

# 반도체 MBT 공정의 Rework 제품 투입결정에 관한 연구

이도훈<sup>1</sup> · 고효현<sup>2\*</sup> · 김성식<sup>2</sup>

<sup>1</sup>삼성전자 / <sup>1,2</sup>고려대학교 산업시스템정보공학과

## A Study of Strategy for Planning of Rework in Semiconductor Monitoring Burn-in Test Process

Do-Hoon Lee<sup>1</sup> · Hyo-Heon Ko<sup>2</sup> · Sung-Shick Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samsung Electronics Co., Ltd., Asan, 336-851

<sup>1,2</sup>Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

This paper considers a strategy for planning of rework in semiconductor monitoring burn-in test process. The equipment error in monitoring burn-in test process generates many defects. These defects are transformed into good products by rework process, i.e. retest. Rework has the advantage of saving production costs. But rework increases holding costs and incurs rework costs. In monitoring burn-in test process, rework depends on operator's experience with no pre-defined specification. In practice, a number of rework activities are performed with respect to the product importance and inventory quantity. Moreover, disregard for order jobs schedule have caused due date penalties. So a strategy for planning of rework by which order jobs schedule are not affected is suggested. Furthermore, production costs, rework costs and inventory costs for planning of rework are considered.

**Keywords:** MBT, rework, semiconductor

### 1. 서론

반도체 산업은 세계에서 가장 경쟁이 심하고 많은 이익을 창출하는 산업 중 하나이다. 최근의 반도체 시장은 높은 원가 경쟁력을 갖춘 일부 거대기업이 아니면 생존이 불가능한 환경이 되어가고 있다. 더구나 이러한 경쟁력의 확보는 복잡한 공정 절차 및 생산 제약으로 인해, 점점 더 어려워지고 있다. 이러한 시장 환경의 변화에 따라 원가를 낮추기 위한 기업들의 노력은 커지고 있고 반도체 각 공정의 수율 관리와 불량품 관리 등 생산 관리의 중요성이 커지고 있다. 또한 생산 관리를 통하여 제한된 자원을 효율적으로 관리하는 것이 반도체 사업의 승패를 결정짓는 중요한 사항이 되고 있다.

반도체 공정은 FAB(Fabrication), EDS(Electrical Die Sorting), 조립(Assembly), 검사(Test), Module의 5가지 공정으로 크게 나누어

진다. 이 중 Test 공정은 가공된 완제품 형태의 반도체를 고객 출하 전에 검사하는 역할을 하며 전기적 특성과 외관특성 검사가 진행된다. Test 공정은 DC Test, MBT(Monitoring Burn-in Test), Post-Burn Test, Final Test, Marking, Visual Inspection, Packing 등의 세부 공정으로 구성된다.

Test 공정의 Area는 크게 MBT, Test, MVP로 나누어진다. 조립 공정을 마친 제품은 MBT Area에 투입되며 조립 공정에서 발생한 불량률 제거하기 위해 DC Test가 먼저 진행된다. DC Test 후에는 제품의 신뢰성 확보를 위해 MBT가 진행된다. MBT를 거친 제품은 Test Area로 이동해서 Post-Burn Test, Final Test를 거친다. Test Area에서는 전기적 Function Test 및 Speed Test가 진행된다. 전기적 특성 검사를 마친 제품은 MVP Area로 이동해서 Marking, Visual Inspection, Packing 공정을 거쳐 Module 공정 출하 또는 Component로 출하된다.

\*연락처 : 고효현, 136-701 서울시 성북구 안암동 고려대학교 산업시스템정보공학과, Fax : 02-929-5888, E-mail : swish17@korea.ac.kr  
2005년 1월 15일 접수, 2회 수정 후 2005년 8월 4일 게재 확정.

Test 공정의 검사 시간은 반도체 고집적화, 고기능화에 따라 점점 많은 시간을 요구하고 있다. Test 공정의 전체 작업시간은 통상 2일 이내이나 대부분의 작업시간은 MBT, Post-Burn in Test, Final Test 공정에서 소요된다. 특히 MBT 공정의 작업시간은 제품별로 적게는 3시간, 많게는 72시간 이상 차지하여 Test 공정 중 가장 많은 시간이 소요된다. 따라서 MBT 공정에서 효율적인 작업시간 관리가 전체 Test 공정의 제조 경쟁력 향상으로 직결된다.

일반적으로 MBT 공정은 공정 진행시간이 길어서 반도체 B/E(Back-End) 공정의 주요 병목 공정이고 여유시간이 많지 않다. 하지만 반도체 공정의 특성상 제품 출하가 월말에 집중되어 월초에는 FAB, EDS 공정으로부터의 Wafer 출하량이 많지 않아 작업 간의 여유시간이 존재한다. MBT 설비는 진행 제품이 설비군별로 정해져 있어서 여유시간이 발생한 설비가 있어도 타 설비군에서 지연되고 있는 작업을 진행할 수 없다. 따라서 MBT 공정의 효율적인 작업시간 관리를 위해서는 주문 작업시간의 관리뿐만 아니라 여유시간의 관리가 중요하다. 여유시간을 효율적으로 활용하는 것은 설비의 효율성 측면에서도 많은 이점을 가질 수 있다.

Test 공정에서 MBT 공정은 높은 온도와 높은 전압의 환경에서 제품의 신뢰성 확보를 위해 가혹시험을 진행하는 공정이다. MBT 공정에서는 검사를 위해 조립공정에서 Package 형태로 가공된 단위 제품을 MBT Board에 삽입하여 125℃ 이상의 고온 Chamber 내에서 장시간 쓰기와 위기를 진행한다. MBT 공정을 거친 개별 제품은 양품 또는 불량품의 종류를 표시하는 Bin 정보로 구분된다. MBT 공정의 Bin정보는 Bin0에서 Bin9까지 10가지로 구분되며, 양품 정보인 Bin1을 제외한 9가지 Bin 정보로 불량 원인을 판별한다.

MBT 공정은 높은 온도와 높은 전압의 검사 환경에서 진행되므로 제품과 Board, Chamber Slot과 Board 간의 전기적 오류로 제품의 신뢰성과는 상관없이 설비 오류로 인한 불량품이 다량으로 발생한다. 이러한 불량은 Lamp on 또는 줄성 불량으로 일컬으며, Bin0 또는 Bin2정보로 구분된다. 본 연구에서는 이러한 MBT 공정의 설비 오류로 인해 불량으로 판정되어 재검사가 필요한 제품을 Rework 제품으로 정의하고, 재검사 과정을 Rework 작업으로 정의한다.

MBT 공정을 거친 제품은 Test 결과인 Bin 정보에 의해 Function, Speed 검사를 위해 다음 공정으로 이동하거나 폐기 또는 재검사가 결정된다. MBT 공정의 불량품의 대다수는 설비 오류로 인한 불량이며 이러한 불량은 Rework을 위해 다시 MBT(Rewind-in) 공정을 거친다. 하지만 한번 Rework을 거쳐 불량으로 판정된 제품은 더 이상 Rework되지 않고 폐기된다.

