

A Study on the Improvement of Plastic Boat Manufacturing Process Using TOC & Statistical Analysis

Gun-Gu Yoon · Tae-Gu Kim · Dong-Hyung Lee[†]

Dept. of Industrial & Management Engineering, Hanbat National University

TOC와 통계적 분석에 의한 플라스틱보트 제조공정 개선에 관한 연구

윤건구 · 김태구 · 이동형[†]

한밭대학교 산업경영공학과

The purpose of this paper is to analyze the problems and the sources of defective products and draw improvement plans in a small plastic boat manufacturing process using TOC (Theory Of Constraints) and statistical analysis. TOC is a methodology to present a scheme for optimization of production process by finding the CCR (Capacity Constraints Resource) in the organization or the all production process through the concentration improvement activity. In this paper, we found and reformed constraints and bottlenecks in plastic boat manufacturing process in the target company for less defect ratio and production cost by applying DBR (Drum, Buffer, Rope) scheduling. And we set the threshold values for the critical process variables using statistical analysis.

The result can be summarized as follows. First, CCRs in inventory control, material mix, and oven setting were found and solutions were suggested by applying DBR method. Second, the logical thinking process was utilized to find core conflict factors and draw solutions. Third, to specify the solution plan, experiment data were statistically analyzed. Data were collected from the daily journal addressing the details of 96 products such as temperature, humidity, duration and temperature of heating process, rotation speed, duration time of cooling, and the temperature of removal process. Basic statistics and logistic regression analysis were conducted with the defection as the dependent variable. Finally, critical values for major processes were proposed based on the analysis.

This paper has a practical importance in contribution to the quality level of the target company through theoretical approach, TOC, and statistical analysis. However, limited number of data might depreciate the significance of the analysis and therefore it will be interesting further research direction to specify the significant manufacturing conditions across different products and processes.

Keywords : TOC, Rotational Molding Process, Logistic Regression, ANOVA

1. 서 론

세계 레저선박시장은 조선, IT기술 등이 융·복합되면

서 연간 400억 달러의 시장으로 성장하고 있다. 그러나 국내 레저선박산업은 매우 영세하여 대부분 외국에서 레저보트를 수입하고 있는 실정이다. 그러다 보니 국내 연안과 도서 지형에 알맞은 플라스틱보트에 대한 수요증가에 능동적으로 대응하지 못하고 있다[23].

플라스틱보트는 합성수지의 일종인 섬유강화플라스틱(FRP : Fiber Reinforced Plastics)과 폴리에틸렌(PE : Poly-

ethylene)을 재료로 사용하여 성형하고 결합하여 완성시킨다.

성형기법은 압출성형, 사출성형, 회전성형 등으로 분류되는데 회전성형은 압출 및 사출성형 보다 경제성과 환경을 동시에 고려하는 획기적인 방법으로 인식되고 있다. 그러나 회전성형은 고난도의 연료배합문제로 인한 높은 불량률로 오히려 제작단가 상승과 원료낭비를 초래하곤 한다[21]. 따라서 회전성형기법을 사용하기 위해서는 이러한 문제해결이 선결과제이다.

이에 본 연구에서는 회전성형 기법으로 제작되는 소형 플라스틱보트 제조공정에 대한 문제점을 제약이론과 통계적 분석을 통해 제약요인 및 개선방안을 도출하고 주요 공정별 지수들의 임계치를 설정하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 소형 플라스틱보트 제조공정

그동안 국내에서 생산하는 플라스틱보트는 세일링 보트, 레저용 보트와 낚시용 보트로 구분되며 주로 FRP를 주재료로 제작되고 있었다. 그러나 2000년대에 들어서면서 환경오염의 유발요인 때문에 알루미늄이나 폴리에틸렌(PE)계통의 재료를 이용한 제작이 활성화되고 있다[5].

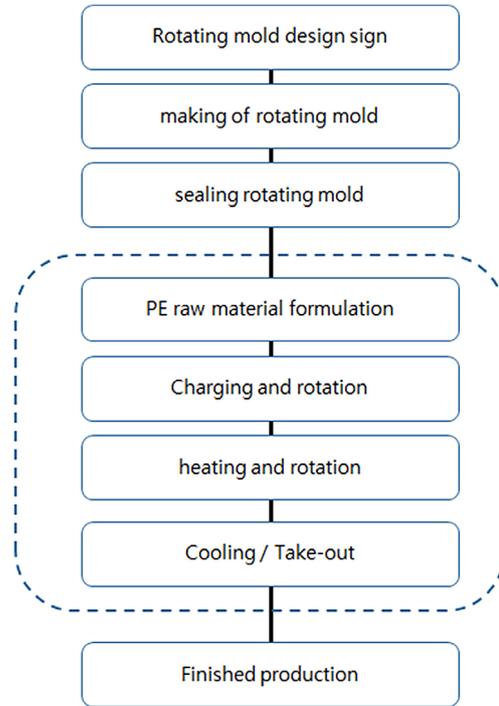
보트는 일반적으로 선형설계, 구조설계, 응력 및 압력설계를 거친 후 주로 사출 또는 회전성형기법에 의해 제조된다. 사출성형은 주로 중대형 보트 제작에 유용하며 보트의 제작설계를 각 단면으로 분리하여 제작한 후 조립공정을 통해 완제품을 완성한다. 반면 회전성형은 이음매 부분이 존재하지 않는 완제품 성형방법으로 소형 플라스틱보트 제작에 활용되고 있다. 복잡한 설비와 고도의 성형기술을 요하는 대신에 조립공정 등의 추가 작업이 필요 없고 접합부분이 존재하지 않아 표면장력이 우수하다는 장점을 가지고 있다[5].

2.2 회전성형 기법

회전성형(Rotational Molding)은 철강, FRP, 나무와 같은 재질을 플라스틱으로 대체하여 제작하는 구조물 성형의 첨단공법이다. 회전성형 공정은 <Figure 1>과 같이 제품의 형태에 맞는 금형에 플라스틱 분말을 녹이고 용화시킨 후 오븐에 분말이 적재된 금형을 넣고 원료가 골고루 금형에 안착되도록 회전시킨다. 금형에 원료가 완전히 녹아 일정 두께로 접착되면 물과 공기를 이용하여 점차적으로 냉각시킨 후 금형에서 제품을 분리시킨다[15, 21].

회전성형의 특징은 이음매 없는 일체형 구조, 경량제

품 생산가능, 가변성이 풍부한 성형기술, 다양한 표면 마무리와 색상지정, 디자인 변경의 유동성, 생산 공정의 경제성과 생산품의 내구성 증대에 매우 유리하다[13, 30].



