한국시뮬레이션학회 논문지
Vol. 22, No. 4, pp. 129-138 (2013. 12)
http://dx.doi.org/10.9709/JKSS.2013.22.4.129
ISSN 1225-5904

# 시뮬레이션 기반 수도권 리사이클링 센터 폐냉장고 전처리 공정 개선

김도균[1] · 강민구[1] · 최진영[1†] · 박기진[1] · 공만식[2]

# Improvement of the Waste Refrigerator Pre-processing Line in Metropolitan Recycling Center using Simulation

Do Gyun Kim · Min Koo Kang · Jin Young Choi · Kiejin Park · Man-Sik Kong

**ABSTRACT**

This paper studies the improvement of a pre-processing line for waste refrigerators in a metropolitan recycling center(MRC). We performed ARENA modeling and simulation by using work analysis and time measurement on the current processing line. Combined this result with some practical experiences from workers, we generated 3 alternatives to improve the current line and evaluated them by using ARENA simulation. The final decision selected consists of changing 2-line process into 1-line and having a separate cell-line for collecting refrigerant. Currently, the result of this study was applied to MRC by improving cycle time, throughput, and space utilization compared to the previous one.

**Key words** : Waste Refrigerator, Recycling, Process Analysis, Simulation, ARENA

**요 약**

본 논문에서는 수도권 리사이클링 센터 폐냉장고 전처리 공정의 성능 개선 방안에 관하여 연구하였다. 이를 위해 현행 전처리 공정을 기본 작업 단위로 구분하고 공정 별 작업 시간을 측정하여 ARENA를 이용한 모델링 및 성능 분석을 수행하였다. 또한 실무자의 경험과 선진 사례 등에 기반한 3가지 새로운 전처리 공정 대안을 생성한 후 ARENA를 이용한 모델링 및 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 최종 선정된 대안은 현행 2-라인 공정을 1-라인으로 전환하고, 냉매를 회수하기 위한 별도의 셀라인을 도입하는 것을 포함한다. 본 연구 결과는 현재 새로운 전처리 공정 라인으로 설치되어 운영되고 있으며, 이전 공정에 비해 사이클 타임과 생산성 향상뿐만 아니라, 공간 활용률 측면에서도 크게 개선된 결과를 보였다.

**주요어** : 폐냉장고, 재활용, 공정분석, 시뮬레이션, ARENA

## 1. 서 론

현대인들은 나날이 발달하는 기술과 경제적 풍요로 인한 생활 수준의 향상으로 인해 다양한 가전 제품을 향유할 수 있게 되었다. 그러나 매우 빨라진 기술 갱신의 시기와 기호 변화에 따른 제품 수명의 단축으로 인해 버려지는 가전 제품의 발생량이 증가하는 결과 또한 매우 심각하게 야기되었다(Park et al., 2003). 한국 전자 산업 환경협회에 따르면, 연도별 폐가전 제품 발생량은 2006년 약 720만 대에서 2011년 850만 대로 Fig. 1과 같이 매년 증

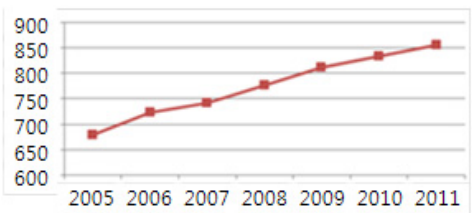



**Fig. 1.** Waste home appliance in years

*본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: GT-12-C-01- 320-0).
접수일(2013년 8월 20일), 심사일(2013년 11월 8일), 게재 확정일(2013년 11월 18일)
[1] 아주대학교 산업공학과
[2] 고등기술연구원 신소재공정센터 기능소재연구팀
주 저 자 : 김도균
교신저자 : 최진영
E-mail; choijy@ajou.ac.kr

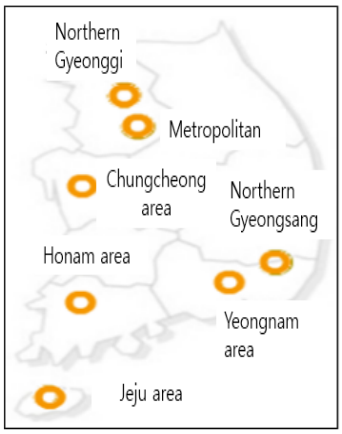



**Fig. 2.** Centers for waste home appliance

가하는 추이를 보인다.

이렇게 발생한 폐가전 제품의 처리는 경제적 가치와 환경적 의무라는 두 가지 측면에서 매우 중요하다. 폐가전 제품은 금, 은, 구리 등의 유가 금속 뿐 아니라 고철, 플라스틱 등의 각종 원자재를 포함하고 있기 때문에 경제적으로 큰 가치를 지니고 있다. 생산되는 원자재의 양이 현저히 부족한 우리나라의 특수성과 현재 불안정한 동향을 보이고 있는 원자재 시장의 상황을 고려해 볼 때, 폐가전 제품의 올바른 재활용은 차후 성장을 위한 강력한 수단이 될 수 있다.

한편, 지구 온난화를 비롯한 다양한 환경적 문제가 수면 위로 떠오른 작금의 현실에 비추어 볼 때, 폐가전 제품의 처리는 환경적 의무를 수행하는 측면에서도 중요하다. 폐가전 제품이 제대로 처리되지 않았을 때 발생하는 냉매, 오일, 납 등의 유해한 물질들이 심각한 환경 오염을 초래할 수 있으며, 매립형 폐기물들을 발생시켜 부수적인 피해를 일으킨다(Park et al. 2003; Jan, 2008).

국내에서는 2003년부터 10가지의 전자 제품에 대하여 '생산자책임 재활용제도'를 실시하고, 제품의 전 과정에 걸친 자연 자원의 사용과 그에 따른 환경부하를 정량적으로 수치화하여 표시하는 환경성적표지제도(Environment Declaration of Products, EDP)를 도입하였다. 또한 폐가전제품 처리를 위해 Fig. 2와 같이 수도권을 비롯한 전국 주요 지점에 7개의 센터가 설립되어 운영되고 있다. 이들 각 센터의 연간 처리량은 평균 30만대 정도 수준이며, 각 지역의 특성에 맞게 처리 품목을 정하고 처리 설비와 공정이 도입되어 운영되고 있다.

