

자동차 산업분야의 효과적인 제조협업 구현을 위한 디지털 엔지니어링 적용 방법론에 대한 연구

이유철^{1*} · 배혜림²

¹씨디어댑코코리아(주) / ²부산대학교 산업공학과

The Methodologies of Digital Engineering Applications to Manufacturing Collaborations in Automotive Industries

YooChul Lee¹ · Hyerim Bae²

¹CD-adapco Group, Korea Office, #1508 CentumLeaders Mark, 1514, U2-Dong, HaeundaeGu, Busan, 612-022, Korea

²Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

Very special and tentative considerations including emotional aspects are required to apply any new mechanism and methodologies for manufacturing fields due to several reasons. This study reviews the characteristics of manufacturing collaborations through specific cases applied digital engineering to enhance the collaboration performance in manufacturing domains. Two cases of collaboration related with automotive manufacturing process are analyzed to extract meaningful insights for better collaboration model suggestions. The first case deals the robot simulation to find out advance errors in jig and fixture design during the various welding process of body-in-whites. The effective communication protocol to share their idea and agreed schedules are essential for this collaboration. More severe requirement of collaboration between R&D and manufacturing departments are studied in the second case for e-coating process. The invisible barriers among different departments are lowered by the process application of Computer Aided Engineering which can make sure their own interesting effectively. Those technical and managerial suggestions can be used when the information system and standard process are sought to implement and update not only when innovation projects are executed.

Keyword: manufacturing collaboration, digital manufacturing, computer aided engineering(CAE), knowledge-based engineering(KBE)

1. 서론

최근 제조 및 서비스 산업 전반에 걸친 경쟁적인 경영환경은 제조업의 운영방식의 변화를 요구하게 되었다. 이는 새로운 비즈니스 모델, 비즈니스 전략 및 운영원칙을 포함한 기술적 역량 전반에 심각한 개선을 요구하게 되었다(Ermilova and Afsar-

manesh, 2006; Harzallah and Vernadat, 2002). “제조”와 관련된 일련의 활동들이 더 이상 분리/독립되어 고려할 수 없음을 주지의 사실이다. 이러한 점은 다수의 사람들이 각 개인 스스로의 힘에 의해 가능한 것 보다 더 향상된 목적을 성취하기 위해 상호 의존적으로 함께 일을 한다는 “협업”의 개념이 이미 제조에 포함되어 있음을 알 수 있다. 하지만, 인류문명과 역사를 같이하

*연락처 : 이유철 부장, 612-022 부산광역시 해운대구 우2동 1514 센텀리더스마크 1508호,

Fax : 051-745-8021, E-mail : yoochul.lee@gmail.com

투고일(2011년 12월 10일), 심사일(1차 : 2012년 01월 20일), 게재확정일(2012년 02월 06일).

는 협업은 때로는 당연시되고, 무시되거나 잘못 이해되어 전 직업분야에서 동시 다발적인 자연스러운 현상으로 받아들여지고 있다. 현재 우리는 사람간의 협업(human collaboration)에 대한 기초적인 이해가 부족한 실정이다. 이에 따라 협업의 성과물은 매번 쉽게 평가하고 인식할 수 있지만, 바람직한 협업을 다시 생성하거나(re-create), 더 발전적인 결과를 얻기 위해 엔지니어들을 교육하는데 필요한 일반적인 방법론은 아주 제한적이라 할 수 있다(Hammond *et al.*, 2001). 기업의 최우선적인 목표인 존속, 유지 및 발전을 통한 주주가치의 극대화라는 관점에서 보면, 제조 협업의 궁극적인 목적 또한 제조의 관점에서 관련 고객을 포함한 참여 이해당사자의 상호 이익증진이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이와 관련된 기업 활동을 엔지니어링의 분야에 한정지어 보고자 한다. 엔지니어링은 급변하는 사회적 요구를 만족시키기 위한 기술, 서비스 또는 시스템을 포함하는 어떤 특정 목적의 기능을 달성하기 위한 활동이라 정의할 수 있다. 끊임없는 기능 개선의 요구, 더 낮은 비용, 더 좋은 품질을 더 짧은 납기와 증가되는 사회적 책임이 엔지니어링이라는 직업분야를 더욱 더 규정하기 힘들게 한다. 이러한 경우에, 제조 분야의 엔지니어는 상보적인 전문지식과 자원을 총 동원하여 다수의 이해당사자(stakeholders)가 다양한 형태의 목적을 달성하기 위한 기술적인 합의를 도출해야하는 도전을 받고 있다. 최근의 제품 수명주기 엔지니어링의 특징과 시장의 글로벌화가 엔지니어링 분야의 협업 없이는 이러한 다양한 분야의 요구를 감당하기 힘든 상황에 직면해 있다고 할 수 있다(Alting *et al.*, 2006). 동시에 시장의 국제화는 지역 고객과 접점을 위해 전 세계적으로 엔지니어링 팀이 분산되는 현상을 가속화 하게 되면서(Tseng *et al.*, 2003), 엔지니어링 분야의 “통합과 분산”이라는 패러독스로 인한 새로운 엔지니어링 협업을 위한 접근방법을 요구하게 되었다(Lu *et al.*, 2006). 유럽연합의 다수의 국가가 참여하는 대규모 항공기 개발 사업은 개별 회사 내부, 부품 제조사 및 수많은 협력사들의 제조 및 기술 분야

의 협업의 중요성을 보여주는 예라고 할 수 있다(VIVACE, 2005). 하지만, 고부가가치의 항공 우주산업에서의 국제적인 제조협업과 치열한 제품 출시 경쟁을 벌이고 있는 전기/전자 또는 자동차 산업분야의 협업을 위한 토양은 다르다고 볼 수 있으며, 이를 위해 보다 현실적이고 효과적인 제조 협업을 위한 방법론이 필요하다.

