

시뮬레이션을 통한 폐자동차 최적 해체시스템 개발

양대길*, 이홍철**

*고려대학교 산업경영공학과, 한국과학기술연구원(KIST)

**고려대학교 산업경영공학과

e-mail : ydg2645@korea.ac.kr

Development of End-of-Life Vehicle Optimum Dismantling System Using Simulation

Dae-Gil Yang*, Hong-Chul Lee**

*Dept of Industrial Management Engineering, Korea University,
Korea Institute of Science and Technology(KIST)

**Dept of Industrial Management Engineering Korea University

요 약

자동차 폐차사업자들은 대부분 소규모로 영세하게 운영되고 있으며, 비효율적인 폐차 프로세스로 인해 폐차 소유자는 물론 폐차처리장까지 불이익을 받고 있다. 이를 위한 폐차 시스템에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 하지만 기존에 개발되어진 폐차 해체시스템의 경우는 국내 폐차업계에 적용하기에는 경제적, 실용적으로 현실성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 폐차에 대한 효율성 극대화와 범용성 확보를 위해 시뮬레이션을 통한 폐자동차 해체시스템을 개발하고자 한다. 시뮬레이션을 통한 폐차 해체시스템의 사용은 복잡한 공정 또는 시스템의 설계 및 운영결과에 대한 효율적 분석이 가능하며, 다양한 위치 및 작업내용을 변경시켜 여러 대안을 마련할 수 있고, 이에 대한 결과를 미리 알아봄으로써 적은 시간과 비용으로 현장상황에 맞는 적절한 시스템을 구축할 수 있게 해주는 장점이 있다. 또한 최적 해체경로 시스템의 적용으로 시스템의 효율을 향상시켰다. 개발되어질 시스템은 높은 범용성 및 유연성 확보로 국내 폐차 업계의 발전에 크게 이바지 할 것이다.

1. 서론

최근 환경문제에 대한 관심이 커지면서 지속적으로 늘어나는 폐자동차의 해체기술 및 친환경적 폐차의 필요성이 증대되었다. 하지만 폐자동차 해체 프로세스 및 설비개발에 대한 연구는 다소 제한되어 왔다.

EU의 차량관련 환경규제와 관련법 제정으로 폐자동차의 재활용 및 재사용을 적극 유도하고 있다. EU에서 제정한 법규를 보면 자동차에 사용된 부품의 80%를 재사용 및 재활용하도록 규제하고 있으며, 열회수를 포함 85%이상을 재활용 하도록 규제하고 있다. 이러한 규제내용은 점차 강화되어 2015년에는 열 회수를 포함 95%이상을 재활용해야하며, 이중 10%만 열 회수로 인정되어 전체 차량중량의 85%를 재활용해야 한다. 우리나라도 2008년 1월 1일 자원순환법이라는 환경법을 제정하여 모든 완성품 제조업체들에게 이를 적용하도록 하고 있다.

이를 효과적으로 반영하기 위해서는 효율적 해체플랜 프로세스 적립 및 환경 친화적으로 폐자동차를

해체하는 시스템 개발이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 폐자동차를 경제적이고 환경 친화적으로 해체하여 자동차 폐기물의 환경 부담을 최소화할 수 있는 해체시스템의 기본구성과 목표 해체량을 최소의 비용으로 처리할 수 있는 시스템을 시뮬레이션 기반으로 설계할 것이다. 또한 국내 폐차업체라면 어디서든 사용 가능하도록 범용성을 확보한 해체시스템을 개발하여 적용함으로써 국내 폐차업계의 발전에 이바지하고자 한다.