그러나 이들 센터의 운영 실적을 보면 전반적으로 국내 재활용 기술 수준의 낙후로 인해 원활한 재활용이 이루어지지 않고 있다. 특히 설비의 도입이 미진하여 수작업에 많은 부분을 의존하고 있어 처리량이 매우 부족한 실정이다. 또한 작업 관리 기법이 잘 적용되지 않고 있으며, 처리 시간이 긴 공정으로 인해 효율성도 떨어진다. 재활용 공정 이후의 폐기물 발생 비율도 15% 정도에 미치는 수준으로 폐가전 제품의 재자원화율마저 매우 낮다(Park, 2008).

이와 같은 어려움을 극복하기 위해서는 먼저 해외의 우수한 사례들에 대한 연구 조사를 통해 개선의 방향성을 확고히 할 필요가 있다. 또한 공정 분석 및 작업 분석을 통한 공정 효율 향상, 유용 자원 회수율의 향상과 처리량 증가 역시 주요한 개선의 과제로 삼아야 한다(Jan, 2008; Park, 2008). 이러한 이슈들에 대한 해결책을 제안하기 위한 방안으로서, 본 연구에서는 먼저 수도권 리사이클 센터(이하 (주)엠알씨))의 폐냉장고 전처리 공정에 대한 개선을 고려하였다. 이는 (주)엠알씨가 수도권에서 발생하는 방대한 양의 폐가전을 처리하는 주요한 시설임에도 불구하고, 설비 도입 미진 및 공정의 비효율화 등으로 인해 적은 처리량과 낮은 효율성 등의 심각한 문제점을 가지고 있기 때문이다. 또한 (주)엠알씨 내부적으로는 폐냉장고 전처리 공정이 세탁기, 에어콘 등의 타 폐가전 제품 전처리 공정에 비해 복잡하고 비효율적으로 운용되고 있어서 이에 대한 개선이 시급하다는 요구가 있었기 때문이다.

이를 위해 본 연구에서는 먼저 현행 (주)엠알씨 폐냉장고 전처리 공정에 대한 ARENA(Kelton, 2007) 모델링 및 시뮬레이션을 통해 현 공정을 분석하고 문제점을 도출하였다. 또한 이를 개선하기 위해서 현장의 요구 사항에 기반한 여러 가지 공정 개선 모델을 수립한 후 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 및 검증하였다. 본 연구를 통해 최종적으로 제안된 새로운 폐냉장고 전처리 공정 모델은 현재 (주)엠알씨에 설치되어 운영되고 있으며, 이러한 결과는 향후 (주)엠알씨 내 타 폐가전 및 국내 타 폐가전제품 센터로 기술 이전될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 (주)엠알씨 폐냉장고 전처리 공정의 주요 현황 및 문제점에 대해서 설명한다. 3장에서는 현 공정 시뮬레이션 모델 및 개선을 위한 요구사항을 소개하고 이에 대한 타당성을 검증한다. 4장에서는 현 공정 개선을 위한 여러 가지 대안을 생성하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한 후, 개선된 (주)엠알씨 폐냉장고 전처리 공정을 제안한다. 마지막 5장에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

## 2. 수도권 리사이클링 센터 현황

### 2.1 개선 전 공정 개요

2003년 가동을 시작한 수도권 리사이클링 센터의 개선 전(이하 현행) 폐냉장고 전처리 공정은 폐냉장고를 분리 및 해체하기 위해서 필요한 40여 개의 세부 작업으로 구성된다. 이를 다시 주요 구성품 해체 단위를 기준으로 구분해 보면, 입고된 팰릿(Pallet)으로부터 폐냉장고를 공정 라인으로 반입한 후 가스켓과 보온재를 분리하는 공정 1부터 시작해서 냉매를 보관하고 있는 콤프레서를 분리 및 해체하는 공정 6까지의 6가지 단계로 나눌 수 있다. Table 1은 이러한 폐냉장고 전처리 공정의 6가지 대공정에 대한 설명이다.

(주)엠알씨에서는 이러한 6가지 대공정을 Fig. 3과 같이 상단과 하단, 두 개의 라인(2-라인)으로 구성 및 설치하여 9명의 작업자가 작업을 진행하고 있었다. 이 때, 각 작업자가 공정 흐름도 상에서 실제로 담당하는 작업의 명세는 Table 2와 같다. 한편, 전체적인 폐냉장고 전처리 공정 흐름은 다음과 같다: 먼저 냉장고 반입 리프트를 통해 해체 공정 라인에 투입된 냉장고는 공정 1부터 3까지 컨베이어 벨트 상에서 작업자들에 의해 각 부분이 해체된다. 이 때 주로 냉장고 전면에 대한 해체 작업이 이루어지며, 후면에 대한 작업을 위해 공정 5에서 회전 컨베이어에 의해 회전된다. 따라서 공정 5에 있는 작업자는 상단과 하단에서 오는 폐냉장고들을 동시에 작업한다. 공정 4와 공정 6을 거친 폐냉장고는 컨베이어 벨트를 타고 냉장고 반출 엘리베이터로 이동된다. 이 때 사용되는 엘리베이터는 구성품이 해체된 폐냉장고를 분쇄하기 위해 후처리 공정으로 이동시키는 장치이다.

본 연구에서는 현행 (주)엠알씨 폐냉장고 전처리 공정에 대한 성능을 평가하기 위해서 Fig. 3의 흐름도를 따라 진행되는 대공정별 소요 시간을 측정하였다. 각 작업자의 작업 시간은 영상 장비를 이용하여 3-5회 촬영한 뒤 평균값으로 산출하였다. 이 때 정확한 시간 산출을 위해 영상 재생 프로그램의 화면 캡쳐 기능을 이용하여 0.1초 간격으로 정지 화면을 저장하고, 저장된 화면의 개수를 측정하는 방법을 사용하였다. 이를 통해 얻어진 각 공정 별 평균 소요시간은 Table 3과 같다. 한편 폐냉장고를 후처리 공정으로 반출하기 위한 엘리베이터의 평균 택타임은 45초로 측정되었다.

