Modeling and Arena*, (장성용, 문덕희, 이영해, 최성훈, 홍성조 옮김 (2009), *ARENA를 활용한 시스템 모델링 및 시뮬레이션*, 텍스트북스, 서울), John Wiley & Sons, NJ.
15. Vasudevan, K., Lammers, E.J., Williams, E.J., and Ugen, O.M. (2010), “Application of Simulation to Design and Operation of Steel Mill Devoted to Manufacture of Line Pipes”, *Advances in System Simulation (SIMUL)*, 2010 Second International Conference, 22-27, August, 2010, Nice, France, pp. 1-6.



최성훈 (shchoi@smu.ac.kr)

1988 KAIST 산업공학과(공학석사)
2002 KAIST 산업공학과(공학박사)
2003~현재 상명대학교 경영공학과 부교수 재직중

관심분야 : 컴퓨터 시뮬레이션 이론 및 응용, 시스템의 설계 및 운영 방법론