

## 시뮬레이션 기반 폐자동차 해체시스템의 개념설계

손영태\*, 표정호, 박면웅(한국과학기술연구원 CAD/CAM연구센터)

### Simulation Based Conceptual Design of ELV Dismantling System

Young-Tae Sohn, Jeong-Ho Pyo, Myon-Woong Park(KIST CAD/CAM Research Center)

#### ABSTRACT

This paper discuss basic functional construction and plant layout of a ELV dismantling system that can maximize the reusability of parts and the recoverability of materials by dismantling ELV rationally and efficiently. "Island" type was selected for the system configuration considering processing amount, economical efficiency, and effectiveness. The system is supported by the information system, and composed of dismantling stations and handling equipments. The layout of the stations was determined after simulation and optimization using commercial software package, Arena and OptQuest. The objective of the optimization was maximum profit while the system capacity is considered as constraint. The environmental load of ELV can be minimized when the composition and function of each station are embodied in detail and the system is interfaced with shredding operation.

**Key Words** : End-of-Life Vehicle (ELV; 폐자동차), Dismantling system (해체시스템), Dismantling information system (해체정보시스템), Recycling (재활용), Simulation (시뮬레이션)

#### 1. 서론

제조기술에 있어서 70-80년대는 대량생산을 위한 생산성 향상 및 원가절감이, 90년대에는 고품질 유지 및 납기단축이 주안점이었다. 90년대 후반부터는 대량생산품에 의한 환경위해가 점차 심각해짐에 따라 제품의 생산, 사용, 회수, 폐기 등의 전과정에 있어서의 환경친화성이 평가의 중요한 요소로 대두되었다. 향후 출시할 자동차는 개발단계에서 제품 전 주기에서의 환경성 평가를 설계에 반영하여, 환경부담을 최소화하여야 하며, 기 생산된 자동차에 대해서는 효율적으로 해체하여, 부품의 재사용, 소재의 재활용을 극대화 할 수 있는 시스템적 기술의 개발과 적용이 시급하다<sup>1, 2</sup>. BMW, Ford, VW 등 구미 자동차 제조업체들은 자체적으로 분해설비를 설치하여, 효과적인 분해 방법론에 대한 연구를 수행하고 있으며, 그 결과를 설계에 반영하여 재활용성이 높고 환경친화적인 모델 설계에 응용하고 있다. 또한, EU의 자동차 재활용율 95%를 2015년에 달성하기 위한 단계적인 법제화와 제조업체의 폐기물 회수 의무화는 전 세계적으로 확산될 것으로 보여 모든 자동

차 업계의 현안이며, 수출 경쟁력과 국가 경쟁력에 직결되는 문제로 대두되고 있다<sup>3</sup>. 국내 자동차 산업은 과거 20여년간 생산량이 수직 상승하여 막대한 양의 자동차 폐기물이 발생될 것으로 예측되고, 향후 몇 년 안에 매립지 부족, 환경위해 등의 문제가 심각하게 대두될 전망이다. 국내 폐차업계는 영세하며, 재활용이나 청정성이 결여된 해체를 수행하고 있다. 따라서 이를 대비하기 위한 공동의 노력으로서 경제적이고 환경친화적인 폐자동차 해체 및 재활용 기술개발이 필요하며, 국제적으로도 23개의 주요 자동차 제조업체들이 IDIS (International Dismantling Information System) 협회를 구성하여 폐자동차의 재활용 활성화를 위하여 관련 정보를 제공하고 있다.

본 연구에서는 폐자동차를 경제적이고 환경친화적으로 해체하여 자동차 폐기물의 환경부담을 최소화 할 수 있는 해체시스템의 기본구성과 목표 해체량을 최소의 비용으로 처리할 수 있는 플랜트의 layout을 시뮬레이션 기반 최적화 기법으로 설계하였다. 또한, 해체시스템을 지원하는 해체정보시스템을 개발하여 적용함으로써 차량상태에 따른 정보기반 해체가 가능하도록 하였다.