본 연구에서는 제조협업을 디지털 엔지니어링 적용 방법론 도출을 위한 관점에서 다시 한 번 정의하고, 이러한 협업의 기본 구성 요소와 효과적인 제조협업 형성의 필수 요소를 정의하였다. 자동차 분야의 실제 제조협업 분야에의 디지털 엔지니어링 적용 사례를 바탕으로 실제 연구개발 및 제조 공정 기술과 관련된 실질적인 효과를 기존의 방식과 대비하여 분석하였다. 제조 분야의 협업의 주체를 두 개의 특성을 가진 집합체로 분류하여, 디지털 엔지니어링이 이들 간의 구체적인 기술적인 분야를 포함하는 의사소통 및 분쟁의 중재자 역할을 수행하게 하려는 모델을 제안하고, 실제적인 효과분석을 <그림 1>의 각각의 이해 당사자를 기준으로 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 제 2장에서는 연구의 배경과 관련 연구들을 소개하고 제 3장에서는 자동차 차체 제조 공법 검토 분야의 협업 적용에 대해 분석을 하고, 자동차 하부 현가장치와 관련된 제조와 설계 부서의 디지털 엔지니어링을 통한 협업을 제 4장에서 검토하였다. 구체적인 사례 연구를 통해 현실적인 효과 분석과 프로세스 도입과 운영을 위한 경영 관리와 관련된 사항을 마지막 제 5장에서 결론으로 도출하였다.

2. 연구배경 및 관련 연구

제조 협업과 관련한 연구 방법론은 기술 위주의 접근 방식을 비롯하여, 사회과학적 관점의 분석 과 이를 통합한 기술 및 사회과학적 방법론(Socio-technical-oriented approaches) 등 아주 다양

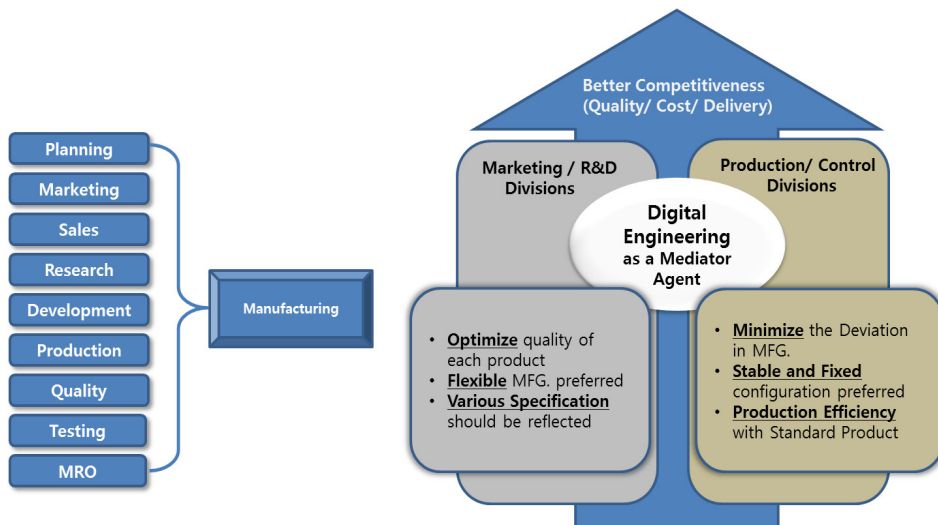


그림 1. 제조협업과 디지털 엔지니어링

하다. 본 연구의 동기와 본 논문에서 다룬 디지털 엔지니어링과 제조와 관련된 협업의 기존 연구들을 다음과 같이 살펴보고자 한다.

2.1 연구 동기

첨단 정보통신 기기 및 이와 관련된 비즈니스가 일상생활의 편리함을 가져다 준 것은 사실이지만, 실제 존재하는 상품의 대부분은 생산/제조라는 과정을 거쳐서 일반 소비자에게 전달되게 된다. 이러한 제조업의 형태는 아주 오래된 전통적인 공법이 활용되는 경우도 있고, 고도의 무인 자동화가 이루어진 분야도 있다. 제품 개발/제조 프로세스에도 많은 획기적인 변화가 있었지만, 연구 개발부서에서 활발하게 이용되고 있는 디지털 엔지니어링 기술이 생산/제조 기술에 보다 많이 적용되기 위해서는 바람직한 협업 모델이 필요하다고 판단된다. 특히 디지털 엔지니어링 분야가 제조와 관련된 협업에서 그 효과를 발휘하기 위한 핵심 내용을 성공적이 제조협업 사례를 통해 살펴보고자 하였다.

2.2 협업과 관련된 연구

만약 한 사람이 개인의 선호와 완전히 분리된 선택을 이성적으로 할 수 있다면 수학적 최적 이론으로 의사 결정을 할 수 있으며, 다수의 참여자가 역시 아주 냉정한(preferance-neutral) 지식을 동원할 수 있는 경우에도 쉽게 문제를 해결 할 수 있다(Papalambros *et al.*, 2000; Franssen, 2005). 보다 복잡한 현실을 설명하기 위해 협조적(cooperative) 또는 비협조적 게임이론(non-cooperative game theory)을 활용한 연구가 활발히 진행되었다(Parag, 2011; Feldman and Tamir, 2009). 그러나 엔지니어링 분야의 협업은 다수의 이해 당사자가 팀워크를 이루어 공동 의사결정을 통해 하나의 합의에 도달해야하는 중요한 특징으로 인하여, 계

임이론으로 해결하기에 적합하지 않은 점이 있다(Lu *et al.*, 2007). 또한 분산 환경 시스템 및 협업을 위한 가상 기업(virtual enterprise)에 대한 제안과 연구가 많이 진행되었다(Price, 2006; Luis *et al.*, 2009). 하지만, 자동차 분야 구체적인 제조 협업과 관련된 실증적이고 구체적인 협업 모델의 제안을 찾을 수 없었으며, 특히 디지털 엔지니어링의 적용을 통한 제조 협업을 유도하는 시도는 일반적이면서 구체적인 제안이 될 수 있을 것이라 판단된다. <그림 1>에서 나타난 제조와 관련된 이해 당사자들이 가지는 연구, 개발, 제조 분야 영역별 특성에 대한 연구 결과(Raffaella *et al.*, 2000)에 주목하면서 원활한 제조 분야 협업을 달성하기 위한 시사점 도출에 노력하였다.

본 연구의 주요 관심사항은 많은 협업관련 이론 중에서 인간의 협업(Human collaboration) 및 엔지니어링(collaboration engineering)과 관련된 특히 제조와 관련된 부분에 집중하고자 한다.

