

A Case Study of Simulation-based Feasibility Analysis of Replacement of Inspection Equipment for Switchboards

Young Jin Han* · Do Yoon Yi** · Jun Pyo Hong* · Sung Ho Joo* · Gi Min Kim* · Jaehun Park***†

*Department of Industrial Management Engineering, Ulsan College

**School of Industrial Engineering, University of Ulsan

***Department of Business Administration, Changwon National University

시뮬레이션 기반 배전반 검사장비 교체의 타당성 분석에 관한 사례연구

한영진* · 이도윤** · 홍준표* · 주성호* · 김기민* · 박재훈***†

*울산과학기술대학교 산업경영공학과

**울산대학교 산업경영공학부

***창원대학교 경영학과

This study deals with replacement analysis of deteriorated equipment for improving productivity of production system. Frequent breakdown of the deteriorated equipment causes a situation that reduces productivity such as low product quality, process delay, and repair cost. However, the replacement of new equipment will be required a high initial investment cost, so it is important to analysis the economic feasibility. Therefore, we analyze the effect of the production system due to the aging effect of the equipment and the feasibility of equipment replacement based on the economic analysis. The process flow, working time, logistics movement, etc. are analyzed in order to build the simulation modeling for a ship and land switchboard production system. Using numerical examples, the economic feasibility analysis of equipment replacement through replacement of existing deteriorated equipment and additional arrangement of new facilities is performed.

Keywords : SwitchBoard, Plant Simulation, Feasibility Analysis

1. 서 론

일반적으로 생산 장비의 노후화로 인한 유지보수비용은 제품원가의 15%에서 40% 정도를 차지하고 있으며, 장비의 노후화 정도가 심할수록 유지보수비용이 차지하는 비율은 더욱 증가하게 된다. 이런 이유로 노후화된 장비를

새로운 장비로 교체하는 것이 장비를 수리해서 계속 사용하는 것보다 경제적이 될 수 있다. 하지만, 노후화된 장비를 새로운 장비로 교체하기 위해서는 어느 시점에 장비를 교체하는 것이 가장 경제적이며 효율성이 높은지를 고려해야 되며, 이를 위한 노후장비교체에 대한 타당성 분석이 요구되고 있다[11]. 노후장비 교체에 따른 장점과 단점은 다음과 같다. 우선 장점으로 노후화된 장비의 교체는 장비의 신뢰성을 향상시키게 되며, 이는 고장률 감소에 의한 유지비 감소와, 생산지연 감소에 의한 생산성 향상 등의 효과를 얻을 수 있다. 반면에 단점으로는 노후장비를 교체

하는 규모와 기간에 따라서 생산 공정의 비가동(정지)을 필요로 할 수 있으며, 이로 인해 손실비용이 발생할 수 있다는 것이다. 따라서 장비교체에 따른 경제성 검토를 고려하여 적절한 시기에 장비의 교체가 이루어져야 한다[2, 3].

선박과 육상배전반을 생산하는 H사는 노후화된 검사장비로 인해 가동을 감소, 불량률 증가와 같은 문제가 빈번하게 발생하여 해당 장비들의 교체를 검토하고 있다. H사에서 생산하는 배전반이란 발전소·변전소 등의 운전이나 제어, 전동기의 운전 등을 위해 스위치·계기·릴레이(계전기) 등을 일정하게 넣어 관리하는 장치를 말한다. 즉, 전력공급에 중요한 역할을 맡은 장치로 품질이 우수하며 높은 수준의 신뢰도를 가지는 배전반을 구매자가 요구하고 있다. 고객의 요구사항을 만족시키기 위해 제조사에서는 출고 전 최종적으로 완제품 배전반의 전기적 기능을 검사하는 공정을 관리하고 있다. 최근에는 이러한 시험 장비의 노후화로 인해 고장이 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 고장은 생산 지연과 검사 오류 등과 같은 공정상에 심각한 문제를 일으키고 있다. 이를 해결하기 위해 H사는 기존의 노후화된 장비를 신규 시험 장비로 교체하는 것을 고려하고 있지만, 장비 교체를 위한 비용투자와 교체시간으로 인해 발생하는 손실(제품을 생산하지 못함으로 인해 발생하는 잠재 손실 비용)을 부담스러워서 한다. H사는 과연 현 시점에서 시험 장비를 교체하는 것이 경제적인 결정인지, 혹은 비용 손실이 최소화 되는 또 다른 대안들은 없는지에 대해서 궁금해 하고 있다. 장비교체의 경제성 분석을 통해 선택할 수 있는 대안으로는 장비를 가능한 빨리 전면적으로 교체 하거나, 기존의 장비를 일정기간 유지보수해서 더 사용 하거나, 일정기간 동안만 더 사용한 후 새로운 장비로 교체하는 것을 고려할 수 있다. 이런 대안들 중에서 H사는 어떤 대안을 선택하는 것이 최선의 선택이 될 것인지에 대한 분석을 필요로 한다.

본 연구는 선박과 육상배전반을 생산하는 H사의 노후화된 시험 장비의 교체에 대한 타당성 분석을 위한 사례연구이다. 구체적으로 본 연구에서는 H사의 배전반 생산 공정의 다양한 생산 요소를 고려하기 위해 Plant Simulation S/W를 활용하여 생산성을 분석하였다. 또한, 노후화된 시험 장비의 신규 교체에 대해 경제적 측면에서 고려할 수 있는 두 가지 다른 대안에 대해 총손실비용을 추정하였고 이를 기반으로 타당성 분석과 대안 평가를 수행하였다.