현재 MBT 공정의 Rework 제품 발생률은 전체 생산량 대비 5% 이상이며, 전체 Test 공정의 Rework 제품량 대비 95% 이상이다. MBT 공정의 Rework 제품은 작업 효율을 위해 여러 Lot에서 발생한 불량품을 하나의 Lot으로 합하여 진행하므로 작업 관리가 복잡하고, 발생량이 많아 전체 MBT 공정의 작업 관리

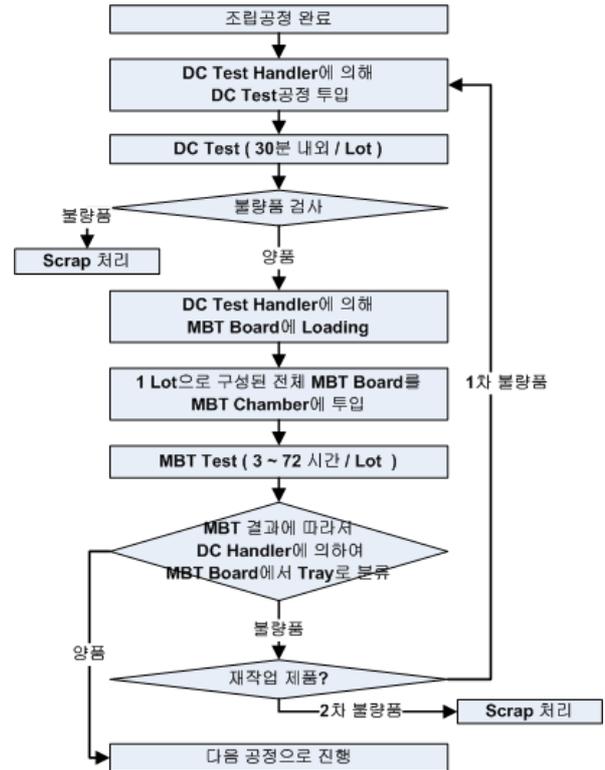


그림 1. DC Test와 MBT 공정 흐름도.

에 많은 영향을 미친다.

<그림 1>은 DC Test와 MBT 공정의 공정 흐름도를 나타낸 것이다. <그림 1>에서 보듯이 DC Test 공정은 MBT 공정에 앞서 진행된다. 조립 공정을 거치면서 생긴 몇몇 불량은 MBT Board와 설비에 심각한 훼손을 발생시킬 수 있다. 따라서 모든 제품은 MBT 공정 전에 반드시 사전 검사 단계인 DC Test 공정을 거친다. DC Test 공정에서는 조립 공정중에 발생한 불량을 통해 MBT 공정 투입 전에 제거한다.

DC Test를 진행한 제품들 중에서 합격한 제품은 DC Test Handler에 의해 자동으로 MBT Board에 삽입된다. 또한 MBT 공정을 거친 제품은 Bin 정보에 따라 MBT Board에서 Tray로 옮겨진다. DC Test 공정의 작업시간은 단위 제품당 1초 이내로 MBT 공정에 비해 매우 짧다. 하지만 DC Test 공정의 생산 관리는 MBT 공정의 작업 준비 및 대기시간에 직접적인 영향을 미치므로 MBT 공정의 작업 조건에 맞추어 충분히 고려해야 한다.

MBT 공정에서 Rework 제품을 폐기하지 않고 Rework 작업을 진행하는 가장 큰 이유는 단일공정 진행만으로도 많은 양의 양품을 얻을 수 있기 때문이다. Rework 작업을 통해 얻어진 양품만큼 다음 고객의 주문 시에 덜 생산해도 되므로 생산원가를 절감하는 효과를 얻게 된다. 또한 긴급 주문에 대하여 FAB에서부터 검사 공정까지의 긴 생산시간을 줄일 수 있어서 중요 고객에게 빠른 납기로 만족 시킬 수 있다. 반면에 Rework 작업을 위한 비용이 추가로 발생하고, Rework 작업 대기로 공정 재고

비용이 증가하며, Rework 작업 진행으로 인해 주문 작업의 납기 차질을 초래할 수 있다.

현재 MBT 공정의 Rework 작업은 작업자의 경험에 의존하여 진행된다. 작업시간 사이의 여유시간이 발생하면 제품의 중요도가 높은 제품이나 대기 수량이 많은 제품이 우선적으로 투입된다. 이로 인해 일부 제품은 Rework 작업이 장기간 진행되지 않아서 공정 재고 비용이 지속적으로 증가하였다. 또한 여유시간을 정확히 고려하지 않아서 주문 작업의 납기 차질을 발생시켰다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기존의 Rework 작업을 개선하기 위해 Rework 작업에 따르는 비용을 효율적으로 활용하여 이익을 최대화하는 Rework 제품 투입 정책을 제안한다. 또한 Rework 작업으로 인해 주문 작업의 납기가 훼손되지 않는 작업시간 사이의 여유시간을 활용하는 Rework 제품 투입 계획을 제안한다.

Rework은 반도체산업뿐만 아니라 많은 제조 산업에서 중요한 이슈이다(Flapper *et al.*(2002)). 이에 따라 1990년대 이후 Rework 제품의 재고 관리와 투입 정책에 관한 많은 연구가 진행되었다.

Rework 대기 제품의 재고 관리에 대한 기존의 연구로는 Flapper and S.D.P(2004)의 연구가 있다. Flapper and S.D.P는 폐기 전략 및 Rework 전략에 따른 단위 시간당 평균 이익을 산출하였다. 하지만 일반 제품과 Rework 제품의 Lot의 수량은 항상 일정하다고 가정하였고, 주문 작업의 생산 계획 조정에 따른 납기 차질을 고려하지 않았다. Jamal and A.M.M(2004)은 Rework 주기에 따른 공정 재고 비용과 소비자 위험 확률을 연구하였다. 하지만 Rework 주기를 일정한 주기로 정하는 경우나, 정해진 Rework Lot의 수량만큼 모였을 때로 한정하였다.

Rework 제품 투입 정책에 관한 연구는 주로 재고 정책에 따라 최적의 Lot 수량을 결정하는 문제에 초점을 두었다. Liu, J.J.(1996), H.Teunter and Ruud(2003)은 단일제품 생산 조건에서 단위시간당 평균 이익을 최대화하는 최적의 Rework Lot 수량 결정 방법을 제시하였다.

Hayek and P. A.(2001)는 공정재고 비용을 최소화하는 Rework 제품 진행방안을 제시하였다. 하지만 Rework 제품의 발생 비용은 항상 일정하다고 가정하였다.

그밖의 연구로, Abdel-Malek and Asadathorn(1996)은 Rework 작업을 경제적으로 수행하기 위한 설비 및 공정 선택 방법을 제시하였다.

지금까지 Rework에 관한 연구는 재고 정책과 경제적 실익에 따른 Rework 작업 Lot 크기 결정 문제가 대부분이었다. 여러 제품이 동시에 생산되고, 생산 계획이 계속해서 변경되며, Rework 제품이 무작위로 발생하는 현실을 감안한 Rework 제품 투입 정책에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구들처럼 Rework의 재고 정책과 Lot 크기 결정의 문제가 아닌 Rework 작업의 투입 방법에 따른 이익을 최대화하는 Rework 제품 투입 정책을 제안한다. 또한 시간 자원을 효율적으로 활용하여 Rework 작업으로 인해 주문 작업의 납기가 훼손되지 않는 범위에서의 Rework 제품 투입 계획을 제안한다.

## 2. MBT 공정의 Rework 투입 알고리즘

### 2.1 연구 문제의 정의 및 분석

본 연구는 반도체 공정에서 가장 많은 Rework 제품이 발생하는 MBT 공정을 대상으로 한다. MBT 공정에 투입되는 제품들은 MBT 공정 투입 전에 납기에 따른 생산 일정이 계획되어 있다. 계획된 생산 일정은 전체 설비의 능력을 계산하여 각 주문의 납기를 정확히 지키도록 계획되어 있다. 하지만 Rework 투입을 위하여 계획된 생산 일정을 조정하면 계획 변경 비용이 추가로 발생하고, 생산 일정 변경에 따른 납기 훼손이 발생할 수 있다. 납기 훼손에 따른 비용은 정량적이긴 하지만 이러한 비용은 산출하기 어려우며, 납기 훼손 발생 시에는 고객 불만으로 인해 주문이 취소될 수도 있다. 따라서 Rework 투입이 기존의 생산 일정을 훼손시키지 않게 설비의 여유시간에 Rework을 투입해야만 한다.

