

# 폐자동차 해체시스템을 위한 시뮬레이션 모형 개발

손영태\* · 임석진\*\* · 박면웅\*

\*한국과학기술연구원 지능인터랙션센터 · \*\*인덕대학 테크노경영과

## A Development of Simulation Model for End-of-Life Vehicle Dismantling System

Young-Tae Sohn\* · Seok-Jin Lim\*\* · Myon-Woong Park\*

\*Korea Institute of Science & Technology, Intelligence & Interaction Center

\*\*Technology & Systems Management, Induk University

### Abstract

It is necessary that End-of-life Vehicle (ELV) should be recycled from the point of view of environmental preservation and resource recycling. This paper deals with two issues. The first one is the basic functional construction and plant layout of the ELV dismantling system that can maximize the reusability of parts and the recyclability of materials. The second issue is the development of a simulation model which can be used to estimate the performance of the layout design. The simulator has been interfaced with an interactive layout design system, and used to effectively determine an optimal layout design of the ELV dismantling system.

**Keywords :** End-of-life vehicle, Dismantling System, Simulator

### 1. 서론

생산기술의 발달로 저렴한 가격에 품질 좋은 제품의 생산과 공급이 가능하게 됨에 따라 자동차, 공작기계, 가전제품 등 공산품 제조업분야에서의 성장이 두드러졌으며 이를 통한 대량생산과 대량소비가 가능한 시대가 되었다.

그러나 전 세계적으로 자원의 고갈 및 환경오염의 심각성이 인식됨에 따라 1990년대 후반부터 환경 및 에너지의 효율적 사용이 중요한 이슈로 등장하게 되었다. 특히 자동차, 가전제품과 같은 공산품분야의 경우 생산량의 팽창에 따라 폐차, 폐가전제품 등이 심각한 환경 유해 요인으로 인식되어져 왔다.

이러한 사회적 요구로 인하여 제품 및 부품의 생산에 있어 에너지효율 제고, 공해 발생 극소화를 위한 다양한 연구가 활발하게 진행되었다. 즉, 단순 제품의 생

산에 중점을 둔 활동에서 제품의 생산, 사용, 회수, 폐기와 같은 제품의 라이프사이클(life cycle) 전 과정에 있어서 환경친화적 활동을 요구하는 것이다.

국내의 자동차 산업의 경우 과거 수십여년간 경제의 발전에 따라 생산량이 수직 상승하여 막대한 수량의 자동차관련 폐기물 발생되고 있다. 국내 자동차 보유대수가 2009년 기준으로 1733만대를 넘어섰고, 폐자동차 발생도 2007년 57만대로 증가되어 향후 몇 년 안에 매립지 부족, 환경위해 등의 문제가 심각하게 대두될 전망이다. 현재 시행되고 있는 '전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률' 제25조에 따르면 폐자동차 재활용 의무비율이 2014년까지는 85%, 2015년 이후는 95%로 설정되어 있다. 그러나 환경부가 2006년 3월에 발표한 자료에 따르면, 폐자동차 재활용 현황이 75% 수준에 머무르고 있는 실정이다.

따라서 사용 후 폐기되는 제품에 의한 환경위해가

† 본 연구는 국토해양부 지원에 의하여 연구되었음.

† 교신저자: 임석진, 서울특별시 노원구 월계동 초안산길 14 인덕대학 테크노경영과

Tel: 02-950-7606, E-mail: bigteach@induk.ac.kr

2010년 7월 20일 접수; 2010년 8월 26일 수정본 접수; 2010년 8월 30일 게재확정

점차 심각해짐에 따라 향후 출시할 자동차는 개발단계에서 제품수명 전주기에서의 환경성 평가를 설계에 반영하여, 환경 부담을 최소화하여야 하며, 기 생산된 자동차에 대해서는 효율적으로 해체하여, 부품의 재사용, 소재의 재활용율을 극대화할 수 있는 시스템적 기술의 개발과 적용이 시급하다[2]. EU의 경우 자동차 재활용율 95%를 2015년에 달성하기 위한 단계적인 법제화와 제조업체의 폐기물 회수 의무화는 전 세계적으로 확산될 것으로 보여 모든 자동차 업계의 현안이며, 수출 경쟁력과 국가 경쟁력에 직결되는 문제로 대두되고 있다[4].