본 연구에서 다루는 노후화된 장비의 교체와 관련해서는 다양한 연구가 이미 진행되어 있다. Lee et al.[9]은 대형조선소에서 노후설비의 평가에 사용되는 각 요소의 상대가중치를 도출하고 AHP 분석 기법을 활용하여 조선 노후설비의 교체 타당성 분석을 지원하는 의사결정모형을 제시하였다. Hong et al.[4]는 경제적 수명분석방법(ESL)를 이용한 설비교체의 경제성을 분석하고, OPM

(Object-Process Methodology)를 활용해서 의사결정절차를 모형화 하였다. Choi et al.[1]은 효율적인 설비보전관리를 위해 설비유지에 발생하는 비용 산출에 활동기준원가시스템을 제안하였다. Lee et al.[8]은 배전설비의 신뢰도 지수와 고장률에 따른 경제적 교체주기를 연구하였으며, 민감도 분석을 통한 설비교체 우선순위를 제시하였다. Park et al.[10]는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 활용해서 디젤발전기의 상태를 정량적으로 평가하고 이를 바탕으로 설비교체의 기준을 제시하였다. Hwang et al.[5]은 공장에서 발생할 수 있는 가상 데이터를 생성하고 빅데이터 분석 기반 실시간 불량품의 발생원인 분석 및 설비의 교체주기를 예측방법을 제시하였다. Jung et al.[6]은 노후설비의 분류, 잠재 위험, 정량적 위험평가, 피해예측 등으로 구성된 노후설비의 비용편익분석 방법을 제시하였다. 그리고 예제실험을 통해 노후설비의 고장으로 인한 위험 시나리오에 따른 경제성 분석으로 노후설비 교체의 타당성 분석을 다루었다. Kim et al.[7]은 국내 자가용 전기설비의 수전용 변압기의 30년 실증데이터 분석을 바탕으로 설비의 고장률을 추정하고 이를 바탕으로 전압, 용량, 종류에 따른 교체 수명을 제시하였다.

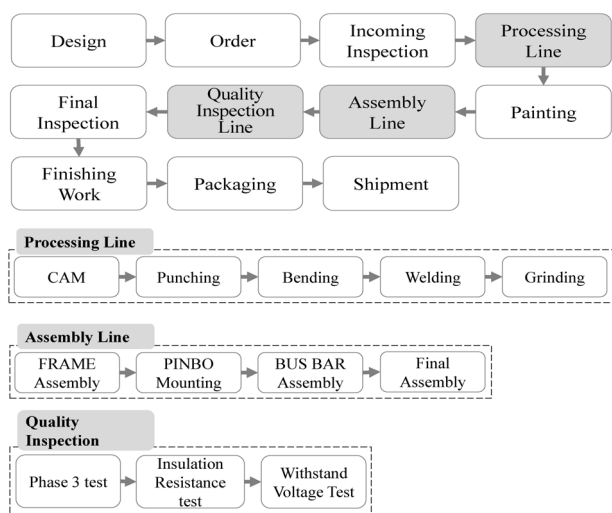
비록 앞서 언급한 바와 같이 노후화된 설비의 교체와 관련된 연구들이 이미 다수 진행되어 있지만, 해당 연구들과 본 연구의 차이점은 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 H사의 배전반 생산시스템의 생산성 분석을 위해 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 특별히 Park et al.[10]의 연구에서는 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 적용하여 설비교체 주기를 평가하는 방법을 제시하지만, 본 연구에서는 객체지향설계의 이산사건 시뮬레이션 기법을 적용한 것이 차이점이다. 둘째, 생산성 저하에 따른 판매기회 손실비용을 고려함에 있어서 본 연구에서는 장비의 고장으로 인해 상승하는 각 공정의 대기시간을 손실인건비로 포함하였다.

2. H사의 배전반 생산시스템 현황 분석

H사의 선박과 육상배전반 공정을 대상으로 시뮬레이션 모델을 구축하기 위해서는 H사가 생산하는 제품의 종류, 생산 공정 및 각 공정에서 사용되는 장비의 Lay-out 등에 대한 분석이 선행되어야 한다. 앞서 언급했듯이 H사의 주된 생산품은 선박용과 육상용 배전반이다. 이러한 선박과 육상배전반의 생산 공정은 고객의 요구 사양에 맞춰 협력업체로부터 반제품과 자재를 납품받아 완제품을 제작하는 형태로 구성된다. 제품의 특성상 소품종 대량생산 방식이 적용되고 있지만, 선박과 육상배전반 간에 공유되는 공통 부품이 많아 부품들의 효율적인 관리가 필요하다. 즉, 선박과 육상배전반의 BOM(Bill of Material)은 상당히 유사

하며 각각의 완제품 조립이후 검사 공정에서도 같은 검사 장비를 사용하고 있다.