그러나 공정 3과 4의 경우에는 한 작업자가 담당하며, 공정 5는 두 라인의 작업을 한 작업자가 담당하는 등, 폐냉장고 전처리 작업의 특성 상 소요 시간 측정만으로는 공정을 정확하게 파악하기에 부족하다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 작업자의 작업률(Utilization)을 고려하였다. 작업률은 측정 시간 동안에 작업자가 실제로 일한

**Table 1.** 6 processes for pre-processing of waste refrigerators

| Process 1 | Process 2 | Process 3 |
|---|---|---|
| Carrying, removal of gasket and insulation | Sorting shelves and breaking glass part | Removal of thermostat and wheels |
| Process 4 | Process 5 | Process 6 |
| Ripping cover of compressor | Join/disjoin of refrigerant pipe | Removal of compressor |

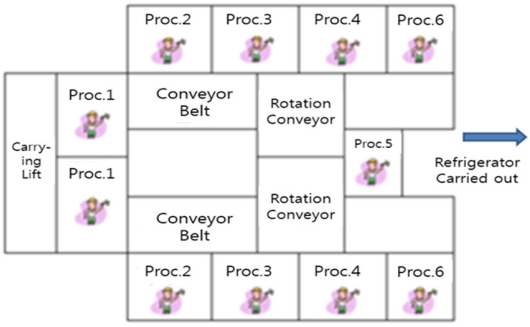



**Fig. 3.** 2-line process flow for pre-processing of waste refrigerators

**Table 2.** Process for each worker

| Worker classification | Jobs that Workers are actually in charge of |
|---|---|
| Top Worker 1 | Process 1 (Top) |
| Top Worker 2 | Process 2 (Top) |
| Top Worker 3 | Process 3&4 (Top) |
| Top Worker 4 | Process 6 (Top) |
| Center Worker | Process 5 |
| Bottom Worker 1 | Process 1 (Bottom) |
| Bottom Worker 2 | Process 2 (Bottom) |
| Bottom Worker 3 | Process 3&4 (Bottom) |
| Bottom Worker 4 | Process 6 (Bottom) |

**Table 3.** Average processing time at each process

| | Proc 1 | Proc 2 | Proc 3 | Proc 4 | Proc 5 | Proc 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Time (Sec) | 93 | 63 | 23 | 122 | 20 | 55 |

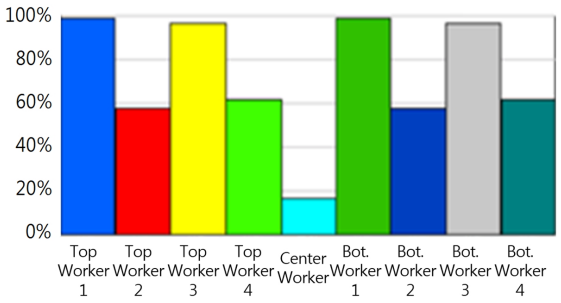



**Fig. 4.** Utilization per worker

시간이 얼마나 되는지에 따라 결정된다. 즉, 선행 작업의 지연 등으로 인해 발생하는 유휴 시간이 많은 작업자는 작업률이 낮은 작업자가 된다. Fig. 4는 (주)엠알씨의 폐냉장고 전처리 공정에서 각 작업자의 작업률 현황을 나타낸다.

## 2.2 현 공정의 주요 문제점

현행 (주)엠알씨 폐냉장고 전처리 공정의 작업 시간과 작업률을 측정하고 파악한 결과 본 연구에서는 다음과 같은 3가지 문제점을 도출함으로서 공정 개선의 필요성을 제시하였다.

- 불필요한 지연 시간
- 작업자 간 작업률 불균형
- 공정 라인 내의 낮은 공간 활용률

이러한 문제점에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저, 불필요한 지연 시간의 경우, 2-라인 공정에서는 한 번에 한 면씩만 작업할 수 있기 때문에(작업자가 한쪽에만 있음), 전면의 작업이 끝나면 후면을 노출시켜주기 위해 불필요한 회전 공정이 존재한다. 또한 전처리 공정 라인은 2-라인이지만, 후처리 공정으로 넘어가기 위한 범용 자원인 엘리베이터는 1대 밖에 없다. 따라서 전처리를 마친 냉장고가 즉시 후처리 공정으로 넘어가지 못하고, 상(하)단에서 엘리베이터까지 이동하며 대기하는 시간이 발생하게 된다. 이로 인해 본래 엘리베이터의 택타임인 45초보다 10초 더 긴 55초의 이동 및 대기시간을 가지며, 결과적으로 공정 전체 처리량에 직접적인 악영향을 주게 된다.

다른 문제점으로는 작업자 간의 작업 시간 및 사용률의 불균형을 들 수 있다. Table 3과 Fig. 4를 보면, 각 공정 간의 작업 시간 편차가 크고, 각 작업자 간의 작업률 차이도 크다. 일반적으로 같은 작업자 수를 가진 라인이라도 작업자들의 유휴 시간 차이가 크면 매우 다른 처리량을 보일 수 있다. 즉, 작업자 자원을 보다 효율적으로 사용하는 라인이 더 많은 처리량을 보이는 것이다. 따라서 공정 내에서 병목 현상이 발생하며, 이는 전체적인 처리량이 낮아지는 직접적인 원인이 된다. 따라서 공정 구분 및 작업자 간 공정 할당에 있어서 공정 간 균형을 유지시킬 수 있는 방법이 필요하다.

그 밖에 현장 엔지니어들의 추가적인 지적 사항으로 라인 내의 공간 활용률 부족이 있었다. 현행 공정은 폐냉장고로부터의 냉매 회수율 수준을 어느 정도 기준 이상으로 유지하기 위해 폐냉장고에 대한 해체 작업이 와식(냉장고가 눕혀진 상태)으로 진행이 된다. 이는 기술적으로 와식에서의 냉매 추출이 입식보다 효율이 높기 때문인데, 이로 인해 냉매 회수율은 준수되지만 컨베이어 라인에서 한 번에 많은 냉장고를 수용하기가 어렵다는 문제점이 있다. 결국 전처리 공정 라인 상에서 처리 중인 폐냉장고의 개수인 Work in process (WIP)의 수준이 낮아지고 이는 전처리 공정 라인의 성능을 나타내는 처리량에도 영향을 미칠 수 있다.