시스템이 범용성을 확보하기 위해서는 사용이 쉽고 간단하여야 하며, 변화에 따라 여러 대안을 분석할 수 있어야 할 것이다. 또한 폐차자의 부담감소와 폐차장 사업자의 이익 극대화를 위해서는 부품 해체시 최적의 경로를 확인할 수 있어야 한다. 하지만 모든 폐자동차의 차종 및 부품이 각각 상이하며 정부의 규제 또한 충족하여야 하기 때문에 이를 효율적으로 파악할 수 있는 시스템이 필요하다. 따라서 확정적 모델(Deterministic Model)을 다루는 최적화 방법론 보다는 가변성을 반영할 수 있고 정부의 환

경규제를 다양한 시나리오로 설정하고 정량적인 결과를 제시함으로써 명확한 해결책이나 의사결정을 지원해줄 수 있는 시뮬레이션을 통한 해체 시스템의 개발이 필요하다.

2. 이론적 배경 및 관련연구

2.1 이론적 배경

2.1.1 폐자동차의 해체

폐자동차의 해체는 완전하게 끝까지 이루어져야 하는 조립과는 대조적으로 기술적, 경제적 제약 때문에 일반적으로 완전하게 이루어지지 않는다는 것을 불완전 해체(incomplete disassembly)라 부르는데 기술적 제약은 해체 불가능한 결합상태에 의해 발생하고, 경제적 제약은 제품에 포함된 부품을 회수하면서 얻을 수 있는 수익(revenue)과는 비례하지 않은 해체비용에 의해 발생한다. 재료 회수 후에 남게 되는 잔여물의 양을 최소화하기 위해서 사용하는 방법으로 선택적 해체(selective disassembly)라는 방법이 있다. 이는 효율적 재활용 공정 설계를 가능하게 할뿐만 아니라 제품의 완전한 재료 수명주기를 최적화 할 수 있는 제품설계의 새로운 개념을 지원하기도 한다[3].

2.1.2 폐자동차 재활용 과정

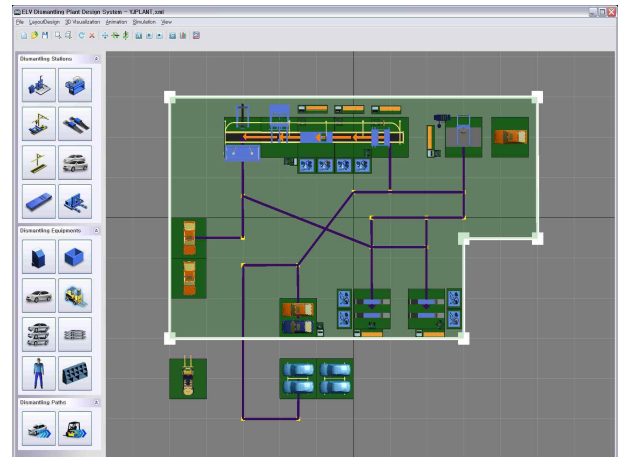
폐자동차의 재활용과정은 해체(dismantling)단계와 슈래딩(shredding)단계로 구분할 수 있다. 해체단계에서는 폐자동차의 상태에 따라 부품들의 재사용 가능성을 판단하여 회수하고, 소재별 재활용률을 증가시키기 위한 분해를 수행하여, 최종적으로 차피를 압착하여 슈래딩 단계로 이송된다. 해체단계에서 회수된 부품들은 검증과 평가를 통하여 중고 부품으로 판매되거나 재생되어 재활용된다. 슈래딩 단계에서는 차피를 작은 크기로 절단하여 자력, 풍력, 중액선별 등의 선별과정으로 소재 재활용을 위한 재질별 회수가 이루어진다. 특히, 슈래딩 과정에서는 ASR (Automobile Shredding Residue)이 발생되며, 이에 포함된 소재 자원들도 추가적으로 회수되어 재활용되고, 그이외의 잔류물들은 소각되어 에너지로 회수되거나 매립된다.

2.2 관련연구

2.2.1 지능형 해체플랜트 시스템

아래의 [그림 1]은 2005년 4월 19일 한국과학기술연구원(KIST) 박면웅 박사팀이 재활용 전문업체인

(주)이엔텍 및 수원대와 함께 개발한 ‘지능형 폐자동차 해체시스템’[1]이다.