본 연구에서는 이러한 사회적 및 산업현장의 요구를 충족시키기 위하여 폐자동차의 효율적 해체 및 재활용율을 높이기 위한 시스템을 구축하는 데 있어서, 사전에 레이아웃 설계 및 시스템의 성능을 평가하는 데 활용될 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하고자 한다.

## 2. 폐자동차 Recycling

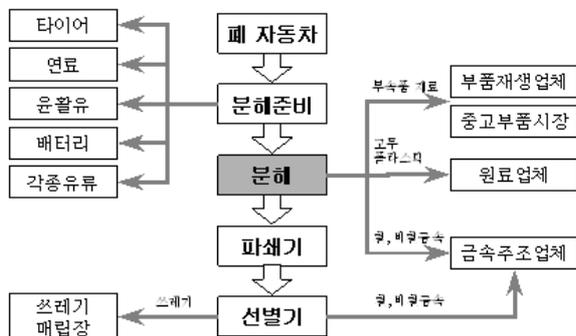
### 2.1 폐자동차 Recycling 프로세스

폐자동차 Recycling 프로세스는 파쇄중심 처리방법으로 운영되고 있으나 점차 재활용을 극대화하기 위한 분해중심의 처리시스템으로 전환되고 있다.

다음 <그림 1>은 분해중심의 처리시스템에 대한 것이다[3].

폐자동차를 분해하기 위하여 타이어, 연료, 윤활유, 배터리 등을 분리한 후 해체작업을 수행하며 이때 부속품재료는 부품 재생업체 또는 중고 부품시장에서, 고무 플라스틱은 원료업체, 철 또는 비철금속은 금속주조업체에서 재활용 된다. 이후 파쇄기를 통하여 파쇄한 후 선별기를 통해 일부 철 또는 비철금속을 회수하여 재활용되고 나머지는 쓰레기매립장으로 보내 처리하는 절차로 수행된다.

폐자동차의 Recycling 프로세스는 크게 해체(dismantling)



<그림 1> 분해중심의 처리시스템

단계와 슈래딩(shredding)단계로 구분된다. 해체단계에서는 폐자동차의 상태에 따라 부품들의 재사용 가능성을 판단하여 소재별 재활용율을 증가시키기 위한 분해를 수행하여 재사용 부품을 회수하고, 최종적으로 차피를 압축하여 슈래딩 단계로 이송된다. 슈래딩 단계에서는 차피를 작은 크기로 절단하여 자력, 풍력, 중액선별 등의 선별과정으로 소재 재활용을 위한 재질별 회수가 이루어진다. 특히, 슈래딩 과정에서는 ASR(Automobile Shredding Residue)이 발생되며, 이에 포함된 소재 자원들도 추가적으로 회수되어 재활용되고, 그 이외의 잔류물들은 소각되어 에너지로 회수되거나 매립된다[5].

## 2.2 폐자동차 해체시스템

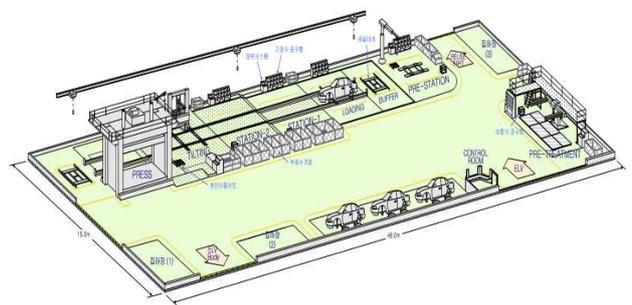
### 2.2.1 해체시스템 개요

본 연구에서의 대상이 되는 해체시스템의 실증 플랜트는 시뮬레이션(simulation)을 기반으로 국내 폐차발생현황, 투자비용 등을 고려하여 국내 폐차업계에 적용 가능한 최적의 레이아웃(layout)을 설계하여 island 타입과 line 타입이 결합된 방식으로, 구축된 플랜트 해체라인은 <그림 2>와 같이 48m x 15m (720m<sup>2</sup>)의 면적에 구성되었다[1]. 해체시스템의 기능구성에서 설정한 각각의 작업장을 해체공정의 순서, 차량의 이동이나 핸들링에 필요한 공간과 설비 등을 고려하여 배치하고, 해체부품들을 임시적으로 보관할 수 있는 집하장, 중요 차량의 육내 보관을 위한 공간들을 배치하였다.

