

중소기업을 위한 RMS의 적합성 평가방법

Improved Methodology To Assess Adaptability of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) for Smaller Enterprises

박종만^{1,#}
Jong Man Park^{1,#}

¹ 한국과학기술정보연구원 고경력과학기술인 (ReSEAT, Korea Institute of Science and Technology Information)
Corresponding Author / E-mail: jmp21c2012@daum.net, TEL: +82-2-399-6231-3

KEYWORDS: Reconfigurable manufacturing system (재구성 가능 제조시스템), Adaptability (적합성), Evaluation (평가), KPI (핵심성능지표), Automotives assembly factory (자동차조립공장)

This paper proposes a new improved methodology to assess reconfiguration manufacturing system (RMS) adaptability in small and medium manufacturing industries. The evaluation of scenarios and alternatives for a reconfigurable design in manufacturing systems requires efficient and convenient methodologies to confirm the comparative evaluation metrics of the assigned KPI. Customizable factors are extracted and mapped for the design structure matrix and the analytic hierarchy processes. Reconfiguration event information is visualized as bill of resource. Evaluation format of KPI choice is then suggested. The reconfiguration control manager is designed to extract and combine the objects and the resource library of the reconfigurable assembly module and line. This paper first proposes the improved evaluation modeling frame and format with the newly refined KPI for the assessment of reconfiguration adaptability. Second, it shows the applicable suitability through a partly designed domain at the real automotive components manufacturing and assembly factory. Finally, it discusses the issues related with the customization and case results by the suggested evaluation methods.

Manuscript received: January 15, 2017 / Revised: May 27, 2017 / Accepted: August 30, 2017

NOMENCLATURE

AHP = Analytic hierarchy process
BOR = Bill of resource
DMS = Dedicated manufacturing system
DSM = Design structure matrix
EPS = Evolved production system
FMS = Flexible manufacturing system
HMS = Holonic manufacturing system
KPI = Key performance index
MPS = Modular production system
RMS = Reconfigurable manufacturing system

1. 연구 개요

세계적으로 4차 산업혁명(Industry 4.0)의 추진 기조아래 스마트공장을 지향하는 대기업들의 제조 부문별 재구성가능제조시스템(RMS) 구축에 대한 선진솔루션의 접목과 기술혁신 사례가 일부 있으나, 국내경우 연구개발의 초기상태로 일부 시스템의 단기적 시현 자체만을 우선시하거나 실용성 및 타당성에 대한 사전검증이 미흡한 상황이다.

특히 중소제조업 경우 기술접목을 위한 현장 맞춤형의 실용적 가이드나 러닝포인트를 접하기도 쉽지 않다. 설계변경 및 생산계획 변동에 대한 신속한 대응과 비용저감을 위한 최적의 RMS 설계에 제품수명주기상의 적합성평가와 그 평가체계 구축이 필수적이다. 특히 제조혁신과 검증 여력이 부족한 국내 중소 기업들이 공정 및 라인과 생산시스템을 재설계 및 재구성하는 경우, 초기

설계단계부터 제조자원 재구성의 적합성 여부 판단과 최적 의사결정을 할 수 있도록 맞춤형 방법론 및 기본 툴의 개발과 지원이 시급하다.

이 논문은 RMS의 적합성 평가를 위한 모델링과 프레임, 상세 포맷과 관련요소를 개발하고 적용사례를 통해 실질적 가이드를 제시하여 중소기업 기술력 및 수익성 개선에 실용적 도움을 주고 실질적인 국가 제조경쟁력 향상에 기여하고자 한다.

2. 연구동향

2.1 배경

기존 제조방식은 원가저감과 품질확보 기반의 Lean 제조시스템에서 제품생산의 다양성 확보 중심의 유연생산시스템(FMS), 제조여건 변화에 대한 대응력 중심의 RMS, 특화영역별 개별적 기능성과 전체 최적화 조합기반 제조시스템(HMS), 지능적 자가 대응 및 진화기반의 생산시스템(EP)과 같은 미래형 제조시스템에 이르기까지 상호 복합적 천이관계가 공존한다. 최근 부각되는 RMS의 구축은 재구성능력 기반의 분산제조 시스템 및 지식기반 재사용 모듈방식의 시스템과 실행시스템의 개발을 필요로 하며, 시스템 구축의 질은 재구성 과정의 효율성과 신속성, 구조적 및 경제적인 적합성으로 결정된다. 실무적으로는 재구성 시나리오별 대안에 대한 제품수명주기 맞춤형 적합성평가 방법론과 모델링, 핵심성과지표(KPI)기반의 연계평가가 핵심이다.

2.2 선행연구

DMS 기반 FMS는 동일 하드웨어를 기반으로 이중제품의 생산을 커버하기 위한 것이나 변화에 대응하는 적합성의 부족은 RMS로의 천이를 가져왔다. RMS의 적합성 평가관련 프레임과 영향요소, 지표 계산식과 의사결정 기준들이 다수 제시되고 있다. RMS가 소규모 균일특성의 제조단위나 중소기업의 기계가공 및 조립공정에 더 적절하다¹는 견해는 가변적 제조환경에 대한 대응과 적응 규모측면에서 중소기업의 재구성 전환과 효율 구현의 파급효과 및 속도가 상대적으로 더 클 수 있다고 이해된다.

재구성가능 여력이나 특성은 변화에 대응한 신속제조를 위해 생산구성자원을 적응시키는 패러다임²이며, 시스템 행위와 레이아웃의 구조적인 변화능력으로 정의되고 있다. 적합성은 변화되는 조건에 적응하도록 하는 시스템특성으로 정의^{3,4}되기도 하며 가용성은 주로 정상가동 시간이나 비율로 설명 된다. 이와 같은 시스템 특성들은 재구성 제품, 공정, 생산 자원에 대한 적합성평가를 통해 식별되며, 주요 코스트드라이버 역시 동일하게 식별된다.⁵ 생산시스템의 주요 비용요소들은 하드웨어 설치나 프로젝트 관리 비용과 소프트웨어 비용이나 생산준비 비용 등 간접비용을 포함한다.⁶ RMS는 DMS와 특정 공용파트 기반의 FMS에서 생산성이나 유연성 같은 특성들의 조합을 통해 시스템이나 기계들의 수명주기 비용 감소시킬 수 있다.

RMS는 시스템과 머신 수준의 2개 수준에서 기계 연결이나

재구성 특성으로 구성되며, 조립, 통합, 맞춤, 확장, 전환, 진단 특성과 원리 등을 이용하여 설계 및 구성된다.^{4,7-9} RMS의 합리성 추구목적이 장비의 효율화에 있다면 제조 시스템 과 장비형태의 의사결정은 생산량에 따른 필요 사항, 변화의 빈도, 운영 조건에 의존적이다.¹⁰ 시장 불확정성에 기인한 빈번한 제품 변동과 생산량이 대규모인 경우, RMS가 가장 효과적인 해법이라는 주장⁷에도 불구하고 측정기반의 코스트 요소들을 포함하는 방법론과 실용적인 판단 케이스를 발견하기는 쉽지 않다.