<Figure 1>은 H사의 배전반의 생산 공정을 나타낸다. 생산 공정은 고객의 주문으로부터 시작되며 가공, 조립 그리고 검사공정 순서로 작업이 진행된다. H사는 제품을 고객으로부터 수주 받아 고객의 요구사항에 따라 제품 설계단계를 수행하게 된다. 설계단계 이후 제품 생산에 필요한 부품과 수량 등이 식별 되고, 이후 해당 부품과 자재들을 협력업체에 주문하여 납품 받게 된다. 입고된 부품과 자재들은 입고 검사를 진행하여 합격 혹은 불합격 판정을 내리게 된다. 입고 검사에서 합격한 부품과 자재들은 가공 Line에서 가공을 진행한다. 가공된 자재들은 자재창고로 이동하며, 가공을 마친 배전반 외함인 FRAME을 외주 도장 업체에 맡겨 도장 작업을 수행한다. 그리고 도장이 완료된 FRAME을 입고 받아 조립 Line으로 이동 시킨다. 조립 Line은 FRAME 조립, PIN BO 취부 및 결선, BUS BAR 조립, 총 조립 및 결선으로 분류된다. 조립 Line 작업을 마치면 배전반의 전기적 기능검사를 위해 품질검사(3상 시험, 절연저항시험, 내전압시험 등)를 수행한다. 품질검사 결과 이상 없는 경우 최종검사인 육안검사를 하고 고객이 직접 공장에서 입회검사를 실시한다. 입회검사가 완료된 배전반은 포장하여 출하 검사를 통해 제품을 출고한다. 선박과 육상배전반의 부품 및 자재의 입고 검사는 제품 및 공정의 특징에 따라 샘플링 검사 및 전수검사로 구분되어 실시된다. 설계단계에서 불량이 일어나면 설계를 재조정하며, 협력업체에서 반제품이나 자재를 납품할 때 수량이 잘못 왔을 시 재입고를 요청한다. 반제품과 자재의 입고 검사는 제품별 샘플링 검사 및 전수검사로 분류되어 있다. H사는 QC 공정도를 이용해서 공정별 제품의 검사항목, 방법, 불량 요인, 불량 해결 방법을 기록해서 관리하고 있다.



<Figure 1> Production Process for Ship/land Switchboard

선박과 육상배전반 생산 공정에 사용되는 물류 및 작업 장비는 <Table 1>와 같다. 외함 제작 및 운송은 Crane, 작은 부품의 이동은 핸드카를 사용하고 있다. H사의 선박과 육상배전반의 생산 공정은 외함의 제작 및 도장을 제외하면 대부분 조립공정으로 이뤄져 있다. 이러한 조립공정은 난이도가 높지 않기에 적은 수의 작업자가 다수의 조립작업을 맡고 있으며, 이로 인해 생산지연과 품질불량이 빈번하게 발생하고 있다. 반면, 조립이 완성된 선박과 육상배전반은 해당 설비가 설치된 곳에서 전기의 배분, 개폐, 안전 및 계량을 담당하기 때문에 이에 대한 작업이 정상적으로 작동하는지에 대한 검사가 매우 중요하다. 생산 공정 중 총 조립(Final Assembly)을 마치고 나면 내전압, 내압 및 절연시험을 통해 선박과 육상배전반의 전기적 기능을 점검하게 된다. 그러나 최근 검사장비의 노후화로 인해 잦은 고장이 발생하고, 이로 인해 검사 및 시험 결과의 오류가 빈번하게 발생하고 있다. H사는 노후 검사장비로 인해 배전반 생산성의 감소와 비효율성 발생을 인지하고는 있지만, 검사장비 도입에 따른 투자 대비 손실 비용의 감소와 이에 따른 이익의 증가 등 경제성 관점에서의 타당성 분석은 수행하지 못하고 있다. 이는, 배전반 공정의 복잡하고 불확실한 생산요소(작업시간, 교대근무, 물류시간 등)를 고려해서 타당성을 검토하는 것이 어렵기 때문이다.

<Table 1> Equipment Used in the Process

Process	Equipment	
	Logistic	Work
CNC Punching	Crane/ Fork lift	Punching Machine
Bending		Bending Machine
Welding		Welding Machine
Grinding		Grinding Machine
Painting		-
Frame Assembly	Crane	Electric Screwdriver/Spanner
PINBO Mounting	Hand-Car	
BUSBAR Assembly		
Final Assembly		
Quality Inspection	Crane/ Hand-Car	Test Equipment
Final Test		
Packing		

이에 본 연구는 배전반 생산 공정의 생산성과 장비 교체에 따른 손실비용을 추정하여 노후 검사장비 교체의 타당성을 경제적 관점에서 분석하고 한다. 이를 위해 다음 장에서는 앞서 분석한 H사의 배전반 생산 공정을 바탕으로 생산성과 시험 장비 교체에 대한 손실비용 추정을 위한 시뮬레이션 활용 방법과 내용을 다루도록 한다.

3. 시뮬레이션 모델 설계

3.1 시스템 구성

본 연구에서는 상용 S/W인 Plant Simulation을 사용하였다. 배전반 생산시스템을 구성하는 각 공정은 Plant Simulation의 Station으로 표현한다. 제품을 제작하기 위한 재료들은 Data Table에 입력 정보로 입력하여 실제 배전반 제작과 1:1로 구성하였다. 완성된 배전반 및 프레임은 크레인으로 옮겨지기 때문에 Plant Simulation의 Transporter를 활용해 각각 Crane, Trolley, Hook을 제작하여 결합해 사용한다. 그리고 배전반에 들어가는 볼트, 너트 전선 등 하위레벨에서의 조립 공정은 Assembly Station으로 표현하였다. 작업자의 작업공간은 Plant Simulation의 Work Space를 모델의 필요한 부분마다 배치하므로 사전에 설정된 작업자들이 작업할 수 있도록 하였다. 그리고 각 공정의 작업자는 한 명씩 배치가 되도록 설정하였다.