### 2.2.2 해체프로세스

건설된 해체시스템은 <그림 2>와 같이 9개의 분해과정을 거치도록 구성하였다. 9개의 분해과정은 해체부품군으로 분류된 6개의 부품군을 기반으로 해체시스템이 갖추어야 할 일반적인 공정인 폐자동차 접수, 차피 압축, 해체부품 관리 등의 공정 등으로 구성하였다. 다음은 9개의 분해과정에 대한 설명이다.

① Reception : 차량의 상태가 파악되고 해체과정에서



<그림 2> 폐자동차 해체시스템의 해체라인

필요한 모든 정보들이 생성되는 작업

- ② Pre-treatment : 액상류 회수 및 후 순위 해체과정의 분해작업이 용이하도록 해당 부품들을 분해
- ③ Pre-station : 지정된 재사용 가능부품들 분해
- ④ Station-1 : 지정된 외장부품 분해
- ⑤ Station-2 : 지정된 내장부품 분해
- ⑥ Station-3 : 지정된 엔진룸부품 분해
- ⑦ Tilting : 엔진과 하체부품들을 순서대로 해체
- ⑧ Press : 차피 압축
- ⑨ Recycling : 재사용 부품 검사 및 등록, 소재별 분리/관리

액상류 회수작업장(Pre-treatment)과 재사용부품 분해 작업장(Pre-station)은 island 타입으로 배치하였고, 타 해체작업장들은 레일로 연결되는 line 타입으로 배치하여 레일대차에 차량을 탑재하여 이송함으로써 연속적인 해체작업이 가능하도록 하였다.

또한, 재사용부품 분해작업장에는 리프트와 지브크레인(jib crane)을, 반전작업장(Tilting)에는 반전기틀, 압축작업장(Press)에는 해체가 완료된 차량을 자동으로 압축기에 밀어 넣는 장비를 설치하였고, 해체라인에는 오버헤드 크레인(over-head crane)을 설치하여 중량부품의 해체나 이동에 안전하고 효율적으로 활용되도록 하였다.

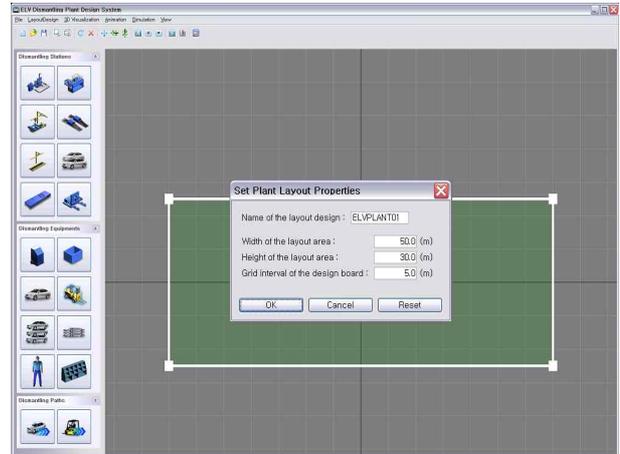
### 3. 해체시스템 시뮬레이션 모델링

인터랙티브 설계시스템을 활용하여 설계자가 구상한 레이아웃에 공정과 설비를 반영하여 시각적으로 가시화하고, 설계안의 성능인 제약사항과 생산성 그리고 경제성 등을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델링을 실시하였다. 시뮬레이션 모델은 가시화를 위한 애니메이션 모델과 평가를 위한 시뮬레이션 모델로 구성하였다.

#### 3.1 애니메이션 모델

시스템의 레이아웃은 2D 모델을 작성하고 이를 3D 모델로 입체화하여 해체플랜트의 직관적 이해도를 증진시키고, 3D 모델 상에서 해체과정을 애니메이션으로 표현함으로써 해체순서와 작업의 흐름을 파악할 수 있도록 하였다.

