creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

폐기제품의 상태 및 분해라인의 운영을 고려한 선택적 분해계획 수립

Planning for selective disassembly considering condition of End-of-Life product and operation of disassembly line

2023 년 2 월

서울대학교 대학원
산업공학과

손 동 석

폐기제품의 상태 및 분해라인의 운영을 고려한 선택적 분해계획 수립

Planning for selective disassembly considering condition of End-of-Life product and operation of disassembly line

지도교수 홍 유 석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022 년 11 월

서울대학교 대학원

산업공학과

손 동 석

손동석의 공학석사 학위논문을 인준함

2022 년 12 월

위 원 장 _____장 우 진_____(인)

부위원장 _____홍 유 석_____(인)

위 원 _____이 덕 주_____(인)

초록

현대 기업은 이윤뿐만 아니라 환경오염의 방지 및 개선을 위해 노력해야 한다. 그래서 제품을 단순히 생산하고 판매하는 것에서 그치지 않고 폐기 이후의 단계에 대해서도 깊이 고려해야 한다. 폐기 이후의 제품에 대해서 제품의 복구를 하게 되면 경제적, 환경적인 면에서 큰 효과를 볼 수 있다. 이를 위해서는 분해의 과정이 필수적인데, 효율적이고 경제적 분해계획을 수립하는 것이 중요하며, 이것이 분해에 관한 연구의 핵심이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 검사에 기반을 둔 선택적 분해라는 프레임워크 하에서 폐기제품의 상태와 라인의 운영 측면을 동시에 고려하여 라인별 분해공정을 어떻게 구성할 것인지, 폐기제품의 상태에 따라 분류한 그룹별로 어느 라인에서 분해를 할 것인지를 동시에 결정하는 최적화 모델을 제안한다. 이는 제품 측면과 라인 측면을 동시에 고려한 분해계획 수립이라는 점에서 기존 연구와는 차별성을 갖는다. 폐기제품의 상태는 제품이 운영되었던 환경에 의해서 매우 다양하기 때문에 목표부품은 사전에 정해지는 것이 아니라 검사를 통해서 결정되며, 이 검사의 방법으로 분해 전 검사와 분해 후 검사로 나눌 수 있다. 그리고 분해라인을 어떻게 설정하느냐에 따라서 비용과 얻을 수 있는 수익과 비용이 달라짐을 고려하였다. 본 연구의 모델은 기업의 수익을 최대화하는 것을 목표로 하며, 다른 방식을 활용한 분해계획과의 비교를 통해 유효성을 입증하였다.

주요어: 선택적 분해, 폐기제품의 다양한 상태, 목표부품, 상태검사

학번: 2021-27053

목 차

초록 i

목차 ii

표 목차 iv

그림 목차 v

제 1 장 서론 1

제 2 장 선행연구 7

2.1 분해에 관한 전반적인 연구 ····· 7

2.2 설계 단계에서의 연구: Design for disassembly ····· 7

2.3 사용 이후 단계에서의 연구 ····· 9

2.3.1 분해 planning ····· 9

2.3.2 분해 scheduling ····· 10

2.4 연구 의의 ····· 11

제 3 장 모델 13

3.1 연구 프레임워크 및 문제상황 ····· 13

3.2 목표부품모음, 분해작업목록 생성 ····· 15

3.2.1 부품 분류 ····· 16

3.2.2 목표부품모음(TCS, target component set) 생성 ····· 18

3.2.3 분해작업목록(DTS, disassembly task set) 생성 ····· 18

3.2.4 최종 목표부품모음(FTCS), 분해작업목록(FDTS) 생성 ····· 19

3.3 수리적 모형 ····· 21
3.3.1 Notation ····· 21
3.3.2 목적함수 ····· 22
3.3.3 제약조건 ····· 24

제 4 장 사례 연구 25

4.1. 부품 분류 ····· 25
4.2. 초기 목표부품모음(TCS) 생성 ····· 27
4.3. 초기 분해작업목록(DTS 생성 ····· 28
4.4. 최종 목표부품모음(TCS), 분해작업목록(DTS) 생성 ····· 30
4.5. 사례연구 결과 ····· 33
4.6. 유효성 입증 ····· 34
4.6.1 유효성 평가 대안 ····· 34
4.6.2 유효성 평가 결과 ····· 35

제 5 장 결론 및 향후 연구 방향 37

5.1. 결론 ····· 37
5.2. 한계점 및 향후 연구 방향 ····· 38

참고문헌 40

Abstract 45

표 목차

표 3.1 부품의 3가지 타입 ····· 17
표 3.2 파라미터, 변수, 결정변수 ····· 21
표 4.1 부품 분류 및 정보 ····· 27
표 4.2 초기 목표부품모음(TCS) ····· 28
표 4.3 분해 작업(Disassembly task) 정보 ····· 29
표 4.4 부품별 필요 분해작업목록 ····· 29
표 4.5 초기 분해작업목록(DTS) ····· 30
표 4.6 POC의 기대수익 ····· 31
표 4.7 최종 목표부품모음(TCS) ····· 31
표 4.8 최종 분해작업목록(DTS) ····· 32
표 4.9 사례연구 결과 ····· 33
표 4.10 유효성 입증 대안 ····· 35
표 4.11 유효성 입증 결과 ····· 36