3. 차체 제조 설비 개발을 위한 협업

차체 제조와 관련된 설비를 구축하기 위해 요구되는 환경은 몇 가지로 요약할 수 있다. 첫째로는 자동차 신규 개발 전체의 개발 리드타임 단축으로 인한 지속적인 세부 개발 기간의 축소를 들 수 있으며, 라인 혼류 통합 생산의 유연성 및 라인 개조 및 증설시 신속한 대응이 가능해야 한다는 점에서, 최대한 다양한 사항에 대한 사전 검토 및 검토 결과의 확보는 필수적이다. 또한, 구축한 방법론에 의한 설비 개발 자체의 투자비 절감은 기본적으로 확보되어야 할 기술 과제이다. 국내의 자동차 생산 대수와 협력업체의 규모로 볼 때, 최근의 전반적인 자동차 분야의 제조 기술은 세계 수준이라 평가할 수 있으며, 이를 가능하게 한 제조 분야의 노력은 크게 다음과 같이 구분할 수 있다.

자동차 차체와 관련된 연구 개발 분야는 3차원 형상 정보의

표 1. 제조 설비와 관련된 주요 기술 개발 내용

주요 항목	개선 전	개선 이후	개발된 기술	주요 효과
공정 및 라인시뮬레이션	수작업 및 수동 2차원 레이아웃	데이터표준화 및 시뮬레이션 3차원 검증	로봇캘리브레이션 및 OLP 기술 차체라인시뮬레이션	설비 제작업울 감소 차체용접 품질향상
설비표준 3D D/B구축	설비 대부분이 2차원 정보	MCP/GUN을 포함한 모든 정보를 3차원 구축	D/B 및 표준화	MCP 검토 시간 단축, GUN 제작업울 감소, 검토 시간 단축
누적 공차 및 변형해석	측정 및 실물 조립을 통한 문제점 파악	측정 데이터 기반의 수치해석(CAE) 검토	공차해석 기술 고속측정 및 데이터 처리 기술 변형해석 기술	검구 제작 비용절감 차체 품질 향상 및 품질 확보 기간 단축
3차원 공법작성	2D 기반 구조 검토, 공법, 측정	3차원 정보 활용	3차원 간섭 검증 용접 공법 시뮬레이션 기술 측정 시뮬레이션 및 데이터 분석 기술	구조 검토, 공법 작성, 품질 분석 투입공수 절감 설비 제작업 비용 감소

중요성으로 인하여, 3차원 데이터가 아주 일반화 되어 있지만, 제조 기술 부분의 3D CAD 도입 및 전체 확산은 최근의 일이라 할 수 있다. 데이터의 재사용성(Re-usability)이 가장 중요한 3차원 데이터의 효용성이라는 관점에서, <표 1>의 노력의 결실은 디지털 엔지니어링 분야의 성과를 극대화할 수 있는 주요 인프라의 구축이라는 관점에서 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

비를 기준으로 시험/평가를 거친다. 이 시점에서 체계적인 사전 검토 및 실패 비용의 규모는 전적으로 완성차 업체 및 프로젝트 관리자의 개인 역량에 의존해 왔다고 볼 수 있으며, 다양한 이해 당사자들 간의 충돌과 이해 상충은 전체 자동차 개발 일정 준수에 적지 않은 위험요소로 인식되고 있다. 또한, 가설/시운전 등의 과정에서 노출된 문제점 발견 시, 명확한 책임 소재 분석 및 추가 비용 발생 및 대응의 효용성도 큰 문제로 인식되고 있다.

3.1 문제 정의

전통적인 차체 제조 설비 개발 프로세스는 완성차 업체의 협력업체 중 설비 구축 관련된 경험을 축적한 다수의 기업을 선정하여, 설비 설계 및 제작을 의뢰하게 된다. 각 시점의 협력업체의 설계/생산 능력보다는 과거의 실적에 의존하여 업체를 선정하게 되고, 아웃소싱의 전형적인 문제점이 노출되게 된다. 설비의 설계 이후 설계 업체별로 설비를 제작하고, 제작된 설

3.2 디지털 엔지니어링 적용 연구

<그림 2>는 신규 개발 차종의 라인(Side Main L/R)중에서 서보-C형 스폿(Spot)용접 공정의 로봇 건(Gun)과 제조 설비의 간섭을 사전에 검토하여, 설계 변경을 <그림 3>과 같이 반영하는 사례이다. 간섭 유무 뿐 아니라, 로봇의 전체 작업 내용을 입력하여, 전체 소요시간 및 이후 공정과의 연속적인 시뮬레이

