

◆ 특집 ◆ 지속 성장 가능 생산시스템

디지털 공장에 기반한 확장형 제조실행시스템 적용 과제

Suggestions for Implementation of the Digital Factory-Based Extended Manufacturing Execution System

✉이규봉¹✉Gyu-Bong Lee¹

1 한국생산기술연구원 지식기반서비스본부 (Knowledge Based Manufacturing Service Division, KITECH)

✉ Corresponding author: gblee@kitech.re.kr, Tel: 032-850-0573

Key Words: Digital Factory-Based Extended Manufacturing Execution System (디지털 공장에 기반한 확장형 제조실행시스템), Product Lifecycle Management (제품수명주기관리), Optimization Problem of Linear Programming (선형계획법 최적화 문제), Achievability of Work Plan (작업계획 달성률), Simulation Control Language (시뮬레이션 제어 로직)

기호설명

T_s = total working hour in a foundry shop floor

C_i = cycle time required to make a cast-iron product i

X_i = number of a cast-iron product i

W = total weight of cast-iron products to be manufactured within total working hour

1. 서론

최근 인터넷과 정보기술이 빠르게 발전하면서 제조업의 환경도 크게 변화하고 있다. 이러한 제조업 환경 변화, 글로벌 시장에서의 무한 경쟁과 제품에 대한 고객의 다양한 요구 등에 신속하게 대응하기 위해서 기업은 새로운 전략을 모색하게 되었다. 이러한 전략의 일환으로 제조업체들은 다양한 정보시스템을 도입하여 제품 개발 및 생산현장을 지원하고 있으나 일부 기업을 제외하고는 그 효과가 미미한 실정이다. 모든 기업들은 제품 혁신, 생산공정의 유연성과 민첩성, 높은 생산성과 낮은 생산비용 등을 추구하고 있으나 이를 지원하는 방법론이나 정보시스템은 너무도 다양할 뿐만 아니라 나름대로의 제약을 갖고 있어 가장 적합한

것을 선택하여 활용한다는 일이 매우 어렵기 때문이다.

이러한 현실을 고려하여 본 논문에서는 자동차 혹은 기계 부품을 제조하는 중소기업에 적합한 생산정보시스템으로서 디지털 공장에 기반한 확장형 제조실행시스템(Digital Factory-Based Extended Manufacturing Execution System: DF-EMES)을 제안하고자 한다. 이것은 실제 공장과 동일한 규모의 가상 공장을 사이버 공간에 구축하고 다양한 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행함으로써 실제 공장에서 발생할 수 있는 문제점들을 사전에 검증하기 위한 일종의 생산공정 혁신 방법론이다. 여기서는 이러한 문제점들에 대한 개선안을 도출하고 이를 검증하여 생산계획에 반영함으로써 생산현장의 최적 운영을 지원하는데 일차적 목표를 두고 있다. 기존의 생산계획시스템들은 대부분 주요 조건들을 제약하여 문제를 단순화하고, 이러한 단순 모델에 대하여 개략적인 해를 구함으로써 생산계획과 실행계획이 실질적으로 연계되지 못하여 많은 비용의 낭비를 초래하고 있다(Song¹). 그러나 DF-EMES에서는 제약조건 없이 전체 제조공정에 대하여 모의실행을 수행함으로써 요즈음과 같이 다양한 고객으로부터 수시로 변화하는 주문에 생산현장이

신속하게 대응하는 것을 지원하는 데 매우 효과적이다. 그러므로 DF-EMES의 디지털 공장 혹은 디지털 제조 기법은 제품개발 영역(Product Domain)과 제조영역(Production Domain)을 연결하는 가교 역할을 수행하여 제조공정을 검증하고 최적화하는데 기여함으로써 PLM(Product Lifecycle Management)의 완성도를 높여주기 때문에 최근에 그 중요성이 크게 부각되면서 많은 관심을 끌고 있다(Figure 1).