그림 목차

그림 1.1 제품 수명주기와 폐기 이후 처리방법 ····· 2
그림 2.1 분해의 Onion ring 모델 ····· 8
그림 3.1 검사에 기반을 둔 선택적 분해 ····· 14
그림 3.2 목표부품모음(TCS), 분해작업공정 목록(DTS) 생성 과정 ····· 16
그림 4.1 제품 구조 ····· 26
그림 4.2 분해작업의 선후 관계 ····· 26

제 1 장 서론

현대산업에서 단순히 제품을 생산하는 것 뿐만 아니라 생산된 제품이 폐기되고 그 이후에 어떻게 처리되느냐 하는 것도 매우 중요한 문제이다. 자원의 고갈과 환경에 관한 관심이 매우 높은 상황에서 수명이 다한 제품을 단순히 폐기하던 그런 시대는 지났다. 사회적, 환경적, 경제적 이익 등을 고려하여 폐기제품의 회수가 더욱 중요해지고 있으며, 제품 복구(product recovery)를 통해서 원자재를 비롯한 에너지 소비를 줄임으로써 자원을 보존하며, 폐기물의 양을 줄여 환경오염을 줄일 수 있다(Ashby, 2012). 폐 전기/전자제품의 폐기물이 지속 증가하고 있으며, 환경과 사람에게 미치는 영향이 크기 때문에(Williams 와 Sasaki, 2003; Hischier 등, 2005; Babu 등, 2007) 국가와 국가를 넘어선 세계적인 기구에서 기업에게 제품의 생산뿐만 아니라 폐기 이후의 처리에 대해서도 책임을 지우고 있다. 이와 관련한 대표적인 사례가 2003년부터 유럽에서 시행되고 있는 폐 전기/전자제품의 회수, 재활용, 재생에 관한 지침인 WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment) 처리지침이다. 이로 인해서 기업이 개인 전자제품 사용자로부터 폐 전기/전자제품을 무료로 회수하도록 하고 있으며, 제조업체는 생태 친화적인 처분, 재사용 등 수집된 폐기물을 친환경적으로 이용하도록 요구되고 있다. 이를 비롯한 다양한 규제로 인해서 제조기업은 폐기이후의 제품의 처리에 대해서 많은 관심과 연구가 진행되고 있다.

이와 더불어 현대산업에서 가장 중요한 이슈 중의 하나가 탄소 중립이라고 할 수 있다. 이는 인간의 활동에 의한 온실가스 배출을 최대한 줄이고 남은 온실가스를 흡수, 제거하여 실질적 배출량을 0으로 만드는 것을 목표로 한다. 탄소중립을 위한 다양한 활동들이 시작되면서 제조산업에서는 탄소의 배출량을

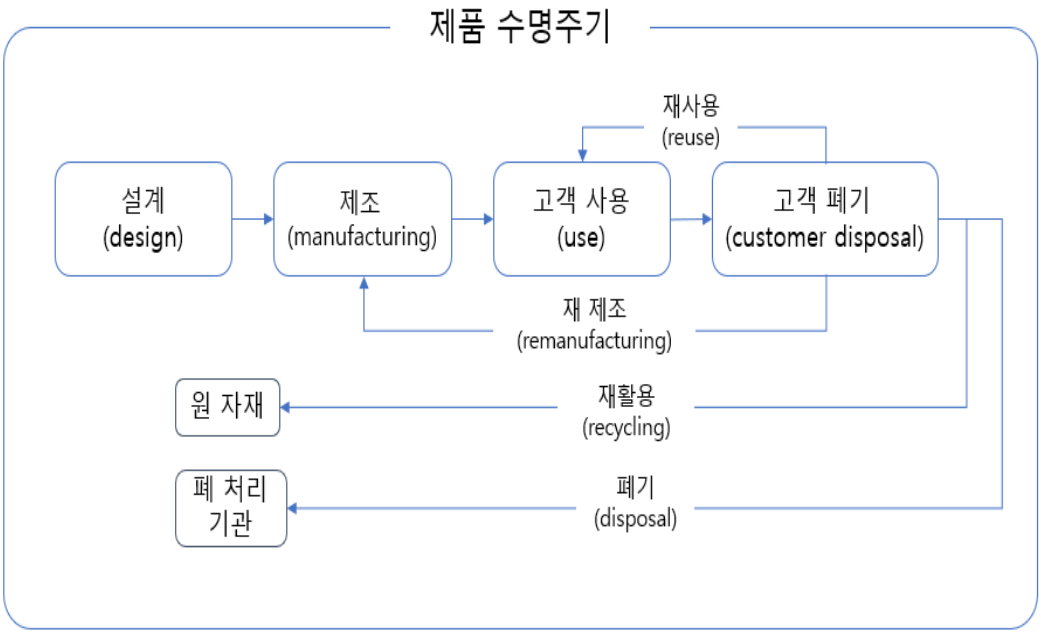


그림 1.1: 제품 수명주기와 폐기 이후 처리방법(Cao와 Folan, 2012)

최대한 줄여야하는데, 기업과 국가는 목표치를 달성하지 못할 경우에는 다양한 규제가 부과된다. 탄소중립 목표달성에 재제조(remanufacturing) 산업이 핵심 산업으로 여겨지고 우리나라 정부 주도의 발전이 이뤄지고 있다. 순환경제 전환을 촉진하기 위해서 재제조 핵심기업을 선정, 재제조 기반의 신사업 발굴 및 사업화를 지원하는 등 정부 주도의 발전이 이뤄지고 있으며('21. 6. 4. 산업통상자원부 보도자료), 사전에 정해진 제품만 재제조 대상으로 허용하던『재제조 대상 제품 고시』를 폐지('22. 4. 20.부)하는 등 관련 규제를 폐지하여 다양한 기업이 이 산업에 뛰어들 수 있는 환경 조성에 힘쓰고 있다.