## 2.3 해외 동향 및 폐가전 처리에 대한 기존 연구

현재 세계적으로 환경에 대한 규제가 강화되고 있으며, 이에 따른 폐가전 처리 및 유용자원 회수의 중요성이 강조되고 있다. 독일의 경우 연간 2백만톤 이상의 폐전자제품이 처분되고 있으며, 재활용 규모가 연간 20억~30억 DM으로 추산되고 있다(National Information Center for Environmental Technology, 2011). 일본의 경우 폐가전 전처리 공정에서 모터와 컴프레셔 내의 영구자석회수 공정을 개발하여 유용자원 회수율 향상에 활용을 추진 중이며, 마쓰시타 그룹의 리사이클링 부서에서는 폐가전의 혼합물을 소각하지 않고 금속만 회수하여 재활용율을 높이는 기술을 개발하였으며, 가전 대기업들은 폐가전 회수를 촉진하기 위해 고객이 부담하는 회수 비용을 인하하기도 했다(Kobayashi, 2002).

한편 폐가전 제품 처리를 위한 연구는 크게 폐가전 제품의 재자원화와 시뮬레이션 등을 통한 공정 개선 사례로 나눌 수 있다. 그러나 두 가지 분야 모두 기존 연구에서 폐가전을 대상으로는 많이 다루어지지 않았으며, 재자원화의 경우에는 주로 재활용 정책의 현황 및 재활용 센터 현황과 개선 방안 등이 제안되는 정도였다(Park et al., 2003; Jan, 2008; Park et al., 2008). 공정 개선 사례의 경우에도 폐가전제품 처리 공정을 대상으로 한 사례는 없지만 본 연구에서 참고할 수 있는 일반적인 시뮬레이션 절차 및 사내 표준 문서의 공정 시뮬레이션 적용 방안 등

에 대한 연구는 제안되고 있다(Kim et al., 2005; Oh et al., 2011).

## 3. 현행 공정 개선 방향

### 3.1 개선 절차

본 연구에서는 2장에서 도출된 문제점을 기반으로 현행 공정 개선을 위한 절차를 Fig. 5와 같이 수립하였다. 먼저 현행 공정의 처리량에 대한 정확한 성능 분석을 위해 현 상황을 반영하는 시뮬레이션 모델을 만든다. 이를 기반으로 2.2절에서 제안된 문제점들을 개선시키기 위해 필요한 요구 사항들을 도출하고, 이를 반영하는 새로운 전처리 공정 라인 시뮬레이션 모델을 설계한 후 실험을 통해 성능을 검증한다. 최종적으로 가장 좋은 성능을 갖는 전처리 공정 모델을 제안한다.

이를 위한 모델링 및 시뮬레이션은 가상 환경에서 공정을 시뮬레이션하여 상황에 대한 접근법을 분석하기 용이하게 보여주는 rockwell ARENA(Kelton, 2007)을 사용하였다. ARENA 소프트웨어는 신공정이나 기술의 도입에 앞서 가상 환경에서 시뮬레이션을 진행하여 적은 비용과 시간으로 변화의 방향이나 폭을 예측하기에 용이한 장점이 있다(Kim et al., 2012).

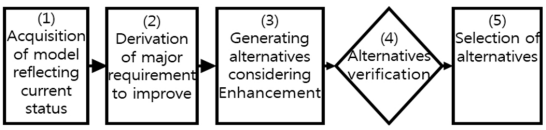



**Fig. 5.** Improvement procedure of current process

### 3.2 현행 공정 시뮬레이션 모델 획득

현행 공정의 폐냉장고 처리량에 대한 정확한 성능 분석을 위해 Table 3에서 명시된 공정별 평균 소요시간 자료를 활용하여 공정별 작업시간을 삼각분포로 모델링 한 후 ARENA 소프트웨어를 통한 폐냉장고 전처리 공정 모델을 Fig. 6과 같이 설계하였다. ARENA 시뮬레이션 모델은 상단과 하단에 있는 6개의 공정과 후처리 공정으로 투입되기 위해서 컨베이어 벨트에서 기다리는 단계를 표현하고 있다. 시뮬레이션 모델에서 사용된 여러 가지 ARENA 모듈들에 대한 설명은 Table 4와 같다. ARENA의 대표적인 모듈인 Create, Assign, Decide, Process, Record, Dispose 등의 모듈을 활용하여 전처리 공정 내에 있는 폐냉장고를 나타내는 개체 생성, 각 공정 단계의 처리 시간에 대한 삼각 분포 발생, 주요 의사 결정 로직 표현, WIP의 개수 및 주요 성능 파라메타들에 대한 정보 저장 등을 구현하였다.

다음 단계로서 이를 이용한 현행 폐냉장고 전처리 공정의 성능 분석을 다음과 같은 실험 조건을 정하여 수행하였다. 먼저 폐냉장고가 라인에 쌓이게 되는 시간을 반영하여 4시간의 warm-up 기간을 두었으며, 1일(8시간) 가동을 기준으로 30회 반복 실행하였다. 이러한 조건은 전처리 공정 개선을 위한 대안들의 시뮬레이션에서도 동일하게 적용되었다. 시뮬레이션 결과 현행 폐냉장고 전처리 공정인 Fig. 6 모델은 처리량 = 524대/1일, 사이클 타임(반입부터 후처리 투입까지 시간) = 37.2분, 택타임(전처리 완료부터 후처리 투입까지 시간) = 55초, WIP = 39.6대를 보였다. 현장 전문가들과의 검토 회의 결과 이러한 값들은 현재 (주)엠알씨의 공정 상황과 유사한 수준