해체플랜트 레이아웃 설계시스템은 다음 <그림 3>과 같이 화면의 상단에는 각 기능모듈을 수행하는 풀다운(pull-down) 메뉴와 툴바(tool-bar)메뉴를 배치하여 파일관리, 3D모델 뷰잉(viewing), 애니메이션 시작/



<그림 3> 설계시스템의 GUI 구성 및 설계환경 설정

종료, 시뮬레이션 시작, 시뮬레이션 결과보기 등의 활용도가 높은 기능을 편리하게 수행할 수 있도록 하였으며, 좌측에는 개념설계에서 정의된 설계요소들을 해체작업장, 부대설비, 경로설정 등으로 구분하고, 실 형상을 아이콘(icon)화하여 배치하였다.

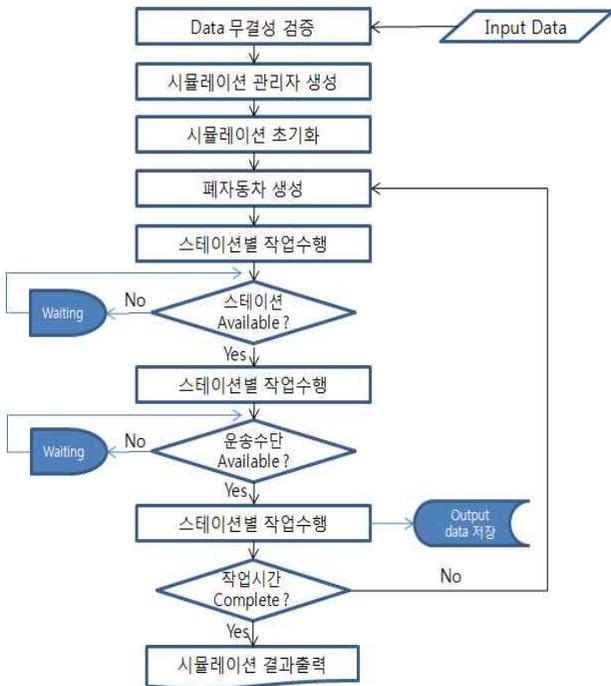
해체플랜트 레이아웃 설계시스템은 Java 기반의 독립 소프트웨어로 구현되어 JVM(Java Virtual Machine)이 설치된 시스템에서 구동이 가능하며, 그래픽 기능과 애니메이션 기능들은 OpenGL과 LWJGL(Lightweight Java Game Library)를 기반으로 3D 애니메이션이 가능한 jMonkey Engine으로 구현되었다. 또한 해체작업장과 부대설비의 3D모델은 상용 3D Max로 모델링하여 임포트(import)시켜 활용하고 있으므로 형상의 변화가 필요한 경우에는 이를 통하여 독립적으로 수정이 가능하게 하였다.

#### 3.2 시뮬레이션 모델

해체플랜트 레이아웃 설계안을 대상으로 시뮬레이션 기반의 총 해체시간, 연간처리량, 설비 가동률, 기대수익 등을 예측하여 레이아웃의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이션 모델은 애니메이션 모델로 설계된 플랜트 레이아웃의 각 작업장과 설비에 설정된 해체공정 정보, 폐자동차의 입고형태, 시뮬레이션 수행기간, 경제성 기준정보 등을 입력으로 시뮬레이션을 수행한다.

본 연구에서의 폐자동차 해체 시뮬레이션 모듈의 수행절차는 <그림 4>와 같다.

레이아웃 설계안의 각종 작업장과 설비의 배치, 설비별 작업자 수, 작업 및 이동시간 등 시뮬레이션 모델링에 필요한 정보가 입력(Input Data)으로 주어지면 해체작업을 가상으로 수행하여 해체가 완료된 자동차 수,



<그림 4> 시뮬레이션 프로세스

평균가동률 등의 정보를 출력으로 생성한다. 다음은 시뮬레이션 프로세스의 중요 모듈에 대한 설명이다.

① Input Data load

시뮬레이션 기본정보와 해체 플랜트 레이아웃 설계안의 작업장이름, 작업시간, 운송수단이름, 운송시간, 작업자 수, 해체경로 등의 정보를 로드.

② Data 무결성 검증

입력파일의 작업장, 운송수단, 작업 및 운송시간, 경로 등 정보에 대한 누락여부와 논리적 오류를 검사.

③ 시뮬레이션 관리자 생성

시뮬레이션 수행 시 각종 정보와 변수 등을 생성하고, 수행상황을 관리.

④ 시뮬레이션 초기화

시뮬레이션 수행을 위한 데이터 및 메모리 초기화.