## 2. 폐자동차 리사이클링

### 2.1 리사이클링 프로세스

폐자동차의 재활용 프로세스는 Fig.1과 같이 크게 해체(dismantling)단계와 슈래딩(shredding)단계로 구분할 수 있다. 해체단계에서는 폐자동차의 상태에 따라 부품들의 재사용 가능성을 판단하여 회수하고, 소재별 재활용율을 증가시키기 위한 분해를 수행하여, 최종적으로 차피를 압착하여 슈래딩 단계로 이송한다. 해체단계에서 회수된 부품들은 검증과 평가를 통하여 중고 부품으로 판매되거나 재생되어 재활용된다. 슈래딩 단계에서는 차피를 작은 크기로 절단하여 자력, 풍력, 중액선별 등의 선별과정으로 소재 재활용을 위한 재질별 회수가 이루어진다. 또한, 슈래딩에서는 ASR(Automobile Shredding Residue)이 발생되며, 이에 포함된 소재자원들은 회수되어 재활용되고, 그 이외의 잔류물들은 소각되어 에너지로 회수되거나 매립된다<sup>4</sup>.

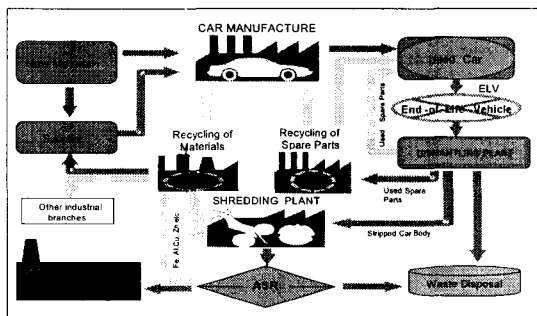


Fig. 1 ELV recycling process

### 2.2 해체 프로세스

폐자동차의 해체 프로세스는 폐자동차의 청정해체를 통하여 부품의 재사용, 소재의 재활용 등의 재활용 가치를 증가시킬 수 있도록 수행되며, 다음과 같은 주요 과정과 순서를 갖는다.

- ◆ 폐자동차 접수 및 점검
- ◆ 잔류액체 제거
- ◆ 차체 외부, 내부해체
- ◆ 잔류차체 압축
- ◆ 해체부품 분류, 검증, 관리 및 판매

접수 및 점검과정에서는 해체부품 관리에 필요한 차량관련 주요 정보가 기록되며, 차량검사를 통한 재사용 가능부품의 목록이 작성된다. 잔류액체 제거 과정에서는 환경유해의 가장 큰 요인인 폐 잔류액체, 즉, 연료, 브레이크액, 냉각수, 윤활유 등을 먼저 제거하여 환경 친화적인 해체가 가능하도록 한다. 차체 해체과정에서는 부품의 재사용이나 소재의 재활용을 고려하여 차량이 해체되며, 해체가 완료된

차체는 압축되어 슈래딩 과정으로 이송된다. 또한, 해체과정에서 분리된 부품들은 재활용을 고려한 분류와 검증을 통하여 관리되고 판매된다.

### 2.3 해체방식

폐자동차의 해체 프로세스를 구현한 해체 플랜트는 해체작업의 진행방식과 규모에 따라 Island 타입, Line 타입, 자동화 타입 등으로 구분할 수 있으며, Fig. 2와 같은 특성과 장단점을 갖고 있다. Island 타입은 중소 폐차장에서 차 한대를 중심으로 작업자가 일반 공구를 사용하여 해체하는 방식으로 초기 투자가 적고 차중에 영향을 받지 않는 유연한 시스템이라고 할 수 있으나 처리능력이 작고 효율이 떨어지는 단점이 있다. Line 타입은 신차 제조라인과 같은 개념으로 다수의 작업장으로 구성되어 컨베이어로 차량을 이송하는 방식으로 용량이 크고 효율적이지만 초기 투자비가 큰 단점이 있다. 자동화 타입은 Line 타입을 발전시켜 차량인식, 해체작업을 센서나 로봇류들이 수행하는 무인화 시스템으로 비용, 효율, 용량의 장단점이 Island 타입과 극단적인 반대라고 볼 수 있다.