3.2 가공시간 및 고장

Station의 가공시간은 각 공정의 소요시간으로 Set-up 시간을 포함한다. 각 공정의 가공시간은 정규분포를 따른다고 가정하고 가공시간의 평균과 표준편차는 공정 담당자와의 인터뷰를 통해 설정하였다. 표준편차는 평균가공 시간의 3%로 설정하였다. 시뮬레이션에 활용한 선박과 육상배전반의 각 공정의 가공시간은 <Table 2>와 <Table 3>과 같다. 다만, 공정작업자와 작업장비 마다 상이하게 부여될 수 있는 공정작업자 Set-up time과 휴식시간은 고려하지 않았다. 또한, 외부로부터의 자재공급으로 인한 지연은 고려하지 않으며, 작업시간은 24시간 3교대로 설정하였다.

<Table 2> Processing Time for Ship Switchboard

Process	Processing Time (dd:hh:mm:ss)	
	Mean	Stdv.
CNC Punching	1:19:12:00	0:01:17:34
Bending	1:19:12:00	0:01:17:34
Welding	0:21:36:00	0:00:38:53
Grinding	1:04:48:00	0:00:51:12
Surface_Painting	1:04:48:00	0:00:51:12
Frame Asseby	3:00:00:00	0:02:09:24
PINBO Mounting	0:14:24:00	0:00:25:55
BUSBAR Assembly	0:14:24:00	0:00:25:55
Final Assembly	3:00:00:00	0:02:09:24
Quality Test	3:00:00:00	0:02:09:24
Final Test	1:19:12:00	0:01:17:34
Packing	0:21:36:00	0:00:38:53

<Table 3> Processing Time for Land Switchboard

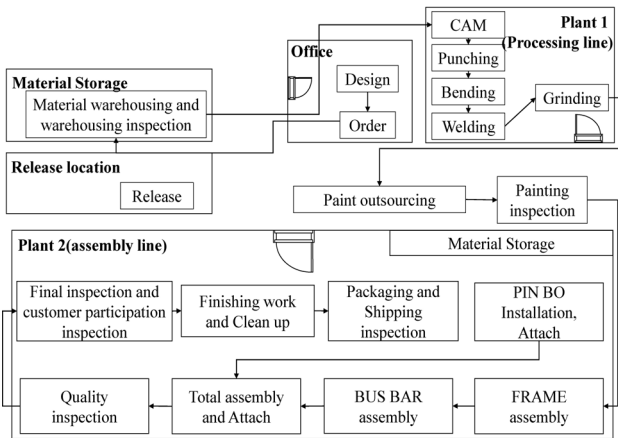
Process	Processing Time (dd:hh:mm:ss)	
	Mean	Stdv.
CNC Punching	1:20:09:36	0:01:19:17
Bending	1:20:09:36	0:01:19:17
Welding	0:22:40:48	0:00:40:49
Grinding	1:05:02:24	0:00:52:04
Surface_Painting	1:05:02:24	0:00:52:04
Frame Asseby	3:00:00:00	0:02:09:24
PINBO Mounting	0:15:07:12	0:00:27:13
BUSBAR Assembly	0:15:07:12	0:00:27:13
Final Assembly	3:00:00:00	0:02:09:24
Quality Test	3:00:00:00	0:02:09:24
Final Test	1:20:09:36	0:01:19:17
Packing	0:22:40:48	0:00:40:49

3.3 장비 Lay-out 및 흐름

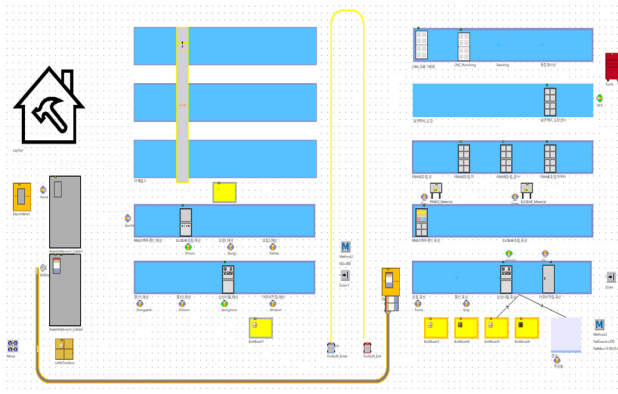
H사의 공정별 장비배치와 공정흐름은 <Figure 2>와 같으며, 해당 공정흐름은 Plant Simulation을 활용해서 <Figure 3>과 같이 구현하였다. Plant Simulation에서 제공하는 Crane 객체를 이용해서 외함 제작을 위한 자재의 이동을 구현하였다. 외함의 도장은 외주(Outsourcing)로 진행되며 이는 작업시간과 운송시간을 포함한 시간으로 하였다. 시뮬레이션 모델의 아래에 있는 좌/우 두 개의 블록은 선박과 육상배전반 각 조립공정을 나타낸다. 이 중 검사공정에는 검사장비 한 대만을 배치하고 선박과 육상배전반 공정에서 사용하도록 모형화 하여 두 개의 작업이 같은 시간에 집중되면 생산 지연이 발생하도록 하였다.