⑤ 시뮬레이션 수행

가상의 폐자동차 생성하여 첫 작업과정에 투입하고, 설정된 순서와 작업시간으로 해체과정을 진행하여 결과정보를 저장.

⑥ 시뮬레이션 결과 출력

시뮬레이션 결과인 투입 및 해체 자동차수, 시스템 평균가동률, 평균 해체대기시간, 예상이익, 작업장별 평균 대기시간 및 가동률 등 출력정보생성.

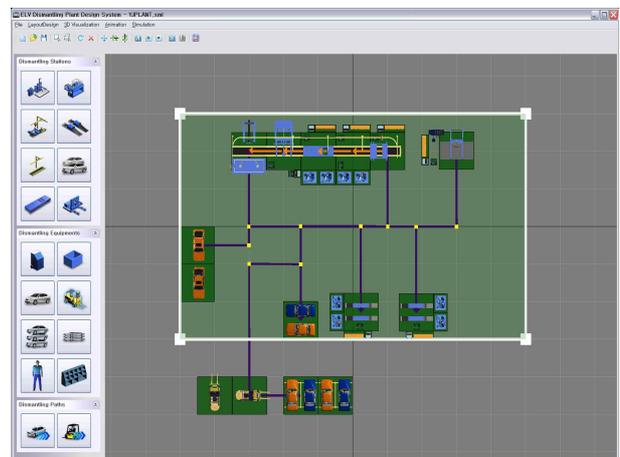
본 시뮬레이션 모형은 C++ 언어로 개발 되었으며, 해체플랜트 레이아웃 설계시스템인 애니메이션 모형과 연동되어 실행되도록 구축하였다.

## 4. 시뮬레이션 모델 적용 및 결과분석

### 4.1 시뮬레이션 모델 적용

본 연구를 통하여 개발된 3D 애니메이션 모형과 시뮬레이션 모형을 적용하여 해체플랜트의 레이아웃을 설계하고 평가하는 과정은 3단계로 이루어진다.

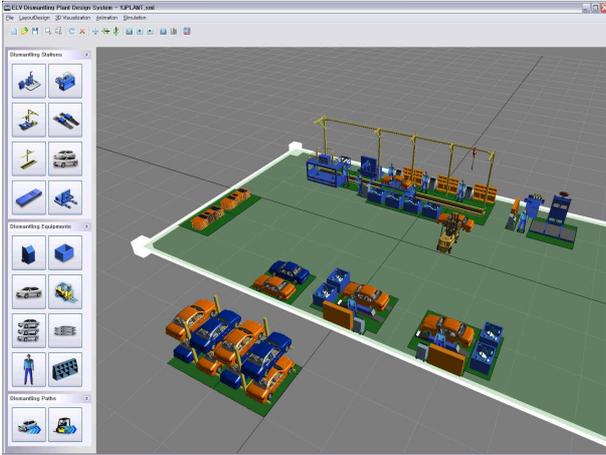
첫째, 레이아웃 설계를 완성한 예로 <그림 5>는 해체플랜트 레이아웃 설계시스템을 활용하여 레이아웃 설계를 완성한 예로, 플랜트가 건설될 부지의 모양을 설정하는 플랜트 부지형상 설정기능, 요구되는 해체작업장과 부대설비를 인터랙티브하게 배치하고 해체작업속성(작업자 수, 해체시간, 이송속도 등)을 설정하는 해체작업장과 부대설비의 배치 및 속성설정 기능, 작업장간의 해체순서, 경로와 방법 등을 설정하는 해체경로 설정기능 등을 수행하여 플랜트의 2D 레이아웃을 설계하게 된다.