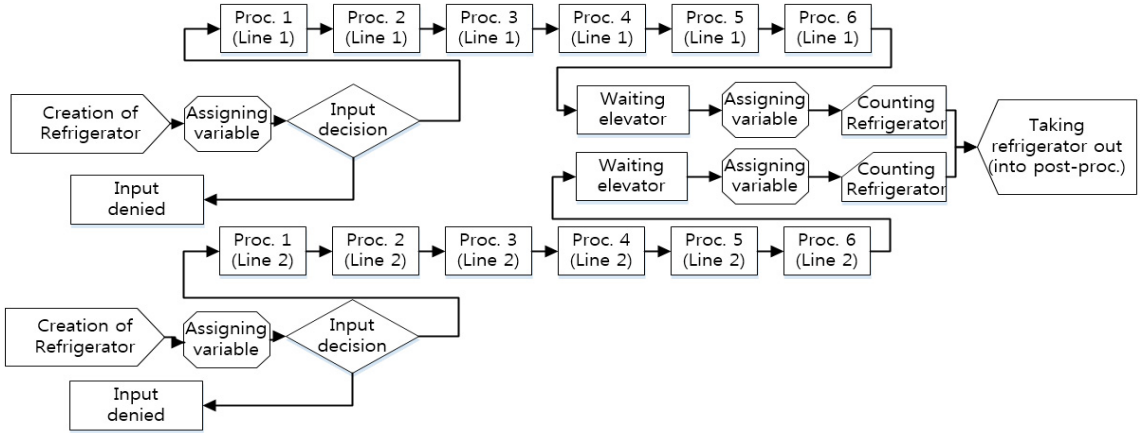



**Fig. 6.** ARENA model of current pre-processing line for wast refrigerators

이며, 따라서 Fig. 6의 ARENA 모델에서의 각각의 모듈들은 현행 공정의 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단되었다. 즉 향후 이 모듈들을 활용하여 공정의 재배치 및 분류 등을 수행할 수 있는 기본 환경이 확보되었다고 할 수 있다.

### 3.3 1-라인 공정의 타당성 분석

이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 현행 공정 라인을 개선시킬 수 있는 방안 및 현장에서의 고려 사항을 도출하고자 하였다. 그러나 2.2절에서 분석된 바와 같이 2-라인 공정은 가장 시급한 문제로서, 불필요한 회전 공정과 엘리베이터 이용에서의 병목 발생 등 성능을 저해하는 요소가 많이 존재한다. 이러한 점은 2-라인이 가지고 있는 구조적인 문제로서 라인의 구조를 1-라인으로 변경하면 어느 정도 해소될 수 있을 것으로 기대되었다.

따라서 본 연구에서는 먼저 2-라인 구조를 1-라인으로 변경하는 것에 대한 타당성을 검토하고자 하였으며, 이를 위해 다음과 같은 2가지 1-라인 모델을 고려하였다.

- (모델 1): 2-라인 공정을 전/후면 작업에 따라 단순히 1-라인으로 배치 후 남는 작업자들을 병목 공정에 추가 투입
- (모델 2): 작업자들의 작업률 불균형을 해소하기 위해 공정의 선후 관계를 유지하면서 라인 밸런싱을 고려하여 공정을 1-라인으로 재배치

**Table 4.** ARENA modules used for simulation model in Fig. 6

| | |
|---|---|
| **Create** | "Create" module generates entities to be handled in simulation (=refrigerator). Because entities are generated according to a certain distribution, cooperation with "Assign" and "Decide" modules is necessary to describe pull-system. |
| **Assign** | "Assign" module can assign measures of model by setting some variables. It appears in first and last position, recording the number of refrigerators in line. Variables are updated tracing refrigerator, realizing pull-system with "Decide". |
| **Decide** | "Decide" module enables a conditional choice. It is used to construct pull-system logic in this research, which decides acceptance or rejection of input by reading the variable assigned by "assign" module. |
| **Process** | "Process" module express a logic that a entity seizes certain resources for pre-defined times. This procedure is appropriate for describing the current system, which contains the processing logic(A worker seizes a refrigerator). |
| **Record** | By "Record" module, user can record various performance measures of model. Measures which are omitted in ARENA report can be counted by record module as necessary. |
| **Dispose** | "Dispose" module eliminates entities generated by "Create" module. This module is used in two points. ① To dispose refrigerators which are denied by input decision. ② To dispose refrigerators carried onto post-process. |

**Table 5.** Simulation results for (Model 1) and (Model 2)

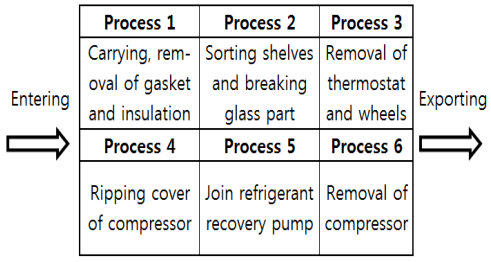
| | Through-put /1day | Cycle time | Tact time | WIP |
|---|---|---|---|---|
| Mod.1 | 460units | 24.0min. | 62.6sec. | 20 |
| Mod.2 | 640units | 17.0min. | 45.0sec. | 20 |

Fig. 7의 (a)와 (b)는 생성된 2가지 모델의 공정 흐름도를 나타낸다. (모델 2)의 경우, 라인 밸런싱을 고려하여 전/후면 4개씩의 공정을 새롭게 정의하였다. 이들의 성능 분석을 위해서 Fig. 6에서 사용된 ARENA 모듈들을 활용하여 ARENA 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 이 때 (모델 2)의 공정 별 작업 시간은 기존에 측정된 단위 세부 작업 별 시간을 이용하여 계산하였다. 이전과 동일한 조건에서 실험한 결과 Table 5와 같은 성능을 확인하였다. 현행 2-라인에 비해 (모델 1)은 현저하게 낮은 처리량, 적은 WIP 수준 및 길어진 택타임을 보였으나, (모델 2)는 높은 처리량과 줄어든 택타임을 보였다. 이로부터 단순히 라인 밸런싱을 고려한 1-라인 공정도 현행 공정의 성능을 크게 개선시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 현행 폐냉장고 전처리 공정을 개선하기 위한 방향을 1-라인에 기반한 효율적인 공정 흐름을 설계하는 것으로 결정하였다.