DF-EMES는 제조공정의 3차원 시뮬레이션 분석 결과를 MES 및 ERP(Enterprise Resource Planning)시스템과 연동하여 최고경영자가 최적의 경영의사 결정을 내리는데 필요한 정보를 제공할 수 있도록 하는 전사적 제조공정 모의실행 분석기법 통합시스템(Lee³)과 기본 개념은 유사하지만 실제 적용 측면에서는 매우 다르다. 다시 말해서 DF-EMES는 국내 중소 제조업체 현실에 적합하게 생산현장의 유비쿼터스화를 유도하고 이의 통합관리 기능과 ERP 기능 일부를 확장형 MES에 포함시키고자 한다. 생산현장의 유비쿼터스화는 향후 실현될 것으로 예상되는 SaaS(Software as a Service) 기반의 정보시스템(Cha⁴) 운영을 대비하는 것으로 확장형 제조실행시스템에서는 반드시 요구되는 전제조건이다.

2. DF-EMES 개념

2.1 디지털 공장의 기능

Figure 2에서 보는 바와 같이 DF-EMES는 디지털 공장, EMES 플랫폼, EMES 응용 모듈로 이루어진다. 디지털 공장은 실제 생산현장에 대한 3차원 모델링 결과를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하여 생산계획과 자원의 최적화를 지원하며 제조실행을 위한 마스터 데이터를 저장한다.

이러한 DF-EMES에서는 기업의 전반적인 자원을 디지털 정보로 표현하고 이를 활용하여 가상현실공장을 컴퓨터에 구축하며, 그리고 제조공정 개선 활동을 사전에 모의 실행함으로써 생산현장의 불량을 최소화할 수 있는 최적화된 공장 운영을 지원하여 실질적인 원가절감 효과를 얻을 수 있다. 또한 고도의 유무선 통신장비를 이용하여 생산현장의 설비를 직접 모니터링하고, 생산 실적을 실시간 집계함으로써 통계적 공정관리, 최적화된 작업계획 및 관리, 전사적 자원관리가 실시간으로 이루어질 수 있기 때문에 최고 경영자의 의사결정을 신속하게 지원할 수도 있다.

DF-EMES의 디지털 공장에서는 먼저 중장기 판매 및 생산 계획과 소위 PPRS(Product, Process, Resources, and Schedule) 등에 관한 생산 정보를 이용하여 생산계획부서에서 작성한 제조실행계획(Manufacturing Execution Plan: MEP) 초안을 접수한