<Figure 1> Rotational Molding Processes in a Plastic Boat Manufacturing

2.3 제약이론(Theory of Constraints)

2.3.1 제약이론의 개요

제약이론(TOC)은 1975년에 물리학을 전공한 골드렛(Eliyahu Moshe Golratt) 박사에 의해 처음으로 정립된 이론으로 집중개선 활동을 통해 조직이나 생산 공정 전체의 제약을 찾아내고 최적화방안을 제시하는 방법론이다[16]. 이러한 제약이론은 기업들이 가지고 있는 핵심적인 갈등요인을 찾아내고 제조공정에 내재된 문제점들을 개선시키는 데 도움을 준다. 최근에는 제품의 생산관리에 따른 각 공정별 제품 요구계획, 그리고 일반 제조 및 서비스 업무의 스케줄링 등에 매우 효율적으로 적용되고 있다[3, 16, 22, 24].

TOC는 크게 납기와 재고문제를 해결할 DBR 일정관리, 조직 전반에 걸쳐 업무성과를 저해하는 핵심문제를 발견하고 해결방안을 찾아내는 사고프로세스(Thinking Process), 프로젝트 소요일정을 획기적으로 단축할 수 있는 애로사슬 프로젝트 경영(Critical Chain Project Management)과 원가회계의 문제점을 해결할 수 있는 Throughput 회계로 구성되어 있다[10, 16].

2.3.2 DBR(drum, buffer, rope) 스케줄링

DBR 스케줄링은 제약이론의 응용분야 중 가장 많이 활용되는 분야로서 제약자원의 처리능력이 전체 시스템의 생산능력을 결정한다는 기본사고를 가지고 있다.

이러한 제약자원의 처리속도는 전체 공정의 속도를 나타내는 드럼(Drum)으로 전체공정의 속도를 조정하며, 버퍼(Buffer)는 제약공정이 다른 작업의 지연에 영향을 받는 것을 보호하고 제약자원을 최대한 활용하여 공정리스크 요인들을 완충하는 역할을 한다. 버퍼는 그 설정위치에 따라 물리적 자원이 부족한 제약자원을 보호하기 위한 자원버퍼(resource buffer), 납기에 맞추어 주문제품을 정확히 출하하기 위한 출하버퍼(shipping buffer), 조립 공정 앞에서 비제약부품의 지연을 방지하는 조립버퍼(shipping buffer)로 구성된다. 로프는 제약자원과 시작공정 간의 통신장치로서 제약자원의 공정속도에 맞춰 시작공정에 자재를 투입하는 속도를 조절한다[3, 10, 16, 26].

2.3.3 논리적 사고프로세스

논리적 사고프로세스는 조직이 인지하는 경영의 문제점과 갈등을 찾아내고 해결하는 방법론이다. 현재 상황나무(CRT : Current Reality Tree)를 이용하여 보트생산공정에 대한 전반적인 흐름을 정리하고 핵심문제를 발견한다. 특히 모델별 원재료에 대한 재고관리와 공정예측이 가능한 지표를 개발하며 이때 발견된 문제점들을 증발구름(EC : Evaporating Cloud)으로 지정하고 외부적 주입(Injection)을 통해 해결방안을 모색한다. 미래상황나무(PRT : Pre Requisite Tree)는 외부주입으로 인해 미래에 개선될 제조공정 업무들을 미리 표현하는 것으로 제안내용에 대한 이해도를 증진시킨다. 선행조건나무(FRT : Future Reality Tree)는 미래상황나무에서 갈등요인들의 개선을 위해 핵심적으로 우선 개선해야할 내용들을 도출하는 것을 말한다. 끝으로 도출된 경영문제 해결을 위한 구체적인 실행계획에 대해 실행계획나무(TRT : TRansition Tree)를 이용하여 정리한다[10, 16].

3. P사의 제조공정 현황 및 문제점

3.1 P사의 현황

P사는 2006년 4억 원의 자본금으로 설립, 어린이놀이시설 장비를 제작 판매해 오고 있으며 현재 근로자 13명이 약 50억 원의 연 매출을 기록하고 있는 유망한 중소기업이다. 특히 최근 들어 플라스틱보트 제작에 큰 관심을 가지고 폴리에틸렌(PE)을 주원료로 하는 회전성형기법을 사용하여 3톤과 5톤의 내수면 어업 및 다목적 플라스틱보

트를 제작하고 있다[26].

그러나 최근 P사는 경쟁기업의 등장, 불량률의 증가, 납기지연과 재고유지 비용증가, 고속련 직원의 퇴직 등으로 생산성이 악화되고 있다. 이에 P사는 납기지연 및 높은 불량률 해결을 위한 회전성형기법의 개선방안 도출과 주요 공정별 지수들의 임계치 설정이 필요한 실정이다.

3.2 플라스틱보트 제조공정의 현황과 문제점

3.2.1 플라스틱보트 제조공정 현황

P사의 제조공정은 <Figure 2>와 같이 플라스틱보트를 주문받으면 보트의 종류에 따라 미리 제작해 놓은 보트 금형을 확인한 후 해당 보트 금형들을 조립하고 폴리에틸렌(PE)과 전착제, 표면강화제 등을 배합한다.

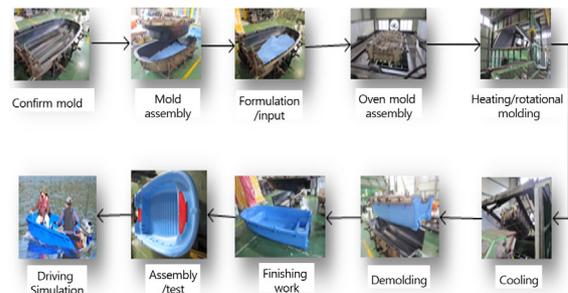
원료의 배합은 보트의 종류, 오븐 회전수, 오븐의 가열 온도, 오븐의 작업시간, 오븐의 냉각시간, 냉매의 종류, 작업장의 온도, 습도 등에 따라 배합 비율을 다르게 한다. 원료배합에 대한 기록은 배합 대장을 이용하여 위에서 언급한 요소들에 대해 수치로 작성되며 결함이 발생한 경우 사용된 배합비율에 결함표시를 하여 재불량을 최소화하고 있다.