MBT 공정의 작업은 Lot 단위로 진행된다. 본 연구에서는 MBT 공정에서의 개별 Batch 작업의 개수를 Lot 개수로, Batch를 구성하는 개별 Unit의 수량을 Lot 수량으로 정의한다. MBT 공정의 최대 Lot 크기는 MBT Chamber에 투입할 수 있는 Board 개수와 하나의 Board에 삽입될 수 있는 제품 수의 곱이다. 최소 Lot 크기의 제한은 없으나, 최대 Lot 크기의 80~90% 이하의 Lot은 설비 효율성 저하로 진행하지 않는다.

MBT와 DC Test 공정의 설비는 동종 병렬기계로 구성되고 MBT 공정에서는 제품마다 서로 다른 MBT Board를 사용한다. 또한 DC Test 공정도 제품마다 다른 Test Contact Base와 Socket을 사용한다. 따라서 MBT와 DC Test 공정의 작업 준비시간은 앞서 진행된 제품에 따라서 달라진다.

MBT 공정의 작업시간은 Lot 수량에 관계없이 제품이 동일하면 동일한 작업시간을 가진다. Rework 작업의 Lot은 일반 Lot에서 발생한 Rework 제품을 합하여 하나의 Lot으로 구성하여 진행한다. 하지만 Rework Lot을 일반 Lot과 합하여 진행할 수는 없다. 일반 Lot에 Rework Lot을 합하면 MBT 공정 이후의 Lot 추적이 불가능하기 때문이다.

Rework 작업을 진행하기 위해서는 최소 투입량 이상으로 모으는 데 필요한 대기시간이 소요된다. 또한 작업을 용이하게 진행하기 위해 모여진 제품을 작업자가 Tray에 정리하는 시간이 필요하다. 따라서 MBT 공정에서 Rework 작업의 총 소요시간은 DC Test 공정과 MBT 공정의 작업시간의 합에 Rework Lot 구성시간, 투입 제품의 정리시간, MBT 공정에서 DC Test 공정으로의 이동시간을 합한 시간이다.

MBT 공정의 수율은 MBT 공정 투입 수량 대비 검사 진행 후에 양품으로 판정된 수량의 비율로 산출된다. MBT 공정의 Rework 제품은 한번 검사가 진행된 제품이므로 정상 제품에 비해 수율이 낮다.

MBT 공정에서 Rework 작업은 1회에 한해서 진행되고 1회 Rework 진행 후에 다시 발생한 설비 오류로 인한 불량품은 수율이 낮고 Lot 구성을 위해 많은 시간이 소요되므로 폐기된다.

DC Test 공정의 작업시간은 30분/1Lot 내외로 MBT 공정의 Burn-in Test 시간인 3HR~72HR/1Lot에 비해 짧다. 또한 제품별로 작업시간의 차이가 거의 없고, MBT 설비에 비해 여유시간이 많아서 Rework 작업 진행 시에 설비 선택의 제한을 거의 받지 않는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 현실적 사항을 고려하여 Rework 작업시간 중 DC Test 공정의 작업시간을 MBT 공정의 작업준비 시간에 포함하여 고려하였다. 또한 DC Test 공정의 작업시간은 제품에 따라 다르지 않다고 가정한다.

위의 MBT 공정의 문제를 요약하면 아래와 같다.

1. MBT 공정의 Rework 투입이 기존의 생산 일정을 훼손시키지 않아야 한다.
2. MBT 공정의 작업은 Lot 단위로 진행된다.
3. Rework 투입을 위한 Lot은 최대량과 최소량을 가진다.
4. MBT 공정의 작업준비시간은 순서 의존적이다.
5. Rework 작업은 1회로 제한된다.
6. Rework 제품은 정상 제품에 비해 수율이 낮다.
8. 동일 제품의 작업시간은 Lot 수량에 관계없이 동일하다.
9. Rework 작업은 여러 일반 Lot의 Rework 제품을 합하여 하나의 Lot으로 구성하여 진행한다.
10. Rework Lot과 일반 Lot을 합하여 작업을 진행할 수는 없다.
11. Rework 작업시간은 DC Test 공정과 MBT 공정의 작업시간과 Rework Lot 구성시간, 투입 제품 정리시간, MBT 공정에서 DC Test 공정으로의 이동시간의 합이다.
12. DC Test 공정의 작업시간은 MBT 공정의 작업준비 시간에 포함하여 고려한다.

본 연구는 Rework 투입에 따른 납기 훼손 없이 생산 일정의 여유시간을 이용하여, Rework 작업의 경제적 이득인 원가 절감 이득에서 경제적 손실인 Rework 비용과 공정 재고 비용을 뺀 이익을 최대화하는 투입 정책을 제안한다.

목적함수 :

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize Rework 작업으로 인한 총 이익} \\
 = & \text{Maximize } \sum(\text{제조 원가 절감 이득} - (\text{Rework 대기 제품의 재고 비용} + \text{Rework 비용}))
 \end{aligned}$$

### 2.2 알고리즘의 절차

본 연구의 목적은 납기 훼손 없이 여유시간을 이용한 Rework 투입에 따른 이익을 최대화하는 것이다.

납기 훼손을 하지 않기 위해서 본 연구에서는 주어진 생산 일정에서 작업을 진행하면서 작업이 완료된 설비를 기준으로 여유시간을 계산한다. 여유시간이 존재하면 투입 우선순위 알고리즘을 통하여 본 연구의 목적인 이익을 최대화하는 Rework 제품을 선택하고 투입한다.

Rework 작업으로 투입할 제품과 투입수량을 결정하기 위해

서 먼저 여유시간이 존재하는 설비에서 생산 일정상의 다음 작업까지의 정확한 여유시간을 구한다. 여유시간의 크기가 결정되면 제품별로 여유시간 동안 작업 가능한 Rework 수량이 있는지를 판단한다. 여유시간 동안 작업 가능한 Rework 제품이 있으면 제품별로 작업 준비시간과 작업시간을 고려하여 여유시간에 투입될 수 있는 최대 Lot 개수를 구한다. 최대 Lot 개수가 결정되면 MBT Chamber에 투입될 수 있는 Lot의 최대수량과 최소수량을 고려하여 투입 Lot별 수량을 결정한다.



그림 2. Lot 개수에 따른 실제 투입 수량.

투입 Lot별 수량을 결정하는 것은 <그림 2>와 같이 정확한 투입 수량을 계산하기 위한 것이다. <그림 2>에서는 두 번째 투입 Lot 수량이 MBT 공정의 최소 투입량일 때와 최대 투입량일 때 전체 투입되는 수량의 차이를 비교한 것이다. 최소 수량 이상 최대 수량 이하로 Lot이 구성되면 여유시간 동안 계산된 Lot 개수는 동일하지만 투입되는 수량은 차이가 있다. 따라서 이러한 차이를 정확히 계산하여 투입 정책에 반영하여야 한다.