재제조를 비롯한 제품복구에 있어서 가장 중요한 핵심 과정이 분해의 과정이다(Lee 등, 2001). 이런 분해에 관해서 본 연구에서는 검사에 기반을 둔 선택적 분해라는 프레임워크 하에서 라인별 분해공정을 어떻게 구성할 것인지,

폐기제품의 상태에 따라 분류한 그룹별로 어느 라인에서 분해를 할 것인지 동시에 결정하는 최적화 모델을 제안한다. 이는 제품측면의 분해계획과 라인측면의 분해계획을 동시에 포함하는 분해계획을 수립하는 것을 의미하는데, 이는 이 두가지가 각각 별개로 이뤄지던 기존 연구들과는 달리 차별성을 갖는다. 이때, 폐기제품의 다양한 상태와 이를 판단하는 검사의 방식, 선택적 분해에서의 목표부품(target component) 설정방법과 라인의 운영 방식을 고려하며, 기업의 수익을 최대화하는 것을 목표로 한다.

회수된 폐기제품 및 그 구성품은 그림 1.1과 같이 폐 처리 혹은 제품복구의 과정을 거치게 된다. 여기서 제품복구의 경우 3R, Remanufacturing(재제조), Reuse (재사용), Recycling(재활용)으로 크게 나눌 수 있으며(Cao와 Folan, 2012), 이는 폐기제품 및 그 구성품의 품질과 상태에 따라서 결정되는데(Mishra 등, 2021), 본 연구에서는 제품복구 중 재제조에 관해서만 다루기로 한다. 재제조 산업에서 활용되는 회수된 폐기제품의 품질과 상태는 그 제품이 사용되었던 환경에 따라 매우 다양하며(Güngör와 Gupta, 1999), 이를 고려한 분해계획을 수립하기 위해서는 회수된 폐기제품 상태의 불확실성(uncertainty)을 효율적으로 관리하고 반영할 수 있도록 모델링해야 한다(Reveliotis, 2007). 제품이 사용 중이었을 때 어떻게 사용되었는지에 대한 정보가 알려지지 않았기 때문에(Ondemir와 Gupta, 2014) 부품의 상태를 판단하는 데 있어서 검사의 과정이 필수적이다. 이 검사를 통해서 각 부품의 품질이 재사용 가능할 수 있는 지에 대해서 판단한다. 검사는 시행하는 시점에 따라서 분해 전 검사와 분해 후 검사로 나눌 수 있는데, 분해 전 검사는 분해하기 전 완성품 상태에서 점검 장비 혹은 프로그램 등을 통해서 각 부품이 재제조에 활용 가능한지 판단하는 것이고, 분해 후 검사의 경우 완성품 상태에서는 부품의 품질에 대한 판단이 불가능하여 반드시 분해를 해야만 재사용 가능성을 판단해야 하는 경우가 이에 해당한다(Tang과 Zhou, 2006; Zikopoulos 등,

2010; Nwankpa 등, 2021). 본 연구에서는 재제조에 활용되는 부품 중 분해 전 검사를 통해 품질을 판단할 수 있는 부품을 PRC(Pre-inspection component), 분해 후 검사를 수행해야 하는 부품을 POC(Post-inspection component)라고 구분한다. 분해 전 검사를 수행하게 되면, 이미 손상을 많이 입어 재사용이 안 되는 부품에 대해서 분해작업을 수행하기 전에 이를 판단할 수 있기 때문에 불필요한 작업 수행을 방지할 수 있으며(Colledani와 Battaia, 2016), 그 결과 전체적인 분해시간과 이에 소요되는 불필요한 비용을 줄일 수 있다(Ridley와 Ijomah, 2015). 분해 전 검사를 수행하게 되면 어떠한 부품이 재사용 가능한지에 따라 폐기제품을 그룹화할 수 있다. 예를 들어 노트북이라고 하는 폐기제품이 있다고 했을 때, 메모리를 재사용할 수 있는 노트북, CPU를 재사용할 수 있는 노트북, 메모리와 CPU를 모두 재사용할 수 있는 노트북, 재사용 가능한 부품이 없는 노트북과 같이 구분할 수 있다.