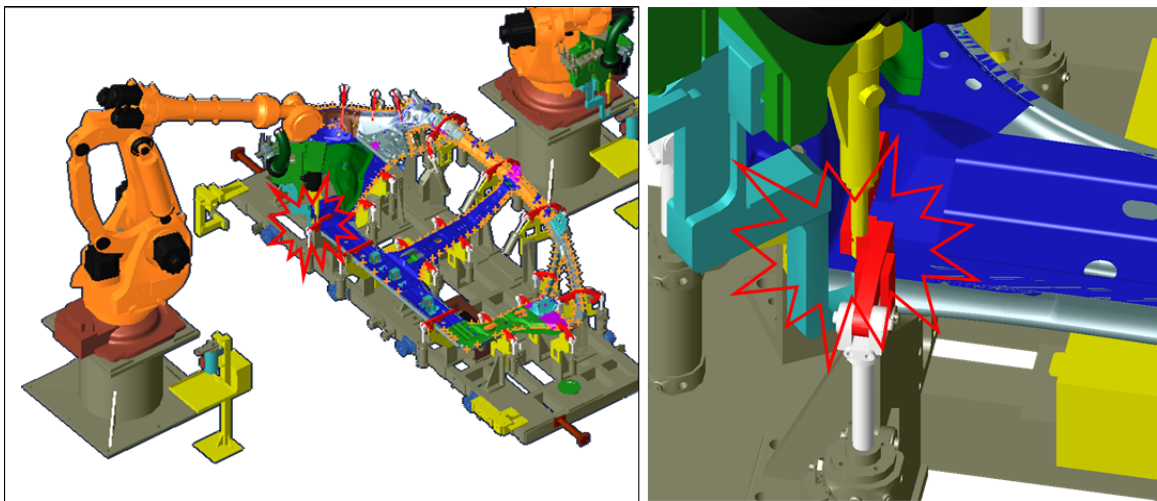


그림 2. 디지털 매뉴팩추어링 시뮬레이션(Robot Simulation)을 통한 설계 오류 검증

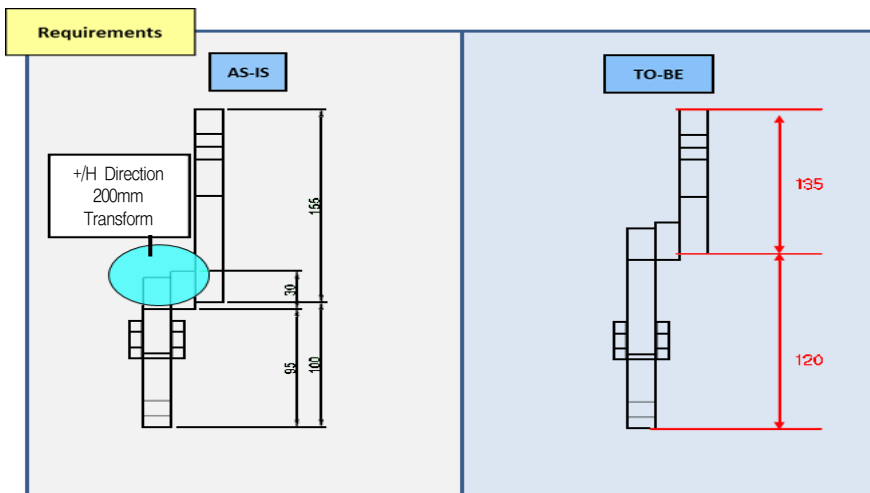


그림 3. 디지털 엔지니어링 분석을 통한 설계 오류 개선 내용

션을 통해, 차체생산 기술부서와 제조 설비 설계 및 생산업체의 실패 비용을 획기적으로 단축할 수 있는 디지털 엔지니어링의 한 분야이다.

앞 절에서 설명한 차체 제조 설비 분야의 협업을 위해서 데이터베이스의 구축이 선행되어야 한다. 각 부품, 공구(건, 그리퍼)와 로봇의 라이브러리 정보가 확보되면, 다음 단계인 시뮬레이션 및 분석을 진행하게 된다. 이 단계에는 다음과 같은 절차로 오프라인 프로그래밍을 이용하게 된다. 첫째로 가상 공정을 정의하여, 조립성 및 작업성을 검증한다. 또한 연속적인 로봇의 작업경로 및 프로그램을 검증하여, 오프라인프로그래밍(OLP) 정보를 로봇 제어기로 변환한다. 시뮬레이션을 통해 이상 유무를 확인하여 로봇에 이식할 작업 프로그램을 생성하는 것으로 본 단계는 마무리된다. 마지막으로 생산라인 실제 환경의 측정을 통해 미세 보정을 마무리하고, 로봇의 라이브러리를 최신 정보로 갱신함으로써, 차체 설비 구축을 위한 디지털 엔지니어링은 완료된다.

3.3 협업 모델 분석

본 사례의 가장 중요한 협업의 변수는 엔지니어링 데이터의 효과적인 공유와 설계, 제작, 설치와 운전 에 참여하는 협력업체 간의 의사소통이라 할 수 있다. <그림 4>에서 비교할 수 있듯이 2차원 형상 정보에 의존하여, 차체 제조 설비를 구축하던 환경에서는 로봇 시스템 업체, 설비 설계 및 제작 업체, 차체 제조 엔지니어 각자가 대면을 통해 검토 및 협의를 진행하였고, 이로 인한 제품 개발 절차는 폐쇄적으로 진행되었다. 이로 인해, 새로운 기술 등의 적용에는 많은 한계점을 가지고 있었으며, 조직의 지식은 체계적으로 공유되지 않고, 각 개인의 암묵적 지식으로 축적되어 인구 고령화에 따른 사회적 문제와 더불어 청년 엔지니어들에게는 전달되지 않는 큰 문제를 내포하

게 되었다. 3차원 데이터가 충분히 확보된 현재의 시점에서는 이러한 데이터를 구성하여 사전 검증하는 디지털 시뮬레이션을 중심으로 관련 협력사들이 소통을 함으로써, 이력관리를 통한 지식기반 엔지니어링의 토대를 마련하는 형태의 제조 협업이 가능하리라 판단된다.

축적된 지식은 엄밀한 분류를 거쳐서 보안등급을 구분하고, 차체 설비 제작과 관련된 협력사에 공유함으로써 전체 차량 개발 기간 단축은 물론 제조 설비 실행검토(try-out)에서 발생하는 실패 비용을 최소화함으로써 완성차의 경쟁력은 물론, 협력업체의 경영 환경도 개선할 수 있으리라 예상된다. 이산(Discrete-time)시간 동적 피드백 모델(Pentland *et al.*, 2005)에 제조 설비 개발과 관련된 협업의 피드백과 관련한 사항을 적용해 보면 다음과 같다. <그림 4>에서와 같이 자동차 제조 엔지니어, 제조 설비 협력업체, 로봇시스템 관련 협력업체등이 협업 과정의 이해당사자라고 정의 할 수 있으며, 첨자 j 로 표현하기로 하자. 일정 시간 t 에서 의 내부 정보($H_{j,t}$: internal information), 외부 데이터($D_{j,t}$: external data)와 이해 당사자의 견지($P_{j,t}$: perspective) 및 이해도 ($U_{j,t}$: understanding)는 다음과 같이 표현된다.

$$H_{j,t+1} = P_{j,t}^F(E_t) U_{j,t} H_{j,t} \tag{1}$$

$$P_{j,t+1}^F = P_{j,t}^L(P_{j,t}^F, H_{j,t+1}) \tag{2}$$

$$D_{j,t+1} = P_{j,t+1}^F(H_{j,t+1}) \tag{3}$$

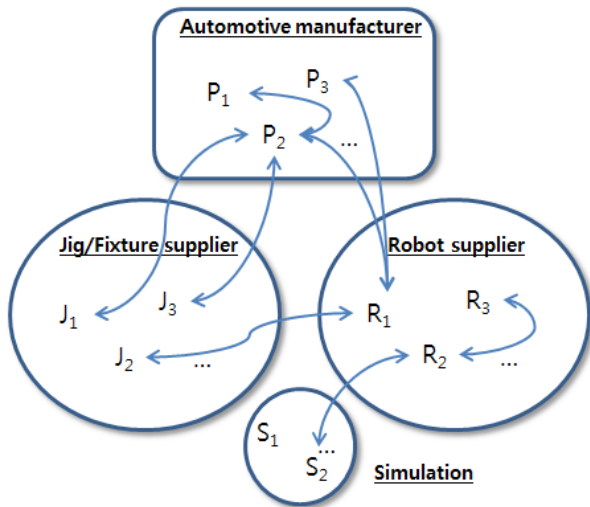
$$U_{j,t}[D_{j,t}] = U_{j,t}(P_{j,t}, H_{j,t})[D_{j,t}] \tag{4}$$

$$H_{j,t+1} = P_{j,t}(E_t) U_{j,t} H_{j,t} + C_{H,j}(U_{j,t}, U_{P_{j,t}}, E_t) \tag{5}$$