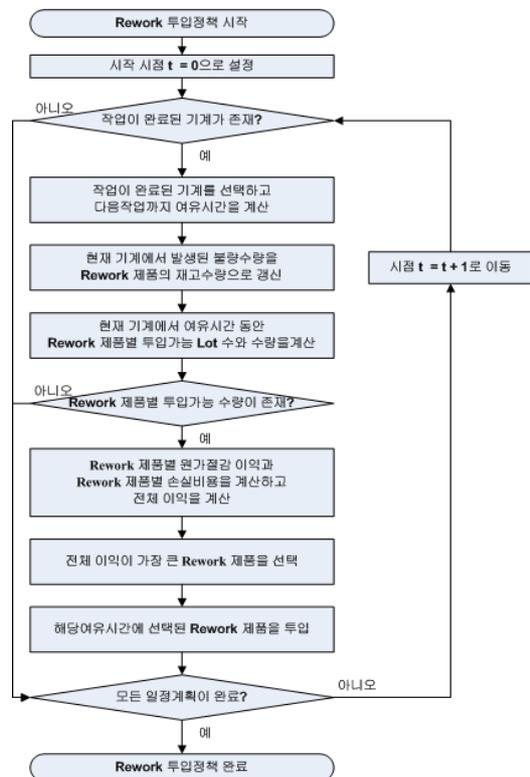


그림 3. Rework 투입 알고리즘 절차.

제품별로 투입할 수 있는 Lot 개수와 수량이 결정되면, 투입되었을 때의 예상되는 이득과 손실을 계산한다. Rework 작업으로 인한 이득은 FAB 공정에서 조립 공정까지의 원가 절감 이득이다. 또한 경제적 손실은 Rework 대기 제품의 공정 재고 비용과 Rework 비용이다. Rework 진행 시에 계산된 이득과 손실의 합인 이익을 기준으로 Rework 작업으로 투입할 제품을 선택한다. 이익이 최대인 제품을 해당 여유시간의 Rework 작업으로 할당하고 투입 계획을 완료한다. 선택된 여유시간에서의 투입 계획이 완료되면 작업을 진행하고 작업 시점을 이동하면서 작업이 완료된 설비를 찾는다.

이상의 절차대로 생산 일정을 수행하면서 발생된 여유시간 동안 투입을 결정하고 생산 일정의 완료 시점까지 진행한다. <그림 3>은 앞서 언급한 Rework 투입 정책에 대한 절차를 보여준다. <그림 3>에서 보듯이 Rework 투입 정책은 생산 일정이 주어지면 생산을 시작하는 시점을 진행 시점  $t$ 로 설정하고 진행한다. 진행 시점을 이동하면서 투입 가능 여부를 위치 조건하여 투입하다가 주어진 생산 일정이 완료되면 Rework 투입 정책은 종료된다.

2.3 기호의 정의

- $n$  : MBT 공정의 설비 번호
- $m$  : MBT 공정의 제품 번호
- $r_{j(n)}$  : 설비  $n$ 에서  $j$ 번째 작업의 투입 가능시간
- $s_{j(n)}$  : 설비  $n$ 에서  $j$ 번째 작업의 작업 준비시간
- $p_{(m)}$  : 제품  $m$ 의 Batch당 MBT 공정 작업시간
- $R(t, n)$  : 설비  $n$ 의 시점  $t$ 에서 여유시간
- $A_{R(t, n)}$  :  $R(t, n)$  동안 Rework 작업할 수 있는 제품의 수
- $O_{m, R(t, n)}$  :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 으로 MBT 진행할 때 투입 가능한 최대 Lot 개수
- $i_{m, R(t, n)}$  :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 으로 MBT 진행할 때  $i$ 번째 Lot 수량
- $O_{m, R(t, n)}$  :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 으로 MBT 진행할 때 실제 투입 가능 Lot 개수
- $s_{nlm}$  : 설비  $n$ 에서 일반 작업 제품  $l$  진행 후에 제품  $m$ 을 진행하기 위한 작업 준비시간
- $M(m)$  : Rework 작업으로 생기는 제품  $m$ 의 개별 Unit당 원가 절감 이득
- $M(m)_{R(t, n)}$  :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 의 Rework 작업으로 생기는 원가 절감 이득
- $W(m)$  : Rework 작업으로 생기는 제품  $m$ 의 Batch(Lot)당 Rework 비용
- $W(m)_{R(t, n)}$  :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 의 Rework 작업으로 생기는 Rework 비용
- $Y(m)$  : 제품  $m$ 의 Rework 작업 예상 수율
- $H(n, m)$  : 설비  $n$ 에서 제품  $m$ 을 MBT 진행할 때 MBT

Chamber에 투입 가능한 최대 수량

$L(n, m)$ : 설비  $n$ 에서 제품  $m$ 을 MBT 진행할 때 MBT

Chamber에 투입 가능한 최소 수량

$h(m)$  : 제품  $m$ 의 Unit당 단위 시간당 재고 비용

$h(m)_{R(t, n)}$ :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 의 재고 비용

$H(m)_{R(t, n)}$ :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 의 Rework 작업으로 생기는 대기 제품의 재고 비용의 합

$I(m)_{R(t, n)}$ :  $R(t, n)$  동안 Rework 작업 진행할 제품  $m$ 의 투입 순위 Index

$Q(t, m)$  :  $t$  시점에서 제품  $m$ 의 Rework 재고량

$Q(t, m)_{R(t, n)}$ :  $R(t, n)$  동안 제품  $m$ 을 Rework할 경우 나머지 Rework 재고량

$T$  : 일정 계획 완료 시점

2.4 Rework 투입량 계산 알고리즘

Rework 투입량 계산 알고리즘은 주어진 여유시간에서 제품별로 Rework을 투입할 수 있는 Lot 개수와 Lot 수량을 결정하는 것이다.

작업이 종료된 설비  $n$ 의 여유시간은 주어진 생산 일정에서 현재 설비에 계획된 다음 작업의 시작시간과 현재 작업의 종료시간의 차이 및 다음 작업의 작업 준비시간의 합으로 구한다. 다음 작업의 작업 준비시간을 포함하는 것은 작업 준비시간이 순서 의존적이므로 다음 작업의 준비시간이 Rework 작업 진행 후에 변경되기 때문이다. 따라서 다음 작업의 준비시간을 먼저 여유시간에 포함시켜 계산하고 Rework 작업 투입 시에 변경된 준비시간으로 바꾸어 준다. 이러한 방법은 정확한 여유시간을 판단하여 제품별 정확한 Rework 투입량을 결정하는데 도움을 준다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R(t, n) = r_{j+1(n)} - t + s_{j+1(n)} \tag{1}$$

$$R(t, n) \geq (s_{nlm} + p_{(m)} + s_{nmk}) \tag{2}$$

식 (1)은 여유시간의 크기를 계산하는 것이다. 식 (1)에 따라 여유시간의 크기가 정해지면, 식 (2)는 Rework 제품별로 작업 준비시간과 작업시간 및 Rework 작업 후의 계획된 작업의 작업 준비시간을 고려하여 여유시간에 투입 가능 여부를 판단한다.

식 (2)에서  $R(t, n) \geq (s_{nlm} + p_{(m)} + s_{nmk})$ 이면 제품  $m$ 은 Rework 가능한 제품으로 선택된다. 식 (2)의 조건에 해당하는 Rework 제품이 없으면 설비  $n$ 은 해당 여유시간 동안 진행할 수 있는 제품이 없으므로 생산 일정의 다음 작업을 진행한다.

$$O_{m, R(t, n)} = 1 + \left\lfloor \frac{(R(t, n) - (s_{nlm} + p_{(m)} + s_{nmk}))}{p_{(m)}} \right\rfloor \tag{3}$$

투입 가능한 제품들이 선택되면 선택된 제품별로 작업 준비시간과 작업시간을 고려하여 식 (3)과 같이 Rework 작업이 가능한 최대 Lot 개수를 구한다. Rework 작업으로 투입되는 Lot 개수

는 한정된 여유시간에 작업 준비시간을 최소화하기 위하여 투입 가능한 최대 Lot 개수로 구성한다. 또한 Rework 투입은 최대 Lot 개수까지 연속적으로 투입한다.