RMS의 초기 설계에서 운영 툴의 배치까지 전 과정에 걸친 타당성 판단방법으로, RMS의 통합설계, 머신 재구성 방법과 최종 구성 평가관련 방법들이 다수 제시되어 왔다. RMS의 필수요소와 상속요소들은 HMS,¹¹ EPS^{12,13}같은 생산 패러다임과의 관계에서 파악되듯이 재구성에 앞서 조립식 생산시스템(MPS) 기반의 조립 특성을 필요로 한다는 것을 보여준다.¹⁰ RMS는 생산능력과 제품 다양성의 대비를 통해 핵심제품을 동적으로 전환시키며 생산능력을 증가시킬 수 있다.^{4,7} 경제적 및 기술적인 관점에서 제조시스템 평가관련 이슈들이 제시되고 있으며 제조시스템 들의 비교 평가에 대한 다양한 방법들이 존재한다.

Kuzgunkaya and ElMaraghy¹⁴는 핵심 매개 변수로 경제적 고려사항, 구조적 복잡성, 대응특성 등을 이용 하여 FMS와 EMS를 비교한다. Nassehi 등¹⁵은 복합적 제조 공정을 모델화하기 위한 수학적 기법을 사용하여 정형적 방법을 제시하고 있다. P. Yan 등¹⁶은 FMS의 모델링에 의한 적합성과 확장특성을 제시한다. Meriem Lafou 등¹⁷은 유연성 평가특성의 정량화, 제품다양성의 관리, 시스템 성능의 일관성 유지의 어려움을 지적하고 자동차산업에 적용되는 평가방법을 제시하고 있다. 제시된 시너지 측정치는 새로운 생산변동과 평가대안을 신속히 식별하는데 사용될 수 있다. P. Spicer 등¹⁸은 확장 가능하고 재구성 가능한 장비와 공정모듈들의 최적화를 위한 설계원리와 경제적 평가방법을 제시한다. M. R. Abdi와 A. W. Labib^{19,20}은 계층화 분석(AHP)에 의한 디자인 전략과 RMS 설계 평가에 의한 적용 타당성을 제시한다. A. F. Farid와 D. C. McFarlane²¹은 분산 제조시스템의 재구성 특성을 평가하기 위해 공리적 디자인 방법론에 의한 디자인 구조 매트릭스 적용 방법을 제시한다. F. Hasan²² 등은 기존구성에 대한 전환 노력을 정량화할 수 있는 모델과 다중속성에 의한 효율이론 기반의 머신 재구성특성의 평가모델을 제시한다.

Ahmad Mussawar 등²은 재구성가능 조립시스템에서의 재구성 특성과 적합성평가의 발견적 기법을 제시한다. 이는 제품의 재구성 특성과 적합성평가를 위해 조립시스템을 구분하고 시스템 수준에서 재구성특성 기준으로 맞춤, 전환, 확장, 조립, 통합 관련 특성들의 계산방법을 제시한다. J. Heilala 등²³은 컴포넌트 기반 시뮬레이션과 수명주기 비용분석 등을 사용하여 모듈기반 반 자동 재구성가능 조립시스템의 설계 방법론을 제시 한다. Chung-Hsien Kuo²⁴ 자원할당 알고리즘과 Petrinet 시뮬레이션을 이용하여 RMS 모델 구축과 재 구축, 분석 평가에 대한 절차를 제시한다. 최적 자원할당을 위해 수송 비용과 사이클 타임을 사용한다. Erik Puik 등²⁵은 공리적 디자인 방법론 기반의 RMS 프로세스모

들을 개발하기 위한 인덱스방법을 제시한다. 재구성 과정의 자원과 리드타임 계산에 가중치가 사용되며, 개발초기의 신속한 대안 비교에 사용 가능하다.

Marcello Colledani 등²⁶은 시스템 제어정책들을 이용하여 통합 시스템 수준의 품질분석과 생산물류 시스템의 성능분석을 지원하는 정량화 방법을 제시하며, 복잡도를 가진 지속적 이산시간 기반의 마코브(Markov) 체인을 이용하여 모델화한다. 조립 스테이션에서 기대수율 예측을 위해 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 이용하기도 한다. George Michalos 등²⁷은 생산현장에서 실시간 재구성에 대한 자동화 생산 단위의 제어원리에 대한 의사결정 프레임워크를 제시한다. Guo Xin Wang 등²⁸은 RMS의 필수적 특성과 재구성 스키마 대안의 등급으로 확장, 전환, 진단, 조립, 통합, 맞춤화 특성 등을 반영하는 정량화 평가인덱스 모델을 구축하기 위해 선호도 등급화 기반의 평가방법을 제안한다. 가중치 배부에 AHP 방법이 사용된다. U. Dombrowski 등²⁹은 다중변형 제품의 순차적 생산에서 제조 적합성을 증가시키기 위한 모델과 기술적 요소들을 제시한다.

Mads Bejlegaard 등³⁰은 저 생산량과 고 다양성을 가진 중소기업에서 재구성가능 제조 능력을 측정하기 위한 사전 설계평가방법을 제시한다. Westkämper Engelberta 등³¹은 조립시스템 제조 능력의 상황기반 적응과 검증에 관한 방법을 제시한다. 이 방법은 조직적이고 기술적인 방법이 결합된 ‘Stuttgart’ 식이라 불리는 기업모델에 기반을 두고 있다. Michael. F. Zaeh 등³²은 자동차 용접 산업의 조립 및 제조자원의 재구성 특성평가를 위해 2개 형태의 KPI와 5 단계로 구성된 종속적 구조모델 기반의 방법론을 제시한다. Pedro Miguel Salsinha and Neves³³는 플러그인 생산시스템과 같은 기민성과 지속 가능성을 향상 시키기 위한 재구성 방법론을 제시 한다.

선행 평가방법론들이 각각의 우수성 표방에도 불구하고 평가기준이나 영향요소들이 특정도메인 중심적이거나 적용절차가 제시되지 않아 실제 사용이 불편할 수 있다. 이는 RMS 설계 및 실행계획 수립 시 기존 및 신규 KPI 추가관련 기준과 절차의 구축 특성이 구분되지 않고 적용됨에 기인하는 것으로 분석된다.

3. 제안 모델

RMS 적합성평가를 위한 선택적 방법론으로 관련요소 및 방법들과 KPI 풀을 형성하는 과정과 구조를 Fig. 1의 6개 주요단계로 제시한다.

1단계에서는 재구성을 위한 전략적 목적과 요소들, 목적 달성을 위한 자원의 상태를 식별하고 조합한다.

2단계에서는 계층화 분석(AHP)과 데이터구조화 매트릭스(DSM) 방법으로 영향요소와 자원의 가용상태를 체크한다.

3단계에서는 평가의 핵심영향 요소와 평가방법이 선택 구성되고 여과된 KPI 풀과 통합 구조로 모형화 한다.