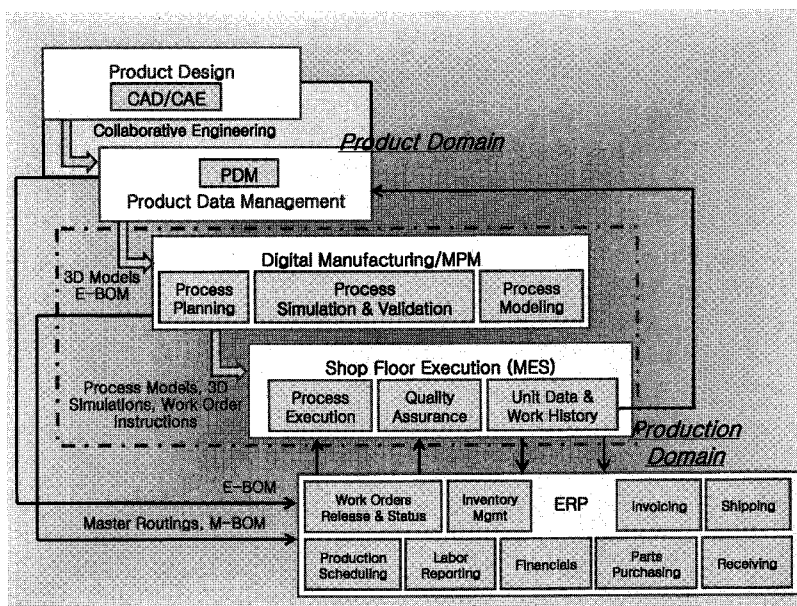


Fig. 1 Digital factory improves PLM technology by linking product design

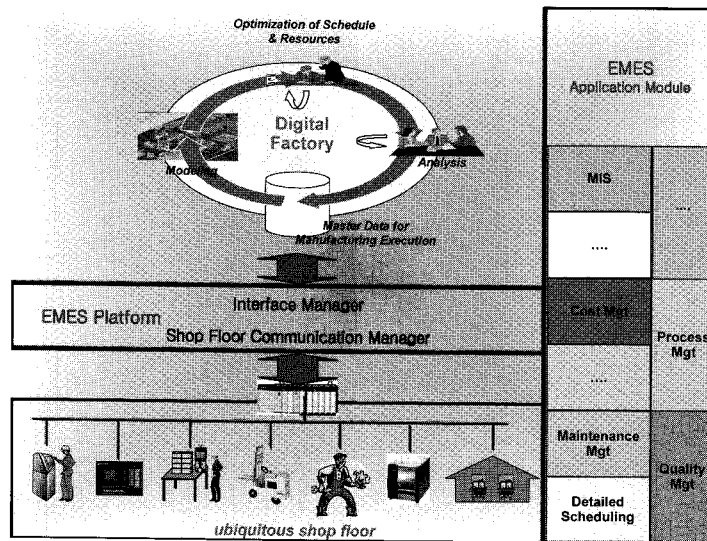


Fig. 2 Concept diagram of DF-EMES

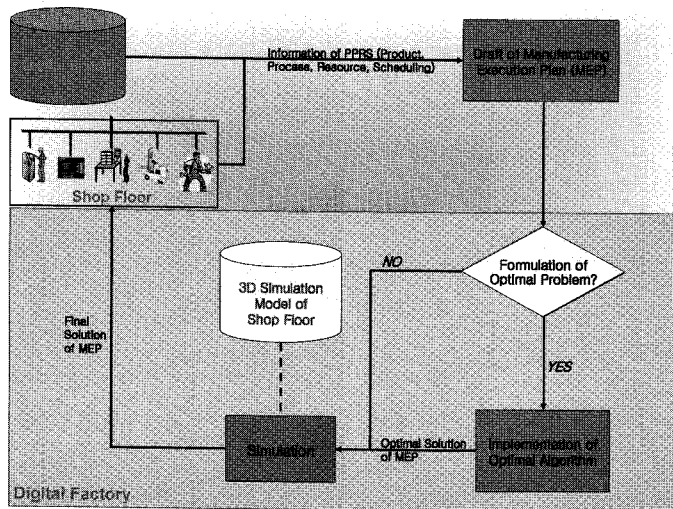


Fig. 3 Functions of digital factory

다(Figure 3). 이 계획안을 최적화 문제로 수식화할 수 있는지를 검토하고, 이것이 가능하면 최적화 알고리즘을 사용하여 제조실행계획에 대한 최적해를 구한다. 그리고 이미 구축되어 있는 3 차원 시뮬레이션 모델을 이용하여 이 최적해의 타당성내지는 신뢰도를 검토하고, 이 검토가 완료되면 최종 제조실행계획이 만들어져서 생산현장으로 보내지게 된다.

EMES 플랫폼은 디지털 공장과 EMES 응용 모듈의 연계를 지원하고, 작업현장의 유무선 통신설

비로부터 발생하는 정보의 통합관리를 지원한다. EMES 응용 모듈은 생산계획, 설비관리 등과 같은 기존의 MES 기능을 포함하여 중소 제조업체에서 요구하는 모든 기능을 지원한다.