3.4 선박/육상배전반 생산 공정의 평가 척도

선박과 육상배전반 생산시스템의 생산성 분석을 위해 배전반 생산시스템의 생산량과 각 공정의 작업시간을 평가 지표로 활용한다. 신규 검사장비 교체의 타당성 검토를 위해 노후화된 장비의 고장으로 인해 발생하는 기회손실 비용(Lost Sale cost)은 손실인건비(Lost Labor Cost), 수리 비용(Repair Cost) 손실생산비용(Lost Product Cost)의 합으로 설정했다. 손실인건비는 장비의 복구 동안 해당 공정의 작업자에게 지급되는 인건비, 수리비용은 고장 난 장비의 복구비용, 그리고 생산손실비용은 인건비를 제외한 제품원가에 고장으로 생산하지 못한 생산수량의 곱으로 구한다.



<Figure 2> Lay-out & Process Flow



<Figure 3> Simulation Full Model

4. 시뮬레이션 실험 분석

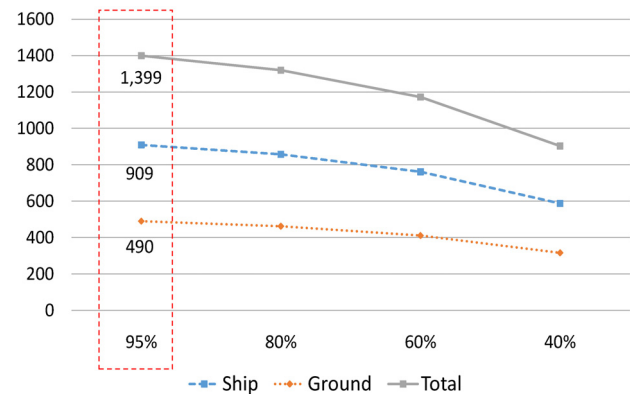
선박과 육상 배전반 생산시스템의 검사장비 교체에 대한 타당성 분석을 위해 2가지 대안을 고려하였다. 첫째, 현재 운용 중인 1대의 노후화된 검사장비와 신규 장비를 추가하는 경우를 대상으로 신뢰성 변화에 따른 경제성을 분석하는 경우, 둘째, 첫 번째 대안에서 신규 검사장비 1대를 여유분으로 더 배치하는 경우를 고려하였다. 시뮬레이션 시간, 장비의 구매비용, 장비 수입비용, 시간당 인건비, 생산손실비용, 수리시간은 <Table 4>와 같다. 생산손실비용은 제품의 판매비용에서 인건비를 제외한 재료비와 물류비용을 고려하였다. 각 실험에서 검사장비의 노후화는 시뮬레이션 기간 장비의 신뢰성(고장이 발생하지 않을 확률)을 95%, 80%, 60%, 40%로 변화시키면서 적용하였다. 이 중 신뢰성 95%는 신규 장비의 신뢰성으로 고려하였다. 이는 일반적으로 구매 초기에는 고장이 거의 발생하지 않지만 이후 사용 기간 10년을 고려하여 95%로 가정하였다.

<Table 4> Cost Factor for Simulation

Cost Factor		Input data
General	Simulation time	876,000
Cost	Purchase Cost	50,000,000
	Repair Cost	1,000,000
	Labor Cost(h)	15,000
	Lost Cost(EA)	Land
Ship		3,000,000
Time	Repair Time(h)	168

4.1 기존 검사장비의 노후화에 따른 신뢰성 변화와 신규 장비 추가로 인한 경제성 분석

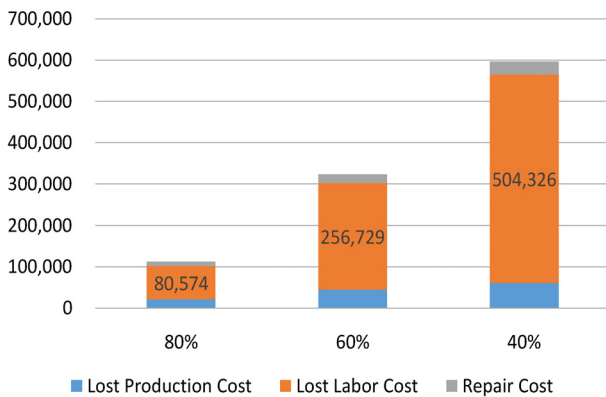
기존 검사장비 1대를 그대로 유지하였을 경우 사용기간의 변화에 따른 고장 발생 확률의 변화(80%, 60%, 40%)에 따른 경제성과 기존 검사장비를 처분하고 검사장비 1대를 신규로 도입하였을 때(신뢰성 95%)의 경제성을 비교한다. 시뮬레이션 결과는 <Figure 4>에서 보는 바와 같이 기존 장비를 처분한 후 신규 검사장비를 도입하면 총 연간 육상 배전반 909개와 선박 배전반 490개를 생산하여 총 1,399개를 생산할 수 있는 것으로 확인된다. 반면, 기존 장비를 그대로 유지하는 경우 장비 노후화에 따른 신뢰도가 80%, 60%, 40%로 변화되는 것을 가정하면 신규 장비를 도입한 경우 보다 매년 적게는 5.7%에서 최대 35.5%까지 생산수량이 감소하는 것으로 분석되었다.