4단계는 실용적 평가에서 가장 중요한 단계로 재구성 전후 성능

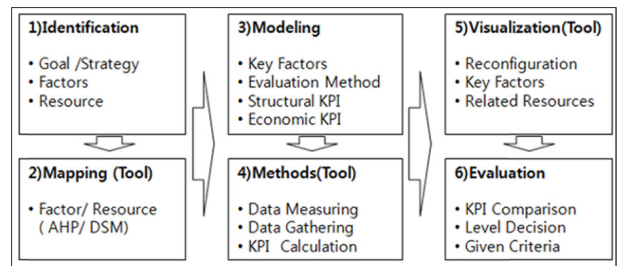


Fig. 1 Main steps for RMS evaluation

Influential Factors or Indicator for Evaluation of Re-configurability	Reference
Re-configurability : modularity, integrability, customization, scalability, convertibility, diagnosability / module cost, capacity increment, production rate, processing time, number of module / identification of Component & interface	[4], [7], [8], [9], [2], [22], [28]/[18]/[21]
Adaptability : part family, and system, machine, control features, and intelligence	[3]
Suitability : NPV of life cycle costs, structural complexity, responsiveness performance Smoothness : reconfiguration smoothness metric	[14], [2]
Flexibility : synergy & flexibility of product, Performance consistency / Variety : multi Criteria	[17] / [1]
Production Performance : production rate , yields, inventory	[26]
Variety : product commonality , process readiness / Production cost, sales quantity	[29] / [30]
Capability : performance indicator & situation-based adaptation & validation of capability	[31]
Design Justification : responsiveness, change over cost quality, inventory, operation skill	[19, 20]
Verification & Validation : reduced cost & fast product changeover	[10]
Transit Cost and Cycle time : throughput & processing utilization, cycle time , transport cost/ busy time ratio over total production time	[24] / [27]
Agility and Sustainability : path time, routing cost, number of product, affinity, moving time & cost	[33]
Resource & Lead time : minimum resource & lead time, by axiomatic gain	[25]
Structural and Economic KPI : number of components adaptation, all reconfiguration costs	[32]
Cost & KPI : cost of ownership, equipment efficiency	[23]
Cost Effective Factors : positioning time, cycle time, throughputs in production, cost	[34]

Fig. 2 Factor and indicators for reconfigurability evaluation

데이터의 존재나 획득이 전제 되거나 가용해야 하며, 신뢰성 있는 데이터 획득을 위해 기존 혹은 예측 및 추정 가능환경에서 데이터를 측정하고 채집한다.

5단계는 관련 컴포넌트의 재구성 적합성과 핵심요소나 자원을 가시화하기 위한 단계로 수준별 생산운영시스템과의 연계나 독립 시스템으로 구성한다. 이런 시스템은 다양한 자원명세형태(BOR)를 기반으로 플러그인 즉시 생산시스템 구성을 위한 관리수준별 오브젝트 제어기능으로 설계한다.

6단계에서 비교평가 알고리즘은 기계지능이나 전문가 지식기반의 맞춤형 의사결정 메커니즘을 포함하며 그 기본은 맞춤형 가중치 요소와 기준 혹은 선호요소와 비용요소에 의한 비교행위이다. 상황과 시간기반의 시뮬레이션 방법의 추가 선택이 가능하며, 예산과 비용 대 효과 측면에서 시뮬레이션의 규모가 결정된다.

3.1 재구성 요소 식별

제조시스템의 재구성 목적과 전략은 주로 저 비용, 고품질, 생산능력 변동에 대한 신속한 대응 능력과 시간요소들로 구성된다. RMS 모델링을 위한 영향요소와 지표들은 Fig. 2와 같이 도출되며 재구성 특성, 적합성, 적절성, 유연성, 다양성, 제품수율, 생산능력, 기민성, 지속가능성, 디자인, 합리성, 입증 및 검증, 사이클 시간 및 이송비용, 구조 및 경제적 KPI, 자원의 량, 재구성 머신

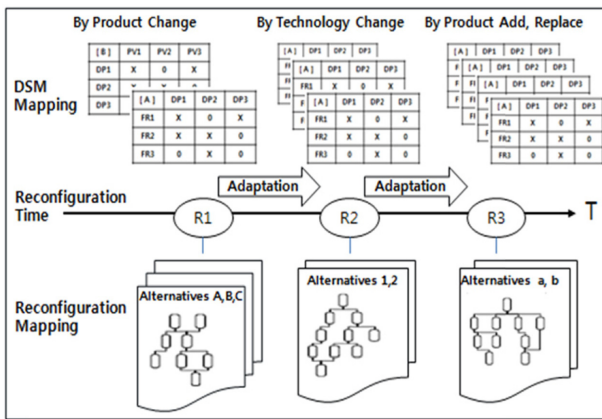


Fig. 3 DSM architecture for reconfiguration

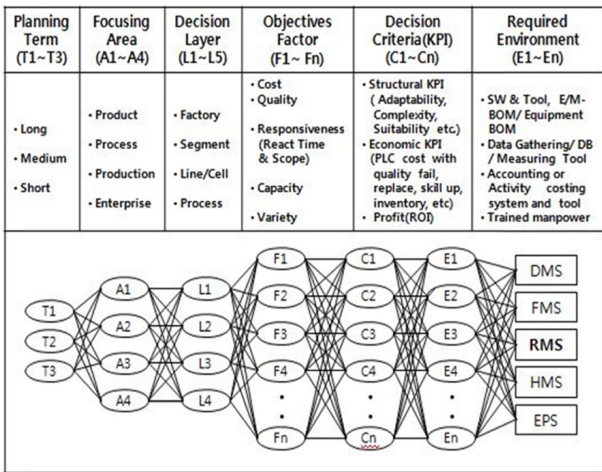


Fig. 4 Design elements and routing in AHP modeling

및 컴포넌트의 개수, 재구성 시간 및 비용, 의사결정 지표 등으로 요약된다.

3.2 재구성 Mapping

RMS 설계요소의 Mapping은 DSM과 AHP를 활용한다. 제품 및 공정 재구성 설계의 목적성과 대안에 따라 Fig. 3과 같이 재구성 자원 객체들간의 관계를 제품 및 공정의 설계변수와 요구기능 및 공정변수 등의 Matrix로 분석하고 재구성 이벤트와 자원구성을 시간구간과 시점 별 형태로 구성한다.

복합적 DSM 형태는 다중 데이터의 구조로 구성된다. Fig. 4와 같이 AHP 방식으로 구성 요소의 전략적 선택이 가능하며, 생산 방식 별 적합성 평가를 위해 KPI와 맞춤형 전략에 맞게 AHP 요소들을 조합하여 시나리오와 대안들을 산출하고 구조화할 수 있다.