배합된 원료는 금형 틀에 충전시키고 회전금형과 오븐에 조립을 한다. 가열과 회전성형 작업은 대부분 전기 용로에 의해 실행되며 오븐 가열시간, 온도, 회전수, 회전각, 냉매의 종류와 냉각시간 등을 회전공정 대장에 작성한다.

냉각은 회전성형이 끝난 후 물과 자연공기에 의해 이루어지는 공정으로 작업장 내의 온도에 따라 냉각시간이 매우 민감하게 정해진다.

탈형은 냉각이 끝난 성형 틀에서 보트를 이탈시키며 이때 발생하는 불규칙한 보트 표면의 이물질들을 제거하고 결함검사를 실시한다.

보트에 대한 불량은 회전성형, 냉각, 사출공정 이후 육안에 의한 검사, 무게와 균형 비율 검사와 초음파에 의한 내부결합 등을 검사한다.



<Figure 2> Rotation Molding Process for Plastic Boat Manufacturing

3.2.2 플라스틱보트 제조공정의 문제점

P사 제조공정의 결함은 <Table 1>과 같이 주로 원료 배합과정, 원료주입과정, 회전성형과 냉각과정에서 발생되었다.

내부밀도결함은 초음파 검사에 의해 발견되는 것으로 원료배합에서 전착제, 표면유연제, 강화제 등의 혼합비율이 보트의 규격과 강도에 맞지 않을 때 발생한다.

축소균열은 보트의 일부분에 균열이 생기는 결함을 말하는 것으로 배합율과 금형 내에 배합제의 주입과 충전에서 발생한다.

회전성형 공정에서 발생하는 결함은 내면뭉침, 두께불균형, 외형함몰, 외형돌출, 외형뒤틀림으로 구분되며 회전성형 속도, 가열온도, 회전각, 회전시간, 냉각시간과 냉각온도 등에 오류가 있는 경우에 주로 발생한다. 이에 따라 회전성형을 위한 기초정보 결정은 제품 품질에 가장 많은 영향을 주고 있는 것으로 밝혀졌다.

<Table 1> A Kind of Defects in Manufacturing Process

Process Type	Defect	Defect Cause
Material Mixing Process	Internal defect density	- Spreading agents ratio below - Surface softener ratio over - Internal reinforcements ratio high
Material Injection Process	Shrink cracks	- Compounding agents Dosage errors - Compounding agents Flatness error
Rotational Molding Process	Inner aggregation	- Rotational molding Speed error - Rotational molding angle error - Oven heating temperature insufficient - Cooling temperature imbalance
	Thickness imbalance	- Rotational molding Speed error - Rotational molding angle error - Oven heating temperature insufficient - Cooling temperature imbalance
	External depression, projection, twisting	- Mold combination error - Rotational molding Speed error - Rotational molding angle error

4. DBR을 이용한 제조공정 개선

4.1 DBR 스케줄링과 보트 제조공정

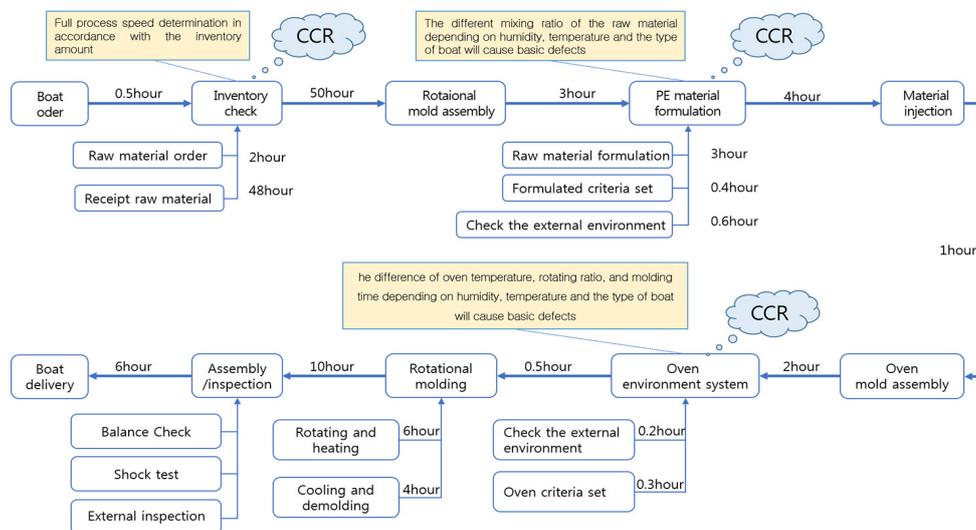
먼저 제약이론의 DBR 스케줄링을 통해 현재 플라스틱 보트 제조공정을 분석하여 비효율적인 공정과 병목공정에 대해 전사적 관점에서 해결방안을 모색한다. 즉, 전체공정에 대한 흐름도를 작성하고 각 공정간 평균시간을 계산하여 생산능력제약자원(CCR : Capacity Constraint Resource)을 찾아 해결방안을 제시한다.

해결방법은 공정의 속도를 조절하는 드럼(Drum) 설정

과 제약자원의 최대한 활용을 위한 버퍼(Buffer)를 지정하고 공정 속도 동기화를 위한 로프(Rope)를 연결한다. 또한 숙련된 작업자들이 경험이나 노하우에 의해 습득한 암묵적 작업지식에 대해 정형화하고 공유하여 결근과 실수에 의해 중단되는 작업공정과 결함의 원인을 제거한다.

4.2 DBR에 의한 현재 생산공정

현재 P사의 플라스틱보트 제조공정은 보트주문, 재고확인, 금형조립, 원료배합, 원료주입, 오븐조립, 오븐환경설정, 회전성형, 조립검사와 보트납품으로 분류되며 <Figure 3>과 같이 CCR을 선정하였다.



<Figure 3> Current Plastic Boat Manufacturing Process by DBR

첫 번째 제약조건(CCR)은 원료재고 확인 및 조달공정이다. DBR 스케줄링에 의하면 전체 공정의 진행속도를 결정하는 가장 중요한 요인이기 때문이다. 원료 재고확인 공정은 보트주문이 발생하면 경험에 의해 원료소모량을 추측하고 창고재고를 파악한다. 이때 재고가 부족한 경우 기존 납품사에 전화를 이용하여 납품을 독촉한다. 납품사의 원료에 대한 조달과 물류이송 기간으로 2일 후에나 정상적인 입고가 된다. 또한 불량이 발생하여 추가적인 원료소모가 발생할 경우 원료소모량 추측이 거의 불가능하여 적정재고와 안전재고에 대한 개념도 갖기 힘들다.