이렇게 폐기제품의 그룹이 결정된 이후에는 분해의 과정을 거치게 되는데, 분해하는 수준에 따라서 모든 부품을 전부 분해하는 완전 분해(complete disassembly), 추출하고자 하는 부품을 추출하는 수준까지만 분해하는 선택적 분해(selective disassembly)로 나눌 수 있고(Lambert, 1997), 선택적 분해의 경우 경제적 가치가 없는 부품에 대해 불필요한 분해작업을 수행하지 않기 때문에 경제적 분해전략이라고 할 수 있다(Guo 등, 2021). 따라서 본 연구에서는 선택적 분해를 분해의 방식으로 활용한다. 선택적 분해에 있어서 가장 중요한 것은 분해를 통해서 추출하고자 하는 부품인 목표부품(target component)이다. 기존의 선택적 분해와 관련된 대부분의 연구에서는 단일 혹은 다중의 목표부품이 주어져 있는 상황에서 목표부품을 추출하기 위해서 분해 순서를 어떻게 할 것인지, 분해계획을 어떻게 세울 것인지에 대한 내용이 다뤄졌다. 하지만, 목표부품이 위험물질인 경우를 제외한 경제적 가치를 가진 부품일 경우에는 폐기제품이

운영되었던 환경에 따라 부품의 상태가 다르기 때문에 목표부품이 서로 다르다. 따라서 목표부품은 분해 전 검사를 통해서 결정되기 때문에 고정되어 있는 것이 아니다. 본 연구에서는 이 점을 고려하였다.

분해 작업이 이뤄지는 공간은 형태에 따라서 cell, 라인, 단일 작업대(single workstation)로 구분할 수 있고(Cevikcan 등, 2020), 분해공정의 경우 라인의 형태로 구성할 때 높은 생산성을 낼 수 있기 때문에 라인 형태로 구성하는 것이 적합하다(Güngör 와 Gupta, 2002). 분해라인은 분해대상 제품, 부품의 품질과 수량, 작업시간, 수요, 작업의 형태 등을 고려하여 설정하는데(Güngör 와 Gupta, 2002), 분해 작업장을 라인으로 구성하게 되면 이를 처음 설정한 분해작업공정을 변경 없이 유지하면서 가동하는 것이 효율적이다. 왜냐하면, 이런 분해라인을 설정하는 데는 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에(Güngör 와 Gupta, 1999; Slama 등, 2019), 중간에 변경하게 되면 시간, 경제적 손실이 발생하게 된다. 그리고 한 라인에서 여러 가지의 분해작업공정을 수행하게 되면 작업의 복잡성을 증가시켜 인적결함을 유발할 수 있지만(Soh 등, 2014), 한 라인에서 하나의 분해작업 공정만을 수행하게 되면 반복된 작업으로 인한 학습효과(learning effect)를 얻을 수 있어 작업의 시간을 단축할 수 있다(Yeh, 2012). 따라서 본 연구에서 분해공정은 라인으로 구성하고 가동중에는 변경없이 운영하는 것으로 고려하였다.

분해계획을 수립함에 있어 분해시간, 분해비용, 작업방향의 변화, 수익, 추출하는 부품의 가치, 작업공구의 수, 작업장의 수, 작업장의 유휴시간, 재고비용, 라인의 가동률, 라인별 작업강도, 설비의 운영유지 비용, 부품별 추출 우선순위 등 다양한 요소에 대해서 고려하지만(Özceylan 등, 2019; Ong 등, 2021), 본 연구에서는 분해작업을 통해서 얻을 수 있는 수익을 최대화 하는 것을 목표로 한다. 여기서 수익은 추출한 부품의 가치에서 분해에 소요되는 모든 비용을 포함하는 총 비용을 제외한 값을 의미한다.

본 연구는 총 5개의 장으로 구성되어 있다. 2장 문헌연구에서는 분해와 관련된 전반적 연구 동향에 대해 살펴보았으며, 3장에서는 본 연구에서의 모델에 대해 설명하였다. 여기에는 본 연구에서 바라보고 있는 프레임워크와 여기에서 발생할 수 있는 문제 상황, 목표부품모음(TCS, target component set)과 분해작업목록(DTS, disassembly task set)을 생성하는 방법, 문제를 푸는 수리적모형에 대한 설명을 포함한다. 4장에서는 사례연구를 통해 본 연구에서 제안한 모델을 활용해서 최적의 분해계획을 찾고 이 결과의 유효성을 서로 다른 대안들과의 비교를 통해서 입증하였으며, 5장에서는 본 연구의 의의와 한계에 관해서 서술하였다.

제 2 장 선행연구

2.1 분해 계획 문제에 대한 선행 연구

분해는 부품과 부품 혹은 하위조립체(subassembly) 사이의 결합을 체계적으로 끊어내는 것으로(Özceylan 등 2019), 위험물을 분리하거나 재사용 가능한 부품 혹은 하위조립체를 얻기 위해서는 필수적인 과정이다(Lee 등, 2001). 분해에 관한 연구는 그림1.1의 제품 수명주기에 따라 크게 설계 단계에서 이뤄지는 분해를 위한 설계(Design for disassembly, DFD)와 고객이 제품을 폐기한 이후 단계에 대해서 이뤄지는 분해에 관한 연구로 나눌 수 있다. 폐기 이후 단계에서의 분해에 관한 연구는 그림 2.1과 같이 4개의 레벨로 나눌 수 있고, 이를 작업의 관점에서 크게 planning, scheduling 2가지로 나눌 수 있다(Lambert, 2003). 그림 2.1의 안쪽 두 개의 레벨인 sequence, detailed 레벨이 해당하는 planning은 제품의 구조와 구성부품의 물리적인 구조형상을 고려하여 최적의 분해 순서를 찾는 연구가 주로 이뤄졌으며, 그림 2.1의 바깥쪽 두 개의 레벨인 task planning, reverse logistics 레벨에 해당하는 scheduling은 정해진 분해 순서를 바탕으로 라인을 어떻게 구성할 것인지에 관한 연구와 수요에 따라서 분해의 시점과 수량을 결정하는 연구가 이뤄졌다(Eguia 등, 2011; Ma 등, 2011).