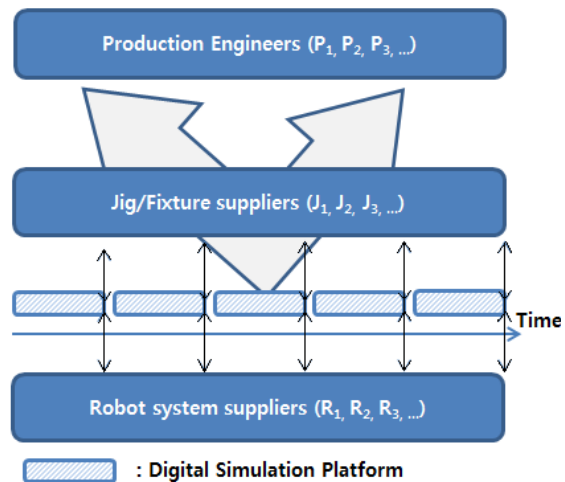
$$P_{j,t+1} = P_{j,t}(H_{j,t+1}) + C_{P,j}(U_{j,t}, U_{P_{j,t}}, E_t) \tag{6}$$

$$D_{j,t+1} = P_{j,t+1}(H_{j,t+1}) + C_{D,j}(U_{j,t}, U_{P_{j,t}}, E_t) \tag{7}$$

궁극적으로 이해 당사자 k 와 j 의 이해도의 교집합($U_{j,t}(D_{k,t}) \cap U_{k,t}(D_{j,t})$) 부분을 요구되는 시간 t 에서 최대화하기 위해서는 외부 데이터 ($D_{i,t}$)는 이해 당사자 k 와 j 의 의사소통($C_{k,j}$)에 속하는



(a) Legacy experience dependent collaboration



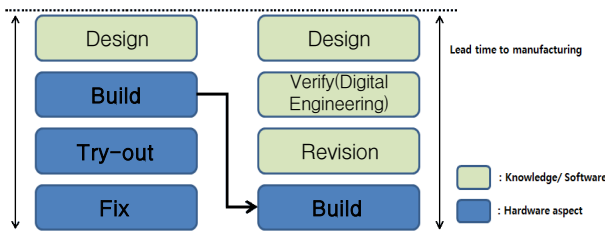
(b) Digital Simulation centered collaboration

그림 4. 경험기반의 협업 모델과 디지털 시뮬레이션 기반의 협업 모델

선택을 하게 된다. 이는 효율적인 기술적 의사 소통의 중요성을 의미하며, 본 모델에서 제어(control)변수에 해당하는 각 이해 당사자 간의 협상(N) 과정도 유사하게 설명할 수 있다.

3.4 사례 연구를 통한 주요 방법론 도출

앞 절에서는 디지털 엔지니어링 플랫폼을 제공함으로써 제조 협업의 참여 이해당사자 각각의 견지에서 외부 데이터를 내부 정보화해가는 의사소통의 차이를 각각의 공통된 이해도를 최대화 해나가는 과정으로 살펴보았다. 차체 제조 설비를 구축하는 과정은 일반적으로 <그림 5>의 큰 단계별로 설명할 수 있다.



(a) Legacy Development process (b) Digital Engineering Application

그림 5. 자동차 제조 설비 개발 프로세스 비교(디지털 엔지니어링 도입 전/후)

좌측의 전통적인 방식부터 살펴보면, 일반적으로 정확한 요구사항이 정의되지 않는 목적물의 대략적인 수량단위로 전체 소요금액으로 과업 수행의 주체를 선정하여 협력업체간의 제작과 현장 맞춤을 통해 제조 설비를 개발해가는 방식이다. 이는 설계 단계의 창의성을 의미하는 설계자유도와는 차원이 다른 대상품의 정보부족을 의미하며, 협업에 참여하는 협력업체는 실패비용을 최소화를 위해 소극적일 수밖에 없으며, 사양과 최종 금액 결정과정은 폐쇄적이고 주관적일 가능성이 높게 된다. 반면 디지털엔지니어링을 통해 개별 주체의 초기설계를 사전 검증하고, 수정하는 경우에는 큰 검토 비용의 추가 없이 다각적인 설계 방안에 대해 신속하게 협의 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이를 통해 설계 및 제작에 소모되는 재료비 및 가공비용등을 최소화하여 설비를 구축할 수 있게 된다. 결국 <그림 5>(a), <그림 5>(b)의 전체 소요 시간은 시간이 경과하여 반복적으로 활용됨에 따라, 축적되는 정보의 질과 양에 의해 차이가 발생할 것이며, 부가적인 정보의 축적을 제외하더라도 소프트웨어적인 지식기반의 제조 협업 기술의 급속한 확보를 통해 제조 혁신도 가능할 것이라 기대한다.

4. 도장 공정 수치해석을 통한 설계부서와 생산부서의 제조 협업

제조 공정은 대부분 양산시스템을 도입하고 있으므로, 생산

시스템의 원활한 운영은 곧 안정적인 제품 품질 수준의 확보를 의미한다고 할 수 있다. 고객의 요구 사항을 반영한 제품의 설계는 궁극적으로 생산시스템에서의 중요한 공정 변수들을 어떻게 능동적으로 반영할 것인가를 포함하고 있으며, 연구 개발을 포함한 설계 부서와 생산부서의 협업이 취약한 영역이다. 다양한 계층의 고객으로부터 품질 불만족 사항이 접수된 경우, 제조와 관련된 거의 모든 부서는 원인 분석에 많은 노력을 기울이게 되고, 때로는 부서간의 상충되는 이해관계로 인하여 정확한 원인이 도출되지 못한 채 임시방편으로 잠재적인 불량을 야기하는 경우도 상당하다고 예상된다. 이는 효율적인 제품 개발 및 생산을 위해서 경영정책 측면에서 새로운 접근을 시도할 필요가 있으며, 최종 제품의 품질 및 이와 직결된 제품의 경쟁력 제고를 위해서도 필수적인 노력이라 할 수 있다. 본 연구에서는 제품 개발 부서와 생산부서가 공동의 목표를 위해 협업을 하고, 자연스럽게 상호간의 다양한 설계 및 공정 변수를 객관적으로 논의 할 수 있는 방법론을 실제 예를 통해 살펴보았다.