2.2 디지털 공장에서의 정보 흐름

Figure 3 와 같이 디지털 공장이 제 기능을 발휘하는 과정에서는 많은 정보들이 움직이기 마련이다. 즉, Figure 4 에서 보는 바와 같이 ERP 와 같은 레가시 시스템이 보유하고 있는 자원이나 재고와

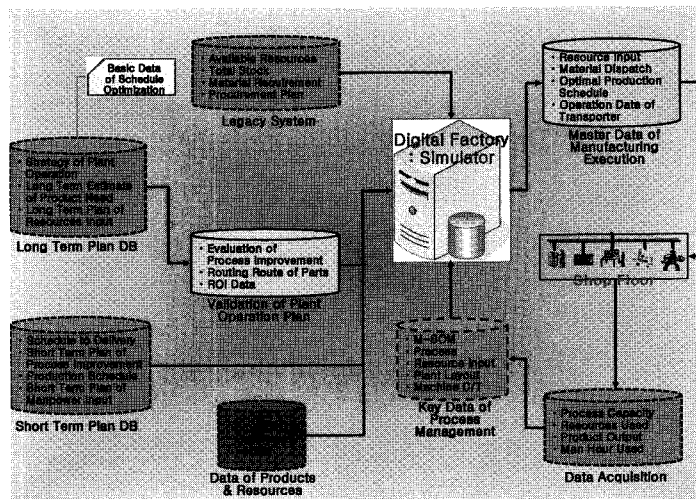


Fig. 4 Data flow in digital factory

같은 기본 정보, 단기 및 장기 계획에 필요한 공장운영 전략이나 제품판매 예측 및 납기뿐만 아니라 공정개선 계획 및 인력투입 계획 등과 같은 다양한 생산정보, 그리고 공정관리를 위한 자재 및 설비 등에 대한 정보를 이용하여 디지털 공장은 제조실행을 위한 마스터 데이터를 생성한다. 이것이 생산현장으로 내려 가고 생산현장에서 집계된 실적 정보는 다시 다음 공정관리를 위한 기본 정보로 활용된다.

3. 적용 사례

3.1 주물공장 업무 프로세스

주물품을 생산하는 J 사의 경우, 기존의 전체 업무 프로세스와 정보시스템은 Figure 5(a)와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 주물품 제조는 용해, 조형, 주입, 탈사, 후처리 등의 공정을 거쳐 이루어지며, 자재 구매를 위해서는 조달물류시스템을, 생산현장의 품질관리를 위해서는 품질자원관리시스템을 활용하고 있다. 제품 수량, 납기 등과 같은 수주 정보를 고려하여 월간 생산계획서를 작성하고, 월간 생산계획서와 긴급 주문 및 현장 상황 등을 고려하여 일일 생산계획서를 작성한 후 이를 현장에 내려 보내고 있다.

그러나 DF-EMES 가 도입된다면 전체 업무 프로세스 및 정보시스템은 Figure 5(b)와 같이 수정될 것이다. 언뜻 보기에 별 변화가 없는 것처럼 보이

지만, 앞에서 설명한 바와 같이 디지털 공장 안에서 수주 정보와 조형기계, 용해로 등과 같은 설비가동 현황 등을 최대한 반영하여 시뮬레이션을 수행하고 이를 토대로 최적의 생산계획서를 작성하게 되는 것이다. 물론 이를 위해서는 사전에 생산현장에 대한 모델링이 완성되어 있어야 한다.

3.2 디지털 공장의 최적 생산계획 수립

J 사의 경우 생산계획 담당자는 매일 생산하여야 할 주물품과 생산수량을 결정하여 작업계획서를 조형공정 작업자에게 내려 보내고 작업자는 이에 따라 주물 금형을 준비하고 작업을 하게 된다. 이 경우 주물품의 종류와 수량뿐만 아니라 전체 작업시간을 준수하는 일이 매우 중요하다. 작업시간은 원가와 직접 연결되기 때문이다.

