

제조시스템공학 40년-정리와 전망

최병규¹ · 한관희^{2*} · 전차수² · 이철수³ · 박상철⁴

¹KAIST 산업 및 시스템공학과 / ²경상대학교 산업시스템공학부 · 공학연구원
³서강대학교 기계공학과 / ⁴아주대학교 산업공학과

Review and Perspectives on the Research and Industrial Applications of Manufacturing Systems Engineering in Korea for 40 Years

Byoung Kyu Choi¹ · Kwan Hee Han² · Cha Soo Jun² · Chul Soo Lee³ · Sang Chul Park⁴

¹Department of Industrial and Systems Engineering, KAIST

²Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University

³Department of Mechanical Engineering, Sogang University

⁴Department of Industrial Engineering, Ajou University

Over 40 years, the domestic manufacturing industry of Korea played the vital role in creating national wealth, employment and innovation in its economy. In 2011, industrial products made up 99.7 percent of exports, and formed 31.2 percent of GDP. Given those facts, the research of manufacturing systems engineering for higher manufacturing efficiency and its industrial applications have been essential for Korea's economic growth.

In this paper, for celebrating the 40th anniversary of the foundation of Korea institute of industrial engineers (KIIIE), the research results and its industrial applications of KIIIE are reviewed and summarized in the area of manufacturing systems engineering over past 40 years. Directions of future manufacturing system and the role of industrial engineers for our continuous economic growth are also mentioned.

Keywords: Manufacturing Systems Engineering, Smart Factory, CAD/CAM, Virtual Manufacturing System, Computer-Based Planning and Scheduling, Automation

1. 서론

급변하는 세계 경제 환경 속에서 생존하기 위해 최근 들어 세계 각국은 새로운 미래 국가 성장 전략을 수립하고 이를 구현하고자 노력을 경주하고 있다. 예를 들면, 내수시장이 적은 이스라엘은 중소형 벤처를 창업한 후 이를 나스닥에 등록하고 M&A를 통하여 부가가치를 창출하는 벤처 중심의 창조 경제 전략을 수립하였고, 문화와 금융에 전통이 있는 영국은 서비스에 예술적이고 감성적인 창의성을 가미하여 경제 체계를 개편하고자 하는 서비스 중심의 경제 성장 전략을 수립하였

다. 제조 분야에 강점을 가진 독일에서는 2010년에 이미 '하이 테크 2020'을 통해 국가 기술 혁신 전략을 제시하였으며, 그 중 생산 기술 분야에서는 비교 우위에 있는 첨단 제조업에 ICT (Information and Communication Technology)를 융합하여 산업 구조의 변화를 유도하는 'Industry 4.0' 전략을 발표하고 이를 적극 추진 중에 있다.

이와 같이 세계 주요 국가들이 각국의 강점과 특성에 부합하는 국가 성장 전략을 수립하려는 신속한 움직임에 비추어 볼 때, 우리나라의 경우에는 제조 분야의 강점을 충분히 살린 국가 성장 전략의 수립이 타당해 보인다. 미국, 독일, 일본 등

* 연락저자 : 한관희 교수, 660-701 경남 진주시 진주대로 501 경상대학교 산업시스템공학부, Tel : 055-772-1702, Fax : 055-772-1699,
E-mail : hankh@gnu.ac.kr

주요 국가들은 이미 제조 부문의 기술 혁신을 촉진하기 위해 신규 정책 수립과 실행 전략을 준비 중에 있다. 이들 정책의 공통점을 살펴보면, 첫째, R&D 대상을 제품 혁신 기술 개발 뿐만 아니라 공정 기술 혁신을 통한 제조시스템 개발을 지향하고 있으며, 기존 제품과 공정을 혁신하기 위해 에너지 절감 기술, IT 기술 및 신 재료 등을 활용하고 있다. 둘째, 제조 기술 고도화를 목표로 하는 신규 기본 정책을 제시하고, 이를 촉진할 제도적 인프라를 신설하고 있다(Kim, 2014).

국내 제조(업)은 지난 40여 년간 국부와 고용 및 혁신 창출의 원천 역할을 수행해왔으며, 2011년 기준으로 수출 품목의 99.6%가 공산품이고, 우리나라 GDP의 31.2%를 제조업이 차지하고 있다. 참고로 주요 국가의 제조업의 GDP 비중은 일본의 경우 19.1%, 독일의 경우 22.6%, 미국의 경우는 12.6%를 점하고 있다. 우리나라 제조(업)은 또한 직접 고용의 20%를 점하고 있으며 과학기술과 연구개발 및 국가 방위의 근간이 되고 있다. 그리고 제조는 국민 개개인의 삶의 질에 직접적인 영향을 미치고 있으며, 최근에는 국가 이미지 및 국민들의 자신감 제고에도 큰 기여를 하고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 국내 제조가 국가 경제에서 차지하는 비중이 비추어 볼 때, 제조의 효율화를 목표로 하는 제조시스템공학(Manufacturing Systems Engineering) 분야의 연구와 연구 결과의 산업계 활용은 국가 경쟁력 향상에 매우 중요하다 하겠다. 영어권에서 Manufacturing이라는 용어가 처음 사용된 시기는 1560년대인데, 이때는 ‘손(manus)으로 만들다(factus)’는 의미로 사용되었으며 산업 혁명 시기를 거치면서 근대적 공장이 생기고 그 이후 제조의 개념에 많은 변화가 발생하였다.

현대에서의 제조시스템공학의 발전 과정은 제조 분야에서의 컴퓨터의 역할 확대 과정이라고 정의할 수 있으며, 이런 의미에서 제조시스템공학은 “광의의 CAM(Computer-Aided Manufacturing)”이라 할 수 있다. 최근의 제조시스템공학의 과제는, 1) 어떤 방법으로 제조할 것인가와, 2) 언제, 어떤 순서로 제조할 것인가로 대별할 수 있는데, 1)은 제품의 기하학적 모델링과 시각화에 관련된 것으로 CAD/CAM으로 대표되는 CAX 기술이나 가상 설계 및 제조 기술(Virtual Engineering and Manufacturing)에서 주로 다루고 있으며, 2)는 제조 작업의 계획 및 스케줄링과 관련된 것으로 VMS (Virtual Manufacturing System) 기술과 최적화 방법에서 주로 연구되고 있다.

본 논문에서는 대한산업공학회 창립 40주년을 맞이하여 국내 제조시스템공학 분야에서 지난 40년간 이루어진 우리나라 산업공학계의 학술적인 연구 내용과 실무적인 적용을 정리해 보고 앞으로의 전망을 논의해보고자 하며, 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 제조시스템공학 분야의 세계적인 흐름을 간단하게 설명하고, 제 3장에서는 해당 분야의 지난 40년간의 국내 학술 연구 동향을 조사하여 정리하였으며, 제 4장에서는 해당 분야 연구 성과의 국내 산업계 활용 현황에 관해 정리한다. 제 5장에서는 해당 분야의 향후 전망을 논의하였으며, 마지막으로 제 6장에서는 논문의 요약과 결론을 기술하였다.

2. 제조시스템공학 분야의 세계적인 흐름

산업혁명을 지나 근대 이후의 제조시스템 발달 과정을 크게 나누면 4단계로 대별할 수 있다. 첫 번째 단계는 시기적으로 1910년에서 1945년까지의 시기로서 테일러의 과학적 관리와 대량 생산 방식으로 특징지을 수 있다. 이 시기에는 노동 집약적 산업에서의 노동 생산성 향상이 목표였으며, 테일러의 과학적 관리 개념과 Gilbreth 부부의 동작 및 시간 연구가 이러한 목표에 커다란 기여를 하였다. 같은 시기에 포드의 흐름 생산 방식에 의한 대량 생산 시스템 운영으로 제조 단가를 획기적으로 낮추어 노동 생산성이 비약적으로 향상되었다. 이러한 대량 생산 체제하에서는 단순 반복적 작업을 수행하는 작업자에게 공작물을 전달하기 위해 전기 모터에 의해 구동되는 컨베이어가 사용되었다. 이 시기를 고전적 IE(Industrial Engineering) 시대라 부를 수 있다.

두 번째 단계는 2차 세계대전 이후에서 1985년까지의 시기로서 전쟁 수행에 요구되는 대규모 시스템에 대한 체계적 관리 방법에 대한 연구와 제어 시스템과 컴퓨터를 이용한 자동화 기술이 발전한 시기이다. 즉, 대규모 시스템을 체계적으로 관리하기 위해 OR로 대표되는 최적화 방법론이 세계대전 중에 태동하여 비약적으로 발전하였으며, PLC(Programmable Logic Controller), 수치제어 기술(NC) 및 산업용 로봇 등 서보 제어로 대표되는 생산 현장에서의 컴퓨터 활용을 통한 제조 자동화 기술이 급속히 발전하였다. 자동화 생산은 제조에 ‘자동화’ 개념을 적용하는 것으로 산업화 과정에 있어서 자동화는 기계화의 다음 단계라 할 수 있다. 즉, 기계화가 작업자에게 작업에서 요구되는 신체적 요건(즉, 근육의 사용)을 지원하기 위해 기계장치들을 제공하는 것에 비해, 자동화는 인간의 감각적, 정신적 요구사항들을 크게 경감시켜준다. 이 시기를 근대적 IE 시대라 부를 수 있다.

세 번째 시기는 기존의 메인프레임 컴퓨터에 의한 중앙집중식 제어 방법이 아닌 PC와 Intranet에 의한 분산 제어 기술을 활용한 디지털 제조 기술이 발달한 시기이다. 디지털 제조는 사람의 개입이 없이 혹은 아주 작은 개입만으로 원하는 스타일이나 수량 만큼 제품을 만들기 위해 컴퓨터 기술이 사용되는 생산의 한 방식이다. 협의의 의미에서, 이것은 모든 생산 프로세스를 가상적으로 정의하고, 계획하고, 생성하고, 모니터링하고, 제어하는 것을 의미한다. 디지털 제조를 가능케 하는 기술로는 다음을 들 수 있다: 1) 제품의 디지털 방식 생성: 물리적 형태 대신에 디지털 형태로 제품을 생성 및 시뮬레이션 하며 가상 설계(VE)라고도 한다. 2) 제조시스템의 디지털 방식 생성: 물리적 공장 대신에 디지털 형태로 제조 공정을 생성 및 시뮬레이션 하며 가상 생산(VM)이라고도 한다. 3) 제조시스템의 컴퓨터 기반 계획 및 스케줄링: IT와 모델링 및 시뮬레이션 기술을 이용하여 생산 계획 및 스케줄을 생성하여 현장 운영을 제어하며 가상 제조시스템(VMS)이라고도 한다. 이 시기를 현대적 IE 시대라 부를 수 있다.