4.1 문제 정의

자동차 개발의 초기단계에서 지향하는 소비자를 선정하게 된다. 전 세계 특정 지역을 목표시장으로 하는 경우도 있고, 제조 현장을 기준으로 지역을 검토하기도 한다. 하지만, 공통적으로 차체 자체의 내구 수명은 자동차의 고급 사양 보다 중요한 기초적인 품질 항목이며, 최소의 비용으로 내부식/내마모성을 확보하기 위해 꾸준히 노력하고 있다. 이를 위해 철계류(steel) 하부 하체 구성품은 높은 경제성을 이유로 전착도장을 통해 외부의 부식요소로부터 차량 전체 중량을 강건하게 지지하게 된다. 하지만, 실제 극한 조건 테스트나 실제 주행 차량의 부식을 손쉽게 확인함으로써 도장품질 확보가 용이하지 않음을 짐작할 수 있다. <그림 6>은 이러한 도막 형성과 관련된 불량 유형을 보여준다. 이 중에서 에어포켓(공기 포집)으로 인한 미도장 불량 및 도장 고임 불량은 주요 형상 설계 및 도장 공정 변수의 수정으로 회피할 수 있음을 알 수 있다.

불량 유형	미도장부(Air-pocket)	도장 고임 현상
불량 현상		
원인	전착조 장입시 기포의 포집과 원활하지 못한	피도물의 오염 또는 도장액 배출이 되지 않음
대책	제품형상별 행킹 방향 설정 제품 설계시 공법 반영	전처리 공정 점검 행거 방향 및 공법 변경

그림 6. 전착도장 공정의 불량 사례(설계 및 공법과 관련된 항목)

4.2 디지털 엔지니어링 적용 연구

전산장비 및 수치해석 기법의 발달로, 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics) 기법이 실제 광범위한 공학 분야에 활용되고 있다(Joel and Milovan, 2002). 앞 절에서 정의된 도장불량의 문제는 공기(에어포켓 또는 대기)와 도장액(페인트)의 자유 경계면(free surface)을 기준으로 다상유동(multi-phase flow) 문제로 정의할 수 있다. 일반적인 연속체 방정식, 에너지 방정식을 포함한 유체역학 지배 방정식에 표면장력, 점착각등을 주요변수로 감안한 체적분률(VOF : Volume of Fluid) 해석 기술을 적용하여, <그림 7> 과 같은 경계면의 임계값 선정으로 도장 불량 현상을 예측할 수 있다.

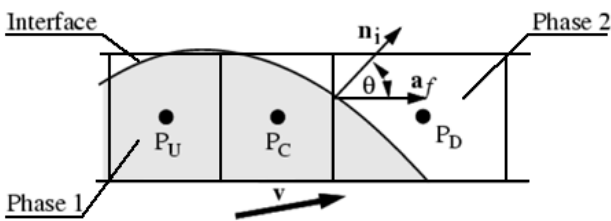


그림 7. 다상 유체(multi-phase)의 경계면(free-surface) 정의

<그림 8>과 같이 전착도장 피도물인 하부 서스펜션 부품을 선정한 행거와 행거 위치를 이용하여 도장 공정에 초기 장착 하면, 이송 방향의 속도 분력 및 자중에 의해 균형을 이루는 제품의 거동이 나타나게 되며, 이는 전착 도장로(paint bath)에서 초기 장입 각도 및 공기 포집에 영향을 주는 주요 인자가 된다.

전체 전착공정은 탕세, 탈지, 표면 조정, 화성피막, 수세등의 수 차례의 디핑(dipping) 공정을 수반하지만, 실제 도막을 형성하는 전착도장로가 수치해석의 주요 대상이라 하겠다. 실제

본 연구에서 수행한 수치해석 기법은 행거의 형상, 행잉 위치, 제품의 이송 방향의 각 공정 변수에 대해 완성차 업체에서 요구한 디자인 검증(Design Validation)시험에서 3가지의 조건에 대해 불량이 발생한 2가지 조건의 도장 불량률 100% 검출하여, 디지털 엔지니어링의 효용성의 확보는 물론 적극적인 생산/공정/품질 부서의 참여를 도출하였으며, 과제 수행업체는 제품의 개발 단계에서 제조 공정변수를 미리 검토하는 업무 프로세스를 확립하였다(HyeongSeok *et al.*, 2011). 전자기장(electro-magnetism)의 지배방정식을 추가함으로써 형성된 도막두께의 예측도 가능하며 이는 제품 내부에 생기는 전기적 음영(shadow)을 사전에 예측하여, 제품 형상 설계 시 제품의 강성과 함께 추가적인 도장 품질을 고려하는 프로세스로 발전시킬 수 있다. 이는 현재 활성화 되어있는 구조강도 시뮬레이션과 연계한 다분야 최적 설계(MDO : Multi-Disciplinary Optimization)의 한 사례로 볼 수 있다고 판단한다.

4.3 협업 모델 분석

디지털엔지니어링의 많은 분야 중에서, 도장 공정해석 사례는 기업 내 연구소등에서 활발하게 수행중인 수치해석 기법을 활용한 디지털 목업(Digital mock-up) 또는 가상 제품 개발(VPD : Virtual Product Development)프로세스의 한 내용이라 볼 수 있다. 하지만, 제조 공정에 관련된 이 분야의 연구 및 적용은 아직도 미비한 수준이며, 이는 수치해석을 이용한 공정과 관련된 물리현상의 구현의 가능성이 제조 관련 종사자에게 많이 알려져 있지 않음에 기인한다고 할 수 있다.

두 번째 사례의 협업 모델은 <그림 9>와 같이 설계 부서와 제조 부서 사이에 디지털 엔지니어링 프로세스가 자리하고 있는 구조로 설명할 수 있다.