따라서 일일 생산계획을 다음과 같은 선형계획법 최적화 문제로 수식화 할 수 있다.

$$\min T_s = \sum C_i \cdot X_i + T_1 + T_2 \tag{1}$$

$$\text{subject to } t_{\min} \leq T_s \leq t_{\max} \tag{2}$$

$$x_{\min} \leq X_i \leq x_{\max} \tag{3}$$

$$W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \tag{4}$$

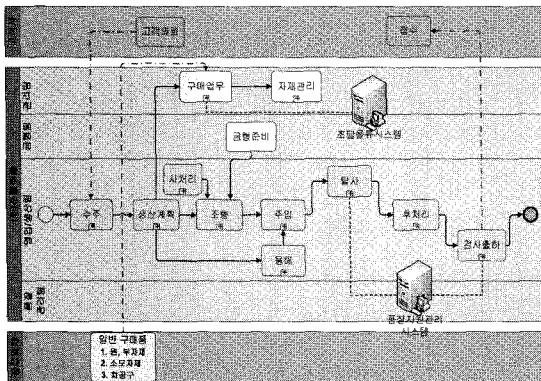
$$W = \sum u_i \cdot X_i \tag{5}$$

여기서 목적 함수 T_s 는 전체 작업 시간을, C_i 는 특정 주물품 하나를 생산하는데 소요되는 사이클 타임을, X_i 는 설계 변수로서 생산하여야 할 주물품의 수량을 나타낸다. T_1 와 T_2 는 상수로서 금형 교체 시간과 기타 비작업 시간을 나타낸다. 그리고 t_{min} 과 t_{max} 는 전체 작업 시간의 최소값과 최대값을 의미하며, x_{min} 과 x_{max} 는 주물품 생산 수량의 최소값과 최대값을 의미한다. w_{min} 과 w_{max} 는 전체 주물품 중량 W 의 최소값과 최대값을 의미하며 u_i 는 특정 주물품의 단위 중량을 나타낸다.

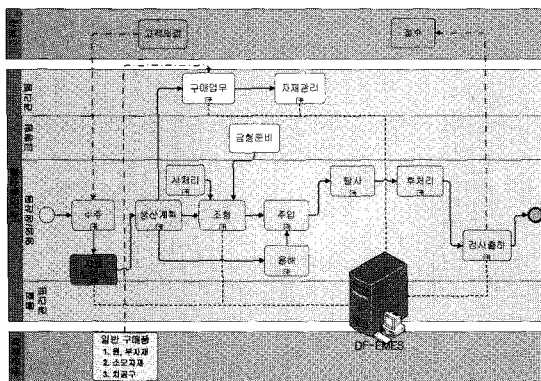
생산계획 담당자가 작성한 Table 1의 작업계획 1이 최적화 문제 식(1)을 풀기 위한 설계 변수 X_i 의 초기값으로 주어지며, 식(1)의 해가 작업계획 2로 제시되었다. 이 작업계획 2를 다시 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 경우에 따라서는 최적해라 하더라도 생산현장 상황에 다소 적합하지 않을 수가 있으므로 반드시 시뮬레이션에 의한 검증이 필요하다. 이러한 검증을 위하여 본 연구에서는 공정흐름의 시뮬레이션과 통계적 결과

분석이 뛰어난 QUEST 프로그램을 이용하였다.

시뮬레이션 모델을 구축하기 위하여 현재의 공정 상황을 상세하게 검토할 필요가 있다. 공정에 투입되는 자재 및 생산 제품의 종류와 수량, 생산 설비의 종류와 사양, 작업 시간 등은 매우 중요한 기초 정보이다. 조형공정 현장을 방문하고 관련 도면 및 작업 일보를 검토하여 공정을 이해하고 시뮬레이션 입력 정보를 정의하여 Figure 6와 같은 모델링 결과를 얻을 수 있었다. 이 그림은 조형공정에서 사용되는 조형기, Turn-over Machine, 컨베이어 등에 대한 모델링 결과와 SCL(Simulation Control Language) 언어를 이용하여 실제 시뮬레이션을 위하여 작성한 로직 프로그램 일부를 보여주고 있다. 모델링의 정확도는 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 끼치므로 모델링 과정에서는 상세한 동작규칙이 포함되어야 한다. 또한 작업자의 직접 작업 및 물류 이송 부분에 대한 상세 거동 로직을 고려하고, 라인과 라인이 만나거나 교차하는 부분에 대한 상세로직을 부여한다.