	Island Type 해체 스테이션	Line type 해체 시스템	해체 자동화시스템
이송	forklift	conveyor	conveyor
작업대	lift	work station	workstation
Handling	hoist, forklift	반전장치	반전장치
작업 주제	작업자	작업자	Sensor류/자동화 기구
엑상류제거	단위 장비	drain station	drain station
정보	모델정보	공정정보	최적공정정보
장점	유연성, 경제성	처리속도	처리속도, 무인화

Fig. 2 Types of dismantling system

## 3. 폐자동차 해체시스템의 설계

### 3.1 해체시스템의 개념설계

폐자동차 해체시스템은 2.3과 같이 구분되고, 각각의 장단점을 갖고 있으나, 경제성, 처리량, 효율성 등을 고려하여 Island 타입으로 설계하였고, 타 타입의 장점을 활용할 수 있도록 작업장(work station) 개념과 엑상류 제거장치, 반전장치 등의 장비와 해체 정보시스템으로 보완하여 정보기반 해체시스템이 되도록 하였다. Fig. 3은 설계된 해체시스템의 구성과 기능을 표현한 것으로 9개의 특화된 작업장으로 구성되며, 해체정보시스템의 지원을 받아 분해작업을 수행하게 된다. 각각의 작업장은 폐자동차의 해체과정을 분석/평가하여 정의된 9개의 표준해체과정을 수행하게 되며, 각각의 기능은 다음과 같다.

① RECEPTION: 폐자동차의 접수하여 차량의 상태

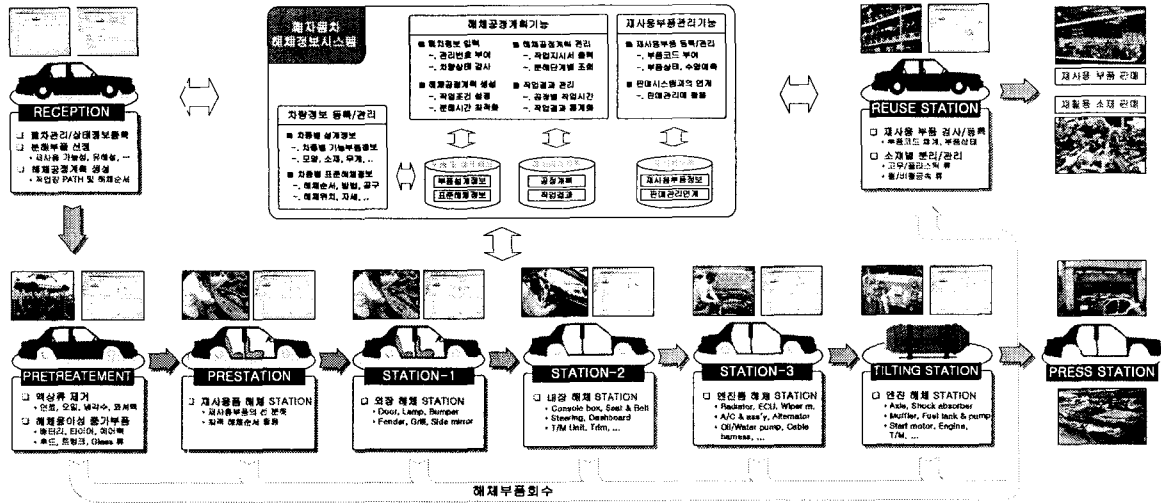


Fig. 3 Architecture of ELV dismantling system

- 정보와 관리정보를 정보시스템에 등록하고, 해체 공정계획을 수행
- ② **PRETREATMENT**: 액상류를 제거하고, 배터리, 타이어 등의 해체 용이성 증가부품을 해체
  - ③ **PRESTATION**: 재사용 부품의 선 분해를 수행하는 작업장으로 재사용부품의 안전회수로 해체시스템의 경제성을 증가시키는 작업장
  - ④ **STATION-1**: 범퍼, 도어, 램프류 등의 외장부품을 해체하는 작업장
  - ⑤ **STATION-2**: 시트, 콘솔박스, 계기판 등의 내장부품을 해체하는 작업장
  - ⑥ **STATION-3**: 라디에이터, 에어컨, 배전기 등의 엔진룸에 부착된 부품을 해체하는 작업장
  - ⑦ **TILTING STATION**: 차체를 반전시켜 하체에 부착된 부품들과 엔진을 해체하는 작업장
  - ⑧ **PRESS STATION**: 차피를 압축하는 작업장
  - ⑨ **REUSE STATION**: 분해된 부품들을 재질별로 분리 저장하고, 재사용 부품의 검사, 관리, 판매를 수행하는 작업장