두 번째 제약조건(CCR)은 원료배합 공정이다. 이 공정은 보트의 종류, 작업장의 온도, 습도와 보트의 색깔 등에 따라 PE, 전착제, 강화제 비율이 다르며 고도의 숙련자에 의해 배합비율이 결정되기 때문이다.

세 번째 제약조건(CCR)은 오븐환경설정 공정이다. 보트의 종류에 따라 회전시간, 오븐가열온도, 작업시간, 회전각과 냉각시간 등이 결정되어 가장 많은 결함률을 보이고 있기 때문이다.

현재 <Figure 3>에서의 제약공정은 대부분 경험에 의한 숙련자들이 업무를 지배하고 있으며 결함이 발생한 경우 원인에 대한 분석은 경험적으로 이루어지고 있다. 만약 핵심 숙련자가 이탈할 경우 공정기한과 결함률이 급격히 증가할 것으로 예상되어 기업에 치명적인 손실과 경쟁력 저하를 가져올 것으로 보인다.

4.3 DBR에 의한 개선된 제조공정

TOC의 DBR 스케줄링에 의해 <Figure 4>와 같이 현

제조공정의 CCR을 개선하고자 한다.

공정예측시스템은 주문된 보트종류에 따라 원료 재고와 전체공정에 대한 속도를 조절하는 역할을 한다. 이때 공정 예측에서는 원료에 대한 재고 및 발주를 로프로 연결하여 자동발주시스템을 가동시키며 발주관리 업무에서는 원료배합 공정과 로프를 연계시켜 공정의 속도 및 재고관리를 연동시킨다.

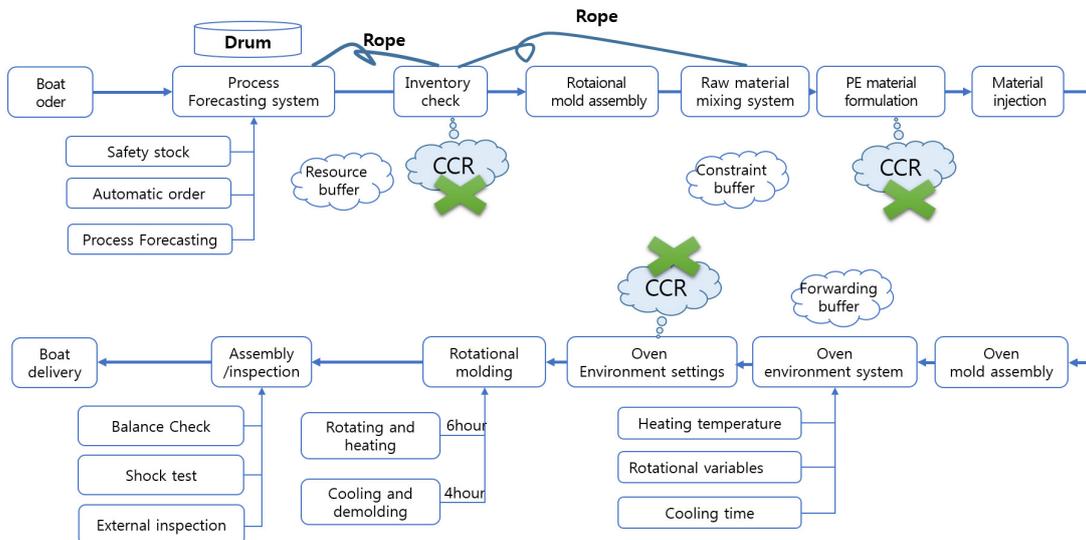
<Figure 5>는 원료주입 전까지 공정에서 밝혀진 첫 번째와 두 번째 CCR을 공정예측정보시스템, 자동발주시스템, 입고출고관리시스템 및 원료배합시스템을 구축하여 개선한 것이다.

공정예측시스템은 원료소모예상량과 전체공정에 대한 시간 예측이 가능하고 평균 불량률도 계산하여 주문한 제품에 대한 최종 납기일을 예측할 수 있으며 원료에 대한 재고, 소모, 발주와 입고를 관리하여 전체공정을 조절하는 드럼역할을 하게 된다.

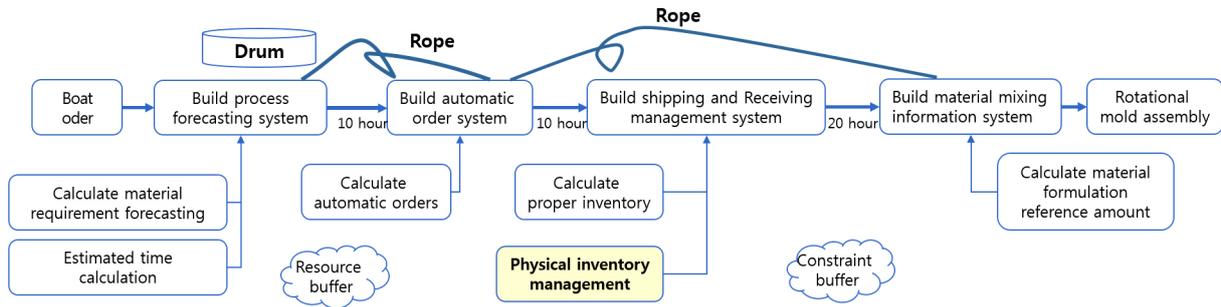
자동발주시스템은 공정시스템에서 예측된 소모량에 대해 현재 보유하고 있는 재고량을 파악하여 일정한 재고량이 부족할 경우 자동으로 발주 하는데 주문과 원료배합 속도에 따라 발주기한을 조절한다. 자원버퍼는 원료재고에 대한 최적의 재고량을 지정하는 역할을 하며 보통 3개월 평균 소모량을 기준으로 한다.

입·출고관리시스템은 원료배합에서 소모되는 기준량과 발주에 의해 입고되는 수량을 계산하고 실제고량을 체크하여 실시간 재고량 및 적정재고량의 기초가 되는 자료를 관리하게 하였다.