투입할 제품과 투입 가능한 최대 Lot 개수가 결정되면 실제로 투입 할 수 있는 제품별 Lot 개수와 제품 수량을 계산한다. 실제 투입 Lot 개수는 제품별 재고 수량을 고려하여 최대 Lot 개수까지 구성된다. 만일 Rework 제품의 재고가 충분하지 않으면 실제 투입 Lot 개수는 최대로 투입 가능한 Lot 개수보다 작게 된다.

Rework 작업의 실제 투입 Lot 개수와 수량을 결정하는 문제는 크게 두 가지 경우로 나누어진다. 첫 번째는 최대 투입 가능 Lot 수량으로 현재 Rework 재고량을 나눈 값이 1 이상인 경우이다. 또한 두 번째는 1보다 작은 경우이다.

첫 번째 경우에는 최소한 1 Lot 이상이 최대 투입 가능량으로 구성된다. 이 경우에는 투입 가능한 모든 Lot을 최대 투입 가능량으로 투입하는 경우와 일부는 최대 투입 가능량으로 투입하고 나머지 하나의 Lot는 최소 투입 가능량 이상으로 투입하는 경우가 있다.

두 번째 경우에는 최대 투입 가능량으로 투입할 수 있는 Lot이 없다. 하지만 최소 투입 가능량으로 현재 Rework 재고량을 나눈 값이 1 이상이면 투입 Lot이 구성될 수 있으므로 첫 번째 경우에서 투입 Lot이 결정되지 않은 제품은 두 번째 경우로 실제 투입 수량을 구할 수 있다.

첫 번째와 같이 Rework 제품의 재고가 충분한 경우는 식 (4)와 식 (5)에 따라서 실제 투입 Lot 개수와 각 Lot의 개별 수량이 정해진다.

$$i_{m, R(t, n)} = H(n, m) \quad (4)$$

s.t.

$$i \leq \frac{Q(t, m)}{H(n, m)}$$

$$1 \leq i \leq o_{m, R(t, n)}$$

$$i_{m, R(t, n)} = Q(t, m) - (i-1) \times H(n, m) \quad (5)$$

s.t.

$$\frac{Q(t, m)}{H(n, m)} < i \leq \frac{Q(t, m)}{H(n, m)} + 1$$

$$Q(t, m) - (i-1) \times H(n, m) \geq L(n, m)$$

$$1 \leq i \leq o_{m, R(t, n)}$$

$$O_{m, R(t, n)} = \text{Max}(i)$$

$$\text{Total Rework Quantity} = \sum_{i=1}^{O_{m, R(t, n)}} i_{m, R(t, n)} \quad (6)$$

먼저 식 (4)에서 Rework 제품의 재고 수량이 충분하면 최대 투입 가능량으로 구성할 수 있는 실제 투입 Lot을 만든다. 실제 투입 Lot을 만들 때 투입 가능한 최대 Lot 개수인  $o_{m, R(t, n)}$ 까지 Lot index  $i$ 를 증가시키면서 만든다. 투입 가능한 최대 Lot

개수까지 실제 투입 Lot이 구성되면 계산은 완료된다.

하지만 투입 가능한 최대 Lot 개수보다 실제 투입 Lot 개수는 작을 수 있다. 만일 식 (4)에서 실제 투입 Lot 개수가 최대 투입 가능 Lot 개수보다 작으면, 식 (5)를 통하여 실제 투입 가능 Lot을 추가할 수 있다. 식 (5)는 식 (4)를 통하여 남은 수량에서 최소 투입 가능량으로 나누었을 때 1 이상이면 추가 Lot Index  $i$ 를 생성한다. 그렇지 않으면 식 (4)에서 구한 Lot Index를 사용한다. 식 (4)와 식 (5)를 통하여 구성된 실제 투입 Lot 개수와 투입 수량은 식 (6)에서 얻을 수 있다.

두 번째 경우에서처럼 최대 투입 가능량으로 투입할 수 있는 Lot이 존재하지 않고 최소 투입 가능량 이상으로 Lot을 구성할 수 있을 때는 식 (7)과 같이 투입량을 나타낼 수 있다. 이때 실제 투입 Lot 개수는 1이 되고 투입 수량은 재고 수량이 된다.

$$i_{m, R(t, n)} = Q(t, m) \quad (7)$$

s.t.

$$L(n, m) \leq Q(t, m) < H(n, m)$$

$$1 \leq i \leq o_{m, R(t, n)}$$

$$O_{m, R(t, n)} = 1$$

$$\text{Total Rework Quantity} = Q(t, m) \quad (8)$$

위에서 언급한 식들을 통하여 Rework 투입량 계산 알고리즘은 두 가지 경우에 대하여 Rework 투입 가능 Lot 개수에서 실제 투입 Lot 개수와 수량을 계산하였다. 이렇게 구한 실제 투입 Lot 개수와 수량은 우선순위 알고리즘에서 정확한 이득과 손실 비용 계산에 사용된다.

## 2.5 우선순위 계산 알고리즘

우선순위 계산 알고리즘은 여유시간 동안 투입될 Rework 제품을 결정하기 위한 것이다. 우선순위 계산 알고리즘은 여유시간 동안 Rework을 진행할 때 예상되는 제품별 제조원가 절감 이득, Rework 비용, 대기 제품의 재고 비용을 고려한 이익이 최대인 제품을 해당 여유시간에 투입하게 한다. 여유시간에 진행되는 Rework 작업의 이익은 식 (9)에서 구한다.

$$I(m)_{R(t, n)} = M(m)_{R(t, n)} - (H(m)_{R(t, n)} + W(m)_{R(t, n)}) \quad (9)$$

$$m = 1, 2, \dots, A_{R(t, n)}$$

식 (9)에서 첫째항은 제조원가 절감 이득을 나타내고 두 번째 항과 세 번째 항은 Rework 대기 제품의 재고 비용과 Rework 비용을 나타낸다. 이익은 제조원가 절감 이득에서 Rework 진행 시에 소요되는 재고 비용과 Rework 비용을 뺀 값이다.

식 (9)의 우선순위 계산 알고리즘에서 제품별 예상 제조원가 절감 이득은 식 (10)에서 보듯이 Rework 수량과 대당 제조원가 절감 이득과 Rework Lot의 예상 수율의 곱으로 구한다.

제조원가 절감 이득

$$M(m)_{R(t,n)} = \sum_{i=1}^{O_{m,R(t,n)}} i_{m,R(t,n)} \times M(m) \times Y(m) \quad (10)$$

$$m = 1, 2, \dots, A_{R(t,n)}$$

Rework 대기 제품의 재고 비용은 식 (11)에서 보듯이 여유시간 동안 Rework를 진행했다고 가정했을 때에 남은 수량과 단위 시간당 개당 재고 비용과 해당 여유시간의 곱으로 구한다.

Rework 대기 제품의 재고 비용

$$H(m)_{R(t,n)} = \sum_{m=1}^{A_{R(t,n)}} h(m)_{R(t,n)} \quad (11)$$

$$m = 1, 2, \dots, A_{R(t,n)}$$

$$h(m)_{R(t,n)} = Q(m)_{R(t,n)} \times h(m) \times R(t,n)$$

$$Q(m)_{R(t,n)} = Q(t,m) - \sum_{i=1}^{O_{m,R(t,n)}} i_{m,R(t,n)}$$

Rework 비용은 식 (12)에서 보듯이 여유시간 동안의 Rework 작업으로 투입할 수 있는 실제 투입 가능 Lot 개수와 Lot별 Rework비용의 곱으로 구한다.