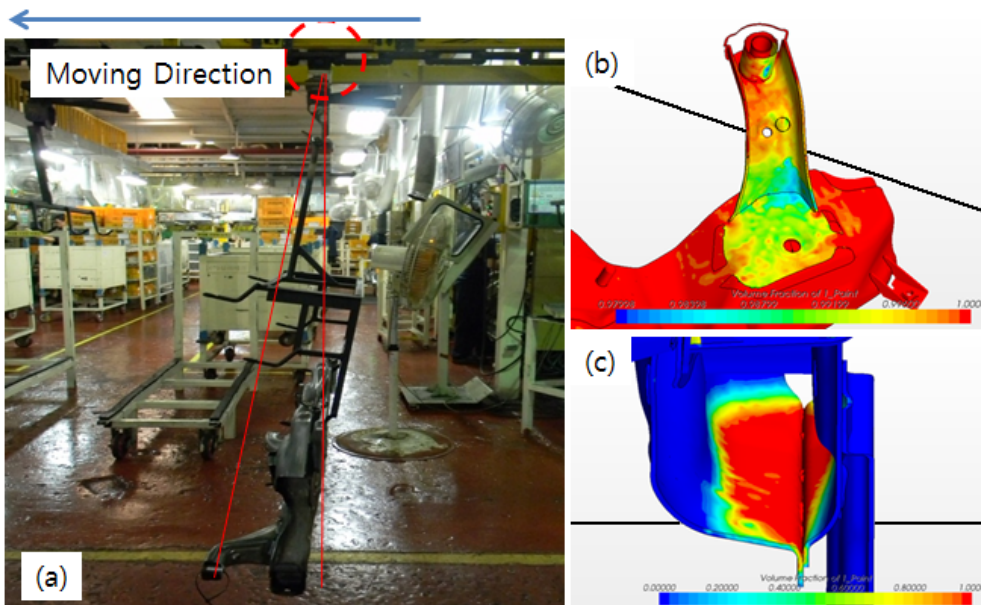


그림 8. 초기 장착 상태 및 주요 시뮬레이션 결과 (b) 미도장부, (c) 도장액 고임

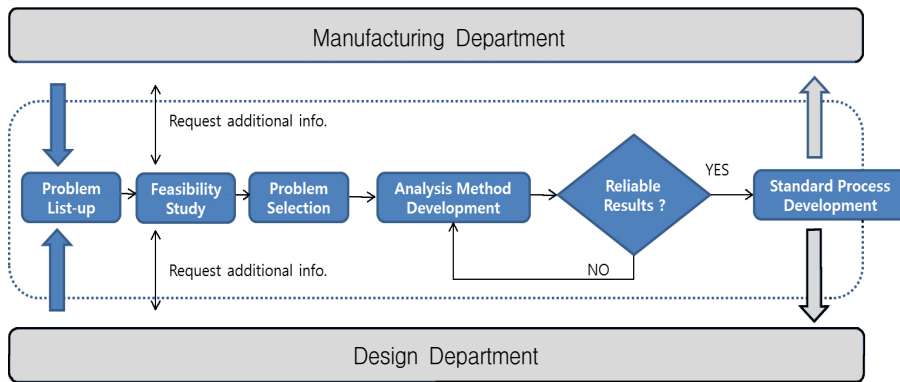


그림 9. R&D 기술개발 주도의 제조협업 모델

각 단계를 구체적인 예를 들어 설명해 보면, 전착도장 공정에서 불량률이 검출되면 관련 부서 회의가 소집되고 대책회의에서 설계부서와 제조부서는 서로 상충되는 입장 차이를 확인하고, 구체적인 대안 마련에 고심하게 된다. 이러한 제조 품질 문제가 자주 발생하는 경우 제시된 협업 문제의 1단계인 문제 수집과정에서 노출된다. 디지털 엔지니어링 부서에서는 수집된 문제의 항목별로 기술적 검토를 수행하고, 선정된 문제를 해결하기 위한 해석 방법론을 개발하여 적용한다. 적용 결과가 제조 및 설계 부서의 요구사항에 적합하면, 현업 부서의 요구사항을 반영하여 표준프로세스를 개발하여 배포하게 된다. 3장에서 다룬 차체 제조 설비 검증 프로세스와의 차이점은 디지털 엔지니어링 방법론 자체에 대한 개발 및 검증 절차가 포함된 점이라 할 수 있고, 이는 실제 현상을 수치해석으로 구현해 나가는 과정에서 발생하는 차이점의 정도에 기인한다고 할 수 있다. 또한 해석에 수행되는 연산 시간이 과도한 경우 엔지니어링 측면에서 그 효용성이 없다고 판단되므로, 실제 현물로 수행하는 시험과 비교하여, 시간을 포함한 경제성 또한 확보되어야 하는 특징이 있다.

4.4 사례 연구를 통한 주요 방법론 도출

본 사례는 동일 조직 내부의 이해관계와 주요 업무가 다른 부서간의 협업을 원활하게 유도하는 것이 가장 중요한 방법론이라 생각된다. 제 2장의 기존 연구에서 상술한 것처럼, 연구 개발부서의 업무 특성과 제조 및 공정 기술부서의 성향 및 업무 목표는 확연히 다르므로, 이들의 상충되는 이해관계를 최대한 존중하면서 개별 협조를 구하는 것이 가장 어렵고 핵심적인 내용이라 하겠다. 연구 개발 부서는 상대적으로 개방된 문화로써 새로운 시도를 잘 받아드리지만, 제조 기술과 관련된 부서는 기존 제조 인프라와 관련된 어떤 형태의 외부 자극에 대해서도 보수적으로 대응하는 특징이 있다고 할 수 있다. 이는 업무 성격뿐만 아니라, 정기적인 생산량 및 불량률의 변화로 평가받는 조직의 당연한 현상이라 볼 수도 있다. 또한 본 협업 모델에서 신뢰할 만한 수치해석 결과는 설계 및 제조 관련 부서의 적극적인 협조 없이는 생성할 수 없다는 점에서, 제

조업체 경영진을 포함한 관련 이해 당사자의 협조 분위기 조성은 기술적 노력보다 선행되어야 한다는 것을 다시 한 번 강조하고자 한다. 이는 디지털 엔지니어링을 수행하는 주체의 명확한 문제의식과 문제 해결 역량을 통해 상호 신뢰 확보가 가장 중요한 사항이라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 자동차 제조분야의 실제 두 가지 사례를 통해 디지털 엔지니어링을 통한 효과적인 협업의 방법론을 살펴보았다. 다수의 협력업체가 참여하는 차체 제조 설비 구축의 경우에는 로봇 시뮬레이션이라는 디지털 메뉴팩처링 기술을 이용하여 이해 당사자 간의 소통 역학을 살펴보았다. 두 번째 사례 연구에서는 연구, 개발, 제조 부서의 협업 특성을 이해하고, 제조업체 내부의 암묵적 지식을 서로 공유하기 위한 수단으로 디지털 엔지니어링 방법론이 적용되어, 체계적인 지식 기반 엔지니어링의 기반을 구축하기 위한 업무 프로세스로 제안하게 되었다.