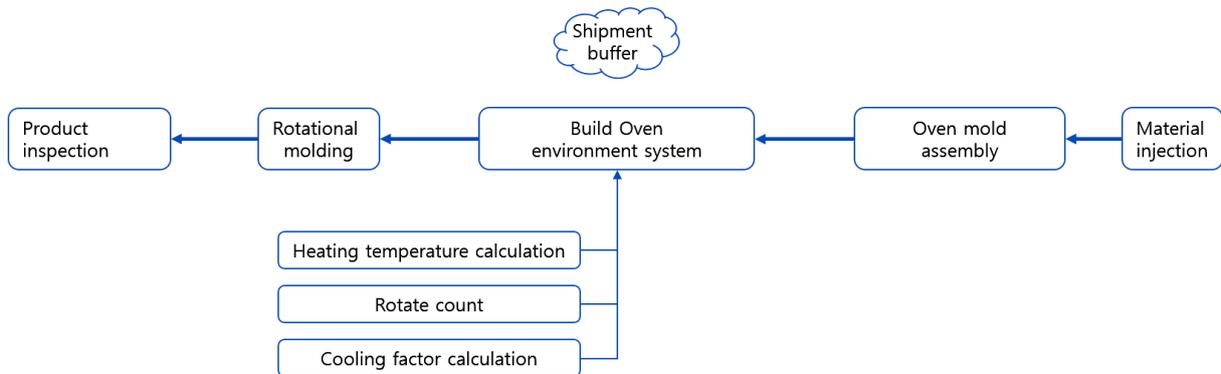
원료배합시스템은 고도의 숙련자에 의해 배합비율이 결정되던 것을 정보시스템을 통해 합리적으로 결정하게 한다.



<Figure 4> Improvement of Plastic Boat Manufacturing Process by DBR



<Figure 5> Improvement of 'Inventory Check' and 'Raw Material Formulation' Defined as CCR



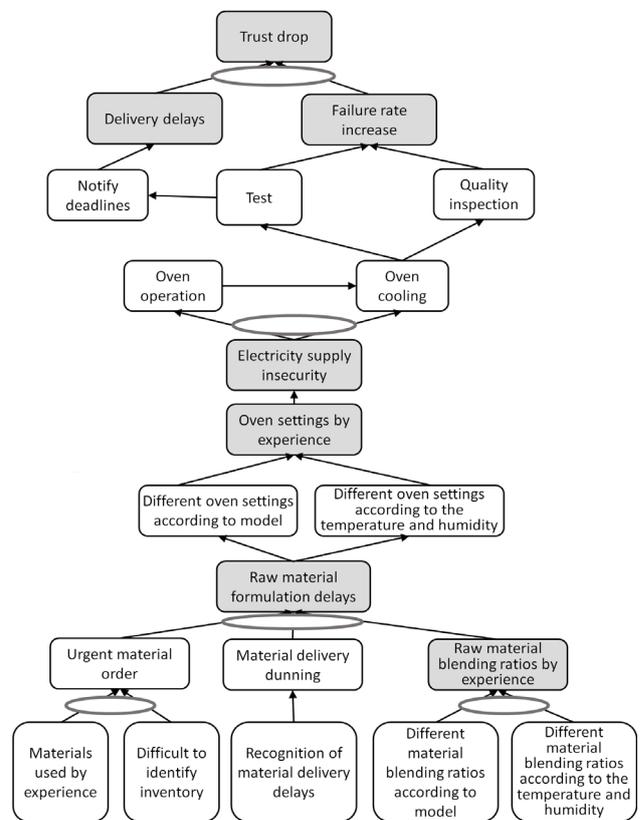
<Figure 6> Improvement of 'Oven Brazier Environment' Defined as CCR

<Figure 6>은 세 번째 CCR인 오븐환경을 개선한 것이다. 주문한 보트종류에 따라 다양한 오븐환경을 설정하는 역할을 한다. 즉, 오븐 회전수, 회전각도, 가열온도 및 시간, 냉각온도 및 시간 등을 자동 계산하여 일부 숙련된 직원들이 경험적으로 알고 있는 수치들을 객관화하여 공유할 수 있는 오븐환경시스템을 구축하였다. 이때 출하버퍼는 최종 제품생산에 따른 기한을 조절하여 주문자에게 신뢰를 높일 수 있도록 활용될 것이다.

5. TOC 사고프로세스에 의한 제조공정개선

5.1 CRT Tree분석

TOC 사고프로세스의 CRT(Current Reality Tree)는 <Figure 7>과 같이 현재 문제가 되는 상황을 Tree 구조로 나타낸 것이다. P사의 경우 회전성형에 필요한 전기공급과 원료배합에 간헐적 문제가 발생하여 납기가 지연되고 불량률이 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다. 이는 원료배합과 오븐환경 설정에 있어 숙련된 직원의 경험에 의존하다 보니 숙련 직원의 신분상 문제가 생길 경우 불량률 상승과 납기지연이 예상된다.



<Figure 7> CRT(Current Reality Tree)

또한 원료배합 공정은 모델에 따라 배합비율과 외부 환경요소들에 의해 영향을 받는다. P사에서는 제품별 원료배합대장을 사용하지만 구체적인 환경변수, 배합비율과 이에 따른 완제품 또는 공정제품들의 불량과 성공에 대한 자료가 없어 구체적인 분석이 불가능하였다.

한편 원재료의 재고관리는 경험 관리자에 의해 암묵적으로 관리를 하고 있었으며 특히 예상하지 못한 제품에 대한 주문이 일어날 경우 원재료 공급자에게 전화하여 급히 조달하는 경우가 대부분이었다. 이는 일정한 형태의 제품생산 기한과 원재료 비용의 비경제적인 구매가 이루어져 원가상승의 요인이 되고 있다.

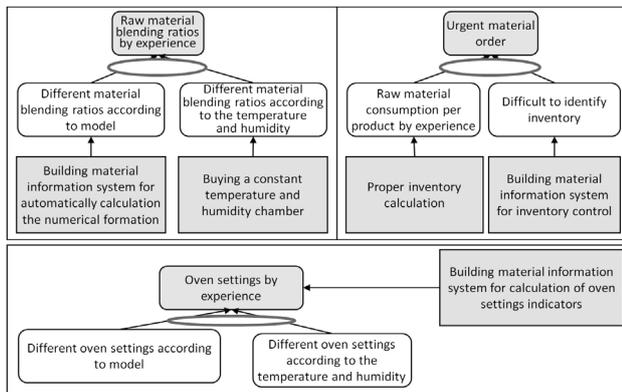
이에 따라 본 연구에서는 보트용 시료를 기준으로 외부 환경적 요인인 온도, 습도와 각 원재료별 배합비율 등을 세분하여 실험, 분석하고자 한다.