Rework 비용

$$W(m)_{R(t,n)} = O_{m,R(t,n)} \times W(m) \quad (12)$$

$$m = 1, 2, \dots, A_{R(t,n)}$$

우선순위 계산 알고리즘에서 Rework 작업에 따른 예상 제조원가 절감 이득, 대기 제품의 재고 비용, Rework 비용을 계산하면, 각 제품별 Rework 진행 시의 이익이 계산된다. 계산된 제품별 이익 중에서 가장 큰 이익을 가지는 제품이 Rework 제품으로 선택된다. 여유시간 동안 하나의 Rework 제품이 모두 작업되고 남은 시간은 새로운 여유시간으로 할당한다. 선택된 여유시간의 Rework 투입 계획이 완료되면, 다음 여유시간의 투입 계획을 수립한다.

### 3. 수행도 평가

#### 3.1 대안 비교 알고리즘

본 연구에서는 여유시간을 판단하고, Rework 투입에 따른 이득과 손실 비용을 계산하여 Rework 제품을 투입하는 정책을 제안하였다. 또한 제품의 작업시간과 작업 준비시간까지 고려하였다. 본 알고리즘의 효과를 검증하기 위하여 현재 MBT 공정에서 진행중인 투입 방법으로 대안 알고리즘을 설정하여 비교한다. 대안 알고리즘은 여유시간에 제조원가가 높은 제품과 재고 수준이 높은 제품을 우선적으로 투입하는 정책이다.

주문 작업의 일정 계획은 FAB 공정에서 미리 수립되어져 있

다. 따라서 확정된 일정 계획하에서 대안 알고리즘과 비교한다. 여유시간 및 Rework 발생량은 동일하고 투입 우선순위 결정은 각각의 투입 정책에 따라 다른 알고리즘을 가진다.

본 연구에서의 알고리즘의 성능을 비교하는 척도는 Rework을 통한 제조원가 절감 이득에서 Rework비용과 재고 비용의 합을 뺀 이익의 총합으로 한다.

Rework 작업으로 인한 총 이익

$$= \sum_{t=1}^T (M(m)_{R(t,n)} - H(m)_{R(t,n)} - W(m)_{R(t,n)})$$

#### 3.2 실험의 설계

본 연구의 실험은 10개의 일정 계획하에서 동일한 조건을 가지고 모의 실험을 하였다. 실험에 사용된 제품 수는 3개, 설비 수는 2개이다. 결정 모수들은 제품별 제조원가, Rework 비용, 재고 비용이다. Rework Lot의 수율과 발생률은 제품과 Lot에 따라 크게 차이가 발생하지 않으므로 고정변수로 놓고 실험하였다. 실험에서 사용하는 Rework Lot의 수율과 발생률은 현재 공정의 실정을 반영하여 80%와 5%로 하였다.

본 실험에서 제시한 알고리즘의 효과를 검증하기 위해서 결정모수들을 변화시키면서 대안 알고리즘과 비교하였다. 또한 스케줄에 따라 Rework 제품 투입 정책의 성능이 변하는지 확인하기 위해 투입 제품의 순서를 바꾸어가면서 반복 시험을 진행하였다. 알고리즘의 성능 비교는 동일한 일정 계획하에서 결정모수들을 변화시키면서 나온 결과값의 평균값을 사용하였다.

표 1. 실험1 실험 환경에 따른 결정모수 데이터

실험 환경	결정모수 데이터
동일 Cost	제조원가 8/unit 재고 비용 $3.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 500/Lot
제조원가 변경	제조원가 5, 8, 10/unit 재고 비용 $3.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 500/Lot
재고 비용 변경	제조원가 8/unit 재고 비용 $1.0 \times 10^{-5}$ , $3.0 \times 10^{-5}$ , $5.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 500/Lot
Rework 비용 변경	제조원가 8/unit 재고 비용 $3.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 300, 500, 800/Lot
제조원가+재고 비용 변경	제조원가 5, 8, 10/unit 재고 비용 $1.0 \times 10^{-5}$ , $3.0 \times 10^{-5}$ , $5.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 500/Lot
제조원가+Rework 비용 변경	제조원가 5, 8, 10/unit 재고 비용 $3.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 300, 500, 800/Lot

표 2. 실험2 실험 환경에 따른 결정모수 데이터

실험 환경	결정모수 데이터
제조원가 차이 변경	제조원가 '8,9,10' '8,10,12' '8,11,14' '8,12,16' '8,13,18' /unit (투입 제품 간의 원가 차이 +1씩 증가) 재고 비용 $3.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework 비용 500/Lot
재고 비용 차이 변경	제조원가 8/unit 재고 비용 ' $3.0 \times 10^{-5}$ , $3.5 \times 10^{-5}$ , $4.0 \times 10^{-5}$ ' ' $3.0 \times 10^{-5}$ , $4.0 \times 10^{-5}$ , $5.0 \times 10^{-5}$ ' ' $3.0 \times 10^{-5}$ , $4.5 \times 10^{-5}$ , $6.0 \times 10^{-5}$ ' ' $3.0 \times 10^{-5}$ , $5.0 \times 10^{-5}$ , $7.0 \times 10^{-5}$ ' ' $3.0 \times 10^{-5}$ , $5.5 \times 10^{-5}$ , $8.0 \times 10^{-5}$ ' /unit/단위시간 (투입 제품 의 비용 차이 + $5.0 \times 10^{-6}$ 씩 증가) Rework 비용 500/Lot
Rework 비용 차이 변경	제조원가 8/unit 재고 비용 $3.0 \times 10^{-5}$ /unit/단위시간 Rework비용 '500,800,1100' '500,1000,1500' '500,1200,1900' '500,1400,2300' '500,1600,2700' /Lot (투입 제품 간의 비용 차이 +200씩 증가)

실험은 크게 2가지로 나누어 진행하였다. 첫 번째 실험은 결정모수의 변경에 따른 Rework 제품 투입 정책들 간의 성능 비교를 위해 진행되었다. 또한 두 번째 실험은 투입되는 제품의 결정모수의 증가에 따른 투입 정책들의 성능 추세를 확인하기 위해 진행하였다.

첫 번째 실험에서는 변경되는 결정모수 외에 다른 결정모수는 고정시키고 실험하였다. 또한 두 번째 실험에서는 하나의 결정모수를 증가시킬 때 나머지 두 개의 결정모수는 고정값으로 두고 실험하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 C++를 이용하여 구현하였고, 펜티엄 2.0GHz 컴퓨터에서 실험하였다.

3.3 실험결과 분석

<표 3>, <그림 4>에서 보듯이 실험1에서 본 연구의 이익/비용 고려 정책이 현재 MBT 공정의 작업 방법인 제조원가 우선 고려 정책 및 재고량 우선 고려 정책에 비해 최소 20% 이상 평균 이익 면에서 좋은 성능을 가지고 있다.

또한 본 연구의 이익/비용 고려 정책이 어떤 결정모수를 변경하느냐에 관계없이 모든 조건에서 우수한 성능을 가지고 있다.

제조원가 우선 정책과 재고량 우선 정책의 성능 비교는 결정모수의 변경에 따라 우열이 다르다. 제조원가 우선 정책은 제조원가가 동일한 환경보다 제조원가가 변경되는 환경에서 Rework 작업으로 인한 평균 이익이 증가한다.