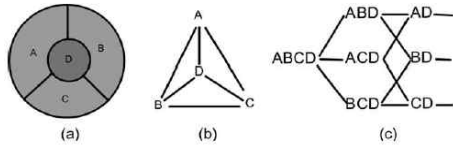
[그림 1] 지능형 해체플랜트 시스템

본 시스템은 국내 최초로 전산 관리체계를 접목하였으며 연간 6000대의 폐자동차를 해체할 수 있는 규모로 설치되었는데, 폐자동차를 해체하기 전에 연료 및 각종 오일을 먼저 뽑아내 환경오염을 감소시키고 소프트웨어를 기반으로 작업자에게 폐자동차의 상태나 필요한 공구에 대한 정보를 제공해 최적의 해체방법을 알려준다는 게 가장 큰 특징이다. 또한, 이러한 해체시스템으로 EU의 폐자동차 규제 목표인 재활용률 95%를 달성할 수 있었다.

하지만, 기 개발된 시뮬레이터는 고가이며 기능적 제한으로 시뮬레이션 모델의 순차적인 인터페이스가 불가능하고, 특히 신규 설계나 설계 변경이 이루어지면 매번 시뮬레이션 툴로 시뮬레이션 모델을 생성, 수정해야하는 번거로움이 존재하기 때문에, 설계 기능과 통합되어 폐자동차 해체 플랜트의 해체과정을 전용으로 시뮬레이션 할 수 있고 어떠한 환경에서도 범용적인 사용이 가능한 모듈 개발이 필요하다.

2.2.2 최적 해체경로 생성

Lambert(2002)는 90년대부터 최근까지 최적 해체 경로에 관해 연구하고 있다. 각종 전자 부품에 대해 환경적 측면에서의 해체비용 최적화에 대해 연구한 바 있으며 최적 해체경로 생성에 관한 각종 개념 등을 적립하였다. 또한 최적 해체경로 생성을 위한 선형 계획으로 최소 해체비용과 최대 이익의 해체경로를 제시한 바 있다.



[그림 2] Disassembly path of Lambert

위의 [그림 2]는 Lambert의 4부분으로 구성된 예제 어셈블리를 나타낸 것이다. (a)는 조립도면을 나타내고 (b)는 연결 다이어그램 (c)는 분해 그래프를 나타내고 있다.

2.2.3 국내·외 기술개발

유럽과 일본에서는 자동차 업계와 폐차 관련 업계가 컨소시엄을 형성하여 해체 Pilot-Plant를 공동하여 해체의 용이성 및 폐기물 감소방안을 현실화 하고 있으며, 독일에서는 이미 폐차 무상회수의 의무화가 '98년 4월에 입법화 되어 자동차 메이커는 폐차 부품의 분해, 분리, 수거, 재생형 친환경 시스템을 구축하고 있다.

재활용 모니터링을 위한 재활용률의 단계별 정량화는 EU Directive등에서 요구하는 목표 재활용률 달성에 유용한 수단으로, 네덜란드 Delft 대학 등에서 수학적 모델을 개발하고 있으나, 제조업체, 해체업체, 분쇄업체 등 모든 입장에서 공인하는 방법론이 없는 상태이다.

국내 업체 중에서는 현대자동차가 해체용이 설계 기술(DFD : Design For Disassembly) 개발(1998년) 및 환경친화적 자동차개발 프로그램 적용 등으로 유럽 폐차 규정과 중금속사용 규정에 대한 능동적 대응체계를 구축하고 실행하고 있으며, 2003년부터 그린구매정책 수립 및 친환경공급관리(SCEM)사업을 통해 협력업체의 환경경영체제 구축하였다. 또한 2005년 폐자동차의 해체공정 개발을 위해 친환경적 해체공법과 부품해체기술을 개발하였다.