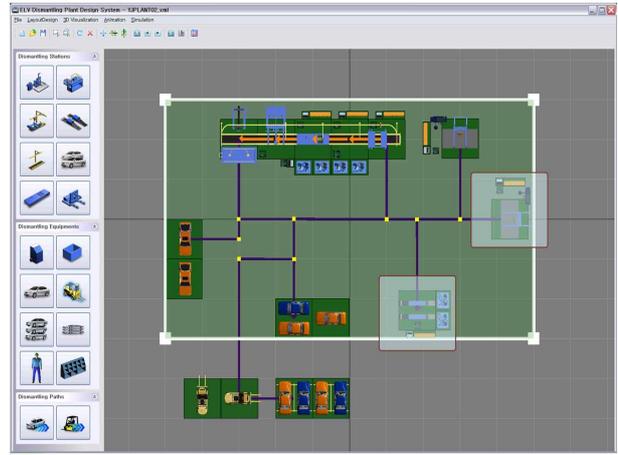
<그림 5> 2D 레이아웃 설계안 예

둘째, 시뮬레이션 단계로 <그림 6>과 같이 설계된 2D 레이아웃에 대하여 애니메이션 모형을 적용하여 설계된 2D 레이아웃을 3D 모델로 변환하여 설계내용을 가시화하고, 폐자동차가 입고되어 설정된 해체작업속성과 해체경로에 따라 순차적으로 해체되는 모습을 사용자가 이해하기 쉽게 개략적으로 제공하는 내용을 표현한 것이다.

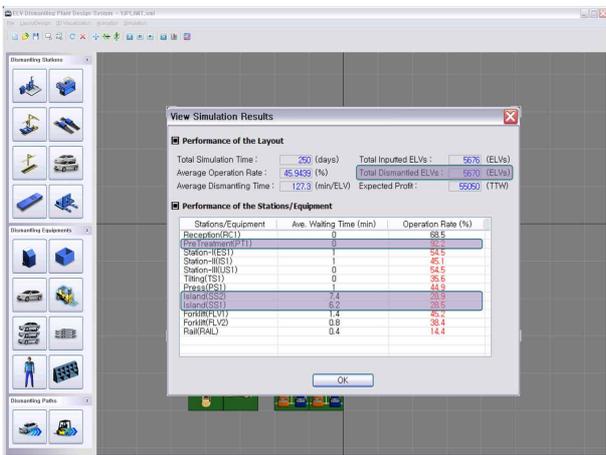
마지막으로 설비 가동률 예측단계로 <그림 7>과 같이 설계된 2D 레이아웃에 시뮬레이션 모형을 적용하여, 설정된 해체작업속성과 해체순서를 기반으로 가상적인 해체작업을 수행하여 설계된 레이아웃의 해체량, 경제성, 각 작업장과 설비들의 가동률(utilization) 등을 예측한 결과이다.



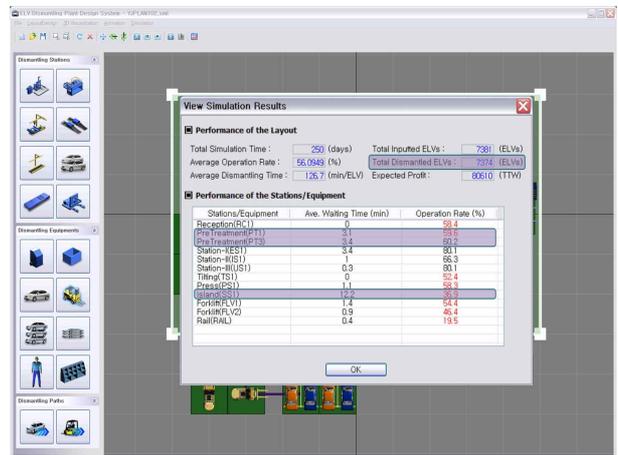
<그림 6> 레이아웃 설계안의 3D 애니메이션



<그림 8> 레이아웃 설계안의 수정



<그림 7> 레이아웃 설계안의 시뮬레이션 평가



<그림 9> 레이아웃 수정안의 시뮬레이션 평가

### 4.2 적용 결과 및 분석

<그림 8>은 초기 레이아웃 설계안을 시뮬레이션으로 평가한 결과를 기반으로 해체량 및 가동율을 향상시키기 위하여 작업자의 노하우 및 시뮬레이션 결과를 통하여 가동률이 상대적으로 높아 병목 작업장으로 예측되는 액상류 회수작업장(Pre-treatment)을 추가하는 대신 가동률이 상대적으로 낮은 독립작업장(Pre-station)의 개수를 1개로 축소하여 제안한 수정된 설계안이다.

또한, <그림 9>는 제안된 수정 설계안에 대하여 시뮬레이션 모델을 적용하여 이에 대한 결과를 평가한 내용을 나타낸 것이다.