Table 1. Evolution of manufacturing system

시기	1910~1945	1945~1985	1985~2010	2010~
키워드	과학적 관리와 대량생산	제조 자동화와 시스템 관리	디지털 제조	스마트 제조
주요 개념	<ul style="list-style-type: none"> 노동생산성 향상 목표 테일러의 과학적 관리 개념 Gilbreth의 동작 연구 포드의 흐름 생산 	<ul style="list-style-type: none"> 최적화방법(OR) 컴퓨터 및 제어 이론 (PLC, NC, 산업용 로봇) 	<ul style="list-style-type: none"> PC/Intranet 기술 활용 가상설계/가상제조 	<ul style="list-style-type: none"> mobile/IOT 기술 서비스 기반 제조 작업자 행복과 창의력 중시
IE 시대 구분	고전적 IE	근대적 IE	현대적 IE	미래의 IE

네 번째 시기는 2010년 이후로 볼 수 있으며, 스마트 폰으로 대표되는 모바일 기술과 IOT(Internet Of Things) 기술이 제조 현장에 급속히 적용되고 있는 시기이다. 즉, Smart Factory나 Smart Product 기술이 성숙함에 따라 서비스에 기반한 제조가 이루어지고 있는 시대라 할 수 있으며 인간의 행복과 창의력이 중시되고 있다. 이 시기를 미래의 IE 시대라 부를 수 있다. 이를 요약하면 <Table 1>과 같다.

3. 제조시스템공학 분야의 국내 학술 연구 동향

지난 40년간 산업공학 전공 연구자들의 심도 있는 제조 생산성 향상을 위한 연구는 급속한 산업화 과정에서 우리나라 경쟁력 향상에 커다란 기여를 하였는데, 이러한 제조시스템공학 분야의 국내 학술 연구 동향을 파악하기 위해 본 논문에서는 대한산업공학회 소속 연구자들의 연구 발표 내용을 조사 분석하였다. 조사 대상 기간은 처음으로 이 분야의 논문이 발표된 1983년부터 2014년 7월까지이며 다음 논문집에 게재된 논문 중 제조시스템공학 분야에 속하는 논문을 대상으로 하였다: (1) 대한산업공학회지, (2) 산업공학지(IE interfaces), (3) 한국 CAD/CAM 학회논문집에서 현재 산업공학과 소속이거나 산업공학 출신인 저자의 논문, (4) 산업공학과 소속 주요 연구자들의 국내외의 논문(Scopus 검색). 이 중에서 (1)과 (2)에 게재된 논문은 해당 저자들이 산업공학회에서 활동을 하는 것으로 간주하고 저자의 현재 소속을 가리지 않았다.

분석 대상 논문은 총 307편이었으며, 전수 조사라고 할 수는 없지만 연구 동향을 파악하기에는 충분하다고 판단된다. <Figure 1>은 조사한 논문집 별 논문의 편수를 보여주고 있다.

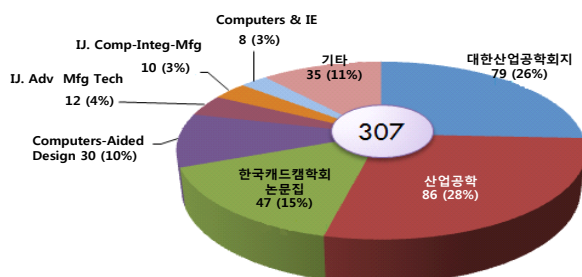


Figure 1. Paper distribution by journal

연구 동향 분석을 위해 제조시스템공학 분야를 크게, 1) 제조공정과 2) CAD/CAM 및 3) 자동화/정보화의 세 연구 분야로 다시 세분하였는데, 307편의 논문 중에서 제조공정 분야는 44편(15%), CAD/CAM/CAPP 분야는 118편(38%), 그리고 자동화/정보화 분야는 146편(47%)을 점하고 있다. 각 연구 분야별 주요 연구 주제와 연구 내용은 다음과 같다:

1) 제조공정

- (1) 절삭 : 조건 최적화, 조건검색, 공구수명분석, 공구선정, 공구파손 감지(Lee and Kim, 1996; Shin et al., 2000)
- (2) 방전가공 : 전극소모량 예측, 방전조건 결정(Lee et al., 1998; Lee et al., 2012)
- (3) 공구관리(Lee and Lee, 1995; Kim and Yang, 2003)
- (4) 사출 : 공정변수 예측과 최적화(Kim et al., 2005; Lee, K. H. et al., 2012)
- (5) NC 기계의 정밀도 및 controller 평가(Suh et al., 1998)
- (6) 측정, CMM : 기어, airfoil 등의 특정 부품 측정, 탐침별 선정(Shim and Byun, 1996; Joung et al., 2002)

2) CAD/CAM/CAPP

- (1) 곡면 모델링 : 측정 데이터로부터 곡면보간, sweep 곡면, 복합곡면의 연속조건, 흠어진 점(삼각 패치), edge/corner blending, NURBS의 행렬표현(Choi and Ju, 1989; Choi and Lee, 1990; Yoo and Jeong., 2000; Park et al., 2006)
- (2) 부재배치(Lee et al., 2011)
- (3) 2D 가공 : 곡선가공, Area cutting(pocketing), 2D 윤곽곡선 offsetting 알고리즘, 자유곡선 가공 경로 생성(Shin et al., 1995; Ko et al., 2006; Park and Choi., 2001; Huh et al., 2006)
- (4) Pocketing : 공구경로길이 최소화, 공구경로 연결, 공구의 비절삭 이동거리 최소화, 레이저가공을 위한 scanning 경로 생성(Kim and Park, 2002)
- (5) 3D 곡면 가공 : 곡면 offsetting(곡면, z-map, 삼각망), 공정 모델링, 공구경로 계획, 황삭, 공구경로생성, 공구간섭 방지, 잔삭 가공, 절삭시간 예측(Choi et al., 1988; Choi and Jun, 1989; Jun, 1993; Choi and Jerad, 1998; Park and Park, 2006; Chung, 2005)
- (6) 5축 및 다축 가공 : 셋업, 공구경로 산출, 공구자세 최적화,

최적공구길이, 가공시간 예측, 이송속도, 프로펠러, 터빈 블레이드, 임펠러 등 특정 부품의 가공, 특이영역 회피, 오차, ruled surface 가공(Choi *et al.*, 1993; Kang and Suh, 1995; Lee, 1996; Lee and Park, 1999; Lee and Lee, 2001; Park and Lee, 2002)

- (7) NC 가공 검증 및 모의 가공(Choi and Chung, 1995; Chung, 1995; Choi and Kim, 1997; Chung *et al.*, 1998)
- (8) STEP-NC(Suh *et al.*, 1995; Suh *et al.*, 2002; Shin *et al.*, 2007)
- (9) 전용 CAD(자동 설계) : 사출 금형의 설계 자동화(부품 라이브러리, 파팅 라인, 요소배치), 냉각 팬, 발전터빈(Kang *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2000)
- (10) 전용 CAM : 금형의 구멍 가공, 박용 프로펠러, 타이어 금형, 브라운관 제조용 노광 렌즈, 구조 패턴(스티로폼), 흉상 환조, 베벨 기어(Lee, S. Y. *et al.*, 2000; Chu *et al.*, 2004; Yoo and Jeong, 2001)
- (11) PDM : Multi-BOM, 정보시스템 아키텍처(Do, 2013)
- (12) 공정계획(CAPP) : 가공 순서 결정과 기계 선정, 공구 선정, 특징형상 추출 및 인식, set-up 계획, CAD/CAM 통합, 조선업에서의 공정계획 및 공간 스케줄링(페인팅, 조립)(Choi, 1985; Cho *et al.*, 1999; Seo and Choi, 2001)

3) 자동화/정보화

- (1) 산업용 로봇 : 충돌회피, 비전 이용, 응용(페인팅, 용접, 두께골천공)(Choi, J. S. *et al.*, 1985; Choi and Kim, 1996; Moon and Han, 1996; Cho *et al.*, 1999; Jung, 2013)
- (2) FMS, FMC : 설계(시스템 구조 및 레이아웃), 운용(공정 계획, 일정계획, 제어/모니터링), 시뮬레이션 활용(Lee and Kim, 1988; Lee, G. G., 1990; Jung *et al.*, 1993; Lee and Bae, 1994; Pyoun and Choi, 1994; Choi and Han, 1995; Hwang, 1996; Kim *et al.*, 2004)
- (3) 자동창고 : 저장 위치 결정, 주행 시간 분석, 수행도 평가,

설계(전문가 시스템, 수리모델 이용)(Kim, 1993; Lee, 1995; Lim, 1996; Lee, 2004)

- (4) AGV : 운행 경로, 적정 대수, 유휴 차량의 대기 위치 결정, 성능 평가(Choi and Jung, 1992; Seo, 1994; Bae and Kim, 1996; Suh and Jang, 2000; Chung and Kim, 2002; Chung *et al.*, 2005)
- (5) PLC : PLC 프로그램 생성 및 오류 검증, PLC 기반 시스템의 설계 및 검증(Koo *et al.*, 2008; Ko *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2009a; Han and Park, 2009)
- (6) 생산 정보화 : 통합 정보시스템, 협업 지원, 일정 계획, POP, MES, SFC, Ubiquitous 공장(Choi *et al.*, 1999; Han and Park, 2004; Han *et al.*, 2005; Chung *et al.*, 2005; Park and Yoshida, 2009; Son *et al.*, 2009; Cho *et al.*, 2010; Suh *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2012)
- (7) Green manufacturing : Green BOM, 재활용(Mok *et al.*, 1997; Park *et al.*, 2012)
- (8) VMS(Virtual Manufacturing System)(Han, 1998; Lee *et al.*, 2001)
- (9) System Modeling and Simulation(Choi and Han, 1995; Choi *et al.*, 1996b; Park *et al.*, 1997; Koo *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2012)

<Figure 2>는 연도별 논문의 발표 편수 분포를 보여주고 있는데, 제조시스템공학 분야의 전반적인 논문 편수는 1980년대 말부터 1995년까지 논문 편수가 급격히 상승하다 그 후 서서히 감소하고 있는 추세에 있다. 그 중에서 자동화/정보화 세부 분야는 1980년 중반부터 2000년 중반까지 활발하다 점차 감소하고 있으며, CAD/CAM/CAPP 세부 분야는 1990년부터 2010년 사이에, 그리고 제조공정 세부 분야는 대체적으로 2000년 전후로 연구가 활발했음을 파악할 수 있다.