표 3. 실험1 투입 정책에 따른 평균 이익

실험 환경	이익/비용 고려 정책	재고량 우선 정책	제조원가 우선 정책
동일 Cost	304,614	220,090	228,532
제조원가 변경	361,332	217,448	314,863
Rework 비용 변경	275,344	224,863	210,092
재고 비용 변경	289,590	218,081	217,880
원가+재고 비용 변경	347,011	220,475	315,398
원가+Rework 비용 변경	320,049	220,003	267,483

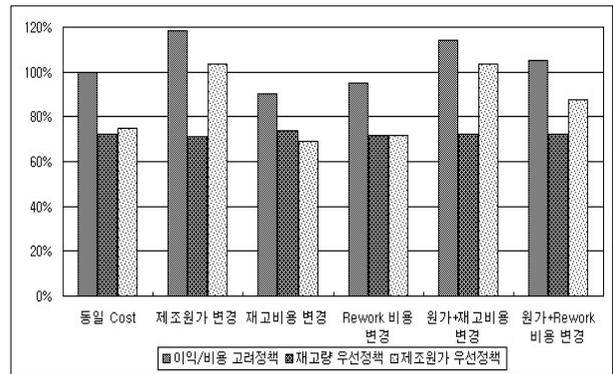


그림 4. 실험1 투입 정책에 따른 평균 이익 비교.

따라서 제조원가가 변경되는 환경에서는 제조원가 우선 정책이 재고량 우선 정책에 비해 우수한 성능을 보인다. 반면에 재고 비용이 변경되는 환경에서는 재고량 우선 정책이 제조원가 우선 정책에 비해 우수하다. 또한 제조원가 우선 정책에 따르면 제조원가와 Rework비용이 변경되는 환경보다 제조원가와 재고 비용이 변경되는 환경에서 Rework 작업으로 인한 이익 이 크다.

이는 제조원가 우선 정책을 따르면 높은 제조원가의 제품을 우선적으로 투입해서 제조원가 절감 이득에서는 유리하지만 상대적으로 작은 양으로 Rework 작업을 함으로써 Rework 작업의 횟수가 증가하기 때문이다. 또한 재고량 우선 정책에 따르면 제조원가 우선 정책에 비해 제조원가 절감 이득은 작지만 많은 양을 한 번에 작업함으로써 재고 비용이나 Rework 비용에서 유리하다.

제조원가와 재고 비용 및 Rework 비용을 함께 고려한 본 연구의 이익/비용 고려 정책은 모든 실험 조건에서 제조원가 우선 정책이나 재고량 우선 정책에 비해 높은 이익을 보인다.

결정모수의 증가에 따른 투입 정책들 사이의 성능 추세를 확인하기 위해 진행한 실험2는 결정모수 내의 변경 값에 따른 Rework 정책별 이익과 비용을 계산하였다. <표 4>, <표 5>, <표 6>과 <그림 5>, <그림 6>, <그림 7>는 결정모수의 증가에 따른 Rework 정책별 평균 이익을 나타낸 것이다.

표 4. 실험2 제조원가 변동에 따른 평균 이익

Scenario 1. 제조원가 변경	이익/비용 고려 정책	재고량 우선 정책	제조원가 우선 정책
+1 증가	314,788	246,980	294,500
+2 증가	364,920	288,541	342,037
+3 증가	432,298	320,064	387,923
+4 증가	485,361	356,781	427,791
+5 증가	549,870	391,263	479,308

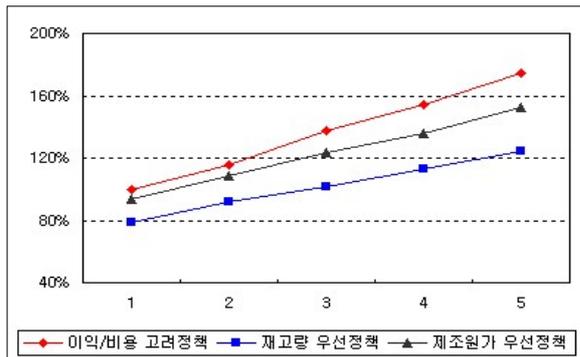


그림 5. Scenario1에서의 평균 이익 비교.

<표 4>, <그림 5>에서 보듯이 Scenario 1은 투입 제품의 제조원가가 증가에 따른 투입 정책별 평균 이익을 비교한 것이다. 제조원가의 변경은 제조원가가 절감 이득과 상관관계가 있다. 반면에 재고 비용이나 Rework비용에는 영향을 미치지 않는다. 제조원가가 커질수록 모든 투입 정책의 제조원가 절감 이득이 증가한다. 하지만 재고 비용이나 Rework비용은 제조원가의 변동에 관계없이 일정하다. 따라서 제조원가가 증가할수록 평균 이익은 증가한다. Scenario 1의 제조원가가 증가하는 조건에 관계없이 본 연구의 이익/비용 고려 정책이 제조원가 우선 정책이나 재고량 우선 정책보다 이익이 높다. 이는 이익/비용 고려 정책이 다른 정책에 비해 제조원가 절감 이득이 크기 때문이다. 제조원가 우선 정책은 개당 제조원가 절감 이득이 크지만 Rework 작업량을 고려하지 않기 때문에 이익/비용 고려 정책에 비해 1회당 Rework 작업하는 제품의 양이 작다. 또한 재고량 우선 정책은 1회당 Rework 진행 수량은 많지만 개당 제조원가를 고려하지 않았다. 따라서 재고량 우선 정책은 제조원가가 증가함에 따라 가장 작은 제조원가 절감 이득을 가진다. 반면 이익/비용 고려 정책은 개당 제조원가와 Rework 수량을 함께 고려하기 때문에 대안 정책보다 많은 제조원가 절감 이득을 가진다.

<표 5>, <그림 6>에서 보듯이 Scenario 2는 재고 비용의 증가에 따른 투입 정책별 평균 이익을 비교한 것이다. 재고 비용의 변경은 제조원가 절감 이득이나 Rework 비용과는 관계없고 재고량에 따른 재고 비용에 영향을 미친다. 따라서 재고 비용이 커질수록 투입 정책에 관계없이 평균 이익은 감소한다. Scenario 2의 재고 비용이 증가하는 조건에서 이익/비용 고려 정책이 대안 정책에 비해 평균 이익이 높다.

표 5. 실험2 재고 비용 변동에 따른 평균 이익

Scenario 2. 재고 비용 변경	이익/비용 고려 정책	재고량 우선 정책	제조원가 우선 정책
+0.5 × 10 <sup>-5</sup> 증가	287,420	202,455	197,754
+1.0 × 10 <sup>-5</sup> 증가	279,512	197,212	193,090
+1.5 × 10 <sup>-5</sup> 증가	270,641	191,330	186,502
+2.0 × 10 <sup>-5</sup> 증가	260,098	184,569	182,257
+2.5 × 10 <sup>-5</sup> 증가	252,649	181,005	178,369

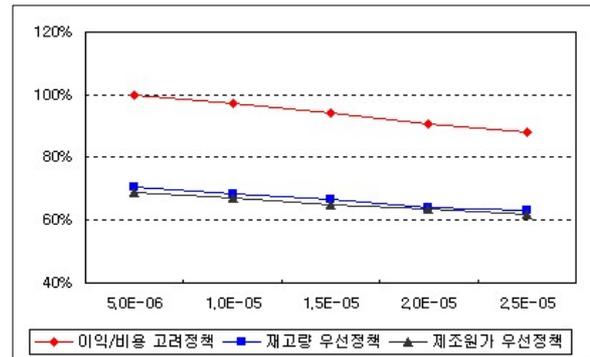


그림 6. Scenario2에서의 평균 이익 비교.