3.3 모델링과 방법

종래의 AHP 방식에서 고려되지 않거나 비중이 적었던 경제적 KPI 영향요소로 품질실패, 교체, 기술습득, 재고 등의 비용과 투자회수율과 이익을 강조한다. 특히 재구성평가의 실무적 맞춤형용

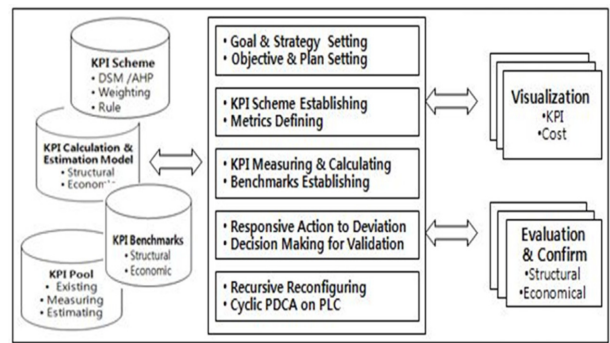


Fig. 5 Evaluation scheme for KPI modeling and processing

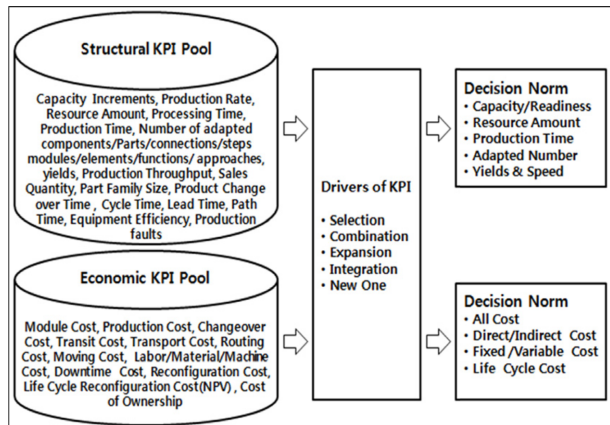


Fig. 6 Decision norm extracted from KPI pool

가능성을 최대화 하기 위해 기존 지원시스템과의 갭을 최소화하고 기존체계와의 연계를 필요로 하거나 새롭게 구현해야 할 환경 평가요소로, BOR, 평가운영 소프트웨어와 툴, 데이터 측정 및 수집 툴, 활동기반원가(Activity Based Cost, ABC) 체계나 비용 원 단위, 운영인력 수준 등을 전략적 필수 고려요소로 새롭게 제시한다.

KPI 평가 모델링과 프로세스는 Fig. 5에서와 같이 목표와 계획에 따른 KPI 스키마 구축과 측정치 정의, 측정 및 계산과 기준설정, 측정 결과의 타당성검증, 제품수명주기상의 반복적 재구성 관리의 5단계로 구성되며 KPI 및 비용과 평가확정 UI 형태로 구성된다. KPI 스키마와 산식, KPI Pool은 DB와 파일형태로 구성된다. 맞춤형 KPI와 의사결정 기준은 Fig. 6과 같이 KPI Pool로부터 도출되며 제시된 KPI 항목의 선택, 결합, 확장, 통합, 추가를 통해 맞춤형 기준으로 수렴된다.

3.4 가시화와 KPI 평가

재구성 평가를 위한 재구성 이벤트의 가시화는 Fig. 3의 재구성 대안 별 연관구조 매핑(Mapping)을 통해 Fig. 7과 같이 특정 이벤트를 구성하는 부품 및 조립 모듈의 계통과 트리 형태의 하부 구성객체로 구성되며, 재구성 이벤트 관련 각 객체정보는 부품 및 모듈 조립과 관련된 통합 BOR과 공정 DB, 혹은 원가 DB로부터 인터페이스 화면에 표시된다.

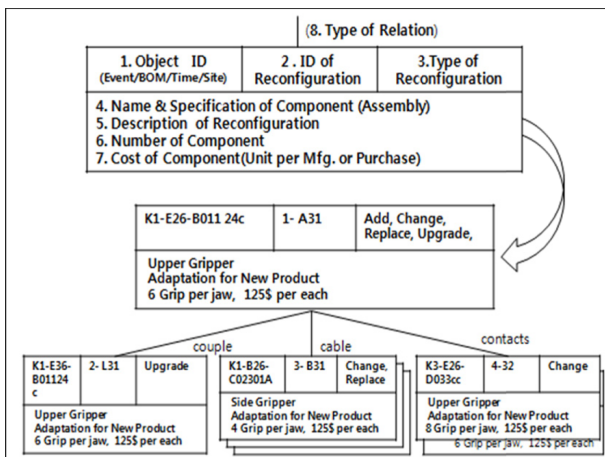


Fig. 7 Reconfiguration event information

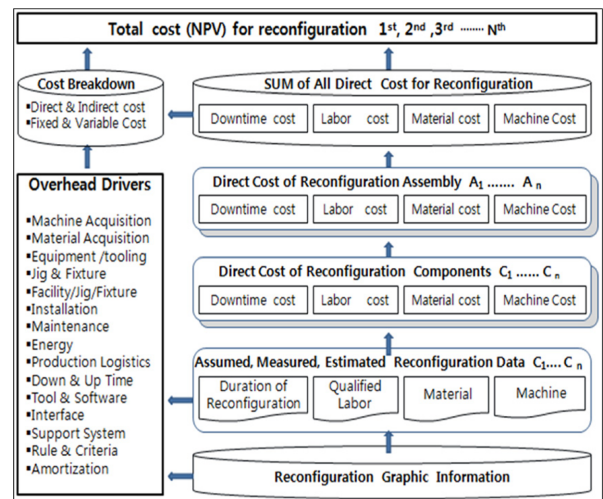


Fig. 9 Cost calculation structure for reconfiguration

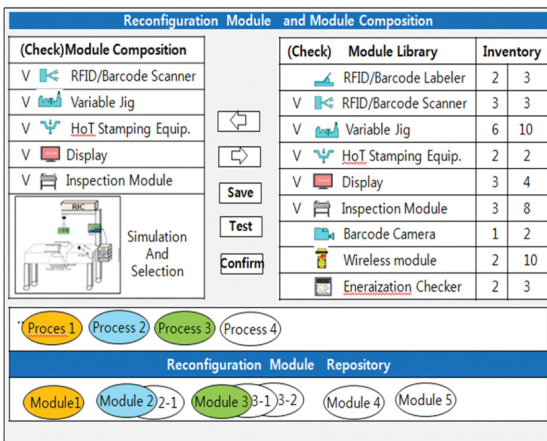


Fig. 8 Module composition by drag & drop

RMS 플랫폼의 화면 인터페이스는 생산모델 및 부품변동, 공정 및 라인변동에 대응하는 재구성 객체의 신속 정확한 구성과 준비를 위해 그래픽 기반의 Drag & Drop 기능으로 부품 및 모듈 라이브러리와 저장소에서 객체정보를 생성 및 조회하고 대안비교가 가능하도록 Fig. 8과 같이 모듈구성 가시화 인터페이스를 포함하고 있다. 가시화 모듈 구성(Configuration) 기능은 재구성 준비를 위해 화면에서 각 공정의 모듈 및 부품 등록 정보로부터 재구성 이벤트정보를 재구성한다.