<Figure 3>은 시대별 연구 분야의 분포를 보여주고 있는데 타원의 폭은 논문 발표 시기를, 타원의 두께는 논문의 연평균

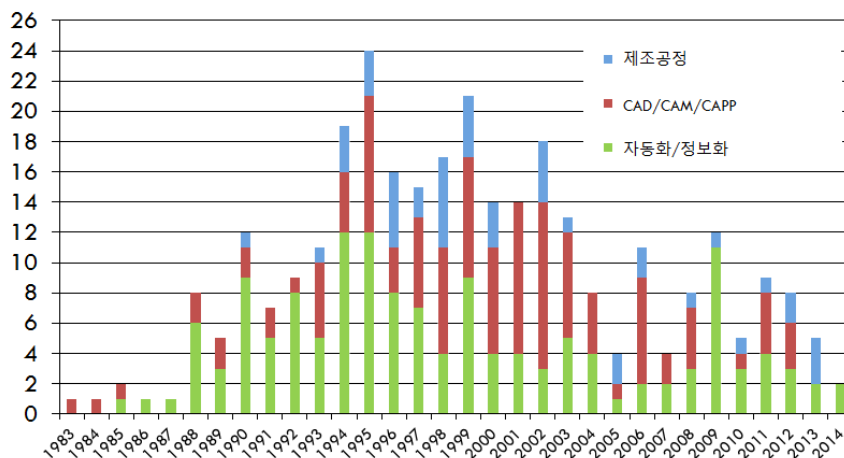


Figure 2. Paper distribution by year

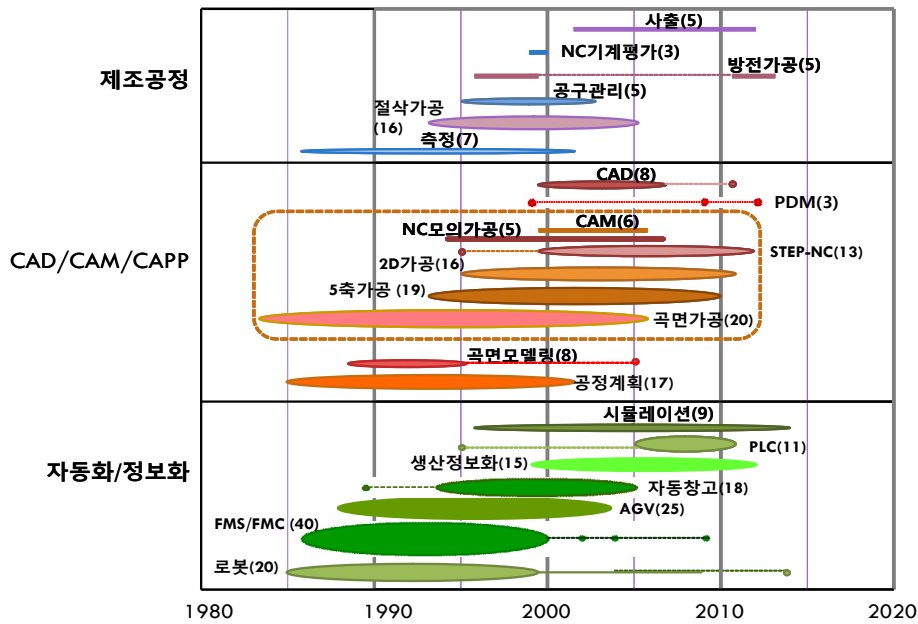


Figure 3. Trend of research themes by year

편수를 나타내도록 하여 타원의 면적이 논문의 편수를 반영하도록 하였고, 타원 옆에 연구 주제와 괄호 안에 논문 편수를 같이 병기하였다. <Figure 3>을 통해 파악할 수 있었던 경향으로는, 통상적으로 한 가지 연구 주제는 10~15년 정도를 한 주기로 하여 연구되고 있음을 알 수 있었다.

<Figure 4>는 제조시스템공학 분야 중에서 가장 연구가 활발하고 산업체 활용이 가장 많은 연구 주제인 NC 공구경로 생성 방법을 보다 자세히 살펴보기 위하여 곡면으로부터 NC 데이터를 생성하는 과정을 나타내었다. <Figure 4>에서 나타난 바

와 같이, 곡면을 가공하기 위해서는 곡면에 공구가 지나가는 경로를 샘플링하고 공구 접촉점(cutter contact point; CC 점)을 공구 위치점(cutter location point; CL 점)으로의 옮기고, 각 점을 연결하는 과정 등이 필요한데 CC(cutter contact) 기반 방식과 CL(cutter location) 기반 방식에 따라 샘플링과 옮기의 순서가 달라진다. 가공곡면(part surface)은 스플라인 매개변수 곡면, Z-map, 삼각망 등 다양한 방식으로 표현되는데, 그 표현 방식에 따라 옮기 및 샘플링 알고리즘이 달라질 수 있다. 또한 각각의 과정에서 경로계획, 공구간섭(interference) 회피, 최적 자

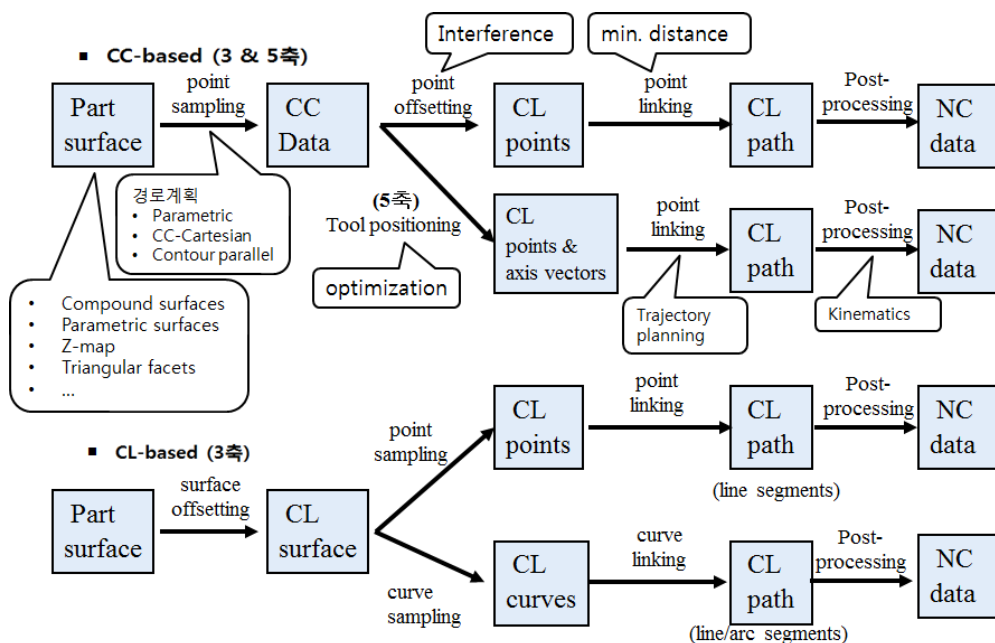


Figure 4. Comparison of tool path generation methods

세, 최소 거리 등의 문제가 있음을 보여준다.

4. 제조시스템공학 분야의 국내 산업체 활용

지난 40여 년간 국내에서의 제조시스템공학 분야 연구가 활발히 진행됨에 따라, 그에 병행하여 연구 결과의 성공적인 산업체 응용 사례도 다수 발표되었다. 국내 제조시스템공학 분야 연구의 산업체 응용은 크게, 1) CAD/CAM 분야, 2) 생산 시뮬레이션 및 스케줄링 분야, 3) MES(Manufacturing Execution System) 분야 및 4) VMS(Virtual Manufacturing System) 분야 등으로 구분할 수 있다. CNC(Computer Numerical Control)에 관한 연구 결과도 발견하였지만 산업체 활용 사례를 찾기 어려운 분류에서 제외하였다. 요약해보면, 시대별로는 대략 1990년대 중반까지는 CAD/CAM 관련 연구가 활발하였고, 이에 대한 산업체 활용도 많았다. 그 후에는 생산 시뮬레이션 및 스케줄링 분야에 대한 연구가 활발해졌고, 그와 함께 VMS에 대한 많은 연구가 발표되었다. 산업체 활용 실적이 많은 교수들 중에는 실험실 창업을 하여 성공적으로 운영하고 있는 사례가 있으며, 각 솔루션 전문 기업에서는 상용 패키지 형태로 소프트웨어 프로그램을 개발하여 관련 산업체에 보급하고 있다. 이하에서는 국내 연구 결과의 산업체 활용 부분을 4가지 유형으로 구분하여 정리한다.