레이아웃 수정안은 기존 레이아웃과 비교해서 해체자동차 수가 5600여대에서 7300여대로 향상되었음을 확인할 수 있으며, 레이아웃 전반의 평균 가동률이 46%에서 56%로 향상되고 각각의 해체작업장과 부대설비의 가동률들이 전반적으로 향상됨과 동시에 공정간 평균화되어 해체작업의 효율성이 향상된 레이아웃이라고 판단할 수

있다. 결과를 정리하면 다음 <표 1>과 같다.

<표 1>에서의 예상이익은 인건비만 고려한 것으로 평균해체시간과 단위시간당 인건비를 계산한 것이다. 해체를 위한 공장 설립 및 레이아웃의 변경시 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 및 설계시스템을 통하여 실제상황에서는 막대한 비용과 시간을 투입하여야 하는 상황에서 본 시뮬레이션 모델과 해체플랜트 레이아웃 설계시스템을 이용하면 다양한 레이아웃 설계 및 변경안에 대하여

<표 1> 레이아웃 수정 결과 비교

	초기 레이아웃	수정 레이아웃
투입자동차수	5,676(대)	7,381(대)
해체자동차수	5,670(대)	7,374(대)
평균가동율	45.9(%)	56.1(%)
평균해체시간	127.3(min)	126.7(min)
예상이익	55,050	80,610

설계자가 쉽게 이해할 수 있도록 가시화는 물론, 성능을 미리 예측하여 레이아웃 설계안의 성능평가 및 레이아웃의 최적화에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서 제품의 수명이 다한 폐기물을 처리하는 폐자동차 해체시스템의 레이아웃에 대한 성능 및 효율을 평가하여 최적의 시스템을 구축하기 위한 애니메이션 모델과 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 2D로 설계된 레이아웃과 작업의 진행상황 등을 직관적으로 이해할 수 있게 3D 애니메이션기능을 활용하여 GUI를 구축하였고 C++ 프로그래밍 언어를 이용하여, 시뮬레이션 기능을 편리하게 수행할 수 있도록 해체플랜트 레이아웃 설계시스템에 통합하였다.

본 연구에서 제안한 모델을 적용하여 초기 설계안에 대한 평가를 수행하였고 개선을 위한 액상류 회수작업장(Pre-treatment)을 추가하고 독립작업장(Pre-station) 개수를 1개로 축소하여 레이아웃을 조정한 결과 가동률 및 평균해체시간 등에서 효율적으로 운영이 되고 있음을 보여주었다.

본 연구의 결과를 통하여 폐자동차는 물론, 모든 공산품에서 재활용률 제고로 자원절약 및 환경 부담 경감을 통한 폐기물 감소에 따른 수익성 향상을 위한 해체시스템 설계에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대할 수 있으며 향후 본 연구에서 고려하지 못한 작업속도와 효율성을 고려하는 데 있어 중요한 요소인 분해 용이성 및 작업 접근성과 같은 요소를 고려하여 연구를 확장할 필요가 있을 것이다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] 손영태, 표정호, 박면응, “시뮬레이션 기반 폐자동차 해체시스템의 개념설계”, 한국정밀공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, 2003.
- [2] 오재현, “일본의 자동차 리사이클링 현장 투어”, 월간 폐기물 21, 제 1권, 제 7호, pp. 1-7, 2000.
- [3] 이화조, “자동차 Recycling을 위한 분해기술”, 대한기계학회지, 제36권, 제2호, pp. 120-136, 1996.
- [4] J. B. T. Zimmerman, “Dutch ELV Recycling in Progress”, International Automobile Recycling Congress Proceedings, March, 2001.
- [5] Heinz-Leo Wertz, “Automobile recycling loop”, International Automobile Recycling Congress Proceedings, March, 2002.

## 저 자 소 개

### 손 영 태



고려대학교 산업시스템정보공학과 박사수료, 한국과학기술연구원 지능인터랙션센터 연구원

주소: 서울특별시 성북구 월송동 5

### 임 석 진



연세대학교 산업시스템경영과 공학박사, 한국과학기술연구원 Post-Doc, 인덕대학 테크노경영과 재직중.

주소: 서울특별시 노원구 초안산길 14

### 박 면 응



University of Manchester Inst. of Sci. & Tech 기계공학과 공학박사, 한국과학기술연구원 지능인터랙션센터 책임연구원

주소: 서울특별시 성북구 월송동 5