최상위 객체정보는 Fig. 7에 제시된 것처럼 이벤트 발생시점에 따라 구성되는 재구성 이벤트정보의 묶음이며 객체 식별을 위한 객체 ID, 재구성 ID, 재구성타입, 모듈 및 부품 정보, 재구성 목적 및 내용, 부품 수, 부품 원가 등을 포함한다. 재구성 이벤트 정보의 검증 및 준비상태 확인과 공정과 라인 재구성 실행을 통해 재구성 이벤트가 완료된다.

재구성 이벤트와 구성방법 및 가시화 틀은 기업상황에 대한 맞춤형 전략과 가용예산 범위에 따라 다양하게 설계될 수 있다. 설계에서 중요한 것은 재구성관련 그래픽 정보와 데이터의 수집이며, 개발 및 제조 자원의 명세뿐만 아니라 제조장비나 정비자원 명세 등과의 연계를 통해 효율성을 증가시킬 수 있다. UI 화면에서 평가

대안구성을 의한 자동 끌어놓기 기능으로 특정 이벤트관련 요소들을 가용예산 범위 내에서 시뮬레이션 한다.

실용적 적합성평가를 위해 제시된 경제적 KPI인 RMS 재구성 비용 산출구조는 Fig. 9에서와 같이 재구성 이벤트와 모듈구성 정보 DB에서 정지시간, 노무, 재료, 머신 비용 등의 도출로 시작되는 구조이며 정지시간의 영향에 의한 직간접 비용으로 구분 산출 및 배분되는 구조이다.

경제적 KPI는 재구성 이벤트에 의해 야기되는 직간접비용의 전체 혹은 부분비용을 포함한다. 재구성 기간의 직간접비용 이외 에너지, 물류, 연계시스템 변경, 교체 및 설치, 폐기 및 감가상각 등 누락 없는 재구성비용 산출을 위해 재구성 전후기간에 제시되는 총 직간접 비용 드라이버는 재구성 모델링의 평가목표에 따라 기업 맞춤형으로 유용하게 사용될 수 있다. 제품 수명주기상에서 이벤트들의 총비용은 순 현재가(Net Present Value)로 환산되어 다양한 비즈니스 의사 결정에 사용된다. 구조 및 경제적 KPI는 단독 혹은 결합되어 사용된다. 특히 간접비 드라이버는 재구성의 목적성에 따라 유용하게 사용될 수 있다. 재구성만을 위해 비용산출 시스템의 별도구축이 반드시 필요한 전제는 아니나 기존의 비용 회계 시스템이나 활동원가 시스템과의 연계가 중요하다.

KPI 평가 포맷은 실무적으로 사용이 쉽도록 Figs. 5와 6의 KPI 모델링 및 프로세스와 Pool에서 드라이버를 통해 선택 및 설정되는 메커니즘과, Fig. 9의 비용산출 메커니즘, Fig. 10과 같은 평가 메커니즘과 포맷 등으로 요약 제시된다.

재구성 평가를 위해 산업별, 기업별 적용 영역별로 구조 및 경제적 KPI들을 선택 조합하거나 의사결정자의 선호 기준 및 비중을 반영하여 대안 별 성과 및 비용을 계산한다. 각 KPI는 Fig. 6의 KPI 드라이버에 의해 도출되는 표준적 산식 및 기준에 의해 산출되며, 경제적 KPI인 비용은 Fig. 9의 상세 스키마에 따른 비용산출 프로그램과 데이터 베이스로부터 산출된다. 표준적 산식 및 기준은 Fig. 2의 재구성 평가요소 및 지표들의 계산을 위한 옵션 프로그램으로 구성된다.

KPI	Factors & Indicators(Fi)	Indicator Calculation (Criteria & Weight Scale)	Alternatives (A) & Choice(C)																									
Structural	1.Re-configurability 1) Modularity 2) Integrability 3) Customization 4) Scalability 5) Convertibility 6) Diagnosability 2. Suitability 3. Adaptability 4. Flexibility /Variety 5. Agility /Sustainability 6. Capability 7. Complexity 8. Performance 9. Design Justification 10. Validation	• Degree of Conformity : for ratio or number of components/functions/ approaches /elements as the 6 reconfiguration functional dependency • Degree of Conformity : for production capacity, volume, rate/ adapted number or ratio of machine, interface, connection, components, module, assembly/ time of cycle & lead, adaption, move & transit/ path & routing, readiness, throughput & yield ,inventory, resource, synergy	Ex: Example: Criteria : 0 ~1 Weight: 0, 1, 2 <table border="1"> <thead> <tr> <th>(A) (F)</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> <th>(C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>a</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>b</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>a</td> </tr> <tr> <td>Σ</td> <td>19</td> <td>22</td> <td>20</td> <td>b</td> </tr> </tbody> </table>	(A) (F)	a	b	c	(C)	1	3	2	1	a	2	1	4	3	b	10	5	3	2	a	Σ	19	22	20	b
			(A) (F)	a	b	c	(C)																					
1	3	2	1	a																								
2	1	4	3	b																								
10	5	3	2	a																								
Σ	19	22	20	b																								
Economic	1. Cost of Ownership 2. Direct /Indirect Cost 3. Fixed /Variable Cost 4. Investment amount 5. Payback Period	• Amount of PLC Cost : (Sum of Fixed & variable cost. Loss cost)/(Equipment Life x Production Rate x Yield x Utilization) • Direct Cost: Labor, Material, Machine • Indirect: Overheads Drivers in <Fig > • Fixed Cost: Acquisition & Amortization • Variable cost : Recurring Cost	<table border="1"> <thead> <tr> <th>(A) (F)</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> <th>(C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>50</td> <td>57</td> <td>49</td> <td>b</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>46</td> <td>50</td> <td>45</td> <td>b</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>39</td> <td>36</td> <td>54</td> <td>a</td> </tr> <tr> <td>Σ</td> <td>237</td> <td>225</td> <td>250</td> <td>c</td> </tr> </tbody> </table>	(A) (F)	a	b	c	(C)	1	50	57	49	b	2	46	50	45	b	5	39	36	54	a	Σ	237	225	250	c
(A) (F)	a	b	c	(C)																								
1	50	57	49	b																								
2	46	50	45	b																								
5	39	36	54	a																								
Σ	237	225	250	c																								
Final Decision(Structural KPI + Economic KPI+ Preference)			By Economic KPI '5', Select alternative 'a'																									