5.2 EC(증발구름)

TOC의 사고프로세스 중 EC(Evaporating Cloud, 증발구름)는 새로운 해결책을 모색하는 과정에서 나타나는 다양한 형태의 갈등에 대해 해결방안과 아이디어를 도출하는 단계를 말한다. 본 연구에서는 비과학적인 원료배합과 회전성형에 핵심인 오븐의 작동환경 세팅에 대한 문제가 제약조건과 CRT의 주된 문제로 도출되어 이를 개선하고자 <Figure 8>과 같이 EC를 도출하였다.

경험에 의한 원료배합은 불량요인들이 내재하고 있어 중간재 형태로 원료를 아웃소싱 할 필요가 있다. 이는 주문 제품의 예측이 불가능하고 재고관리의 문제점을 해결하는데 유리하다.

핵심공정인 오븐의 환경설정은 주문제품에 따라 암의 종류와 개수, X, Y의 회전 수, 오븐 예열온도, 작업시간, 냉각시간, 탈형온도 등으로 공정을 세분화하여 각각 이에 대한 제품의 양부를 파악하고 통계적 분석을 통해 오븐환경 설정변수에 대한 임계치를 설정하고자 한다.



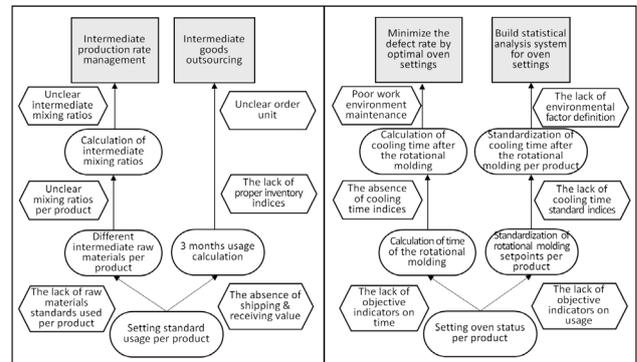
<Figure 8> EC(Evaporating Cloud)

5.3 선행조건나무 분석

TOC의 선행조건나무(PRT : Pre Requisite Tree)는 목표를 달성하는 과정에서 발생하는 장애를 찾아내고 극복하기 위해 중간목표를 설정하고 해소하는 도구이다.

<Figure 9>는 EC에서 나타난 문제점과 아이디어에 대해 구체적인 목표를 설정한다. 원료 배합에 대한 문제와 제약조건은 중간재 형태로 아웃소싱을 하여 공정에 대한 문제를 해결한다. 이때 중간재 배합에 대한 비율은 제품주문 시에 통보하고 중간재 제조비용은 실험노트와 숙련된 기술자의 노하우를 체계적으로 도출하여 객관화한다.

오븐환경에 대한 공정별 지수에 대한 임계치 설정은 실험노트와 숙련된 기술자의 계산방식을 이용하고 통계적 기법을 통해 타당성을 검증한다. 통계적 기법은 시료에 대한 실험노트를 근거로 외부의 습도, 온도, 오븐의 가열온도, 가열시간, 제품의 중량, 암의 종류, X축의 회전수, Y축의 회전 수, 냉각시간, 탈형온도를 독립변수로 하여 로지스틱 회귀분석을 실시하여 불량에 영향을 미치는 요인들을 찾아낸다.

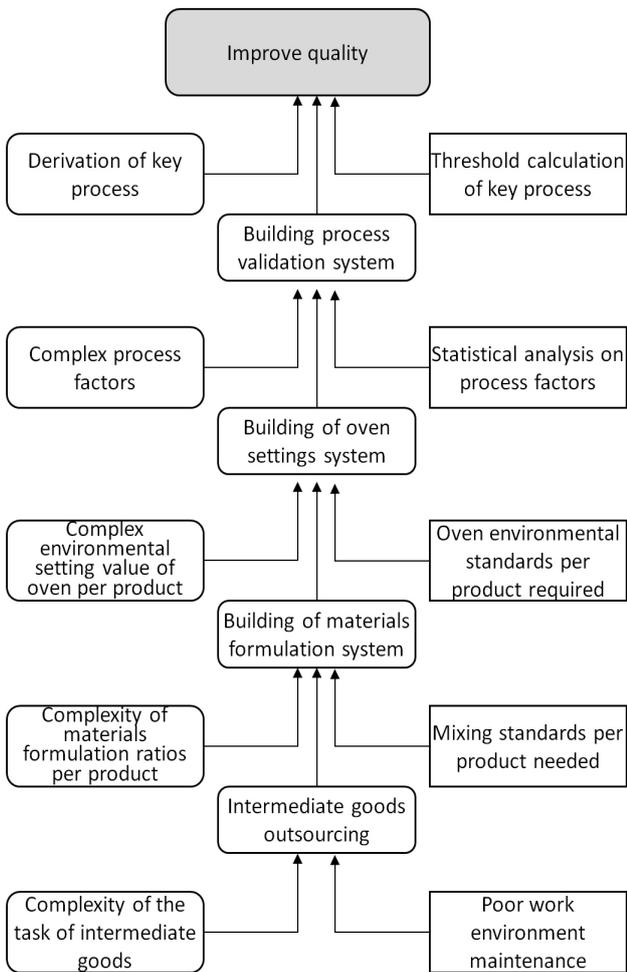


<Figure 9> PRT : Pre Requisite Tree

5.4 실행계획 나무

TOC의 사고프로세스에 의한 실행계획 나무(Transition Tree)는 PT에서 나타난 해결책에 대해 구체적인 실행방안을 모색하는 것으로 본 연구에서는 중간재의 아웃소싱과 오븐환경 설정에 관한 통계적 분석을 통해 최종 산출물의 불량유무에 영향을 미치는 공정요인을 찾고자 한다.

<Figure 10>은 실행계획나무를 도식화한 것으로 공정별 지수화를 전제로 공정에 대한 객관적 표준화가 필요하여 이를 실험노트를 통해 통계적 유의성을 검증한다. 또한 향후 각 공정별 임계치를 설정하여 불량률을 획기적으로 감소시키고자 한다.



<Figure 10> TRT : TTransition Tree

6. 통계적 분석 및 기대효과

6.1 통계적 분석

6.1.1 시료의 선정

통계적 분석을 위해 18건의 시료 중 불량률이 높은 6개의 시료 즉, R.D_450-A(시료1, 33.3%), R.D_450-B(시료2, 27.8%), R.D_450-C(시료3, 33.3%), R.D_450-D(시료4, 27.8%), R.D_450-E(시료5, 25%), R.D_450-F(시료6, 25%)를 선정하였다. 분석건수는 시료 1~4는 각 18건, 시료 5~6은 각 12건으로 총 96건이다.