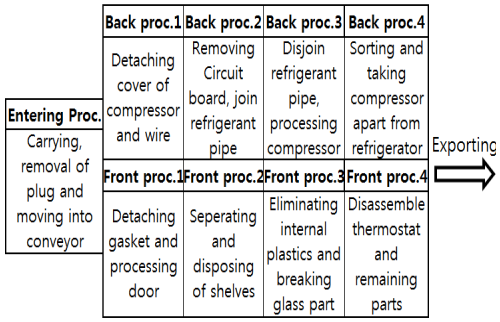
## 4. 시뮬레이션 기반 전처리 공정 개선

### 4.1 개선안 생성을 위한 고려 사항

3.2절에서의 실험 결과는 2.2절에서 제안된 현행 라인의 문제점 중에서 불필요한 지연 시간과 작업자 간 작업




(a) Model 1




(b) Model 2

**Fig. 7.** Process flow for

률 불균형을 해결하기 위한 방향을 제시했다고 할 수 있다. 그러나 현장의 다른 요구 사항인 공간 활용률 제고를 위해서는 다른 방법이 필요하며, 본 연구에서는 이를 위해 냉장고의 입식 투입(세워서 투입)을 고려하였다. 입식 상태의 냉장고는 와식 상태의 냉장고에 비해 절반 가량의 공간 밖에 차지하지 않기 때문에 공간 활용률의 개선에 큰 도움을 줄 수 있기 때문이다.

반면, 기술적으로 전처리 공정을 입식으로 진행할 경우 한 가지 문제점이 발생할 수 있는데, 이는 냉매 콤프레셔 구조상의 문제로 냉매 회수율이 저하된다는 것이다. 이것은 폐가전제품 재활용의 주요한 목적과 상충하기 때문에 별도의 처리가 필요하다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로 본 연구에서는 폐냉장고를 전처리 공정에 입식으로 투입 후 냉매 회수 바로 전 공정에서 와식으로 전환하는 방식과 냉매 회수를 위한 별도의 셀 라인을 설치하는 방식 등을 고려하였다.

### 4.2 현행 공정 개선을 위한 대안 생성

본 연구에서는 지금까지의 실험 결과와 4.1절에서의 개선 고려 사항 등을 종합하여 다음과 같은 3가지의 1-라인 전처리 공정 흐름 방식을 생성하였다. 이러한 방식들은 일본·독일 등의 선진국에서 많이 도입된 방식들이다. 생성된 모델들의 공정 구성은 (모델 2)에서 라인 밸런싱을 고려하여 새롭게 정의한 전/후면 4개씩의 공정 구성을 그대로 활용하였으며 필요시 새로운 공정을 추가하였다.

- (모델 3): 입식 투입 후 와식 전환
- (모델 4): 모든 공정을 입식으로 진행하며, 냉매 회수를 위한 별도의 셀 라인 설치
- (모델 5): (모델 3)과 (모델 4)의 절충

각각의 대안에 대한 특징은 다음과 같다. 먼저 (모델 3)의 경우에는 입식 투입 후 냉매 회수 이전까지 해체 공정을 진행한 후에 와식으로 전환하여 냉매 회수와 이후 공정을 진행한다. 이 방법은 입식으로 진행되는 구간이 존재하기 때문에 공간 활용률이 상승하며, 와식 상태에서 냉매 회수가 이루어지기 때문에 냉매 회수율도 현 공정 수준을 유지할 수 있다. 냉장고가 입식 상태로 진행되는 공정의 범위는 반입부터 전/후면 공정 1에서 2까지이며 이후는 와식으로 진행된다. 와식 전환을 반영한 공정의 배치는 Fig. 8과 같다.

(모델 4)는 모든 공정을 입식으로 진행하여 라인의 공간 활용률을 극대화하면서도 냉매 회수만을 위한 별도의 공정을 보강하는 방식이다. 순수 입식 진행이기 때문에,

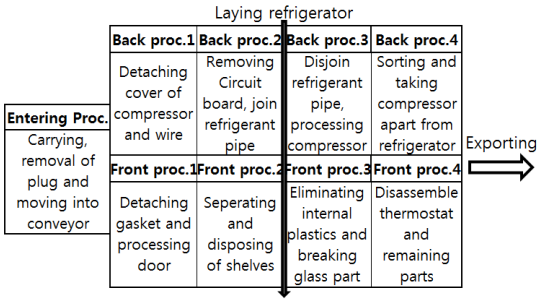



**Fig. 8.** Process flow for (Model 3)

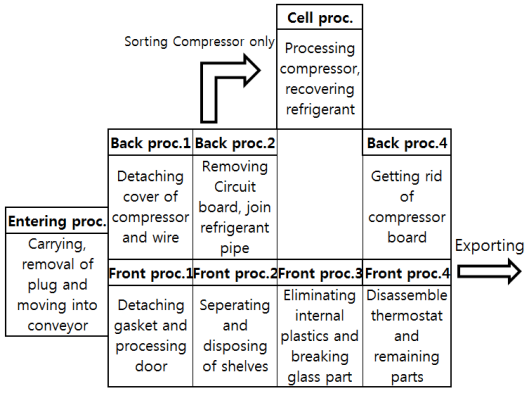



**Fig. 9.** Process flow for (Model 4)

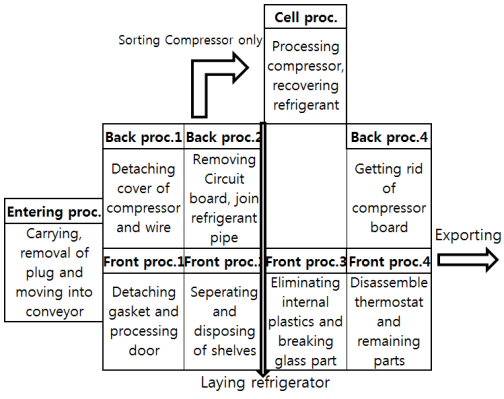



**Fig. 10.** Process flow for (Model 5)

가장 큰 공간 활용률 상승을 가져올 수 있다. 역시 반입부터 전/후면 공정 1과 2까지는 (모델 2)의 공정과 같이 진행되며, 콤프레셔를 별도의 셀 라인으로 옮기기 위한 처리가 추가된다. 이후에 본 라인에서는 냉장고 처리를, 셀 라인에서는 콤프레셔에 대한 처리를 수행한다. 공정의 배치는 Fig. 9와 같다.