<Figure 4> Comparison of Total Production due to Decreased Reliability of One Equipment

이를 비용 측면에서 살펴보도록 하자. 장비의 신뢰도가 95%인 경우 실제 장비의 수리비용과 신규 장비의 구매비용으로 총 2천 6백만 원 정도가 발생하는 것으로 분석된다. 만약, 기존 장비를 계속 유지하면 신규 구매비용은 추가로 들지 않지만 신뢰도가 80%, 60%, 40%로 감소하면서 수리비용이 증가할 것으로 예상 가능하다. 장비의 노후화

에 따라 신뢰도가 80%에서 40%까지 낮아지는 것을 가정한다면 <Figure 5>과 같이 연간 최대 약 6억 원의 손실이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 특히, 손실비용을 차지하는 요소 중 손실인건비(장비의 고장수리시간 동안 직접 생산을 하지 못하지만 계속해서 지급되는 근로자 인건비)가 차지하는 비중이 70%에서 85%까지로 분석되었고 그 상승률이 타 비용에 비해 높은 것을 알 수 있었다.



<Figure 5> Comparison of Lost Sale Costs due to Decreased Reliability of One Equipment

<Table 5>는 검사장비의 신뢰도를 95%, 80%, 60%, 40%로 변화시켰을 때 공정의 작업시간 변화를 보여준다. 배전반 생산시스템을 구성하는 공정 중 CNC부터 FRAME 조립까지는 육상과 선박배전반 모두 같은 장비를 사용하며, PINBO 취부결선부터 마무리 작업까지는 서로 다른 장비와 작업대를 사용하고 있다. 배전반 생산시스템 중에서 신뢰도 95%를 기준으로 Grinding 공정의 작업시간이 9.59%로 가장 적으며, FRAME 조립공정의 작업시간이 95.88%로 가장

높다. 이러한 공정의 불균형은 각 공정의 작업과 물류이동 시간 등에 따라 생길 수 있으며 장비와 작업자의 추가배치를 통해 개선하는 방법이 있다. 그러나 본 연구는 장비의 노후화로 인한 생산성 영향 분석이므로 병목공정의 개선을 통한 생산성 개선은 고려하지 않는다.

검사장비의 신뢰도 저하에 따라 신뢰도 95%를 기준으로 40%까지 감소하게 되면 최대 36%까지 공정의 가공시간이 감소하는 것을 알 수 있다. 가공시간의 감소로 인해 각 공정의 인건비 낭비가 발생하게 되며 최종적으로는 배전반 전체 생산량을 감소하게 만드는 핵심 요인이 된다.

또한, 검사장비의 신뢰도 저하로 장비의 수리 횟수가 증가함에 따라 수리비용도 상승하게 된다. 이러한 결과들로 보았을 때 검사공정의 신뢰성 저하로 인한 고장이 증가한다면 검사장비를 교체하거나 추가 배치하는 방향을 검토하는 것이 경제적인 것으로 분석된다.

4.2 신규 검사장비의 추가와 여유 장비 배치에 따른 경제성 분석

본 장에서는 기존 노후화된 검사장비를 유지하면서 신규 장비를 1대와 2대를 추가하였을 때 배전반 생산시스템의 생산성, 손실비용 그리고 각 공정의 가공시간 변화를 분석한다. 신규로 도입되는 검사장비의 신뢰도는 95%로 가정하였고 기존 검사장비의 신뢰도는 80%로 각각 가정하였다. 이후 나머지 공정의 기본 정보와 시뮬레이션 구성은 4.1절과 동일하게 설정하였다.

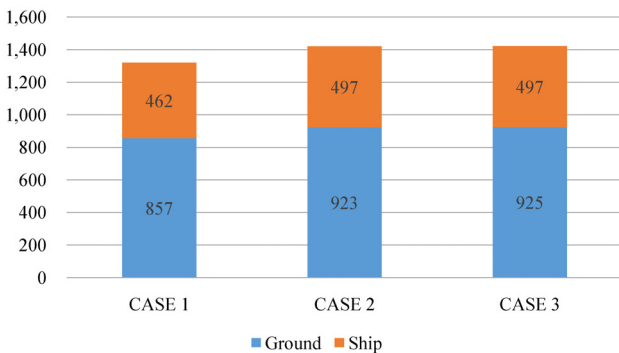
<Figure 6>은 분석기간 10년 동안의 기존 장비 유지(CASE 1), 신규 장비 1대 도입(CASE 2) 그리고 신규 장비 2대 도입(CASE 3)의 경우에서 생산한 육상과 선박배전반의 연간 총생산수량을 나타낸다. 분석결과 신규 장비를 1대

<Table 5> Comparison of Working Time(%) Comparison of Lost Sale Costs due to Decreased Reliability of One Equipment