2.2 설계 단계에서의 연구: Design for disassembly

DFD는 일반적인 설계 개념인 'Design for X(DFX)' 중의 하나로(Kuo 등, 2001), 제품이 분해되기 쉽도록 제품을 설계하는 전략을 의미한다(Boothroyd와 Alting, 1992). 이는 분해과정의 간략화, 분해에 필요한 시간과 비용의 최소화, 부품과

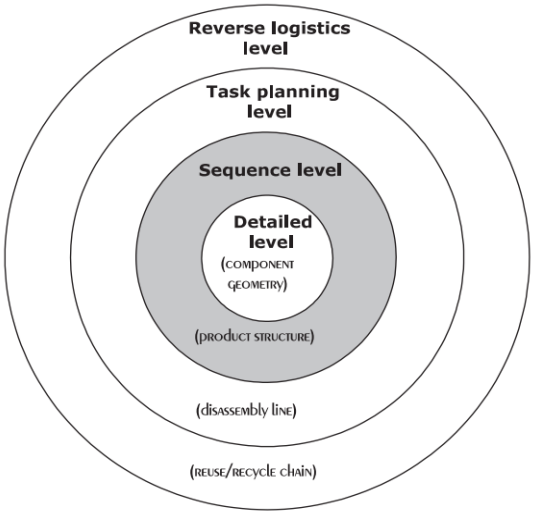


그림 2.1: 분해의 Onion ring 모델(Lambert, 2003)

원자재로의 복구 최대화를 주목표로 하며, 부품과 제품 아키텍처의 설계, 부품 간의 체결 부위 선택, 재질의 선택 등을 다룬다(Favi 등, 2019). Villalba 등(2004)은 재활용성 지수(recyclability index)를 활용하여 부품별로 어떠한 재질 혹은 재료로 설계할 것인지에 관한 연구를 수행하였고, Denis 등(2018)은 네트워크 분석을 통해서 분해를 위한 설계의 효과를 산정하고 대안들을 비교하여 의사결정에 활용할 수 있는 방법론에 관해 연구하였으며, Güngör(2006)는 ANP(analytic network process)를 활용하여 분해와 조립에 용이하고 성능 향상을 위해서 어떠한 결합체로 설계하는 것이 적절할지 판단할 수 있는 방법론에 관한 연구를 수행하였다. Kwak 등(2009)은 폐기제품의 처리방법에 관한 관점에서 바라본 에코 아키텍처를 제안하였고 이를 활용하여 분해작업을 효율적으로 할 수 있도록 아키텍처를 설계하는 방안에 관한 연구를 진행하였다.

2.3 사용 이후 단계에서의 연구

2.3.1 분해 planning

분해 planning은 제품의 구조와 구성부품의 물리적인 구조형상을 고려하여 최적의 분해 순서를 찾는 것인데 여기서 주요 결정변수는 분해 수준, 분해 순서, EOL Option이다(Ma 등, 2011). 분해의 수준에 따라서 전체 혹은 완전 분해(full or complete disassembly)와 선택적 혹은 부분적 분해(selective or partial disassembly)로 나눌 수 있다(Ong 등, 2021). 잘 설정된 분해 순서는 분해의 효율성을 높이고 분해에 드는 비용을 감소시키기 때문에(Zhou 등, 2019) 다양한 요인들을 고려하여 신중하게 결정되어야 한다.

분해 planning에 대한 과거 연구에서는 분해 순서를 찾아내고 표현하는 방식에 대해 주로 연구가 이뤄졌다. Kara 등(2006)은 선택적 분해에서 단일 목표부품을 추출하기 위해서 분해 작업의 선후 관계를 기반으로 한 laison diagram을 활용하였으며, Smith 등(2012)은 두 개 이상의 목표부품에 대한 선택적 분해 순서를 DSSG(Disassembly sequence structure graph)를 활용하여 찾았으며, Mitrouchev 등(2015)은 제품과 그를 구성하는 부품들의 형상적 구조에 따라서 분해 순서를 찾는 DGCG(Disassembly Geometry Contacting Graph) 방법을 활용하였다. Kim 등(2018)은 분해 작업시간이 무작위인 상황에서 분해 비용을 최소화 할 수 있는 분해 순서를 찾는 연구를 수행하였으며, 이를 branching-binding 알고리즘을 활용한 확장된 절차 그래프(Extended process graph)로 나타내었다. Bentaha 등(2020)은 회수한 제품의 품질에 따른 경제적 가치를 고려하여 최적의 분해 수준과 순서를 찾았으며, 이를 And/Or 그래프를 활용하여 표현하였다.