Fig. 10 Formal format for KPI evaluation

Fig. 10에서 평가요소 및 지표(Fi)는 복수의 옵션 선택이 가능하다. Fi 우측의 지표계산 요소는 적합성의 정도(Degree of Conformity)를 나타내는 정량화 요소들을 의미한다. 개별 Fi의 단일 및 복수 조합에 의해 적합성 평가가 가능하나 동종 산업표준이나 유사규모 제조기업들과의 상대비교 기준이 부재하거나 미흡한 경우 정량화 지표 자체만으로 적합성 여부 판단이 어려우며, 반대 경우라도 기업의 제조회경과 목표수준, 재구성 시점에 따라 적절한 적합성 평가기준이 아닐 수 있다. 따라서 최적 적합성 여부 평가는 개별기업의 RMS 구축목적성에 따라 해당기업의 맞춤형 정량화 요소에 대한 향상 및 달성 정도를 절대비교 기준으로 하되 제조회경의 가변성에 따른 적응기준과 의사결정자의 경험 및 선호 비중을 반영하도록 설계된다. Fig. 10의 가장 우측 표 안의 숫자는 대안(Aj) 및 Fi 별 정량화 요소의 정규화 점수를 나타내며, 점수를 기반으로 Fi 별 대안선택(Ci) 다빈도 순위, Aj 별 점수합계(Σj) 순위, 혹은 선호 등급을 통해 최적 대안을 선택하는 메커니즘을 나타낸다. 즉 Σj 점수 순위 상 두 번째 대안 b(A2)를 선택하고 Fi 별 대안선택(Ci) 다빈도 순위로는 대안 a를 선택한다. 이와 같은 적합성 평가를 통한 재구성 대안의 선택 방법은, 구조 및 경제적 KPI에 대한 개별 및 조합 Fi 선택과 행, 열 기반의 점수 등급화를 통해 적합성의 정도를 기업 맞춤형으로 평가할 수 있도록 옵션선택 체계와 정량화 점수테이블을 제시하고, 실질적 RMS 평가가이드를 제시함에 특징과 가치가 있다.

최종적인 대안선택과 재구성 이벤트의 시나리오에 맞게 KPI 별 기준과 기준치 삽입이 가능하고 선호 등급화나 점수부과 등의 부가적 작업도 UI에서 선택사항으로 처리되어 자동 계산되도록 한다. 이와 같은 참조모델은 예시이며 재구성 전후 평가 시점이나 기간에 따라 실적 치나 예상치 및 추정치를 수정하여 활용한다. 향후 투자 수익과 투자회수기간 비교, 수학적 정수 프로그래밍과 시뮬레이션을 통한 타당성 검증 기능은 선택적으로 개발 사용될 수 있다.

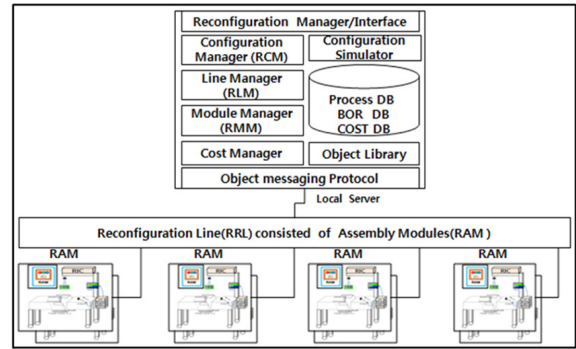


Fig. 11 Application process of project

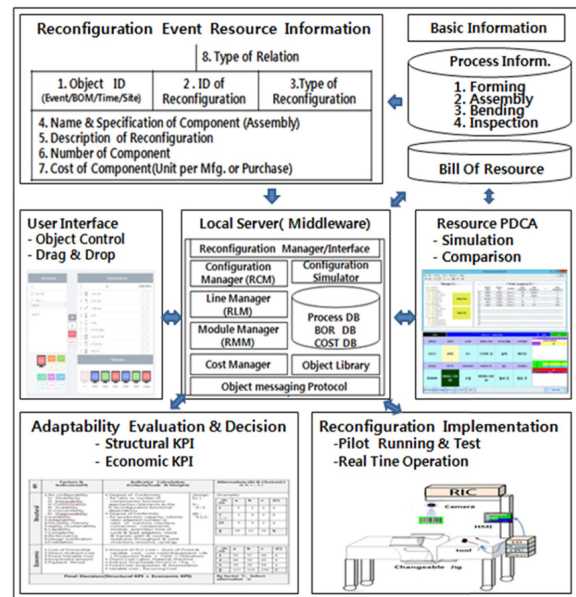


Fig. 12 Reconfiguration process of RAM, RRL, inspection line

4. 사례 연구

논문에서 개별적 KPI 채택에 의한 특정 평가모델의 검증보다 적용사례를 통해 평가방법의 실무적 유용성을 제시하는 이유는 차기 연구에서 실증 데이터의 확보 이후 검증을 통해 이중 산업의 제조영역에 확산하기 위함이다. 예시된 자동차 부품제조 및 조립공장에서의 RMS 적합성 평가방법에 대한 사례연구의 핵심가치는 RMS 구축내용의 예시보다 새로운 평가방법을 제시한 것에 있다. 이 사례에서 예시된 RMS 구축은 시스템 효율화와 비용저감에 목적을 두고 있으며 1차적으로 Fig. 11과 같이 재구성가능 조립모듈(RAM)과 재구성가능라인(RRL)의 자원 객체들에 대한 자동구성과 구성객체들의 제어를 위한 UI를 개발하고 있다. RAM과 RRL, 검사라인 작업대 등의 재구성 절차는 Fig. 12와 같이 예시된다. 이 과정에서 제조 공정 변동정보와 검사라인 재구성 정보에 의한 조립모듈과 라인의 재구성 이벤트구성과 전체 평가과정이 작업자나 관리자 화면에서 제어되며 최적 의사결정 기반의 재구성 행위가 실행된다.

Selectable Cost & KPI & TCO		Scenario A			Scenario B (...N)		
		Y1	Y2	Y3	Y1	Y2	Y3
1	Performance KPI						
	Good Units(GU): EL*TR**U	700	800	1200	800	1000	1500
	Equipment Life(EL)						
	Through Rate(TR)						
	Yield(Y), Utilization(U)						
	Utilization(U): A*E*Q	55%	65%	80%	60%	75%	80%
	Availability(A), Efficiency(E)						
	Quality(Q)						
	Cost KPI						
	Fixed Cost(FC)	11000	12000	15000	11000	12000	12500
Variable Cost(VC)	2000	2100	2250	1900	2000	2200	
Yield Loss Cost(YC)	1000	900	900	1000	1000	1200	
Total Cost(TCO): FC+VC+YC	14000	15000	18150	13900	15000	15900	
Cost/Unit: TCO/GU	20	18.75	15.13	17.38	15.0	10.6	
2	Structural KPI						
	Total No. of Components(TN)	30	27	25	35	33	37
	Num. of Adaptation(NA)	6	9	15	6	8	12
	Num. of Connection(NC)	5	10	18	8	12	16
	Range: NA/TN	20%	10%	20%	17.1%	24.2%	32.4%
	Density: NC/NA	0.83	1.11	1.2	1.33	1.5	1.3
	Economic KPI						
	Assigned Indirect Cost(AIC)	8	10	11	11	12	14
	Downtime Cost(DTC)	7	6	5	8	8	9
	Direct Cost(DC): L+MR+MC	14	16	17	15	15	15
Labor(L)	1.4	1.6	1.7	1.5	1.5	1.5	
Material(MR)	8.4	9.6	10.2	9.0	9.0	9.0	
Machine (MC)	4.2	4.8	5.1	4.5	4.5	4.5	
Total Cost(TCO): AIC+DC	22	26	28	25	27	29	
Total Cost(TCO): DTC+DC	21	22	22	23	23	24	