4.1 CAD/CAM 분야

(1) KAPT/SWEEP 시스템 사용화

국내에서 CAD/CAM에 대한 연구가 처음 시작된 것은 1980년대 중반이다. 초창기에는 KAIST의 CAM Lab을 중심으로 활발한 연구를 수행하였으며, 연구 초기에는 금형공장 등에서 사용할 전용 시스템을 개발하였다. 즉, 포탄의 하우징 금형(<Figure 5> 참조)을 가공하거나, TV 브라운관이나 TV의 프론트 마스크를 가공하는 시스템을 개발하였다(Jun, 1985; Yang and Choi, 1989).

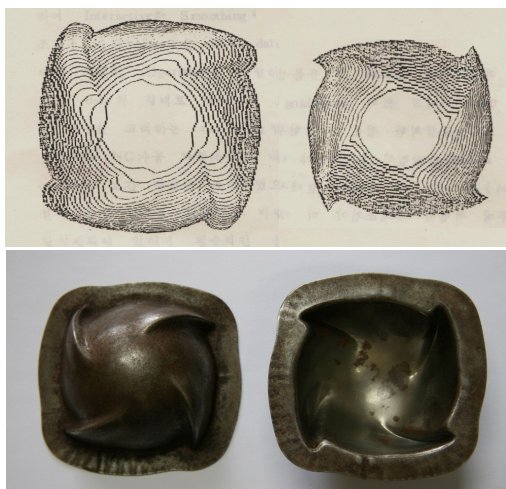


Figure 5. NC tool paths for a punch and die (above) and its drawn plates (below)

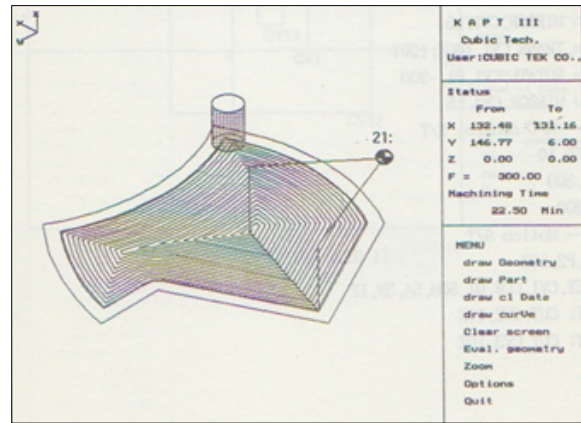


Figure 6. Screen of KAPT system

이러한 경험을 바탕으로 1980년대 말에 KAPT/SWEEP이라고 하는 국내 최초의 범용 CAM 시스템이 개발되었는데(Lee, 1990), KAPT는 2차원 가공을 위한 CAM 시스템이고(<Figure 6> 참조), SWEEP은 3차원 곡면 가공 시스템이다. <Figure 5>의 상단은 KAPT 시스템에서 생성된 결과이다. KAPT/SWEEP 시스템은 MS DOS에서 작동되는 시스템으로 지금까지 국내 산업계와 교육기관에 약 1,000카피 정도 보급되어 CAM 국산화의 시초가 되었다(Choi *et al.*, 1996a).

(2) 오메가와 Z-master

1980년대 말에 KAIST CAM Lab에서 개발된 CAM 시스템을 국내에 보급하기 위하여 전문 솔루션 기업인 큐빅테크(주)가 설립되었고, 이후 현재까지 국내의 CAD/CAM 발전에 많은 공헌을 하고 있다. 큐빅테크(주)에서는 KAPT/SWEEP의 성공에 힘입어 2차원과 3차원을 통합한 시스템인 오메가 시스템을 개발하여 보급하기 시작하였다. <Figure 7>은 오메가 시스템의 화면으로서 MS Windows가 보급되기 시작한 시기라서 KAPT/SWEEP에 비해 훨씬 세련된 모양과 기능을 갖추고 있다. 오메가 시스템은 지금까지 산업계와 교육기관에 약 5,800여 카피가 보급되었다(Shin *et al.*, 1995; Yoo *et al.*, 1999; Yoo and Jeong, 2000; Lee *et al.*, 2000; Yoo and Jeong, 2001).

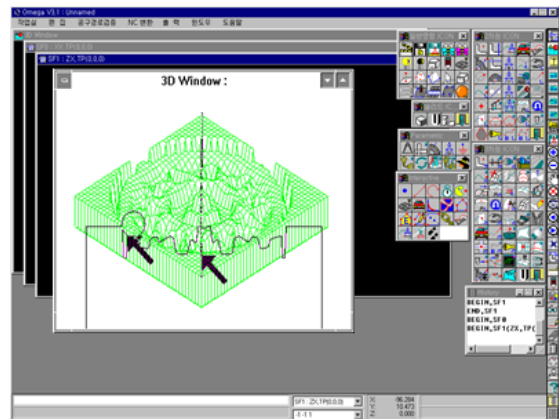


Figure 7. Screen of Omega system

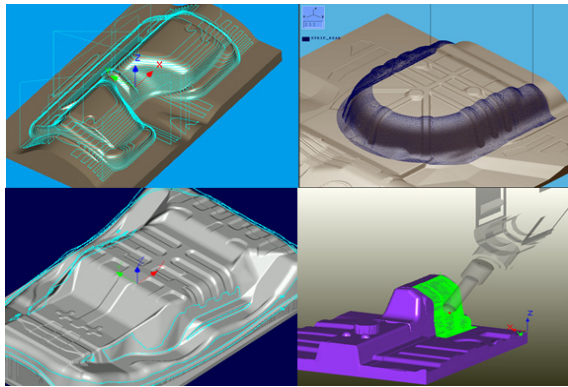


Figure 8. Z-master system

KAIST CAM Lab 연구팀에서는 1990년대에 들어서 가공 시뮬레이션에 대한 연구를 활발히 수행하였으며, 이 연구 결과를 모아서 Z master 시스템을 발표하였다(<Figure 8> 참조). 초기 시스템은 자동차나 가전 금형을 가공하는 NC 데이터를 검증하는 기능 위주로 개발하였지만 점차 기능을 확대하여 NC 데이터의 생성과 생성된 공구 경로의 편집 기능을 갖추게 되었다(Chung, 1995; Choi *et al.*, 1994; Choi and Chung, 1995; Chung and Choi, 1996; Chung *et al.*, 1998; Park *et al.*, 1998). 이 시스템은 국내의 모든 자동차 회사와 가전 금형 회사에서 사용되었을 뿐만 아니라 Chrysler Motors(U.S.A.), Toyota Motors(Japan), Mazda Motors (Japan) 등과 같은 외국의 자동차 업체에서도 사용되고 있다.

(3) 전용 CAD/CAM 시스템

1990년대 이후에는 CAD/CAM 기술을 다양한 산업 현장에 적용한 연구들이 발표되었는데, 예를 들면 자동차 패널 금형을 위한 3축 가공데이터 및 포켓가공 경로 생성(Lee, 1994)과, 터빈 블레이드나 선박용 프로펠러 등과 같은 5축 가공에 대한 연구 결과 들을 들 수 있다(Lee and Park, 1999).



Figure 9. Product of large propeller of ship(diameter : 11m, weight : 114 ton) and 5 axis machining center of Hyundai Heavy Industries

이외에도 특정한 분야에 적합한 전용 시스템으로 개발된 CAM 시스템도 다수 있는데, <Figure 9>에 나타난 바와 같이 현대 중공업(주)에서 사용하고 있는 5축 조선용 프로펠러 시스템이 대표적이다. 또한 5축 타이어 모델 가공용 시스템(<Figure 10> 참

조)이 개발되었는데 상용 CAD/CAM 시스템에 비해서 설계 생산성이 우월하므로 타이어 금형 시장 점유율 세계 1위 업체인 세화 IMC(주)와 MK테크놀로지(주)에서 현재까지도 사용하고 있다(Lee, 1996; Lee and Park, 1998).



Figure 10. Product of tire master model based on dedicated CAM system

이 시기 이후에 조선 산업에 적합한 CAD/CAM 연구도 많이 진전이 되었는데. 선박 건조를 위해 조선용 CAD 시스템에서 설계된 부재를 자동으로 강재에 배치하고 다양한 절단 장비에서 필요로 하는 도면과 가공 데이터를 생성하여 작업 현장에 제공하는 조선용 CAM 시스템에 대한 연구 결과가 발표되었고, 이는 2000년대 초에 E-NEST라는 상표로 상용화되었다(<Figure 11> 참조).

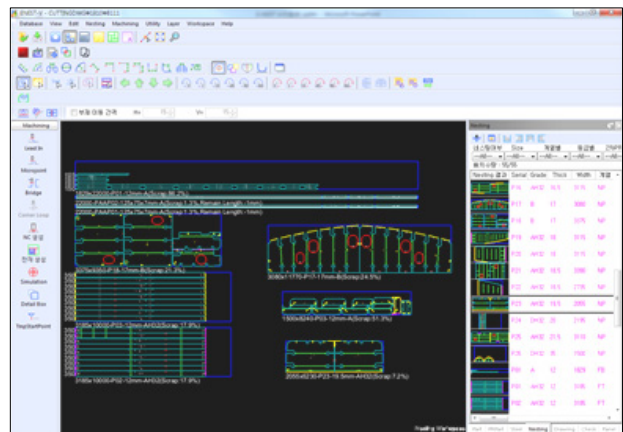


Figure 11. E-NEST : CAM system for shipbuilding

이 시스템은 원가 절감을 위해 큰 강재에 작은 부재를 효율적으로 배치하여 스크랩 량을 최소화 하는 것과 남아 있는 잔재 영역을 자동으로 탐색하여 잔재로 활용될 수 있도록 하는 것이 중요한 요건이며 현재 현대중공업(주), 삼성중공업(주), 삼호중공업(주) 등에서 사용되고 있다. 이 시스템의 성능을 평가하는 가장 큰 성과 척도는 자동 네스팅 수율이다. 그동안 이를 향상시키기 위한 연구가 다양하게 진행되어 왔는데, 주된 내용은 부재들을 일정한 패턴별로 구분 또는 조합하고 배치 가능한 영역에 최적으로 배치하는 것이다(Lee *et al.*, 2011).