2.3.2 분해 scheduling

그림 2.1의 task planning level에서 주로 이뤄지는 연구가 분해라인 밸런싱인데, 이는 분해 작업의 선후 관계와 사전에 설정된 순서를 준수하고 한정된 자원의 활용을 최대화하면서 각 작업장에 분해 작업을 배정하는 것을 의미한다(Güngör와 Gupta, 1999; Kalayci 등, 2016). 라인 밸런싱에 관한 대부분의 연구는 각종 알고리즘을 활용하여 특정 라인의 형태에서 작업장의 수, 유휴시간, 작업시간 비용 등의 최소화나 이익의 최대화, 특정 부품을 빠르게 추출하는 것을 목적함수로 하여 진행되었다(Özceylan 등, 2019). Bentaha 등(2015)은 위험 부품이 포함된 제품이 불확실한 작업시간을 가질 때, 분해에 드는 비용을 최소화하는 방법론에 관해 연구하였으며, Kalaycılar 등(2016)은 워크스테이션이 제한된 상황에서 MILP(Mixed integer linear program) 모델을 활용하여 총 순수익을 최대화하는 방안을 찾는 연구를 수행하였으며, Wang 등(2021)은 분해시간이 확률적인 상황에서 워크스테이션의 수, 업무강도, 분해의 수익을 고려하여 MOGSA(multi-objective genetic simulated annealing)를 활용한 최적의 라인 설계방안에 관한 연구를 수행하였다. C.B. Kalayci 등(2016)은 워크스테이션별 유사한 유휴시간(idle time)을 보장하고, 위험 물질과 수요가 많은 부품을 가능한 빨리 추출하도록 하면서 분해 워크스테이션의 수와 유휴시간을 최소화하는 라인설정을 찾는 모델을 수립하였고 이를 VNSGA (variable neighborhood search method with genetic algorithm)을 활용하여 풀었다.

그림 2.1의 reverse logistic level에서 주로 이뤄지는 연구가 수요를 충족하기 위해서 폐기제품의 분해 수량과 시기 즉, 언제 얼마나 폐기제품을 분해할 것인지 결정하는 문제를 다룬다(Kim 등, 2007). Lee 등(2002)은 자원의 제약으로 인해 분해할 수 있는 능력이 제한된 상황에서 구매비용, 재고비용, 분해비용을 포함한 총 소요비용을 최소화하는 모델을 구축했고 이를 정수 프로그래밍(integer programming)을 통해서 풀었다. Kim 등(2003)은 공통된 부품을 공유하는 다양한

종류의 제품을 분해하는 상황에서 분해작업을 위한 준비시간, 분해작업 및 재고비용의 최소화를 목적함수로 하여 모델을 수립하였고 이를 선형 프로그래밍 완화 접근법 기반의 휴리스틱 방법을 통해서 풀었다. Kim 등(2010)은 수요가 무작위이고 자원의 제약으로 인해 분해할 수 있는 능력이 제한된 상황에서 폐기제품을 부품 레벨과 제품 그 자체로의 레벨로 구분하여 재고비용, 패널티 비용, 분해공정 준비비용을 최소화하는 모델을 라그랑지안에 기반을 둔 휴리스틱 알고리즘을 통해서 해결하는 연구를 수행하였다.

2.4 연구 의의

Mishra 등(2021)은 회수된 폐기제품의 순환성(circularity) 즉, 재사용(reuse), 재제조(remanufacturing), 재활용(recycling)에 기반하여 핵심부품의 품질을 평가하는 도구를 제안한 연구를 진행하였다. 여기서 핵심부품은 제품복구에 활용될 수 있는 잠재적인 부품 이라고 할 수 있다. 이때 평가 단계를 핵심부품을 획득하기 전(분해 이전), 핵심부품을 획득한 이후(분해 이후)로 나눠서 진행하였다.

Moussa 와 ElMaraghy(2022)는 기어 샤프트와 같이 제품 자체의 형상에 따라서 variant를 구성하는 제품군(product family)에 대해서 2개 이상의 시점(multi-period)에서 다양한 variant의 수요를 충족하기 위해서 어떻게 플랫폼을 구성하며, 이 플랫폼을 변형(절삭, 접합)하여 variant를 만들어 낼 것인가에 관해서 연구하였다. 이때 각 시점에서의 플랫폼은 어떠한 구성형상(feature)의 모음으로 구성할 것인지, 각 시점의 variant의 수요를 어느 시점에서 생산한 플랫폼을 활용(그대로 혹은 절삭, 접합)할 것인지에 대해서 결정하는 연구를 진행하였다.

Mishra 등(2021)은 본 논문에서의 연구와 같이 폐기 후 회수된 제품의 재사용성 평가에 대해서 분해 전의 완성품 단계, 분해한 후의 부품 단위로

바라보았고, Moussa와 ElMaraghy(2022)는 본 논문에서의 연구와 같은 형태의 결정변수를 할당(allocation)하는 문제를 다루었다. 하지만 분해계획을 수립하는 문제에 대해서 이러한 관점에서의 연구는 이뤄지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이 두가지의 관점을 바탕으로 하여 분해계획 수립에 관한 연구를 진행하였으며, 기존의 연구에서 각각 이뤄지던 제품 측면의 분해계획인 분해 planning과 라인 측면의 분해계획인 라인밸런싱 문제를 동시에 고려한 분해계획이라는 점에서 타 분해계획 수립 연구와의 차별성을 갖는다.