(a) AS-IS



(b) TO-BE

Fig. 5 Work process in a foundry plant of J company

3.3 결과 및 토의

Table 1은 특정 조형공정에 대한 작업계획과 실제 작업실적을 비교한 것이다. 작업계획 1은 최적화나 시뮬레이션 개념이 전혀 고려되지 않은 기존의 방식대로 J사 생산계획 담당자가 작성한 자료이다. 표에서 보는 바와 같이 실제로는 주물품마다 고유의 사이클 타임이 주어져 있으나, 작업계획 1에서는 이를 고려하지 않고 10시간 정도의 작업시간을 고려하여 생산계획을 작성한 것이다. 작업계획 2는 최적화 문제 식(1)-(5)의 해를 구해서 얻어진 결과이다.

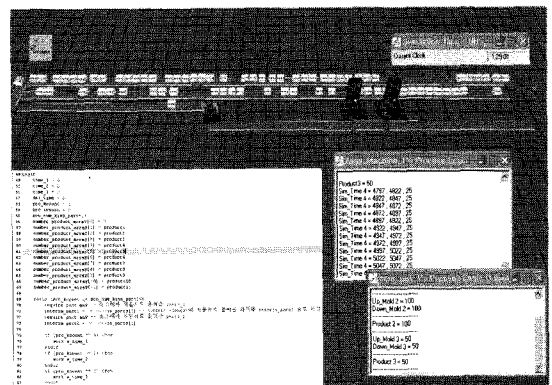


Fig. 6 Simulation model and logic program of mold manufacturing process

Table 1 Work plans for manufacturing cast-iron products and their comparison with the results

product code	name of product	unit weight (kg)	cycle time (sec)	work plan 1 (A)	work plan 2 (B)	work plan 3 (C)	no. of products manufactured (D)	ratio (%)		
								D/A	D/B	D/C
1000	DRUM	55.7	23.0	50	51	52	52	104	101.96	100
220	F.W.H	55.0	24.0	100	101	100	98	98	97.03	98
161	F.W.H	45.0	24.0	50	50	50	56	112	112	112
192	F.W.H	50.8	25.0	100	100	102	93	93	93	91.18
3027	T.G.C	24.0	22.0	100	95	95	100	100	105.26	105.26
C-531	CASTING	28.5	22.0	100	100	100	100	100	100	100
232A	F.W.	55.8	23.0	125	129	128	124	99.2	96.12	96.88
380	HUB	22.1	24.0	200	195	195	192	96	98.46	98.46
2C000	B/CAP	3.8	26.0	300	300	300	296	98.67	98.67	98.67
1010	HUB	30.3	26.0	100	95	100	100	100	105.26	100
1170	HUB	34.5	22.0	100	100	100	102	102	102	102
sum				1,325	1,316	1,322	1,313	99.09	99.77	99.32
total work hour(sec)				36,000	37,254	37,410	37,902			

최적화 문제를 풀 때 각 부품에 대한 사이클 타임은 고려되었으나 과거의 불량률 데이터는 고려되지 않았다. 작업계획 3 은 과거의 불량률이나 작업시간 등에 관한 데이터를 참고하여 작업계획 2 를 약간 수정한 후 시물레이션을 수행하여 최종적으로 검증한 결과이다. 작업 달성률을 비교하여 보면 작업계획 3 보다 작업계획 2 가 99.77%로 더 높는데, 이는 실제 작업에서는 과거 평균치보다 훨씬 높은 30 개의 조형에서 불량률이 발생하였으나 작업계획 2 를 검증하는 과정에서 이것을 정확히 예측한다는 것이 매우 어려웠기 때문이다.

실제 작업에서는 1,313 개를 제조하였으나 작업 시간이 37,902 초로 원래 예상 시간보다 많이 소요된 것도 이러한 불량 발생 때문이다. 그렇지만 생산계획 담당자가 작성하는 작업계획 1 보다는 작업계획 2 나 3 이 작업 달성률이나 작업시간 측면에서 실제 작업과 더 가깝다는 것을 알 수 있다. 결국, 시물레이션에 기반한 작업계획이 과거의 유사한 작업실적을 보다 정확하게 반영할 수 있기 때문에 이러한 결과가 얻어질 수 있다고 판단된다. 시물레이션을 수행하지 않을 경우, 과거의 작업실적, 설비가동 효율 혹은 설비 비가동 예상시간, 용탕작업 상태 등과 같은 여러 가지 변수를 충분히 고려하여 작업계획을 작성한다는 것은 거의 불가능하다.