6.1.2 통계적 분석

선정된 6개 시료에 대하여 평소 주요한 공정요인으로 나타난 가열시간(A), 가열온도(B), X축 회전속도(C), Y축 회전속도(D), 냉각시간(E), 탈형온도(F)에 대해 분석하였다.

(1) 기초통계량 분석

관측치에 대한 기초 통계량을 분석한 결과, 주요 공정 요인들에 대한 평균 및 표준편차를 보면 가열시간은 평균 32.16분, 표준편차 0.67분, 가열온도는 평균 204.48℃, 표준편차 10.117℃, X축 회전속도는 평균 40.83rpm, 표준편차 3.134rpm, Y축 회전속도는 평균 44.74rpm, 표준편차 3.507rpm, 냉각시간은 평균 23.33분, 표준편차 3.529분, 탈형온도는 평균 57.14℃, 표준편차 4.164℃로 나타났다.

(2) 로지스틱 회귀분석[9, 28]

본 연구에서는 회전성형 공법에 의해 제작되는 소형 보트의 불량유무에 영향을 미치는 공정요인을 찾고자 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 로지스틱 회귀분석은 독립변수들의 변화에 따른 종속변수 사건의 발생 가능성을 다루는 확률 모형으로서, 일반적인 선형 회귀분석과는 달리 범주형 데이터를 종속 변수로 두는 일종의 분류 문제의 성격을 가진다. 즉, 종속변수는 최종 생산물의 불량 유무로 선정하였고 독립변수로는 회전성형 공정에서 사용하는 가열시간, 가열온도, XY축 암의 회전속도, 냉각시간, 탈형온도로 설정하였다. 선택된 독립변수들에 대하여 유의성 검증을 통한 변수선택을 거쳤으며, 결과적으로 유의한 독립변수들을 통해 최종적인 모형을 구하였다.

추정된 회귀모형은 <Table 2>와 같이 카이스퀘어 검정 및 Hosmer와 Lemeshow 검정기준에서 그 유의성이 검정되었으며, 종속변수인 불량유무에 대하여 0.655의 설명력(R²)을 보여주었다.

<Table 2> Statistics by Logistic Regression Analysis

Statistics	Value	Interpretation
Chi-square p-value	0.001 Under	Significant
Hosmer & Lemeshow Test p-value	0.462	Suitable
R ² (Nagelkerke way)	0.655	Superior explanatory power

유의성 검정을 통해 최종적으로 선택된 독립변수들을 <Table 3>에 정리하였다.

<Table 3> Logistic Regression Model

Variable	β	$\exp(\beta)$	Significance
Constant	-45.806		1.5×10^{-5}
Cooling Time	0.989	2.69	1.4×10^{-5}
Stripping Temperature	0.366	1.44	3.5×10^{-4}

최종적으로 선택된 독립변수는 냉각시간과 탈형온도 두 가지이며, 상수를 포함해 세 항목은 모두 1% 유의수준을 만족하고 있다. 또한 독립변수의 지수계수($\exp(\beta)$) 값이 모두 1보다 크게 나타나 두 독립변수 모두 증가 시 불량률을 높이는 방향으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 다시 말해 냉각시간의 증가나 탈형 시의 온도증가는 더 많은 불량을 유발할 수 있으며, 특히 탈형온도에 비해 냉각시간의 변화가 더 큰 영향력을 가진다.

선택된 독립변수에 의한 최종 회귀분석 식을 변형하여 불량률(p) 자체를 종속변수로 할 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p = \frac{1}{1 + \exp(45.806 - 0.989\text{냉각시간} - 0.366\text{탈형온도})}$$

이렇게 추정된 로지스틱 회귀식은 주어진 환경, 즉 입력된 독립변수의 값들을 바탕으로 해당 공정조건이 불량품을 생산할 확률을 계산하게 된다. 이때 확률이 0.5가 넘는 경우 불량으로 예측되며, 그 반대의 경우는 양품으로 간주한다. 주어진 데이터의 공정조건을 바탕으로 회귀식에 의해 예측된 불량률과 실제 불량률의 일치정도를 나타내면 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Testing of Logistic Regression Coefficients

Normal/Bad		Predicted Value		Classification Accuracy(%)
		Normal	Bad	
Observations	Normal	62	6	91.2
	Bad	7	21	75.0
	all(%)			86.5

<Table 4>를 보면 실제 정상제품 중 90% 이상을 정상으로, 실제 불량제품 중 75%를 불량으로 예측하고 있다.

6.2 기대효과

지금까지 제약이론의 DBR 스케줄링 방법을 이용하여 P기업에서 플라스틱보트 제작시 납기지연 및 불량률 증가를 가져오는 회전성형 공정의 병목공정과 제약요인들을 개선한 결과, 다음과 같은 성과를 거두었다.

정량적인 성과로는 2015년 매출액이 전년도(5,000백만원)보다 1,000백만 원(20%)이 증가되었으며 보트제작의 결함률(주로 두께미달)도 약 10%에서 약 5%로 감소시킴으로써 품질개선은 물론 연간 150백만 원(불량 50대×300만 원)의 원가절감을 거둔 것으로 나타났다. 한편 정성적인 성과로는 가격경쟁력 확보를 통한 제품인지도 향상과 자체 기술력 확보를 들 수 있다.

7. 결 론

회전성형 기법과 Polyethylene(PE)원료를 사용하는 플라스틱보트 제작공정은 마지막 공정인 탈형 및 조립 검사공정에서 불량유무가 판단되므로 각 공정별 불량감소를 위한 획기적인 방안이 필요하다.

본 연구에서는 제약이론의 DBR과 사고프로세스를 이용하여 플라스틱보트 제조공정에 대한 제약 공정과 개선 방안을 도출하였다. 즉, 핵심적 제약공정은 경험에 의한 원료재고관리, 원료배합, 회전성형용 오븐환경설정으로 밝혀졌다. 이의 개선방안으로는 중간재 형태의 재료 아웃소싱, 안전재고와 자동발주시스템 도입, 중간재 원료 배합의 기준지표 선정, 오븐환경변수 설정의 표준화와 각 공정별 작업자 지정을 통한 작업의 책임성 강화, 각종 변수 관리를 위한 정보시스템 및 무정전 전원공급장치(UPS) 도입 등이 제시되었다.

본 연구의 가치는 제약이론과 통계적 분석을 통해 소규모 제조공정에서 암묵적, 경험적으로 발생하는 많은 공정상 문제들을 발견하고 해결방안을 제시한 데 있다.