마지막으로 (모델 5)는 와식 전환과 셀 라인 설치를 모

두 적용한 두 모델의 절충안이다. 이 방법은 모든 공정이 입식으로 진행되는 것이 아니기 때문에 셀 라인 설치 방식보다는 적은 수준의 공간 활용률을 보이지만, 와식 전환만을 반영한 모델에 비해서는 공간 활용률이 높다. 또한, 본체의 잔존 냉매 처리 과정이 와식으로 진행되기 때문에 소량이지만 냉매 회수율도 증가한다. 공정은 Fig. 10과 같은 형태로 진행된다.

### 4.3 시뮬레이션 결과 분석 및 대안 선정

위에서 제안된 3가지의 대안들을 모두 ARENA를 통해 Fig. 6의 모듈들을 사용하여 모델링 하였고, 앞서 적용하였던 시뮬레이션과 동일한 조건 하에서 실험을 수행하여 Table 6과 같은 결과를 얻었다. 3가지 모델 모두 처리량과 택타임은 (모델 2)와 동일하지만, 사이클 타임과 WIP은 증가하였다. 일반적으로, WIP의 상승은 프로세스가 비효율적인 것으로 여겨지지만(Kim et al., 2005), 본 연구의 범위 내에서 WIP은 라인에서 동시에 작업 중인 폐냉장고와 후처리 공정으로 투입되기 위해서 기다리는 폐냉장고를 모두 포함하기 때문에 공간 활용률을 반영하는 지표로 사용할 수 있다. 예를 들어, (모델 2)가 약 20대 가량의 냉장고만을 라인 위에서 동시에 처리할 수 있었다면, 와식 전환을 반영한 (모델 3)에서는 약 29대 가량의 냉장고를 동시에 처리할 수 있는 것으로 볼 수 있다. 이러한 이유로, 3가지 모델 모두 (모델 2)보다 높은 공간 활용률을 보이고 있으며, 특히 셀 라인 도입의 경우는 약 2배 가까이 높은 공간 활용률을 가진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 성능 지표와 더불어 경제성, 도입성, 확장성 등을 고려하는 전문가 회의 평가 결과로서 와식 전환 및 셀 라인 도입을 절충하는 (모델 5)를 최종 대안으로 선정하였다. 선정된 대안은 먼저, 경제성 측면에서 생산성의 향상을 보장하면서도 공간 활용률의 증가를 기대할 수 있다. 냉매 회수율도 별도의 셀 공간에서의 작업을 통해 집중적으로 수행함으로서 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 단순히 공간 활용률만을 본다면 셀 라인을 도입한 대안이 최적이 되겠으나, 폐가전제품 재활용 공정의 취지를 고려할 때 냉매 회수율이 더 중요한 요소

**Table 6.** Simulation results for (Model 3) to (Model 5)

| | Through-put /1day | Cycle time | Tact time | WIP |
|---|---|---|---|---|
| Mod.3 | 640 units | 25.2 min. | 45 sec. | 29.4 |
| Mod.4 | 640 units | 30.3 min. | 45 sec. | 39.5 |
| Mod.5 | 640 units | 25.9 min. | 45 sec. | 34.3 |

**Table 7.** Reasons for improvement effects

| Method | Reason for improvement effects |
|---|---|
| Standing | Improving space utilization |
| Laying | Enhanced Recovery rate of refrigerant |
| Extra cell line | Throughput increasing caused by dividing process for compressor and main body of refrigerator |

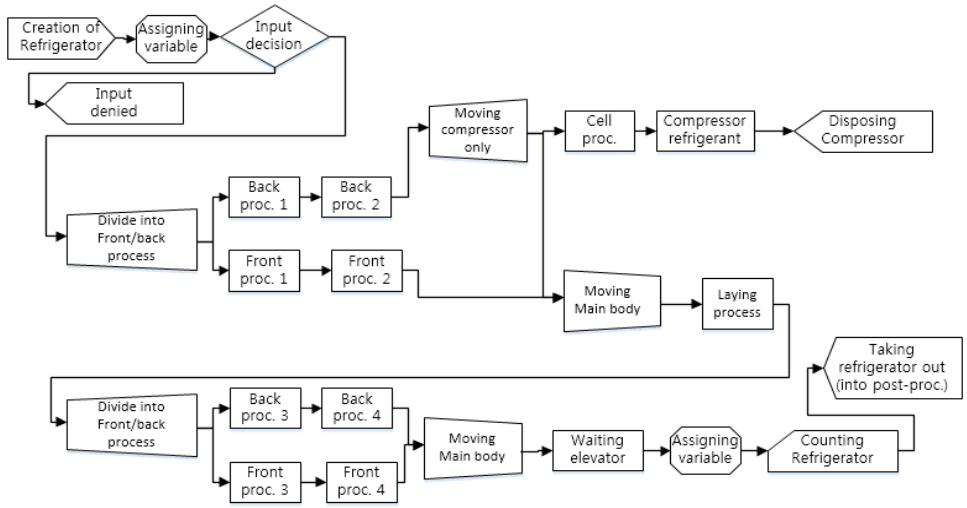



**Fig. 11.** ARENA model for the selected (Model 5)

이기 때문에 이와 같은 결정을 내렸다. 또한, 와식으로 진행되는 공정이 작업자들에게 보다 더 익숙함을 제공하여 현행 공정으로 부터의 도입성이 높다. 확장성의 경우, 냉매 회수를 위한 셀 라인의 설치로 인해 향후 후처리 공정의 택타임이 개선되어 더 많은 폐냉장고의 냉매 회수에 대한 동시 처리가 필요한 경우에도 설비 확장을 용이하게 할 수 있다. 이러한 개선효과 발생 원인은 Table 7과 같이 요약될 수 있으며, 이를 기반으로 (모델 5)는 다양한 측면에서 현장의 요구를 반영할 수 있는 대안이라는 점에서 높은 지지를 받았다. Fig. 11은 (모델 5)에 대한 ARENA 모델을 나타낸다.