제 3 장 모델

3.1 연구 프레임워크 및 문제상황

본 연구에서는 검사에 기반을 둔 선택적 분해라는 프레임워크 하에서 제품의 상태와 라인의 운영 측면을 동시에 고려하여 라인별 분해공정을 어떻게 구성할 것인지, 폐기제품의 그룹별로 어느 라인에서 분해를 할 것인지 동시에 결정하는 최적화 모델을 제안한다. 모델에서의 검사에 기반을 둔 선택적 분해 프레임워크는 그림 3.1과 같다. 사용자로부터 회수된 폐기제품이 공장으로 입고되게 되면 완성품 상태에서 분해 전 검사를 실시한다. 이 분해 전 검사를 통해서 재제조에 활용되는 부품 중 완성품 상태로 검사하여 품질을 판단할 수 있는 부품(PRC)에 대한 상태판단이 이뤄진다. 분해 전 검사의 결과에 의해 어떤 부품에 재제조에 활용 가능한지에 따라서 폐기제품은 그룹별로 분류된다. 예를 들어 부품 A를 재제조에 활용할 수 있는 제품, 부품 B를 재제조에 활용할 수 있는 제품, 부품 A, B 모두를 재제조에 활용할 수 있는 부품, 둘다 재제조에 활용이 불가한 제품 등과 같이 나눌 수 있다. 이렇게 분류된 폐기제품의 그룹들은 서로 다른 분해공정을 수행하도록 설정된 분해 라인들 중 하나의 분해라인에서 분해 작업을 거치게 된다. 이후 분해 후 검사를 통해서 재사용 가능성을 판단할 수 있는 부품의 경우 분해 후 검사를 수행하게 된다. 이러한 검사의 결과를 통해서 재제조에 활용이 가능하다고 판단되는 부품의 경우 재제조에 활용되며, 그렇지 않은 부품은 폐기, 원자재로써 재활용 하거나 유해물질일 경우 특수 처리를 거쳐 폐 처리된다.

검사에 기반을 둔 선택적 분해의 프레임워크 안에서 구성된 라인에서는 공정이 진행되는 동안에는 최초 설정된 분해 작업 공정은 변경 없이 유지된 상태에서 분해 작업이 이뤄진다. 여기에서 상태에 따라서 재제조에 활용될 수

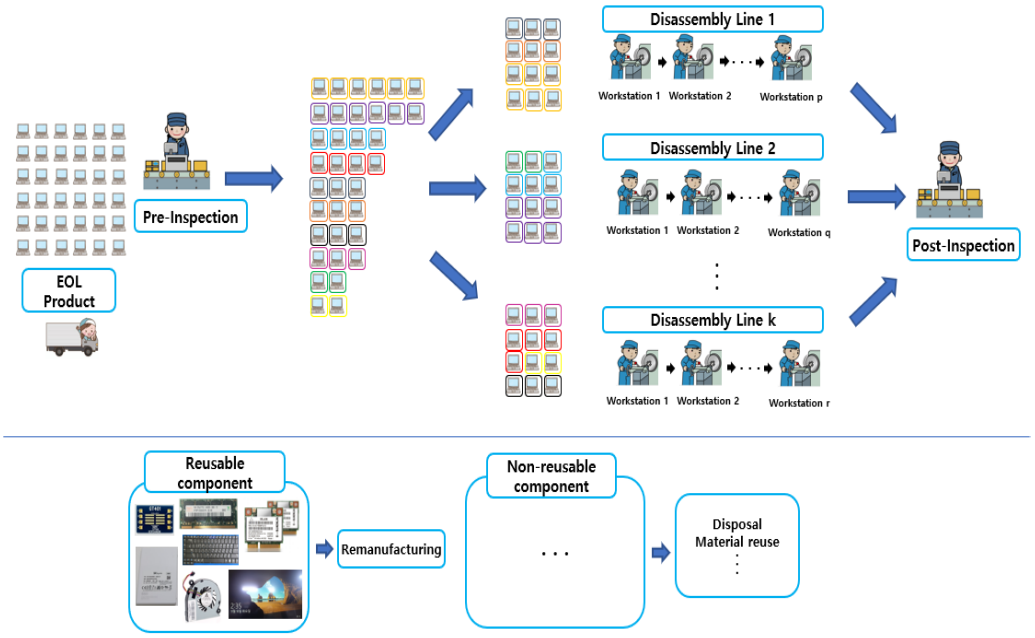


그림 3.1: 검사에 기반을 둔 선택적 분해

있는 부품의 종류를 n개라고 했을 때, 폐기제품의 그룹의 수는 2^n개이며, 각각의 그룹별로 목표부품을 추출할 수 있는 분해공정이 1개 있다고 했을 때, 분해공정의 수 또한 2^n개다(실제로는 중복되는 공정이 있을 수 있기 때문에 2^n개보다 작다). 하지만 이에 비해 라인의 개수는 매우 제한적이다. 1개의 라인을 운영하는 기업이라면 문제가 없겠지만, 2개 이상의 라인을 운영하는 기업에서는 라인을 어떠한 분해공정으로 설정할 것인지와 폐기제품의 그룹별로 어느 라인에서 분해를 할 것인지에 대해 결정을 내려야 한다. 어떤 그룹을 어떤 분해공정으로 분해하느냐에 따라서 재사용이 가능함에도 추출할 수 없는 부품이 발생할 수 있으며, 해당 그룹의 목표부품 추출에는 필요하지 않은 작업을 수행해야 할 수 있다. 예를 들어 부품 A, B, C가 재사용 가능한 폐기제품을 A, B를 추출할 수 있는 공정으로 설정된 분해라인에서 분해하게 되면 C를 추출하지 못하는 손실이

발생하는 부품의 낭비가 발생하고, A, B, C, D를 추출할 수 있는 공정으로 설정된 라인에서 분해를 하게 되면 재제조에 활용이 불가한 D를 추출하게 되고 이에 따른 불필요한 작업을 수행하게 되는 작업의 낭비가 발생한다. 이러한 두 가지의 낭비를 최소화하면서 수익을 최대화하는 것이 본 모델의 궁극적 목표이다.