Process	Working(%)							
	95%		80%		60%		40%	
CNC Punching	57.51		54.34		48.19		37.15	
Bending	57.55		54.38		48.22		37.18	
Welding	19.18		18.12		16.07		12.39	
Grinding	9.59		9.06		8.03		6.19	
Surface_Painting	38.36		36.25		32.14		24.77	
Frame Asseby	95.88		90.61		80.35		61.95	
Process	Ground	Ship	Ground	Ship	Ground	Ship	Ground	Ship
PINBO Mounting	62.32	35.79	58.88	33.22	52.22	29.08	40.23	22.74
BUSBAR Assembly	37.38	21.47	35.32	19.93	31.32	17.44	24.14	13.64
Final Assembly	37.39	21.48	35.33	19.94	31.33	17.45	24.14	13.64
Quality Test	12.47	7.16	11.78	6.64	10.45	5.81	8.05	4.55
Final Test	57.50	57.50	54.33	54.33	48.17	48.17	37.13	37.13
Packing	37.40	21.48	35.33	19.93	31.32	17.44	24.15	13.63

추가한 경우가 기존 장비를 유지한 경우보다 총생산량이 7.7% 높았으나, 신규 장비 2대를 추가한 경우와 비교하였을 때는 총생산량은 0.1%만 증가하였다. 이를 통해 기존 장비와 신규 장비 1대를 도입해서 가장 효과적이며, 검사설비의 고장을 대비해 여유검사설비를 추가 배치하는 CASE 3은 큰 경제적 이익을 얻기 어려운 것으로 해석할 수 있다.

<Table 6>은 시뮬레이션 10년 동안 발생한 각 경우 (Figure 6에서의 CASE 1, 2, 3)의 연간손실비용을 나타낸다. CASE 2와 3의 연간손실비용에는 신규 검사설비 각 1대와 2대 구입에 따른 구매비용이 포함되어 있다. CASE 2의 연간비용은 CASE 1과 비교하면 117%로 다소 큰 폭으로 감소하였으나, CASE 3은 CASE 2보다 16%만 감소하였다. 연간손실비용만 평가한다면 CASE 3이 CASE 2보다 경제적인 것으로 보이지만 검사장비의 운영, 보관, 관리 등의 정성적인 부분을 고려한다면 높은 이익은 아닌 것으로 분석된다.



<Figure 6> Comparison of Total Production due to Decreased Reliability of Multi-Equipment

<Table 7>은 CASE 1, 2, 3의 각 공정의 가공시간 변화를 나타낸다. CASE 2의 가공시간이 CASE 1보다 약 7.6% 정도 개선된 결과를 보여준다. 각 공정의 작업시간 중 검사공정이 54.3%에서 58.5%로 향상되었는데 이는 신규 검사장비가 추가 배치됨에 따라 노후설비의 고장으로 인한 생산정지를 예방한 것으로 해석할 수 있다. 반면, 연간손실비용과 마찬가지로 CASE 2 기준 CASE 3의 가공시간 개선은 거의 없는 것으로 나타났다.

<Table 6> Comparison of Lost Sale Cost due to Decreased Reliability of Multi-inspection Equipment

	Lost Cost (Unit: 10,000won)			
	Product	Labor	Repair	Total
CASE 1	21,400	80,574	10,429	11,240
CASE 2	-5,600	-21,103	13,036	-1,867
CASE 3	-6,100	-21,129	15,643	-2,159

이를 통해 현재 운영 중인 노후 검사장비의 신뢰도가 저하되어 80% 수준으로 보면, 새로운 95% 신뢰도를 가지는 검사장비를 1대를 배전반 생산시스템에 배치하는 것이 검사장비의 구매비용을 고려해도 기존 노후 검사장비만은 운영하는 것보다 경제적인 것이라고 판단된다. 만약 노후 검사장비의 신뢰도가 80%보다 더 낮은 수준이라면 신규 검사장비의 배치 효과는 더 높을 것이다. 그러나 검사장비를 총 2대 도입한 CASE 3의 경우 CASE 2의 생산수량과 각 공정 작업시간뿐만 아니라 손실생산비용과 인건비 또한 비슷한 수준으로 나타났다. 더불어, 검사장비를 2대 배치하였기 때문에 그에 다른 수리비용도 CASE 2보다 증가하였으며 새로 구매하는데 필요한 구매금액도 추가되어 개선효과가 적은 것으로 분석된다. 신규 검사장비 2대 배치는 검사장비 1대가 고장이 발생한 상황에서 선박과 육상배전반 각 제품 1대가 검사공정에 같은 시간에 도착한 경우를 발생하는 생산지연을 줄이는 방안으로 검토하였다.

5. 결론 및 연구방향

본 연구에서는 선박과 육상배전반을 생산하는 H사에서 검사장비의 노후화로 인해 발생하는 생산지연과 품질저하를 예방하고자 장비교체의 타당성 분석을 수행하였다. 이를 위해서는 배전반 생산 공정의 생산성이 평가되어야 한다. 작업시간, 물류이동시간, 교대근무 등 복잡하고 다양한 생산요소를 고려하기 위해 상용 시뮬레이션인 Plant Simulation을 활용해서 배전반 생산 공정을 모형화 하였다. 개발된 시뮬레이션을 바탕으로 두 가지의 대안 실험을 수행하였다. 먼저 배전반 생산 공정에 검사장비를 1대 배치하는 가정 하에서 신규 검사장비(신뢰도 95%)와 기존 노후장비(신뢰도 80% ~ 40%)의 경제적 손실을 비교하였다. 예제실험을 통해서 신뢰도가 높은 신규 검사장비가 더 적은 손실비용을 발생시킨다는 것을 알 수 있었다. 그다음 검사장비를 2대와 3대를 각 배치하였을 때 생산성과 손실비용을 비교하였다. 이는 예비 검사장비를 배치함으로써 검사장비 고장으로 인한 생산지연을 예방하고자 함이다. 실험결과 신규 검사장비 1대보다 2대를 배치하였을 때 손실비용이 117% 감소하였으나 3대를 배치한 경우 16%로 감소폭이 적었다. 이는 검사장비의 신뢰도가 95%로 높아서 예비검사장비를 배치하는 효과가 줄어든 것으로 분석된다.