해체과정의 시뮬레이션 모듈은 Arena 또는 AutoMod 등과 같은 상용의 시뮬레이션 툴을 활용하면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있겠지만, 상용 시뮬레이션 툴의 기능적인 제한으로 시뮬레이션 모델의 순차적인 인터페이스가 불가능하고, 특히, 신규 설계나 설계변경이 이루어지면 매번 상용 시뮬레이션 툴로 시뮬레이션 모델을 생성, 수정해야 하는 번거로움이 존재하기 때문에, 설계기능과 통합되어 폐자동차 해체플랜트의 해체과정을 전용으로 시뮬레이션 할 수 있는 모듈을 개발하고자 한다.

3. 시뮬레이션을 통한 폐자동차 최적 해체시스템

본 연구에서는 기존의 지능형 해체 플랜트 시스템에 최적 해체경로 시스템을 도입하여 효율성을 극대화한 폐차 처리시스템을 개발하고자 한다. 또한 기존 시스템의 비유연성과 일반 폐차사업장에서는 사용하기 힘든 어려운 시스템이 아닌, 쉽고 간단한 작업으로 해체 플랜을 완성할 수 있는 시스템이다.

3.1 시뮬레이션 프로세스

폐자동차 해체 플랜트는 부지형태에 따라 다양한 레이아웃들이 가능하며, 개발된 폐자동차 해체 시뮬레이션 모듈은 이러한 여러 대안에 대한 평가를 수행하는데 있어 유용한 기능을 제공하여 주는 시뮬레이터이다. 즉, 다양한 위치 및 작업내용을 변경시켜 여러 대안을 마련할 수 있고 이에 대한 결과를 미리 알아봄으로써 적은 시간과 비용으로 현장상황에 맞는 적절한 시스템을 구축할 수 있게 해주는 장점이 있다.

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, 평균 가동률 등의 정보를 출력으로 생성한다. 본 폐자동차 해체 시뮬레이션 모듈의 수행절차는 다음 장에서 자세히 살펴보도록 한다.

3.2 최적 해체경로의 적용

본 연구에서 해체 경로의 결정은 Lambert의 해체 경로 생성 이론에 따라 가장 많은 이익을 남길 수 있는 해체경로를 찾는 것이다. 문제는 다음과 같은 식 (1)의 모델을 따른다. 이를 위해 각각의 부품 군에는 부가가치가 지정되고, 각각의 해체작업에는 해체비용이 지정된다. 이 때 부품 군에는 초기상태의 폐기제품이 포함된다. 그리고 해체경로는 각각의 단일부품으로 해체될 때까지 뿐만 아니라, 부품 군을 형성하도록 중간에서 멈추게 되는 모든 불완전 해체 경로를 포함한다.

$$\sum_i \sum_j (T_{ij}r_i - c_j)x_j \tag{1}$$

위의 식 1은 프로그래밍에 사용될 공식으로 최적화문제는 식 (1)을 최대로 하는 x_j 를 구하는 문제 $Max.(x_j)$ 로 귀결된다. 이때 식 1은 모든 부품을 해체해서 얻을 수 있는 순수 이익을 의미하게 되며 초기 조건방정식은 다음과 같다.

with the initial condition :

$$x_0 = 1 \tag{2}$$

subject to :

$$\sum_j T_{ij} x_j \geq 0 \tag{3}$$

여기서,

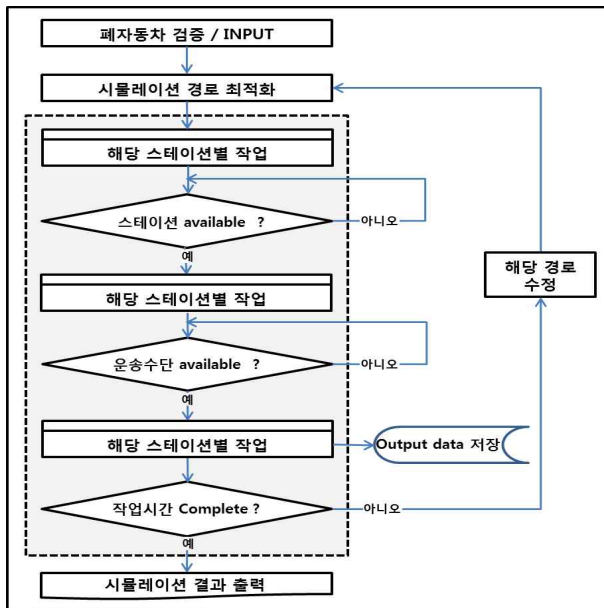
x_j : 특정 해체작업의 수행 확인 변수
 = 1 (해체작업 j 수행하는 경우)
 = 0 (해체작업 j 수행하지 않는 경우)