Fig. 13 Calculation results for KPI evaluation

제시된 RMS 평가 방법론의 스키마와 프레임에 따른 적용절차에 따라 RMS 구축 시나리오 이행기간이나 투자회수기간(ROI)에 따른 자원 제약 조건과 변동환경, 의사결정 그룹과 최고 의사결정자의 선호를 반영하여 특정 시점에서의 최종 RMS 평가 예를 Fig. 13에 제시한다. 재구성 반복성을 고려하지 않은 초기 설계단계보다 반복적 재구성일 경우 학습에 의해 사용자의 평가과정은 더 간편해 질 수 있다. Fig. 10의 구조 및 경제적 KPI 기반 SW에 대한 정형적 포맷이나 자동화 정보처리 시스템의 구축이 어렵거나 여력이 부족한 중소기업의 경우, 혹은 추가적으로 경제성공학에 의한 사례의 검증이 필요한 경우, Fig. 13과 같이 축약적인 성과와 선택적 비용기반의 KPI나 간편지표 및 생애주기(Life Cycle) 총비용(TCO)에 의한 ROI 시나리오를 통해 RMS 평가와 실행여부 결정이 상대적으로 신속해질 수 있다.

즉 축약적 성과 KPI로 장비수명, 산출량, 수율, 효율성(가용성, 효율, 품질)등에 의한 양품 수량(GU)을 성과로 계산하며, 비용 KPI로는 번고정비와 수율 손실비용을 더한 TCO를 GU로 나눈 양품의 단위비용을 산출하여 적합성평가 비교기준으로 설정한다. 또한 간편 구조 KPI로 총 부품 수(TN) 중 재구성부품 수(NA)나 NA중 연결부품 수(NC)의 증감과, 경제적 KPI로 직 간접비와 정지시간(Downtime) 비용의 증감 등으로 적합성 평가기준을 설정한다. 상기 두 방법은 Fig. 10 대비 평가 신속성과 간편성을 제공할 수 있으나 정확성 및 신뢰성과의 Trade-Off가 필요하다. Figs. 10 및 13에서의 KPI 방법들에 대한 개별적 혹은 대체 및 보완적 적용은 선택 사항이다.

종래 평가연구와의 차별성은 성능지표와 함께 상세비용의 구분과 조합에 의한 실용성을 높이고, 이를 기반으로 전체 및 부분 최적의 목적 달성과 수준에 맞는 맞춤형 솔루션을 찾도록 발견적 기법을 확대 제시하고 있다는 점이다. 본고의 중소기업 사례 적용에서 의사결정자의 선호에 대한 기본적 논리는 신속성과 간편성이다. 전체적으로 재구성 적합 수량이나 빈도에 의한 복잡도가 상대적으로 적고 생산 정지시간에 의한 전체 영향도가 적은 대안에

비중이 있다.

실무적 주안점은 RMS 구현 전체 직접 비용이 시스템구축 이후 3년 이내에 회수가 가능한지 여부, 제조 성과 및 성능 30% 증가와 생산 능력 2배 이상 실현 목표에 대한 달성가능 여부와 가용예산 범위에 근접 하는지 여부이다. 제시된 데이터는 재구성 RMS 설계 일부 단계의 실제 및 추정결과와 예시이며, 시나리오는 재구성 이벤트에 따라 변동된다. 최종 실행 안은 Fig. 10의 방법에 의해 대안 a가 선택되었고 Fig. 13의 간편 계산방법 1과 시나리오 B에 의해 검증과 To-Be 목표가 설정되었고 반복추진 및 구현과정에서 적합성을 향상시키고 있다.

예시사례에서 조립모듈, 재구성 라인, 검사부품, Jig 구성 등을 대상으로 RMS 적합도평가가 반복 실행되고 있다. 평가시간은 일 단위에서 시간 단위로 단축되고 있으며 시스템이 완성될 경우 분 단위 동기화가 예상된다. 적합도 향상이 진행 중이며 최근 시점에서의 목표 수정치는 조립 모듈의 변경경우 대응은 30초 이내, 모델변경은 30분 이내, 라인의 경우 품목변경 10분 이내, 모델변경 1시간 이내, 대응모델 수 5종 이상, 검사작업대 경우 설치준비 시간 1분 이내, 모델 변경 대응 30초 이내, Jig 경우 변경 대응시간 1분 이내 등으로 실증 및 검증에 집중하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 중소기업의 RMS 구축 평가에 있어 발견적 기법 기반의 KPI 계산이나 의사결정 과정에서 확정적 기준이나 인공적 가중치 부여방법보다 현재상태와 현장요구를 최대한 반영하는 맞춤형 시나리오와 투자대안을 도출하고 수준별 적용가능 KPI를 다면적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 중소기업이 RMS 평가를 위한 충분한 SW 툴이나 필수적인 데이터 제공을 지원할 만한 기본시스템을 갖고 있지 않다면 재구성 대상의 부품적합 수량과 정지시간의 빈도 혹은 비율같이 간편 KPI를 사용하는 평가가 바람직하다.

논문에서 제시된 다양한 KPI 지표들을 이론상 제한 없이 채택하여 평가시스템을 구축할 수 있으나, RMS 구축만이 최적 적합성을 보장하는 것은 아니다. 툴과 지원시스템의 구비여력이 없이 하드웨어 중심적인 재구성 시스템을 우선적으로 구축하는 경우 구축 이후의 직간접 비용의 증가로 목적달성이나 수익적 운영이 어렵게 되는 경우가 있기 때문이다. 또한 의사결정 과정에서 성능 혹은 비용 KPI의 증감이나 향상 자체가 기업의 평가기준이나 선호에 따른 등급 및 점수화 지표가 될 수 있으나 재구성 과정에서 기업전체의 성과와 성과의 균형적 최적화를 반드시 보장하는 것은 아니다.

따라서 평가도구의 공급자 측면에서는 제시된 방법과 메커니즘과 관련하여 보급형 SW 도구의 개발과 시뮬레이션에 도구의 개발과 플랫폼 연계 개발, 정수프로그래밍에 의한 기업 전반의 수익최적화 관련 RMS 대안의 우선순위 선별 같은 추가연구가 필요하다. 수요자 측면에서는 제시된 평가 알고리즘을 To-Be수준에

맞게 적용하되 기업 내 정보자동화 수준에 맞추어 확장특성을 가지고 구축해 갈 것을 주문한다.