장비의 특성에 따라 고장발생시간이 확률분포를 따를 수 있으나 본 연구에서는 장비의 신뢰도를 고장발생확률로 제한적으로 접근하였다. 향후 본 연구를 바탕으로 신뢰성 분야에서 제시되고 있는 장비의 다양한 고장확률분포와 교체주기 정책을 반영한 경제성 분석 연구를 수행할 수 있다.

<Table 7> Comparison of Working Time(%) due to Decreased Reliability of Multi-Equipment

Process	Working(%)					
	CASE 1		CASE 2		CASE 3	
CNC Punching	54.34		58.46		58.46	
Bending	54.38		58.50		58.50	
Welding	18.12		19.49		19.49	
Grinding	9.06		9.75		9.75	
Surface_Painting	36.25		38.99		38.99	
Frame Asseby	90.61		97.46		97.46	
Process	Ground	Ship	Ground	Ship	Ground	Ship
PINBO Mounting	58.88	33.22	63.35	35.79	63.35	35.79
BUSBAR Assembly	35.32	19.93	37.99	21.47	37.99	21.47
Final Assembly	35.33	19.94	38.01	21.48	38.01	21.48
Quality Test	11.78	6.64	12.68	7.16	12.68	7.16
Final Test	54.33	54.33	58.46	58.46	58.47	58.47
Packing	35.33	19.93	38.01	21.48	38.01	21.48

Acknowledgement

This results was supported by “Regional Innovation Strategy (RIS)” through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE) (2021RIS-003).

References

- [1] Choi, B.K., Kang, Y.S, and Hahm, H.J., The Study on the Maintenance Cost Accounting System used Activity based Cost, *Journal of The Korean Institute of Plant Engineering*, 2005, Vol. 10, No. 4, pp. 47-57.
- [2] Hamilton, N.R.S., Replacement and Additive Designs for Plant Competition Studies, *The Journal of Applied Ecology*, 1994, Vol. 31, pp. 599-60.
- [3] Hartman, J.C., *Engineering Economy and the Decision-Making Process*, Pearson Prentice Hall, NJ, 2007.
- [4] Hong, S.M., Rim, S.C., and Park, J.I., Modeling an Economical Plant Replacement Study using Object-Process Methodology (OPM), *Journal of The Korean Institute of Plant Engineering*, 2009, Vol. 14, No. 4, pp. 105-115.
- [5] Hwang, S.Y., Kwak, K.M., Shin, D.J., Kwak, K.J., Rho, Y.J0, Park, K.W., Park, J.M., Kim, J.J., Analysis of Defective Causes in Real Time and Prediction of Facility Replacement Cycle based on Big Data, *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 2019, Vol. 19, No. 6, pp. 203-212.
- [6] Jung, S.M., Jung, C.M., Kang, S.M., Chae, S.B., Kang, S.G., and Ko, J.W., Cost-Benefit Analysis Method for Ageing Equipment of Chemical Plants Using Risk Assessment, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 2020, Vol. 24, No. 4, pp. 84-92.
- [7] Kim, Y.S., Kim, C.M., and Jeong, K.S., Analysis of Replacement Cycle based on Inspection Statistics of Receiving Power Transformer for Private Electrical Facilities, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2022, Vo. 71, No. 1, pp. 275-281.
- [8] Lee, H.T., Kim, J.C., Moon, J.F., Chu, C.M., Component Replacement Ordering Evaluation for Proper Reliability Maintenance in Power Distribution System, *Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2005, pp. 48-50.
- [9] Lee, M.W., Ko, D.C., and Park, J.C., A Study on the Decision Making for Evaluating the Outworn Facility Replacement in Shipbuilding, *IE Interfaces*, 2001, Vo. 14, No. 3, pp. 310-317.
- [10] Park, M.S., Song, G.W., Seo, S.I., and Ju, W.D., Investigation on Replacement Criteria for Aged Diesel Driven Power Generation Facility by Monte Carlo Simulation, *Transactions of the KSME C Industrial Technology and Innovation*, 2014, Vol. 2, No. 2, pp. 89-97.
- [11] Tarquin, A. and Blank, L., *Engineering Economy*, Mc Graw Hill, 2005.

ORCID

Young Jin Han | <http://orcid.org/0000-0002-8821-9255>
Do Yoon Yi | <http://orcid.org/0000-0003-0717-3062>
Jun Pyo Hong | <http://orcid.org/0000-0003-4261-664X>
Sung Ho Joo | <http://orcid.org/0000-0003-0460-8817>
Gi Min Kim | <http://orcid.org/0000-0002-3107-9511>
Jaehun Park | <http://orcid.org/0000-0001-8105-7727>