### 3.2 해체시스템의 Layout 설계

해체시스템의 플랜트 layout은 표준해체과정과 작업장의 기능을 기반으로 각 작업장과 이동설비를 직관적으로 배치한 layout을 Arena를 활용한 시뮬레이션으로 시스템의 시뮬레이션 특성을 파악하고, 보완하는 과정들을 반복적으로 수행하여 개략적인 layout을 결정하고, OptQuest를 이용하여 투자비용, 해체량, 경제성 등을 고려한 최적 설비용량을 결정하였다.

#### 3.2.1 Layout 구성 및 시뮬레이션 정보

Fig. 4는 최적화로 결정된 해체 플랜트의 layout

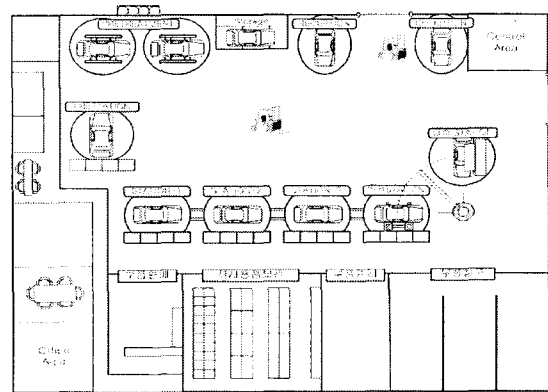


Fig. 4 Layout of ELV dismantling plant

설계안으로 약 1500(m<sup>2</sup>)의 면적에 10개의 작업장, 해체부품을 관리하는 공간, 기타 부대시설 공간으로 구성되어 있다. RECEPTION과 PRETREATMENT 작업장은 각각 2개이며, 2대의 지게차와 STATION-1과 TILTING STATION 사이의 차량 이송을 수행하는 레일장치, TILTING STATION과 PRESS STATION 사이의 차량 이송을 수행하는 크레인 등을 활용하였다. 이송장치들은 시뮬레이션 평가과정에서 선정되었다. 해체시스템의 시뮬레이션에 적용된 데이터는 Table 1과 같으며, 년 250일, 일 8시간의 해체작업을 수행하는 것으로 가정하여 시간을 설정하여 수행하였다. 최적화 과정에서는 각 설비의 수명을 10년으로 가정한 연 감가상각비와 1만원/(시간)의 작업자 비용만 고려되었으며, 건축비나 기타 유지비는 고려되지 않았다. 또한, 각 작업장의 작업시간 정보는 차량의 상태정보를 반영하기 위하여 차량의 상태를 13가지로 구분하여 각각의 작업시간을 할당하였으며, ±20%의 상/하한을 갖는 삼각분포로 가정하였다.

Table 1 Simulation parameters

작업장 및 설비	비용(만원)	작업시간(분)
RECEPTION	2500	20
PRETREATMENT	8000	25
PRESTATION	2500	15
STATION-1	2500	5
STATION-2	2500	15
STATION-3	2500	5
TILTING STATION	3000	10
PRESS STATION	7000	3
Storage Shelves	30	-
Crane	1000	-
Forklift	2000	-
Rail	5500	-

이송설비	속도(m/min)	Loading/Unloading(분)
Crane	4	1
Forklift	30	1
Rail	6	0.5

### 3.2.2 최적화 수리모델

투자비용, 해체량, 경제성 등을 고려한 최적 해체 시스템의 layout을 결정하기 위하여 다음과 같이 연간 5000대 이상을 최소의 비용으로 처리할 수 있는 수리모델을 적용하였다. 즉, 설비의 적정 용량과 인력규모를 결정하여 소요 비용이 최소화되도록 하였다. 수리모델의 첫 번째 제약식은 연간 처리량이 5000대 이상 되어야 한다는 것이고, 두 번째 제약식은 각 작업장 작업자의 활용도(utilization)가 80%를 넘을 수 없다는 것을 의미한다.