T_{ij} : 전환 매트릭스

r_i : 부품 군 수익벡터

c_j : 해체작업 비용 벡터

3.3 최적 해체시스템



[그림 3] Simulation Framework

시스템의 프로세스를 살펴보면 먼저 폐자동차 검증 및 초기 Input 단계에서는 입력파일의 작업장, 운송수단, 작업 및 운송시간, 경로 등 정보에 대한 누락여부와 논리적 오류를 검사하게 된다. 이후 최적 해체경로 생성시스템을 통해 해체의 최적경로를 도출하게 되고, 시물레이션 기본정보와 해체 플랜트 레이아웃 설계안의 작업장 이름, 작업시간, 운송수단 이름, 운송시간, 작업자 수, 해체경로 등의 정보를 갖고 있는 입력파일을 로드하게 된다.

로드된 파일은 시물레이션 수행을 통해 각종 정보와 변수 등을 생성하고, 수행상황을 관리하게 되며 시물레이션 수행을 위한 데이터 및 메모리를 초기화하게 된다. 가상적으로 폐자동차 생성하여 첫 작업

과정에 투입하고, 설정된 순서와 작업시간으로 해체 과정을 진행하여 결과정보를 저장하게 된다. 시물레이션 수행결과인 최적 해체 경로, 시물레이션 시간, 투입 및 해체 자동차수, 시스템 평균가동율, 평균 해체대기시간, 예상이득, 작업장별 평균 대기시간 및 가동률 등을 출력파일로 생성됨으로써 프로세스는 마무리된다.

4. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 폐자동차의 경제적이고 환경 친화적인 해체와, 해체 경로의 최적화를 통해 부품의 재활용 효율 및 해체 시 가질 수 있는 수익을 극대화할 수 있는 시스템을 제시하였다. 또한 기존에 개발된 정보기반 해체시스템의 장점을 살리고, 3D 가시화와 장비사용의 유연성을 통해 국내 폐차 업계에 널리 활용될 수 있는, 범용적 시물레이터이다. 시물레이션의 사용으로 저 처리비용, 고효율의 재활용을 실현할 수 있을 것이다. 현재 폐차 처리 시스템은 차량의 개발 및 생산과정과는 관련 없이 차를 버리는 단계에서 시작된다. 이러한 점 때문에 폐차 시각 부품에 대한 정보검색과 분석이 선행되지 못하며, 해체 경로에 대한 내용 또한 선지식에 의존한다. 때문에 비용적 부담은 늘어나게 된다. 따라서 향후 연구로는 이러한 제품의 설계단계와 폐차 시스템을 연계하여, 각 부품의 생산단계에서의 시스템과 폐차할 때의 시스템을 통합(SI: System Integration)한 현장중심의 실무적인 시스템 개발을 통해 생산 및 폐차의 최적 통합 시스템을 구현, 제시하고자 한다.

참고문헌

- [1] 박면용, 손영태 “폐자동차 리사이클링을 위한 정보 기반 해체시스템”, 대한금속재료학회, 제18권, 제4호, pp. 7-13, 8월, 2005.
- [2] Fleischmann M., Krikke H.R., Dekker R., Flapper D.P., "A characterization of logistics networks for product recovery", Omega, pp. 653-666, 2000.
- [3] Lambert, A. J. D., "Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment", Computers and Industrial Engineering, 43, pp.553-575, 2002.
- [4] Zussman, E., & Zhou, M. C., "A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 15, 190 - 94, 1999.