4.2 시뮬레이션 기반 생산 운영 시스템 분야

1990년대 이후 생산 시뮬레이션과 그를 이용한 스케줄링에

대한 연구 결과도 관련 산업체에 많은 도움을 주었다. 생산 시물레이션 분야는 반도체 FAB 생산 또는 LCD Panel 생산과 같이 제조 공정이 복잡하고, 생산 리드 타임이 오래 걸리며, 생산량이 많은 공장에서 주로 활용되고 있다. 생산 라인을 효율적으로 운영하기 위해서는 정체 현상이 발생할 시점과 대상 제품 및 설비군을 미리 파악하고 대책을 수립할 수 있어야 한다. 그러나 생산 라인의 복잡성으로 인해 사람에 의한 예측이 불가능하기 때문에, 단기(1~3일) 또는 중기(1~2주) 기간 동안의 라인상황을 예측하기 위해 생산 시물레이션 전용 시스템을 산업계에서 도입하여 활용하고 있는 실정이다. 예를 들면, VMS Solutions(주)는 2002년부터 DES(Discrete Event Simulation) 기반의 생산전용 시물레이션 시스템인 SeePlan LSE를 개발하여 국내 반도체 및 LCD Panel 제조 회사에 적용하고 있다(<Figure 12> 참조). 이 시스템은 현재 국내 대부분의 반도체 제조 회사와 외국 반도체 회사(삼성전자(주) 반도체, SK 하이닉스(주) 반도체, TSMC, Infineon 등)에서 사용하고 있고, 일부 LCD Panel 제조 회사에서도 활용하고 있다(Choi and Choi, 2011; Song *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2013a).

고가의 생산 설비를 사용하고 물류가 자동화 되어 있는 공장에서는 설비가동률과 생산량을 최대화하고 생산 변경 사항을 실시간으로 반영하기 위해 Real Time Scheduling(RTS) 시스템을 활용하고 있다. RTS 시스템은 복잡한 제조 공정과 생산 제약, 병목 설비군의 정체 현상 등을 고려하여 실시간으로 설비별 작업 계획을 수립하고, 수립된 작업 계획에 따라 MES(Manufacturing Execution System)에 의해 물류 시스템이 자동으로 작업물을 설비에 반송하여 공정을 진행하도록 하고 있다(Yang *et al.*, 2013b; Son *et al.*, 2009; Chung *et al.*, 2005). 현재 국내의 대부분의 반도체 FAB라인과 LCD Panel 생산 라인에서는 RTS 시스템을 이용한 라인 운영이 이루어지고 있으며, 이러한 용도로 국내에서 개발된 시스템으로는 VMS Solutions(주)의 SeePlan APS, CSPI 사의 ezDFS, KSTEC사의 KSTEC RTS 등이 활용되고 있다.

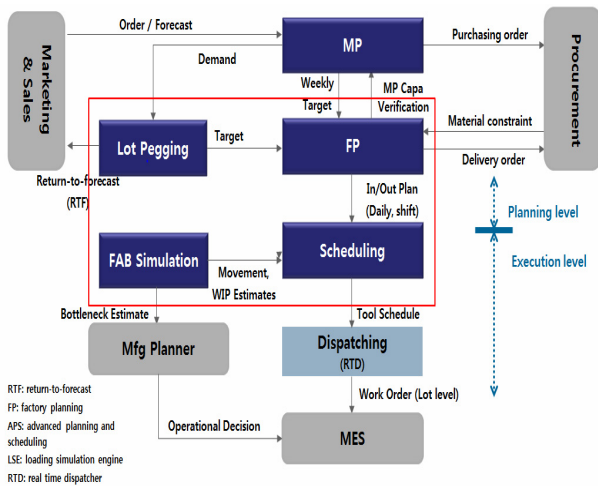


Figure 12. Application scope of SeePlan LSE in the production planning and scheduling

4.3 MES(Manufacturing Execution System) 분야

MES는 반도체나 LCD 제조와 같은 첨단 산업 뿐만 아니라 자동차, 제약 등 대부분의 제조 산업에서 폭넓게 사용되는 공장의 제조관리 및 통제 시스템이다. 즉, MES는 제조 현장 운영에 필요한 각종 데이터의 생성 및 이력 관리까지 거의 모든 데이터를 통합 관리하는 역할을 수행한다(Kim *et al.*, 2011; Cho *et al.*, 2010; Park and Yoshida, 2009).

국내에서는 에임시스템(주), 미라콤아이엔씨(주), LG CNS(주) (<Figure 13> 참조), 엑센솔루션(주) 등에서 MES를 개발 보급하고 있는데 산업공학을 전공한 사람들이 주도적인 역할을 하고 있다. MES에서는 공정 진행 정보의 조회 및 제어, 설비 제어 및 조회, 품질 정보 집계 및 제어, 실적 정보 집계, 창고 운영 관리, 재공품 관리, 자재투입 정보 등을 제공한다.

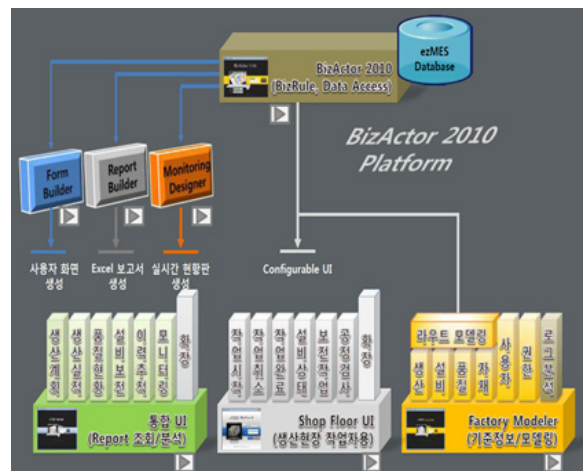


Figure 13. ezMES system of LG CNS Co., Ltd.

4.4 VMS(Virtual Manufacturing System) 분야

VMS(Virtual Manufacturing System)는 Digital Manufacturing 과 연관해 공장의 설치 단계에서 컴퓨터상의 가상공장(virtual factory) 모델을 이용하여 실제 생산라인에 있는 로봇, 이송장치, 지그, 각종 디바이스 등을 컴퓨터상에서 모델링하고 성과 예측, 물류제어, 설비배치 등을 사전검증하는 것을 말한다.

공장 설계는 크게 물리적 설계와 논리적 설계로 나눌 수 있는데, 물리적 설계에서는 생산 시스템의 기계적인 구성 요소들을 설계하며, 논리적 설계에서는 생산 시스템의 제어 로직(PLC 프로그램)을 설계하게 된다. 생산 시스템을 제어하는 PLC 프로그램은 입출력 접점들을 이용하여 생산 시스템의 상황을 다양한 센서들을 통해 인지하고, 실제 상황에 적합하게 작업을 수행하는 액츄에이터들에게 명령을 내리게 된다. 이 때 생산 시스템의 제어 로직을 실제 고가의 물리적 생산 시스템이 아닌 가상의 컴퓨터 기반 생산 시스템을 이용하여 검증하게 되면 실제 생산 시스템의 설계 및 구축에 소요되는 시간과 노력을 크게 절감하는 효과를 기대할 수 있게 된다(Wang *et al.*,

2008; Park *et al.*, 2009a; Park *et al.*, 2009b; Ko *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2009c; Han and Park, 2009; Ko *et al.*, 2011).

이를 위해서는 가상 생산 시스템 모델이 센서와 액츄에이터 수준에서 정교하게 모델링 되어야 하며, 또한 PLC와 같은 실제 하드웨어와 연동하게 하는 기술이 필요하게 된다. 이러한 분야에서는 PLC 검증(유디엠텍(주), <Figure 14> 참조)과 자동차 OEM 부품업체 대상 가상공정 검증(오토에버 시스템(주)), 자동차/LCD 제조 공정 모델링 및 제조 공정 산업용 훈련 시스템(큐빅테크(주)) 등의 시스템들이 개발 되어 활용되고 있으며, 적용 사례로는, 현대기아자동차(HKMC) 생산라인, LG Display, LG CNS, LG 화학 및 대우조선해양(주) 등을 들 수 있다(Choi *et al.*, 2005; Ko *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2009).

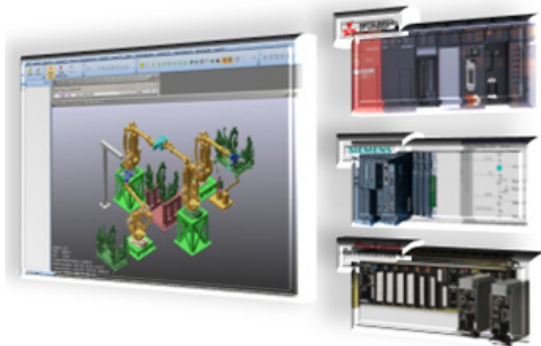


Figure 14. PLCStudio system of UDMTek Co., Ltd..

5. 제조시스템공학 분야의 전망

서론에서도 일부 언급되었지만, 최근 중국 등 선진 개도국의 과학기술 경쟁력 강화로 선진국들은 제조 리더십 약화에 대한 위기감을 느끼고, 제조업을 부활하고 경쟁력을 강화하기 위한 새로운 법과 제도를 마련하고 국가 주도의 R&D 프로그램을 경쟁적으로 추진 중에 있다.

미국은 제조업 경쟁력 회복을 위해 2012년 7월 ‘미국 제조업 재생계획’을 발표하였는데(Kim, 2014), 제조 분야 원천 및 사업화 기술 개발과 지방 중소기업 지원 등을 위해 전국에 15개의 제조 혁신기구(IMI, Institute for Manufacturing Innovation)를 설치하고, IMI가 개발한 기술과 지식을 공유하는 전국 네트워크인 제조혁신 네트워크(NNMI, National Network for Manufacturing Innovation)를 구축하는 등의 내용을 담고 있다. 미국은 또한 차세대 기술인 CPS(Cyber-Physical System) 연구에 박차를 가하고 있는데, 2007년 8월 미국 대통령과학정책 자문위원회의 리포트인 “Leadership under challenge : IT R&D in a competitive world”의 권고 이후, NSF의 학제간 CPS 연구 프로그램을 적극 후원하고 있다. CPS는 물리적 H/W를 개념적 서비스와 연결하는 개념으로 computation, communication 및 control을 통해 물리적 세계의 능력을 확장하고 상호작용하는 능력이라 정의된다.