$$\text{Min. } Z = EC + VC + HC$$

$$\text{s.t. } \text{OutCounter} \geq 5000$$

$$0 \leq U(w_i) \leq 0.8$$

EC = 각 작업장 설비의 연 감가상각비 합

VC = 차량 이동장비의 연 감가상각비 합

HC = 연 작업자 비용

$U(w_i)$  = 작업자  $i$ 의 utilization

### 3.2.3 시뮬레이션 최적화

OptQuest는 상용 시뮬레이터인 Arena에 탑재하여 활용할 수 있는 최적해 탐색모듈로<sup>6</sup> 정의된 수리모델을 적용하여 각 작업장의 설비와 작업자 수를 결정하였다. Fig. 5는 OptQuest에서 최적해를 탐색하는 과정을 그래프로 나타낸 것이고, Table 2는 OptQuest가 제시한 최적해로 연 5000대 이상을 최소의 비용으로 처리할 수 있는 해체시스템의 설비와 작업자의 최적 용량이다. Table 3은 최적 용량을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과로 약 6000대를 27,250만원의 비용으로 처리할 수 있음을 알 수 있다.

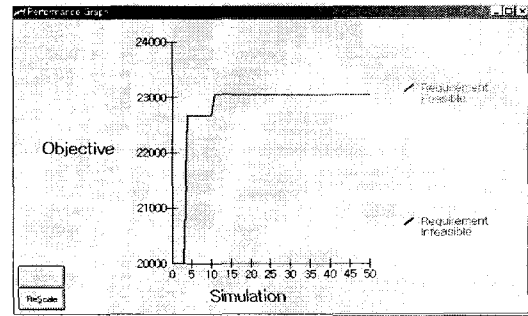


Fig. 5 Optimization process graph

Table 2 Optimization result

작업장 및 설비	설비용량(대)	작업자(인)
RECEPTION	2	1
PRETREATMENT	2	2
PRESTATION	1	1
STATION-1	1	2
STATION-2	1	
STATION-3	1	
TILTING STATION	1	1
PRESS STATION	1	
Crane	1	-
Rail	1	-
Forklift	2	2
Storage Shelves	0	-

Table 3 Simulation result from the optimized system

작업장 설비의 연 감가상각비	4,100 (만원)
연 작업자 비용	22,000 (만원)
이송장비의 연 감가상각비	1,150 (만원)
총 해체비용	27,250 (만원)
폐차 처리대수	5,994 (대)

### 3.3 해체정보시스템 개발

해체정보시스템은 차량설계 및 해체정보 데이터베이스를 기반으로 차량상태에 따른 해체과정의 순서와 해체지원 정보를 생성하여 각 작업장에 제공하여 해체작업의 용이 및 효율적 수행을 지원하고, 해체결과 수집기능, 재사용부품 관리기능 등을 통하여 폐자동차의 환경친화성 정보를 획득하는 시스템이다. Fig. 6은 시스템의 화면으로 폐자동차의 표준해체과정을 지원하기 위하여 폐차정보등록, 해체공정계획, 해체작업지원, 재사용부품등록 등의 주요 기능으로 구성되어 있다.

#### 3.3.1 폐차정보등록

폐차정보 등록기능은 RECEPTION 작업장을 지원하는 기능으로 데이터베이스에 등록된 차량설계 및 해체정보를 기반으로 관리정보, 폐차상태, 재사용

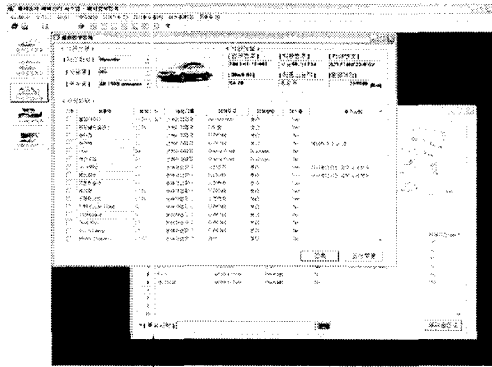


Fig. 6 ELV Dismantling information system

가능 부품, 옵션부품 정보 등의 폐차별 특징정보를 입력받아 해체공정계획과 해체작업 지원에 활용한다. 또한, 분해 대상부품의 선정이나 분해방법의 변경이 가능하도록 하여 차량의 상태, 해체작업장의 여건, 경제성 등을 고려한 해체가 가능하게 하였다.