본 연구 결과를 기반으로 (주)엠알씨는 기존 2-라인 폐냉장고 전처리 공정을 (모델 5)를 적용한 1-라인 공정으로 전환 설치하였으며, 새로운 설비 도입기를 거쳐 현재 본 연구에서 수행된 시뮬레이션 결과에 준하는 성능 수준으로 전처리 공정 설비를 효율적으로 운영하고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 (주)엠알씨 폐냉장고 전처리 공정의 성능 개선 방안에 관하여 연구하였다. 이를 위해 먼저 2-라인으로 되어 있는 현행 공정의 3가지 문제점을 도출하고 이를 개선하기 위해 1-라인 공정의 타당성을 검증하였다. 또한 이를 기반으로 3가지 개선안을 생성하였으며, 시뮬레이션과 경제성, 도입성, 확장성 등을 고려하여 최종적인 개선안을 제안하였다. 선택된 개선안은 폐냉장고를 입식으로 반입 후 적당한 해체 작업을 수행 한 다음 와식으로 전환하여 진행하며, 냉매 회수를 위한 별도의 셀 라인을 갖는 특징을 갖는다. 본 연구 결과는 현재 (주)엠알씨의 폐냉장고 전처리 공정 라인에 적용되어 효율적으로 운영이되고 있다.

본 연구에 대한 후속 조치로서 (주)엠알씨에서는 개선된 폐냉장고 전처리 공정 중의 일부에 대한 공정 분석 및 타당성 검토를 통해 선택된 공정을 완전 자동화하는 계획을 가지고 있으며, 이를 통해 작업의 안전성 및 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 적용된 시뮬레이션 모델링 및 개선 절차를 현재 운영 중인 세탁기, 에어콘 등의 전처리 공정 라인에 확대 적용할 것이며, 더 나아가서는 국내 다른 지역에 있는 폐가전제품 센터에도 적용될 수 있도록 제안할 계획이다.

## References


1. Kim, D.S., Park, C.S. and Moon, D.H, “Determination of New Layout in a Semiconductor Packaging Substrate Line using Simulation and AHP/DEA”, IE Interface, Vol. 25, issue 2, pp. 264-275, 2012.
2. Kim, S.N. and Rim, S.C., “Achieving Target Throughput with minumus Cost Using Simulation”, Fall conference proceedings of korean institute of industrial engineering (KIIE), pp. 326-333, 20050
3. Park, Y.W., “A Study on the Present Condition and Improvements of Recycling Policy: The Survey of Local Governments by Affiliated Recycling Center”, Journal of association for public management, Vol. 22, book 3, pp. 103-131, 2008.
4. Park, C.H. et al., “A Study on the Improvement Strategy of Reuse and Recycling of Home Appliances Waste”, J. of the Korea organic resources recycling association, vol. 11, issue 2, pp. 74-85, 2003.
5. Oh, B.S. and Park, J.I., “Study on Application of Simulation of Small and Medium Enterprises using Standard Documents”, Fall conference proceeding of KIIE, pp. 370-373, 2011.
6. “Survey on technology development for processing waste electrics and electronices in Germany”, National Information Center for Environmental Technology, pp. 1-11, 2011.
7. Jan, J., Material Hygiene-AnEcoDesign mindset for recyling of products, Ph.D Thesis, Royal Institute of Technology, 2008.
8. Kelton, S. S., Simulation with Arena, 4th ed., McGraw-Hill Korea, 2007.
9. Kobayashi, M., “Survey on technology development for recycling of waste electronics and nonferrous metals in Japan”, SERES conference, pp. 235-238, 2002.

**김 도 균** (rlaehrbs90@ajou.ac.kr)

2013 아주대학교 산업정보시스템공학부 학사
2013 아주대학교 산업공학과 석사과정

관심분야 : 스케쥴링, 모델링&시뮬레이션

**강 민 구** (ozige@ajou.ac.kr)

2007 아주대학교 산업정보시스템공학부(공학사)
2009 아주대학교 산업공학과(공학석사)
2009～현재 아주대학교 산업공학과 박사과정

관심분야 : 데이터 분석, 스케쥴링, 모델링 & 시뮬레이션

**최 진 영** (choijy@ajou.ac.kr)

1991 한양대학교 산업공학과 학사
1993 KAIST 산업공학과 석사
2004 Georgia Tech 산업및시스템공학과 공학박사
1993～1999 한국전자통신연구소 선임연구원
2005～2007 삼성네트웍스 부장
2007～현재 아주대학교 부교수

관심분야 : 스케쥴링, 데이터 Analytics, 프로세스 마이닝, 모델링 & 시뮬레이션

**박 기 진** (kiejin@ajou.ac.kr)

1989 한양대학교 산업공학과(공학사)
1991 POSTECH 산업공학과(공학석사)
2001 아주대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
1991～1997 삼성종합기술원/삼성전자 연구원
2001～2002 한국전자통신연구원 연구원
2002～2004 안양대학교 컴퓨터학과 교수
2010～2011 Visiting Professor, Rutgers, The State University of New Jersey, USA
2004～현재 아주대학교 공과대학 산업공학과 교수

관심분야 : Cloud Computing, Process Design, Fault-tolerant & Dependable Computing

**공 만 식** (mskong@iae.re.kr)

1998 경상대학교 금속재료공학과(공학사)
2001 경상대학교 금속재료공학과(공학석사)
2013 아주대학교 재료공학과(공학박사)
1998～1998 한국로스트왁스㈜ 사원
1999～2002 한국기계연구원 재료연구소 위촉연구원
2002～2005 대창공업㈜ 기술연구소 계장
2005～현재 고등기술연구원 신소재공정센터 기능소재연구팀 팀장/수석연구원

관심분야 : copper & copper alloy, casting tech., powder metallurgy, metal & E-waste recycling, pyrometallurgy