향후에는 지속적인 데이터 축적과 정확한 통계적 분석을 통해 불량률을 최소화시키는 주요 공정별 지수의 임계치 설정과 불량률에 가장 많은 영향을 미치는 오븐의 가열온도 공정에 대한 원료별, 제품별 표준화가 필요하다고 본다.

References

- [1] Aggarwal, S.C., MRP, JIT, OPT, GMS : Making Sense of Production Operations Systems, *Harvard Business Review*, 1985, Vol. 63, pp. 8-16.
- [2] Bae, W.T. and Shin, D.W., Quantitative Evaluation of Plasticity and Extension for Extruding Body, *Journal of Korean Ceramic Society*, 2002, Vol. 39, No. 11, pp. 1048-1054.
- [3] Chakravorty, S.S. and Atwater, J.B., The Impact of Free Goods the Performance of Drum-buffer-rope Scheduling Systems, *International Journal of Production Economics*, 2005, Vol. 95, pp. 347-357.
- [4] Cho, J.R. and Ha, J.W., Integrated Framework combining Six Sigma and TOC-Thinking Process : A Case Study, *Journal of The Korean Institute of Plant Engineering*, 2009, Vol. 14, No. 1, pp. 11-19.
- [5] Cho, S.S., Study of Structural Design of Polyethylene Pleasure Boat' Trans, *Korean Soc. Mech. Eng. A*, 2012, Vol. 36, No. 12, pp. 1551-1561.
- [6] Cooper, D. and Schindler, P.S., *Business Research Me-*

- thods, Published by McGraw-Hill Higher Education Companies Inc, New York, 2003.
- [7] Dong, Y.B., The Prospects and the Present Condition of Plastic Industry in Japan, *The Monthly Packaging world*, 2011, No. 216, pp. 128-134.
- [8] Duclos, L.K. and Spencer, M.S., The Impact of a Constraint Buffer in a Flow Shop, *International Journal of Production Economics*, 1995, Vol. 42, pp. 175-185.
- [9] Frank, E.H, Regression Modeling Strategies, Springer, 2015.
- [10] Goldratt, E.M., "The Goal," North River Press, New York, 1992.
- [11] Gupta, M. and Snyder, D., Comparing TOC with MRP and JIT : a Literature Review, *International Journal of Production Research*, 2009, Vol. 47, No. 13, pp. 3705-3739.
- [12] Hong, S.G., Byun, J.H., and Lee, S.K., Fabrication and Characterization of 3D Woven Textile Reinforced Thermoplastic Composites, *The Korea Society for Composite Materials*, 2007, Vol. 16, No. 2, pp. 33-46.
- [13] HPT Company, <http://www.polytank.kr/molding/mold2.php>, 2014.
- [14] Hurley, S. and Whybark, D., Inventory and Capacity Trade-offs in a Manufacturing Cell, *International Journal of Production Economics*, 1999, Vol. 59, No. 3, pp. 203-212.
- [15] John, K.K., Polypropylene Structure, Blends and Composites : Composites, Chapman and Hall Press, London, 1995.
- [16] Jung, N.K., "TOC Golden Role," HanEeon Community Press, 2002, pp. 14-96.
- [17] Kee, R. and Schmidt, C., A Comparative Analysis of Utilizing Activity-based Costing and the Theory of Constraints for Making Product-mix Decisions, *International Journal of Production Economics*, 2000, Vol. 63, pp. 1-17.
- [18] Kim, J.K., Kim, C.S., Lim, S.J., Kim, H.M., Choi, S.W., and Yoon, H.S., Research Results and Trends Analysis on Process Fraction of Nonconforming Control Charts under Non-Normal Process, *Korean Institute of Industrial Engineers, Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, 2013, pp. 269-273.
- [19] Kown, J.O., Lee, J.K., Kim, H.C., and Kim, J.S., Evaluation of FRP Test Boat Constructed by New Production Systems, *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, 2001, pp. 100-103.
- [20] Lee, D.K., Jeong, Y.K., and Shin, J.G., Development of a Factory Layout Design System using Leisure-Boat Building Process, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2013, Vol. 50, No. 1, pp. 14-24.
- [21] Lee, J.K., Han, H.D., and Kim, H.J., A study on Quality Assurance for Rotational Molding Products, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 2004, Vol. 28, No. 6, pp. 826-837.
- [22] Lee, S.H., Bae, H.R., Won, H.J., Kim, H.T., and Kang, S.H., Efficient Execution Method for Business Process Management Using TOC Concepts, *Korea Electronic Commerce Research*, 2010, Vol. 10, No. 1, pp. 61-77.
- [23] Lee, S.W., Lee, J.H., Hong, J.W., and Lee, Y.J., A Study on Strategies to Develop the Marine Leisure Boat Industry, *Korea Maritime Institute, Korea Maritime Institute Report 2009*, 2009.
- [24] Linhares, A., Theory of Constraints and the Combinatorial Complexity of the Product-mix Decision, *International Journal of Production Economics*, 2009, Vol. 12, No. 1, pp. 121-129.
- [25] Park, K.J., Shin, S.M., and Jeong H.J., An Optimal Process Design Using a Robust Desirability Function (RDF) Model to Improve a Process/Product Quality on a Pharmaceutical Manufacturing Process, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2010, Vol. 33, No. 1, pp. 1-9.
- [26] POLYPIA Company, <http://www.polypia.co.kr>, 2014.
- [27] Sale, M.L. and Inman, R.A., Survey-based Comparison of Performance and Change in Performance of Firms Using Traditional Manufacturing, JIT and TOC, *International Journal of Production Research*, 2003, Vol. 41, No. 4, pp. 829-844.
- [28] Scott, M, Applied Logistic Regression Analysis, Sage Publications, Inc., 2002.
- [29] Song, C.Y., Lee, D.S., and Shin, S.W., Application of TOC and TRIZ for Paradox management, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2010, Vol. 33, No. 2, pp. 72-80.
- [30] Yoon, D.J., Kim, S.J., Choi, S.U., and Na, K.H., The Cold Repressing Process of Sintered Preform, *The Korea Society for Technology of Plasticity Conference*, 1997, pp. 281-286.

ORCID

Gun-Gu Yoon | <http://orcid.org/0000-0002-5492-1046>
 Tae-Gu Kim | <http://orcid.org/0000-0003-0246-3546>
 Dong-Hyung Lee | <http://orcid.org/0000-0001-8743-858X>