### 3.3.2 해체공정계획

해체시스템에서 차량상태에 따라 거처야할 각 작업장과 순서, 각 작업장별 분해순서를 결정하는 과정으로 표준해체정보와 차량별 상태정보를 바탕으로 해체환경과 조건을 설정하여 해체공정계획을 생성한다. PRESTATION 작업장에서는 다양한 위치에 부착된 부품들이 분해되므로 본 작업장의 해체순서는 설정된 조건에 따른 최적화를 수행하여 생성된다.

### 3.3.3 해체작업지원

해체작업지원 기능은 각 작업장의 작업자가 해체공정계획에 따라 해체를 수행할 수 있도록 관련정보를 지원하고, 해체결과를 수집하는 기능으로 각 작업장에 입고된 차량의 관리번호를 설정하여 대상부품, 해체순서, 해체도구, 해체방법, 분해도 등의 해체정보를 지원 받는다. 또한, 개략적인 해체시간, 해체부품의 재사용 가능성, 특기사항 등의 해체결과를 입력받아 폐자동차의 재활용성 정보로 활용한다.

### 3.3.4 재사용부품등록

재사용부품등록 기능은 재사용이 가능하다고 선정된 부품들을 회수하여 데이터베이스에 등록하는 기능으로 폐차등록 단계와 해체단계에서 재사용 가능성이 확인된 부품들을 검사, 평가하여 관리번호별로 조회하여 등록할 수 있도록 하였다. 등록과정에서는 부품의 상태와 사진은 물론 부품코드를 부여하여 재사용부품의 단일화된 구분이나 중고부품 판매시스템과의 연계를 통하여 사용 활성화를 유도할 수 있도록 하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 폐자동차를 경제적이고 환경친화적으로 해체하여, 부품의 재사용 및 소재의 재활용을 극대화 할 수 있는 해체시스템의 기본구성과 이를 적용한 해체플랜트의 layout을 설계하였다. 개발된 시스템은 해체정보시스템의 지원을 받는 정보기반 해체시스템으로 폐자동차 해체과정 분석 및 해체시험을 통하여 정의된 9개의 표준해체과정을 수행하는 특화된 해체작업장과 핸들링 장비들로 구성된다. 또한, 해체플랜트의 layout은 Arena와 OptQuest를 활용한 시뮬레이션 기반 최적화 기법으로 목표 해체량을 최소의 비용으로 처리할 수 있도록 설계하였다. 해체시스템을 지원하는 정보시스템은 차량상태에 따른 해체지원 정보를 생성하여 각 작업장에 제공하며, 해체결과 수집기능, 재 사용부품의 회수 및 관리기능 등을 통하여 폐자동차의 재활용성 정보를 획득할 수 있도록 하였다. 각 해체작업장의 구성과 기능을 구체화하고 슈래딩과 연계된 플랜트로 적용하면 자동차 폐기물의 환경부담을 최소화할 수 있고, 폐차량의 재활용성 정보를 제공함으로써 재활용을 고려한 환경친화적인 차량설계를 지원할 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 산업폐기물 재활용 기술개발 사업으로 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

1. 이화조, "자동차 Recycling을 위한 분해기술", 대한기계학회지, 제36권, 제2호, pp. 120-136, 1996.
2. 오재현, "일본의 자동차 리사이클링 현장 투어", 월간 폐기물 21, 제 1권, 제 7호, pp. 1-7, 2000.
3. J. B. T. Zimmerman, "Dutch ELV Recycling in Progress", International Automobile Recycling Congress Proceedings, March, 2001.
4. Heinz-Leo Wertz, "Automobile recycling loop", International Automobile Recycling Congress Proceedings, March, 2002.
5. Farrington. P. A. and J. J. Swain, "Design of Simulation Experiments with Manufacturing Applications", Proceeding of the 1993 Winter Simulation Conference, pp. 69-75, 1993.
6. W. David. Kelton, Randall P. Sadowski & Deborah A. Sadowski, "Simulation with Arena", 2nd Edition, McGraw-Hill, 2002.