CPS의 응용 분야는 수송, 의료, 스마트 그리드, 재생 에너지, 제조 등 광범위한 분야를 포괄하고 있으며, 특히, 2012년부터 제조 분야에서의 CPS 관련 연구를 본격화 하고 있다.

독일은 2010년에 첨단 기술전략 2020(High-Tech Strategy 2020)을 통해 국가 기술혁신 전략을 제시하였으며, 그 중 생산기술 과제로서 미래 제조 분야를 주도하기 위해 Industry 4.0을 선정하였고, 2013년 4월 연방 교육연구부 후원 하에 National Academy of Science and Engineering 주도의 working group에서 “Industry 4.0 전략 이니셔티브를 구현하기 위한 권고안” 최종 보고서가 발표되었다(Kagermann *et al.*, 2013). Industry 4.0은 ICT와 제조업의 융합을 통해 제조업의 완전한 자동 생산 체계를 구축하고 모든 생산 과정의 최적화를 통해 Smart Factory를 구축하는 것을 목표로 제시하고 있으며, 지멘스 등을 중심으로 한 산학연 공동연구를 통해 Smart Factory 프로토타입을 구현하고 있는 중이다.

우리나라는 지난 40년간 제조업이 국부 및 고용 창출의 역할을 수행하여 왔지만, 최근 제조 패러다임의 변화에 맞추어 새로운 진화 전략을 수립할 시점임을 인식하고 2014년 6월에 산업통상자원부에서 ‘제조업 혁신 3.0 전략’을 발표하였는데, 이는 1) 융합형 신제조업 창출, 2) 제조혁신기반 강화, 3) 주력 산업 핵심역량강화 전략으로 구성되어 있다. 그 중에서 ‘융합형 신제조업 창출 전략’ 중의 하나로 IT/SW/IOT 기반 공정혁신을 주요 과제로 설정하였으며, 이는 IT/SW/IOT 등과의 융합을 통해 생산 전 과정을 지능화·최적화하여 2020년까지 1만개의 스마트 공장 보급 추진을 주된 내용으로 하고 있다. 이에 한국생산기술연구원 주도하에 한국 중소형 제조업 현실을 감안한 스마트 공장 개념의 정립, 기술개발 및 기반 조성 측면의 실행 방안을 현재 기획 중에 있다.

이와 같이 우리나라를 포함한 세계 주요국들은 미래 제조 분야를 주도하기 위해 많은 노력을 경주하고 있으며, 이에 따라 미래 제조시스템 연구도 활발히 이루어지고 있는 실정이다. <Figure 15>에 나타난 바와 같이 미래 제조시스템은 크게 다음과 같은 방향으로 진화하리라 예상 된다. 1) 관리 시스템의 정보화를 통해 보다 효율적 조직을 운영할 수 있게 된다. 즉, ICT 기술의 적극 활용을 통해 3C(Communication, Collaboration, Coordination)가 향상됨으로써 조직 운영의 효율이 극대화된다. 2) 관리 시스템의 지능화를 통해 인간의 창의력과 행복이 증시된다. 즉, IOT 기반의 지능 환경(intelligence environment) 구축을 통해 ‘직장 안정성’, ‘자긍심’ 및 ‘원활한 관계’라는 3S(security, self-esteem, smoothness)를 확보함으로써 인간다운 삶과 창의력이 증시되는 환경이 구축된다. 이를 위한 기반 조건으로는 근골격계 질환이 최소화되는 인간다운 작업 환경의 운영이 선행되어야 할 것이다.

이러한 제조시스템 분야의 전체적인 추세를 감안해 볼 때, 향후 미래 제조 분야를 주도하기 위해 우리나라 정부와 학계 및 산업계의 긴밀한 협력을 통한 심도 있는 미래 제조시스템 연구가 요구되는 시점이라 하겠다.

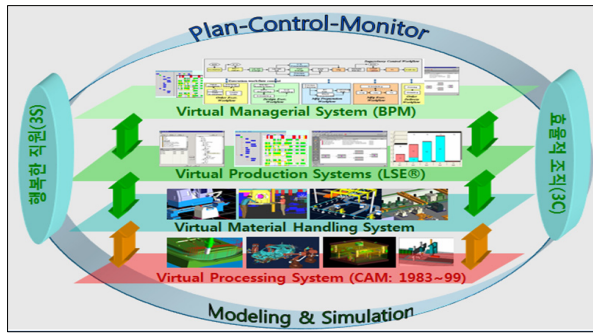


Figure 15. Directions of Future manufacturing system

6. 결론

지난 40년간 대한산업공학회 소속 연구자들이 제조 생산성 향상을 위해 많은 연구를 수행하였는데, 제 3장에서 살펴본 제조 시스템 공학 분야의 국내 연구 동향을 요약해보면, 대한산업공학회지와 산업공학지(IE interfaces) 및 한국 CAD/CAM 학회 논문집 중에서 제조시스템 분야의 논문과 이 분야의 산업공학 분야 소속 또는 출신 연구자들의 국내외 논문 등 총 307편의 논문을 조사한 결과, 전반적으로는 1980년대 중반부터 1990년대 중반까지 논문 편수가 증가하다 그 후 점차 감소하고 있으며, 시대별로 유행하는 연구 주제가 있음을 파악할 수 있었으며, 그 경향은 아래와 같다. 1) 제조 공정 분야에는 논문 실적이 전체 중 가장 적으며, 측정, 절삭가공, 공구관리, 방전, 사출 등에 관한 연구가 있었다. 2) CAD/CAM/CAPP 분야는 주로 2축, 3축, 5축 가공에 있어서 공구 경로 생성에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으며, 산업체 응용이 활발한 특징을 가지고 있다. 3) 자동화/정보화 분야는 1990년대에는 FMS, AGV, 자동창고의 설계와 운영에 관한 연구가 많았으며, 그 후에는 주로 PLC, 생산정보화, 시뮬레이션에 관한 연구가 수행되고 있음을 파악할 수 있었다.

제 4장에서 살펴본 국내 제조시스템공학 연구 결과의 산업체 응용 사례를 요약해보면, 첫째로 국내 CAD/CAM 연구의 초창기라 할 수 있는 1980년대 중반부터 KAIST CAM Lab을 중심으로 CAD/CAM 연구와 시스템 국산화가 병행 진행되었고, 이어 1980년대 후반에는 CAM 시스템의 국산화 및 상용화에 성공하였다. 1990년대에는 CAD/CAM 솔루션 전문기업이 창립되어 긴밀한 산학협력으로 2000년대까지 국산 CAM 소프트웨어를 발전시켜 국내 제조 생산성 향상과 CAM 시스템 세계화에 이바지하였다. 이외에도, 1990년대 이후에는 조선이나 타이어 제조 등 특정 산업에 적합한 전용 CAD/CAM 시스템이 다수 개발되어 산업체에서 성공적으로 활용되고 있는 형편이다. 2000년 이후에는 이산사건 시뮬레이션 기반 생산 운영 시스템들이 국내 산업공학과 연구진들을 중심으로 개발되어 현장에 다수 활용되고 있으며, 최근 VMS에 대한 연구도 상당히 진전되어 자동차 산업을 위시하여 여러 산업 분야에서 활용 중인

실정이다.

제 2장에서 살펴본바와 같이 제조시스템은 1980년대 PC/Intranet 기술을 활용한 디지털 제조 개념에서 더 나아가 2010년대 이후에는 mobile/IOT 기술을 바탕으로 하는 Smart Factory 개념으로 진화하고 있다. Smart Factory 하에서 미래의 제조는 고효율의 지능화된 공장에서 편리하고 안전한 근로자 환경을 통해 고부가치의 제품을 생산하는 새로운 생산 패러다임으로 전환되리라 예상된다. 이러한 미래 제조시스템의 주도권을 잡기 위해 독일의 Industry 4.0 전략 등 세계 주요 나라에서 제조 혁신을 위한 전략 수립 및 연구에 박차를 가하고 있는 실정이다.

국내 제조(업)은 지금까지 국부 창출의 원천이었고 고용에 있어서 원천적이고 파급력이 높은 기반을 제공하였으며 과학 기술 R&D의 근간으로서의 역할을 충실히 수행하였는바, 현 시점에서 고급기술인력, 생산자본의 축적 및 과감한 경영의지 등 그동안 쌓아온 제조 분야의 강점에 세계 최고 수준이라 평가받는 IT 인프라를 융합하여 우리나라의 특성을 잘 살린 미래 성장 전략 수립이 절실한 시점이라 생각된다.

이와 같은 우리의 미래 성장 전략 중에서 미래 제조시스템의 방향이라 할 수 있는 Smart Factory 환경 구축과 산업별 특성을 살린 ‘스마트 생산운영 시스템’의 정립과 개발에 산업공학의 주도적 역할이 절실히 요구된다.

참고문헌

- Bae, J. U. and Kim, K. J. (1996), A Development Tool for AGVS Controller using Simulation, *IE interfaces*, **9**(1), 25-40.
- Cho, K. K., Lee, S. H., and Ahn, J. H. (1999), Automated welding operation planning system for block assembly in shipbuilding, *International Journal of Production Economics*, **60**, 203-209.
- Cho, Y. H., Han, K. H., and Choi, S. H. (2010), Systematic Embedded Subsystem Development Methodology for POP System, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **23**(1), 35-47.
- Choi, B. K. (1985), STOPP : an approach to CAD/CAM integration, *Computer-Aided Design*, **17**(4), 162-168.
- Choi, B. K., Jung, J. Y., and Kim, D. W. (1985), Development of a Graphic Simulation Modeller for Robot Welding Process Planning, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **11**(1), 21-32.
- Choi, B. K., Lee, C. S., Hwang, J. S., and Jun, C. S. (1988), Compound surface modelling and machining, *Computer-Aided Design*, **20**(3), 127-136.
- Choi, B. K. and Jun, C. S. (1989), Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces, *Computer-Aided Design*, **21**(6), 371-378.
- Choi, B. K. and Ju, S. Y. (1989), Constant-radius blending in surface modelling, *Computer-Aided Design*, **21**(4), 213-220.
- Choi, B. K. and Lee, C. S. (1990), Sweep surfaces modelling via coordinate transformation and blending, *Computer-Aided Design*, **22**(2), 87-96.
- Choi, B. K., Park, J. W., and Jun, C. S. (1993), Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining, *Computer-Aided Design*, **25**(6), 377-386.