이 논문은 실무적 적용이 용이한 새로운 RMS 평가방법을 제시하였으므로 반복적 사례적용에 의해 유용성 입증에 가속화될 것이다. 4차 산업혁명 지향의 제조업과 스마트공장 구축의 지향성을 가진 기업, 특히 중견 및 중소기업에서의 적용과정에 실용적 효과가 극대화되기를 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 미래창조과학부의 과학기술진흥 기금과 복권기금 출연사업인 한국과학기술정보 연구원 ReSEAT 프로그램의 지원으로 수행된 내용의 일부를 포함한다.

REFERENCES

- Huettemann, G., Gaffry, C., and Schmitt, R. H., "Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly—Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook," *Procedia CIRP*, Vol. 52, pp. 112-117, 2016.
- Ahmad, M., Ahmad, B., Alkan, B., Vera, D., Harrison, R., et al., "Hydrogen Fuel Cell Pick and Place Assembly Systems: Heuristic Evaluation of Reconfigurability and Suitability," *Procedia CIRP*, Vol. 57, pp. 428-433, 2016.
- ElMaraghy, H. A., "Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 261-276, 2005.
- Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., et al., "Reconfigurable Manufacturing Systems," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 2, pp. 527-540, 1999.
- Harms, R., Fleschutz, T., and Seliger, G., "Knowledge Based Approach to Assembly System Reuse," *Proc. of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, pp. 295-302, 2008.
- Reinhart, G. and Wunsch, G., "Economic Application of Virtual Commissioning to Mechatronic Production Systems," *Production Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 371-379, 2007.
- Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., and Koren, Y., "Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 11, No. 4, pp. 403-419, 2000.
- Koren, Y., "General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems," *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Vol. 3, pp. 27-45, 2006.
- Koren, Y. and Shpitalni, M., "Design of Reconfigurable Manufacturing Systems," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 29, No. 4, pp. 130-141, 2010.
- Siltala, N., "Formal Digital Description of Production Equipment Modules for Supporting System Design and Deployment," *Tampere University of Technology*, pp. 1-231, 2016.
- Giret, A. and Botti, V., "Engineering Holonic Manufacturing Systems," *Computers in Industry*, Vol. 60, No. 6, pp. 428-440, 2009.
- Frei, R., Barata, J., and Onori, M., "Evolvable Production Systems Context and Implications," *Proc. of International Symposium in Industrial Electronics*, pp. 3233-3238, 2007.
- Akillioglu, H., "Evolvable Production Systems: Demand Responsive Planning," *KTH Royal Institute of Technology*, pp. 31-37, 2011.
- Kuzgunkaya, O. and ElMaraghy, H. A., "Economic and Strategic Justification of Changeable, Reconfigurable and Flexible Manufacturing," *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, pp. 303-320, 2009.
- Nassehi, A., Newman, S., Dhokia, V., Zhu, Z., and Asrai, R. I., "Using Formal Methods to Model Hybrid Manufacturing Processes," *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, pp. 52-56, 2012.
- Yan, P., Zhou, M., and Caudill, R., "A Life Cycle Engineering Approach to FMS Development," *Proc. of the International Conference in Robotics and Automation*, pp. 395-400, 2000.
- Lafou, M., Mathieu, L., Pois, S., and Alochet, M., "Manufacturing System Flexibility: Product Flexibility Assessment," *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 99-104, 2016.
- Spicer, P., Yip-Hoi, D., and Koren, Y., "Scalable Reconfigurable Equipment Design Principles," *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 22, pp. 4839-4852, 2005.
- Abdi, M. R. and Labib, A. W., "A Design Strategy for Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSS) Using Analytical Hierarchical Process (AHP): A Case Study," *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 10, pp. 2273-2299, 2003.
- Abdi, M. R. and Labib, A. W., "Feasibility Study of the Tactical Design Justification for Reconfigurable Manufacturing Systems Using the Fuzzy Analytical Hierarchical Process," *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 15, pp. 3055-3076, 2004.
- Farid, A. M. and McFarlane, D. C., "An Approach to the Application of the Design Structure Matrix for Assessing Reconfigurability of Distributed Manufacturing Systems," *Proc. of IEEE Workshop in Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications*, pp. 121-126, 2006.
- Hasan, F., Jain, P., and Kumar, D., "Machine Reconfigurability Models Using Multi-Attribute Utility Theory and Power Function Approximation," *Procedia Engineering*, Vol. 64, pp. 1354-1363, 2013.
- Heilala, J., Montonen, J., and Väättäin, O., "Life Cycle and Unit-Cost Analysis for Modular Reconfigurable Flexible Light Assembly Systems," *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 222, No. 10, pp. 1289-1299, 2008.
24. Kuo, C.-H., "Resource Allocation and Performance Evaluation of the Reconfigurable Manufacturing Systems," Proc. of the International Conference in Systems, Man, and Cybernetics, pp. 2451-2456, 2001.
 25. Puik, E., Telgen, D., van Moergestel, L., and Ceglarek, D., "Assessment of Reconfiguration Schemes for Reconfigurable Manufacturing Systems Based on Resources and Lead Time," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 43, pp. 30-38, 2017.
 26. Colledani, M., Yemane, A., and Tognetti, A., "Analysis of In-Line Quality-Oriented Assembly Strategies in the Production of Electric Drives," Procedia CIRP, Vol. 50, pp. 784-789, 2016.
 27. Michalos, G., Sipsas, P., Makris, S., and Chryssolouris, G., "Decision Making Logic for Flexible Assembly Lines Reconfiguration," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 37, pp. 233-250, 2016.
 28. Wang, G. X., Huang, S. H., Yan, Y., and Du, J. J., "Reconfiguration Schemes Evaluation Based on Preference Ranking of Key Characteristics of Reconfigurable Manufacturing Systems," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 89, Nos. 5-8, pp. 2231-2249, 2017.
 29. Dombrowski, U., Krenkel, P., and Ebentreich, D., "Adaptability within a Multi-Variant Serial Production," Procedia CIRP, Vol. 17, pp. 124-129, 2014.
 30. Bejlegaard, M., Brunoe, T. D., Bossen, J., Andersen, A.-L., and Nielsen, K., "Reconfigurable Manufacturing Potential in Small and Medium Enterprises with Low Volume and High Variety: Pre-Design Evaluation of RMS," Procedia CIRP, Vol. 51, pp. 32-37, 2016.
 31. Michael, N. and Engelbert, W., "Method for a Situation-Based Adaptation and Validation of the Manufacturing Capability of Assembly Systems," Procedia CIRP, Vol. 17, pp. 118-123, 2014.
 32. Zaeh, M. F., Reinhart, G., Lindemann, U., Karl, F., and Biedermann, W., "DSM-Based Evaluation of Assembly Manufacturing Resources," Proc. of the 13th International Dependency and Structure Modelling Conference, pp. 435-448, 2011.
 33. Neves, P., "Reconfiguration Methodology to Improve the Agility and Sustainability of Plug and Produce Systems," KTH Royal Institute of Technology, pp. 1-202, 2016.