4. 결론

국내 중소기업들이 글로벌 경쟁력을 갖기 위해서는 제조시스템의 혁신과 이를 뒷받침할 수 있는 새로운 패러다임의 정보시스템 구축이 절실히 요구된다. 이러한 상황에서 본 논문에서 제안한 DF-EMES 시스템은 영세한 중소 제조업체에게 적절한 솔루션이 될 것으로 확신한다. 중소기업이 다양한 정보시스템을 도입하여 업무에 적용하기에는 여러 가지 여건상 다소 무리가 있기 때문이다.

디지털 공장에서 수행하는 시물레이션은 긴급한 생산계획의 변경에 유연하게 대응할 수 있도록 도와준다. 현재는 현장 작업일지를 수기로 작성하고 있기 때문에 오기 가능성 및 임의성이 존재하고 실적의 적기 반영이 어려워 실시간 실적관리가 어려우며, 이것은 다시 생산계획 수립에 차질을 초래하는 악순환이 일어나고 있으나 DF-EMES 는 이러한 문제점을 개선시킬 수 있다. 보다 장기적으로는 현장 전체에 대한 완전한 디지털 공장이 구축되면, 제조공정의 문제점을 발견하고 개선할 수 있는 보다 체계적인 방법론을 정립할 수 있을 것이다.

본 논문에서 제시한 DF-EMES 개념을 주물공장의 조형공정에 적용해 보았다. 최적화 알고리즘과 시물레이션에 기반한 작업계획의 달성률이 기

존의 작업계획 달성률보다 약 0.3~0.8% 높게 나타났다. 이 수치는 매우 미미해 보이지만 월간 혹은 연간으로 환산할 경우 무시할 수 없는 작업 물량이 될 수도 있다. 작업계획과 실제 작업에서의 작업시간이 많이 다른 이유는 작업계획을 작성할 때 실제 작업에서 일어날 수 있는 불량률 및 설비 비가동 시간을 정확하게 고려하지 못했기 때문이며, 이는 추후 개선되어야 할 사항이다.

향후에는 본 연구 결과를 바탕으로 주물공장의 전 공정에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하고 이를 기반으로 제조실행계획을 수립하고, 이 결과를 공장 전체 운영시스템에 대한 실시간 데이터와 연동하는 방안에 대한 연구를 수행할 예정이다. 보다 장기적으로는 생산 및 물류 정보를 실시간으로 집계, 분석하고 제조현장의 설비 및 인력 등을 효과적으로 관리하여 원가절감, 생산성 향상, 리드타임 단축, 품질향상 등을 도모할 수 있도록, 그리고 최적화와 시뮬레이션의 역할과 기능이 더욱 확대된 효율적인 DF-EMES 시스템을 완성할 수 있도록 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Song, Y. J., Lee, K. K., Lee, D. K., Woo, J. H. and Shin, J. G., "Simulation Based Execution Support System," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 913-914, 2008.
2. Slansky, D., "Integrating PLM with the Shop Floor : Validating As-Built to As-Designed," ARC Advisory Group, <http://www.arcweb.com>
3. Lee, T. G., "Total Analysis & Simulation Technique of Manufacturing Process; TAST," Project Proposal submitted to Ministry of Knowledge Economy, Chung Nam Techno Park, 2008.
4. Cha, S. K., "Methodology of Application of Knowledge Service to Realize u-Manufacturing in Global Manufacturing," General Seminar, Service Science National Forum, 2008.
5. Lee, K. K., "Simulation-based Ship Production Execution System for a Panel Block Shop," Doctoral Dissertation, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, 2008.
6. Delmia Corporation, "QUEST User Manual," 2002.