이는 이익/비용 고려 정책이 증가한 재고 비용과 투입될 제품의 제조원가가 절감 이득을 함께 고려하여 최대의 이익을 가지는 Rework 작업을 선택하여 진행하기 때문이다. 반면에 제조원가 우선 정책은 증가한 재고 비용을 고려하지 않고 제조원가가 높은 제품을 투입하기 때문에, 재고 비용이 증가할수록 평균 이익이 가장 작아진다. 또한 재고량 우선 정책은 재고 비용만을 고려하므로 늘어난 재고 비용 이상으로 제조원가 절감 이득이 큰 제품을 선택하지 않는다. 제조원가 우선 정책과 재고량 우선 정책을 비교하면 제조원가가 낮고 재고 비용이 상대적으로 큰 작업환경에서는 재고량 우선 정책이 제조원가 우선 정책에 비해 많은 이익을 가진다. 또한 제조원가가 재고 비용보다 상대적으로 큰 조건에서는 제조원가 우선 정책이 유리하다.

<표 6>, <그림 7>에서 보듯이 Scenario 3은 Rework비용 변경에 따른 투입 정책별 평균 이익을 비교한 것이다. Rework비용도 제조원가 절감 이득이나 재고 비용에는 관계없이 Rework 횟수에 따른 Rework비용에만 영향을 미친다. 따라서 Rework비용이 증가할수록 모든 투입 정책에서 평균 이익은 감소한다. Scenario 3의 Rework비용이 증가하는 조건에서도 이익/비용 고려 정책이 대안 정책보다 평균 이익이 높다. 이는 이익/비용 고려 정책이 제조원가 절감 이득 및 재고 비용과 함께 Rework비용도 고려하기 때문이다. 반면에 제조원가 우선 정책이나 재고량 우선 정책은 늘어난 Rework비용을 고려하지 않는다. 따라서 Rework비용이 증가할수록 이익/비용 고려 정책과 대안 정책 간의 평균 이익의 차이가 크다.

결정모수를 변경한 모든 작업 조건에서 이익/비용 고려 정책이 제조원가 우선 정책이나 재고량 우선 정책에 비해 평균 이

익이 항상 높다. 이는 이익/비용 고려 정책이 Rework 작업으로 발생하는 이익과 비용을 함께 고려하기 때문이다. 반면에 제조원가 우선 정책은 이익을 발생시키는 Rework 작업 수량을 포함하지 않았고, 비용을 고려하지 않았다. 또한 재고량 우선 정책은 Rework 비용을 포함하지 않았고, 이익을 고려하지 않았다.

표 6. 실험2 Rework 비용 변동에 따른 평균 이익

Scenario 3. Rework비용 변경	이익/비용 고려 정책	재고량 우선 정책	제조원가 우선 정책
+300 증가	280,944	221,753	211,450
+500 증가	279,471	216,008	208,862
+700 증가	278,633	214,422	205,977
+900 증가	277,486	211,470	202,866
+1100 증가	274,077	209,961	200,137

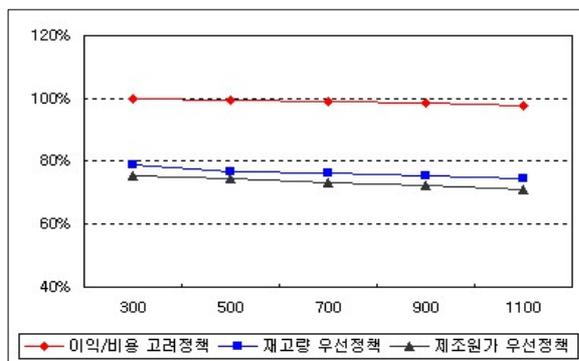


그림 7. Scenario3에서의 평균 이익 비교.

본 연구의 Rework 제품 투입 정책은 현재 MBT 공정에서 적용되는 대안 정책에 비해 어떠한 조건에서도 우수한 성능을 보였다. 또한 작업시간 사이의 정확한 여유시간을 고려하였기 때문에 설비효율을 높일 수 있는 이점이 있다. 따라서 본 연구의 알고리즘은 현재 MBT 공정의 경험적 투입 정책을 효율적으로 대체하여 적용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론 및 추후연구

본 연구는 MBT 공정의 엔지니어링 경험을 바탕으로 Rework 투입 정책을 제안하였다. Rework 제품의 발생률이 타 공정에 비해

현저히 높은 MBT 공정에 본 연구의 정책을 적용하면 Rework 작업을 보다 효율화할 수 있으리라 생각된다. 또한 여유시간을 최대한 활용하기 때문에 작업시간이 길어서 생산능력이 한정되어 있는 MBT 공정에 유용할 것이다.

MBT 공정에서는 작업의 납기 지연이 많이 발생한다. Rework 작업이 긴급 생산 주문 작업으로 대체되면 수량 부족으로 발생하는 납기 지연 주문을 최소화할 수 있다. 따라서 Rework을 고려한 일정 계획 수립에 관한 추가 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

- Abdel-Malek, L., Asadathorn, N. (1996), An analytical approach to process planning with rework option, *International journal of production economics*, 46(47)(COM), 511-520.
- Chiu, Y. P. (2003), Determining the Optimal Lot Size for the Finite Production Model with Random Defective Rate, the Rework Process, and Backlogging, *Engineering optimization*, 35(4), 427-438.
- Flapper, S.D.P., Fransoo, J. C., Broekmeulen, R. A. C. M., Inderfurth, K. (2002), Planning and control of reworking in the process industries : a review, *Production planning & control*, 13(1), 26-34.
- Flapper, S.D.P., Teunter, R.H. (2004), Logistics planning of rework with deteriorating work-in-process, *International journal of production economics*, 88(1), 51-59.
- Giri, B.C., Moon, I., Yun, W.Y. (2003), Scheduling economic lot sizes in deteriorating production systems, *Naval research logistics*, 50(6), 650-661.
- Gopalan, M.N., Kannan, S. (1994), Multi-type Rework in Two-stage Production Systems, *The International journal of quality & reliability management*, 11(6), 38-49.
- Gopalan, M.N., Kannan, S. (1996), Probability of first passage analysis of a two-stage transfer-line production system with storage and rework, *Microelectronics and reliability*, 36(3), 403-407.
- H.Teunter, Ruud, Flapper, Simme Douwe P. (2003), Lot-sizing for a single-stage single-product production system with rework of perishable production defectives, *OR Spektrum : Organ der Deutschen Gesellschaft für Operations Research*, 25(1), 85-96.
- Hayek, P. A., Salameh, M. K. (2001), Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced, *Production planning & control*, 12(6), 584-590.
- Jamal, A.M.M., Sarker, B.R., Mondal, S. (2004), Optimal manufacturing batch size with rework process at a single-stage production system, *Computers & industrial engineering*, 47(1)77-89.
- Liu, J.J., Ping, Y. (1996), Optimal lot-sizing in an imperfect production system with homogeneous reworkable jobs, *European journal of operational research*, 91(3), 517-527.

**이도훈**

한양대학교 공업화학과 학사

현재 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사과정

관심분야: 생산 및 물류관리, 시스템 최적화

**김성식**

고려대학교 기계공학과 학사

고려대학교 산업공학과 석사

Southern Methodist University 산업공학과 석사

Southern Methodist University 산업공학과 박사

현재 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수

관심분야: 생산 및 재고관리 시스템, CIM/  
ERP/SCM, APC

**고효현**

명지대학교 산업공학과 학사

고려대학교 산업공학과 석사

현재 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정

관심분야: 생산관리, ERP, e-Business, APC