- Choi, B. K., Chung, Y. C., Park, J. W., and Kim, D. H. (1994), Unified CAM-system architecture for die and mold manufacturing, *Computer-Aided Design*, **26**(3), 235-243.
- Choi, B. K. and Chung, Y. C. (1995), Machining Simulation and NC-code Verification Using Z-map, *IE interfaces*, **8**(3), 155-169.
- Choi, B. K. and Han, K. H. (1995), Job Resource relation-Net Modeling for the Simulation of FMS, *IE interfaces*, **8**(3), 61-73.
- Choi, B. K., Jun, C. S., Yoo, W. S., and Pyoun, Y. S. (1996a), *CAD/CAM systems and CNC machining*, SciTechmedia, Korea.
- Choi, B. K., Han, K. H., and Park, T. Y. (1996b), Object-oriented graphical modeling of FMSs, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **8**(2), 159-182.
- Choi, B. K. and Kim, B. H. (1997), Die-cavity pocketing via cutting simulation, *Computer Aided Design*, **29**(12), 837-846.
- Choi, B. K. and Jerad, R. (1998), *Sculptured Surface Machining-Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers.
- Choi, H. Y. and Jung, M. Y. (1992), Guide-Path Design for Automated Guided Vehicles, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **18**(1), 121-139.
- Choi, J. H., Kim, J. G., Lee, D. H., and Choi, I. J. (1999), Development of the DNC System for SFC/POP, *IE interfaces*, **12**(3), 374-381.
- Choi, J. S. and Kim, D. W. (1996), Collision-Free Path Planning for Articulated Robots, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **22**(4), 579-588.
- Choi, M. W., Han, S. T., Seo, J. H., Woo, J. H., Lee, C. J. and Choi, Y. R. (2005), Digital Manufacturing Strategy and Case study of Automotive General Assembly, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **10**(3), 199-209.
- Choi, T. J. and Choi, B. K. (2011), Study on Automod Generating Emulation/Animation Model for Integrated Simulation of Production and Material Handling Systems, *Proceeding of Autumn Annual Conference of The Korean Institute of Industrial Engineers*, 178-182.
- Chu, W. S., Ahn, S. H., Kim, D. S., and Jun, C. S. (2004), MIMS : Web-based Micro Machining Service, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **9**(3), 246-252.
- Chung, B. D. and Kim, K. S. (2002), A Study on Design of a Tandem AGV System with Multi-Load AGVs, *IE interfaces*, **15**(1), 1-9.
- Chung, Y. C. (1995), Cutting simulation and verification of NC data for unified CAM system for die and mold manufacturing, *Ph.D. Thesis*, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST).
- Chung, Y. C. and Choi, B. K. (1996), Non-parametric Modeling of Cutter Swept Surfaces for Cutting Simulation, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **1**(1), 45-55.
- Chung, Y. C., Park, J. W., Shin, H. Y., and Choi, B. K. (1998), Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC verification, *Computer-Aided Design*, **30**(8), 587-594.
- Chung, Y. C. (2005), Tool-path Computing by Slicing Offset Triangles and Tracing Intersections, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **10**(6), 455-464.
- Chung, J. W., Jang, J. J., Suh, J. D., Koo, P. H., and Choung, Y. I. (2005), A Scheduling with semiconductor FAB Manufacturing integrated by lots balance and facility assignment, *Proceeding of Autumn Annual Conference of The Korean Institute of Industrial Engineers*, 931-938.
- Do, N. C. (2013), An Information System Architecture for Extracting Key Performance Indicators from PDM Databases, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **39**(1), 1-9.
- Han, K. H. (1998), New Directions in the CIM System Development-Virtual Manufacturing, *IE Interfaces*, **11**(3), 219-225.
- Han, K. H. and Park, C. W. (2004), A QFD-Based Requirements Analysis for the Development of Integrated Design and Manufacturing Information System, *IE Interfaces*, **17**(3), 261-268.
- Han, K. H., Park, C. W., Ok, J. S., and Kim, K. S. (2005), The Development of a Shop Floor-Centered Information System for the Integration of Design and Manufacturing Data, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **10**(4), 237-243.
- Han, K. H. and Park, J. W. (2009), UML-based PLC Ladder Logic Design and Automatic Generation of Ladder Code, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **14**(1), 50-59.
- Huh, J. H., Kim, Y. L., and Jun, C. S. (2006) Contour Parallel Offset and Tool-Path Linking Algorithm for Pocketing Using Pairwise Intersection Approach, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **11**(5), 375-383.
- Hwang, H. S. (1996), A Comparative Study of FMS Performance Evaluation Modeling Using FACTOR/AIM, *IE interfaces*, **9**(2), 191- 202.
- Joung, S. H. and Byun, J. H. (2002), An Experimental Study on Selecting the Diameter of Probe Stylus of a Coordinate Measuring Machine in Measuring the Edge Profile of High Pressure Compressor, *IE interfaces*, **15**(4), 432-438.
- Jun, C. S. (1985), NC Machining of Sculptured Surface from 3D Measuring Data, *M. S. Thesis*, Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST).
- Jun, C. S. (1993), Cutter Interference Avoidance in NC Machining of Compound Surfaces, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **19**(3), 139-154.
- Jung, E. K., Jeon, T. B., and Kim, Y. H. (1993), Flexibility Measurement Model for Cellular Manufacturing Systems, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **19**(3), 91-102.
- Jung, Y. C. (2013), Tool-path Generation for a Robotic Skull Drilling System, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **18**(4), 243-249.
- Kagermann, H. et al. (2013), *Final Report-Securing the Future of German Manufacturing Industry Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0*, Industrie 4.0 Working Group, Germany.
- Kang, J. K. and Suh, S. H. (1995), Determining Machinability and Setup Orientation for Five-axis NC Machining of Free Surfaces, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **21**(1), 67-84.
- Kang, J. G., Lee, H. S., Oh, K. J., and Jung, J. Y. (2000), Optimal Design and Die Manufacturing of an Axial Fan for Cooling Towers, *IE interfaces*, **13**(4), 717-724.
- Kim, B. H., Back, J. Y., and Yi, I. L. (2005), A Support System for Searching Robust Injection Molding Condition, *IE interfaces*, **18**(1), 73-81.
- Kim, B. K. and Park, J. Y. (2002), An Algorithm for Reducing the Tool Retraction Length in Zigzag Pocket Machining, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **28**(2), 128-138.
- Kim, G. Y., Jin, Y. E., Noh, S. D., Choi, S. S., Jo, Y. J., and Choi, S. O. (2011), Implementation Strategy and Effect Analysis of MES for a Small and Medium PCB Production Company based on BPR Methodology, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **24**(3), 231-24.
- Kim, J. H. (2014), *VIP Report*, Hyundai Research Institute, Seoul, Korea.
- Kim, K. H. (1993), Correlated Assignment Strategy in Miniload AS/RS, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **19**(1), 19-29.
- Kim, Y. J. and Yang, Y. M. (2003), Development of Web Based Machining Tool Data System Using XML(eXtensible Markup Language), *IE interfaces*, **16**(1), 8-15.
- Kim, Y. K., Kim, J. Y., and Shin, K. S. (2004), The Integration of FMS Process Planning and Scheduling Using an Asymmetric Multi-lev-