다양한 형태로 이루어지는 제조협업의 형태를 각 제조, 공정 기술과 연관된 디지털 엔지니어링 솔루션을 제품수명주기 관리(PLM : Product Lifecycle Management) 등의 통합 환경으로 구축하게 되면 다음과 같은 일관된 효과를 기대할 수 있다. 첫 번째, 제조협업에 필수적인 데이터의 교환/저장소를 확보하게 되며, 모든 데이터의 이력 관리 등을 통해 부가적인 지식 기반 엔지니어링을 위한 정보를 축적해 나갈 수 있게 된다. 두 번째로 통합 환경에서 선정된 디지털 엔지니어링 솔루션에 호환되는 데이터는 제조협업에 참여하는 이해 당사자 간의 표준 프로토콜로써 정보 교환의 효율성을 도모할 수 있게 된다. 부가적으로 생산 공정의 산포 등으로 인한 제조상의 문제에 대해 디지털 엔지니어링 방법론은 개선방안 또는 차선택에 대한 선행 검토를 통해 신속하게 대응이 가능하다는 점이 실제 제품을 통한 제조 공정 검토에 비해 장점이라 할 수 있다. 하지만, 제조협업을 위한 디지털 엔지니어링 방법을 도입하기 위해서는 치밀하고 면밀한 연구를 통해 디지털 엔지니어링 솔루션의

신뢰 수준을 신속하게 확보하는 것이 제조협업 및 디지털 엔지니어링의 안정화를 담보할 수 있다. 이런 과정 중의 노력은 치열한 경쟁과 협업이라는 상충되는 현실 속에서 개별 기업의 차별화된 그들만의 기술을 확보하는 또 다른 방법이라 할 수 있다.

본 연구 과정에서 제조 협업 도입 성과 분석에 대한 객관적이고 범용적인 방법론에 대한 연구가 충분하지 않음을 확인하였으며, 제조 협업에 참여하는 이해 당사자의 적극적인 경영 전략화를 위해 제조협업 도입에 대한 명확한 이득과 요구되는 합리적인 투자 예측에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

참고문헌

Alting, L. A., Boelskifte, M. M. P., Clausen, C., and Jorgensen, U. (2006), Design and Innovation-The DTU Program, International CIRP Design Seminar, 1-8, Calgary, Canada.

Ermilova, E. and Afsarmanesh, H. (2006), Competency and profiling management in virtual organization breeding environments, In *network-centric collaboration and supporting frameworks*, Boston: Springer, 31-142.

Feldman, M. and Tamir, T. (2009), Approximate strong equilibrium in job scheduling games, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 36, 387-414.

Franssen, M. (2005), Arrow's Theorem, Multi-criteria Decision Problems and Multi-attribute Preferences in Engineering Design, *Research in engineering Design*, 16(2), 42-56.

Joel, H. F. and Miloval, P. (2002), Computational Methods for Fluid Dynamics, third, rev. edition, Springer, 1-5.

Hammond, J. H., Koubke, R. J., and harvey, C. M. (2001), Distributed Collaboration for Engineering Design : A Review and Reappraisal, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 11(1), 35-52.

Harzallah, M. and Vernadat, F. (2002), IT-based competency modeling and management : From theory to practice in enterprise engineering and operations, *Computers in Industry*, 48(2), 157-179.

Kim, H.-S., Lee, S. C., Lee, S. S., and Lee, Y.-C. (2011), Numerical Simulation of e-coating Process in the Design of Suspension Modules, KSAE Annual Conference, Daejeon, Korea, 2328-2332.

Lu, S. C.-Y. (2006), Beyond Concurrent Engineering : a New Foundation for Collaborative Engineering, *International Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 9(2), 27-40.

Luis, M. C.-M., Hamideh, A., Nathalie, G., and Arturo, M. (2009), Collaborative networked organizations-Concepts and practice in manufacturing enterprise, *Computers and Industrial Engineering*, 57, 46-60.

Price, M., Raghunathan, S., and Curran, R. (2007), An integrated systems engineering approach to aircraft design, *Progress in Aerospace Sciences*, 42, 331-376.

Papalambros, P. Y. and Wilde, D. J. (2000), Principles of Optimal Design : Modeling and Computation, Cambridge University Press.

Parag, C. P. (2011), Game theory applications for multi-agent systems, *Expert Systems with Applications*, 39, 273-279.

Pentland, A., Choudhury, T., Eagle, N., and Singh, P. (2005), Human Dynamics: Computation for Organization, *Pattern Recognition*, 26(2), 503-511.

Raffaella, C., Vittorio, C., and Raffaela, M. (2000). Differences and similarities in managing technological collaborations in research, development and manufacturing : a case study, *Journal of Engineering and Technology Management*, 17, 193-224.

Lu, S. C.-Y., Elmaraghy, W., Schuh, G., and Wilhelm, R. (2007), A Scientific Foundation of Collaborative Engineering, *Annals of the CIRP*, 56(2), 605-607.

Tseng, M. M., Kjellberg, T., and Lu, S. C.-Y. (2003), Design in the New E-Commerce Era, *Annals of the CIRP*, 52(2), 43-54.



이 유 철

부산대학교 정밀기계공학과 학사
 부산대학교 정밀기계공학과 석사
 UTS Master of Engineering Management
 현재 : CD-adpaco 한국지사 부장
 관심분야 : Engineering Consulting, Project Management, BPM, MOT, FEA/CFD



배 혜 림

서울대학교 산업공학과 공학사
 서울대학교 산업공학과 공학석사
 서울대학교 산업공학과 공학박사
 현재 : 부산대학교 산업공학과 부교수
 관심분야 : BPM and Enterprise Information System Integration, e-SCM & e-CRM, TOC, Semantic Web, RFID and Logistic Process Management