- eled Symbiotic Evolutionary Algorithm, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **30**(2), 130-145.
- Ko, K. H., Seo, J. C., and Choi, B. K. (2006) Automatic Feedrate Adjustment for 2D Profile Milling, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **5**(2), 175-183.
- Ko, M. S., Koo, L. J., Kwak, J. G., Hong, S. H., Wang, G. N., and Park, S. C. (2009), A Study of PLC Simulation for Automobile Panel AS/RS, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **18**(3), 1-11.
- Ko, M. S., Shin, H. S., Hong, S. H., Park, S. C., and Wang, G. N. (2011), A Template Based Process Modeling Methodology for Control Simulation, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **16**(5), 351-360.
- Ko, M. S., Cheon, S. U. and Park, S. C. (2013), A Method for Generating a Plant Model Based on Log Data for Control Level Simulation, *Trans. of the Society of CAD/CAM Engineers*, **18**(1), 21-27.
- Koo, L. J., Yeo, S. J., Lee, K. G., Hong, S. H., Park, C. M., Park, S. C., and Wang, G. N. (2008), The Process Analysis and Application Methods for PLC Code Programming, *IE interfaces*, **21**(3), 294-301.
- Koo, L. J., Park, S. C., and Wang, G. N. (2009), A Study of Methodology for Applying Simulation to Car Body Assembly Line using I/O Model, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **14**(4), 225-233.
- Lee, C. H., Wang, G. N., and Park, S. C. (2009), Design of a Vehicle Assembly Line Using PLC Simulation, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **14**(5), 323-329.
- Lee, C. S. (1990), A Study on Sweep Surface Modeling, *Ph.D. Thesis*, KAIST.
- Lee, C. S. and Bae, S. Y. (1994), Scheduling of Machining Shop Composed of Machining center and Multiple Pallets, *IE interfaces*, **7**(2), 107-120.
- Lee, C. S. (1994), Tool-Path Generation in NC Machining of Automobile Panel Die, *J. of The Korean Society of Automotive Engineers*, **2**(5), 74-84.
- Lee, C. S. (1996), Surface Modeling and 5-axis NC machining of Automobile Tire Model, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **9**(2), 2129-2141.
- Lee, C. S. and Park, G. R. (1998), A 4-axis NC Lettering System for the Side-wall of the Automobile Tire, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **11**(2), 65-78.
- Lee, C. S. and Park, G. R. (1999), Generation of 5-axis NC Data for Machining Turbine Blades by Controlling the Heel Angle, *Trans. of the Society of CAD/CAM Engineers*, **4**(2), 110-120.
- Lee, C. S., Park, G. R., and Kim, Y. H. (2000), Generating the Parting-Line, Parting-Surface and Core/Cavity for an Injection Mold by using Face-Edge Graph, *IE interfaces*, **13**(4), 591-598.
- Lee, C. S. and Lee, J. P. (2001), Calculating the Feedrate of 5-Axis NC Machining Data for the Constant Cutting Speed at a CL- point, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **6**(2), 69-77.
- Lee, C. S., Heo, E. Y., Kim, J. M. and Kim, D. S. (2011), A Study Of The Efficient Nesting Considering Scrap Feature, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers*, 533-537.
- Lee, C. S., Choi, I. H., Heo, E. Y., and Kim, J. M. (2012), A Method of Hole Pass-Through Evaluation for EDM Drilling, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **38**(3), 220-226.
- Lee, G. G. (1990), Buffer Sizing in FMS Environment through Transfer Pricing Mechanism, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **16**(2), 81-89.
- Lee, K. B. and Kim, Y. M. (1996), Expert System for optimal cutting speed and feed rate selection, *IE interfaces*, **9**(1), 1-10.
- Lee, K. B., Ju, S. Y., and Wang, G. N. (1998), Determination of Machining Parameters for Two Dimensional Electrical Discharge Machining using Neural Networks, *IE interfaces*, **11**(1), 145-153.
- Lee, K. H., Kang, Y. S., and Lee, Y. H. (2012), Development of Manufacturing Ontology-based Quality Prediction Framework and System : Injection Molding Process, *IE interfaces*, **25**(1), 40-51.
- Lee, M. K. (1995), Travel-Time Analysis for an Automated Mobile Racking System, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **21**(2), 195-206.
- Lee, M. K. (2004), Travel Time Models of a Hybrid Automated Storage/Retrieval Module for Small and Medium-Sized Enterprises, *IE Interfaces*, **17**, 52-61.
- Lee, S. W. and Lee, J. J. (1995), Tool Management System for Machine Shop Floor, *IE interfaces*, **8**(4), 191-200.
- Lee, S. Y., Jeong, H. M., Ko, C. N., Lee, D. K., Jeong, S. B. and Kim, S. B. (2000), Development of hole machining system for Commercial Vehicle Side frame, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*.
- Lee, Y. H. and Kim, S. S. (1988), A Simulation Support System for Optimal Design of FMS, *IE Interfaces*, **1**(2), 25-34.
- Lee, Y. S., Hwang, H. J., Park, M. J., Jang, D. Y., kim, J. P. and Na, K. H. (2001), Development of Web-based Virtual System to Simulate Forging Operation, *IE interfaces*, **14**(1), 1-8.
- Lim, S. G. (1996), Expected Travel Time and Class Layout for Class-based Automated Storage/Retrieval Systems, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **22**(2), 179-188.
- Mok, H. S., Kim, H. J., and Moon, K. S. (1997), Disassemblability of mechanical parts in automobile for recycling, *Computers and Industrial Engineering*, **33**(3/4), 621-624.
- Moon, S. H. and Han, M. H. (1996), Navigation Control for a Mobile Robot using a Camera, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **22**(2), 165-177.
- Park, J. H., Chung, Y. C. and Choi, B. K. (1998), Precision Shape Modeling by Z-Map Model, *J. of Korean Society for Precision Engineering*, **15**(11), 180-188.
- Park, J. H. and Yoshida, A. (2009), A Simplified MES Implementation for Small-sized Manufacturing Industries with EXCEL VBA, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **22**(4), 302-311.
- Park, J. C., Shin, H., and Choi, B. K. (2006), Elliptic Gabriel graph for finding neighbors in a point set and its application to normal vector estimation, *Computer Aided Design*, **38**(6), 619-626.
- Park, J. W. and Lee, J. G. (2002), CL-data Optimization of 5-axis Face-milling Via C-space and Effective-radius Map, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **7**(1), 34-41.
- Park, S. C. and Choi, B. K. (2001), Uncut free pocketing tool-paths generation using pair-wise offset algorithm, *Computer-Aided Design*, **33**(10), 739-746.
- Park, S. C. and Park, T. J. (2006), Pencil Curve Computation for Clean-up Machining, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **11**(1), 20-26.
- Park, S. C., Ko, M. S., Park, S. H., and Wang, G. N. (2009a), SOS-Net for Generation of PLC Program, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **14**(1), 60-68.
- Park, S. C., Seong, K. Y., Han, K. H., Pyun, J. J., and Wang, G. N. (2009b), PLC Program Monitoring for Manufacturing Systems Using PLC Signal Time Difference, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **14**(3), 176-185.
- Park, S. C., Lee, C. H., and Wang, G. N. (2009c), Design of a Vehicle Assembly Line Using PLC Simulation, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **14**(5), 323-329.
- Park, T. Y., Han, K. H., and Choi, B. K. (1997), An object-oriented mod-

- elling framework for automated manufacturing system, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **10**(5), 324-334.
- Park, Y. J., Shin, M. S., and Ryu, K. Y. (2012), Development of Green-BOM to Manage Eco-friendly Information on Products and Manufacturing Processes, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **17**(6), 387-397.
- Pyoun, Y. S. and Choi, B. K. (1994), Quantifying the flexibility value in automated manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, **13**(2), 108-118.
- Seo, Y. H. (1994), Integrated Manufacturing Systems Design : Integrated Approach to Process Plan Selection and AGV Guidepath Design, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **20**(3), 151-166.
- Seo, Y. H. and Choi, H. G. (2001), Machining Sequence Generation with Machining Times for Composite Features, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **6**(4), 244-253.
- Shim, C. G. and Byun, J. H. (1996), A Study on the Evaluation of the Gear Measurement Capability of a 3 Dimensional Coordinate Measuring Machine, *IE interfaces*, **12**(2), 180-192.
- Shin, D. O., Kim, Y. J., and Ko, S. L. (2000), Development of Tool and Optimal Cutting Condition Selection Program, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **26**(2), 165-170.
- Shin, H. Y., Jeong, H. M., and Kwak, Y. S. (1995), Machining of 2D Parametric Spline Using Cutter Radius Compensation, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **8**(3),
- Shin, S. J., Suh, S. H., and Stroud, I. (2007), Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications, *Computer Aided Design*, **49**(1), 1-16, 133-139.
- Son, H. S., Lee, H. Y., and Choi, B. K. (2009), Capacity-Filtering Algorithm based Release Planning Method for TFT-LCD Fab, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **22**(1), 1-9.
- Song, E. H., Gu, S. J., and Choi, B. K. (2010), Event Graph Modeling of Electronics Fab with Uni-inline Cells, *Proceeding of Annual Conference of The Korean Institute of Industrial Engineers*, 397-401.
- Song, E. H., Choi, B. K., and Park, B. (2012), Event graph modeling of a homogeneous job shop with bi-inline cells, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **20**(1), 1-11.
- Suh, J. D. and Jang, J. J. (2000), An AGV control policy reflecting the current and future status information of a semiconductor and LCD production shop, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **26**(3), 238-248.
- Suh, S. H., Noh, S. K., and Choi, Y. J. (1995), A PC-based retrofitting toward CAD/CAM/CNC integration, *Computers and Industrial Engineering*, **28**(1), 133-146.
- Suh, S. H., Lee, E. S., and Jung, S. Y. (1998), Error modelling and measurement for the rotary table of five-axis machine tools, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **14**(9), 656-663.
- Suh, S. H., Lee, E. S., Kim, H. C., Cho, J. H. (2002), Geometric error measurement of spiral bevel gears using a virtual gear model for STEP-NC, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42**(3), 335-342.
- Suh, S. H., Shin, S. J., Yoon, J. S., and Um, J. M. (2008), UbiDM : A new paradigm for product design and manufacturing via ubiquitous computing technology, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **21**(5), 540-549.
- Wang, G. N., Koo, L. J., Yeo, S. J., Lee, K. G., Hong, S. H., Park, C. M., and Park, S. C. (2008), The Process Analysis and Application Methods for PLC Code Programming, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **21**(3), 294-301.
- Yang, D. Y. and Choi, B. K. (1989), *Study of Precision Materials Processing and its Automation*, National Research Foundation of Korea, KOSEF 860311.
- Yang, K. R., Ahn, E. K., Chung, Y. H., Kim, B. H., Seo, J. C., and Park, S. C. (2013a), Bottleneck detection using productivity achievement ratio in semiconductor production line., *Proceeding of the Society of CAD/CAM Engineers*, 444-445.
- Yang, K. R., Ahn, E. K., Chung, Y. H., Kim, B. H., Seo, J. C., and Park, S. C. (2013b), Bottleneck detection using Backward planning, *Proceeding of Spring Annual Conference of The Korean Institute of Industrial Engineers*, 1779-1787.
- Yoo, W. S., Jeong, H. M., and Cheon, S. U. (1999), Modeling of blend surfaces by NURBS Patches, *Proceeding of Autumn Annual Conference of The Korean Institute of Industrial Engineers*.
- Yoo, W. S. and Jeong, H. M. (2000), Modeling of blend surfaces by Non Uniform B-spline surface patches, *J. of The Korean Institute of Industrial Engineers*, **26**(2), 95-100.
- Yoo, W. S. and Jeong, H. M. (2001), Development of the Wire EDM CAM System Considering a Variable Taper Wire-cut and an Unmanned Wire EDM during the Night, *Trans. the Society of CAD/CAM Engineers*, **6**(3) 206-214.
- Yoon, J. S., Shin, S. J., and Suh, S. H. (2012), A conceptual framework for the ubiquitous factory, *International Journal of Production Research*, **50**(8), 2174-2189.