3.2 목표부품모음, 분해작업목록 생성

모델을 구현하는 데 필요한 정보, 즉 모델의 입력값은 부품별 가치와 재사용 가능확률(reusability), 분해작업별 비용, 목표부품모음(TCS, Target Component Set)과 분해작업목록(DTS, Disassembly Task Set)이 해당한다. 재사용 가능확률 (reusability)은 재제조에서 폐기제품의 부품이 재사용할 가능성을 나타내며, 과거의 통계를 통해서 얻을 수 있다(Kim 등, 2022). 본 연구에서는 부품별 가치와 재사용 가능확률(reusability), 분해작업별 비용은 기본적으로 주어진 정보로 활용한다. 본 절에서는 주어진 정보 외에 목표부품 모음(TCS)과 분해작업목록(DTS)를 생성하는 단계를 설명한다. 이는 그림 3.2과 같이 4단계의 과정을 통해서 생성한다. 1단계에서는 재제조 활용 가능성과 분해 전 검사를 통해서 재사용 가능성의 판별이 가능한지를 기준으로 부품을 타입별로 분류하며, 2단계에서는 1단계에서 분류한 부품의 타입에 따라서 부품을 조합하여 최초 목표부품모음(TCS)을 생성한다. 3단계에서는 이 최초 목표부품모음(TCS)을 추출하기 위한 최초 분해작업 목록(DTS)을 생성하고, 4단계에서는 POC의 기대수익을 고려하여 최종 목표부품 모음(TCS)과 최종 분해작업목록(DTS)을 생성한다. 이때 사전에 주어진 정보인 분해 작업의 선후 관계, 제품의 물리적 구조, 각각의 부품을 추출하는 데 필요한 분해작업목록(RDT, required disassembly task)을 활용한다.

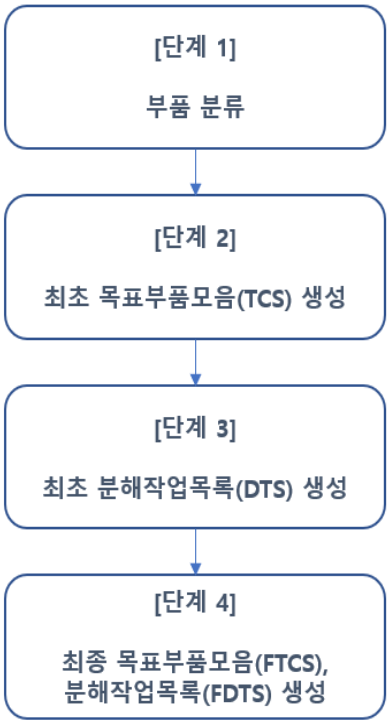


그림 3.2: 목표부품모음(TCS), 분해작업공정 목록(DTS) 생성 과정

3.2.1 부품 분류

선택적 분해에서 분해하여 추출하고자 하는 부품을 목표부품(target component)이라고 한다. 선택적 분해의 계획을 수립하는데 가장 중요한 것은 목표부품을 정하는 것이다. 과거 대부분의 연구는 이것이 주어진 상황에서 연구가 이뤄졌다. 하지만 본 연구에서는 이 목표부품은 제품이 사용된 환경에 의한 각 부품의 품질에 따라서 목표부품이 달라지는 상황을 고려한다. 목표부품을 결정하기에 앞서 폐기제품의 구성품인 부품을 어떤 기준으로 구분할 것인지

정의하는 과정이 선행되어야 한다. Kwak 등(2009)은 폐기제품의 구성품 단위를 eco-module로 정의하였으며, 회수한 부품을 어떻게 활용할 것인지에 따라서 재사용, 원자재로 재활용, 소각 등을 통해서 에너지원으로 활용, 특별처리(위험물인 경우), 폐기의 5가지로 구분하였다. 본 연구에서는 추후 활용에 대해서 재제조, 폐기 두 가지로만 나누었으며 재제조 활용 가능성과 분해 전 점검을 통해서 재제조 활용가능 여부를 판별할 수 있는지에 따라서 부품을 다음 3가지로 분류하였으며, 이를 표로 나타내면 표 3.1과 같다.

[1] 분해 후 점검으로 재사용 가능 여부를 판단 가능한 품목
(POC, Post-Inspection Component)

[2] 분해 전 점검으로 재사용 가능 여부를 판단 가능한 품목
(PRC, Pre-Inspection Component)

[3] 분해가 불필요한 부품

[1]의 경우 분해를 한 이후 부품단위로 검사를 해야 재제조에 활용 가능한지를 판단할 수 있는 부품으로 반드시 분해를 해야하는 POC가 이에 해당하며, [2]의 경우 분해 전 완성품 상태에서 재제조에 활용 가능한지 즉, 재사용 가능성을 판단할 수 있는 PRC가 이에 해당한다. [3]의 경우 상태와 상관없이 재제조에 활용되지 않기 때문에 분해가 불필요한 부품으로 분류하고 분해계획을 수립할 때는 고려하지 않는다.

표 3.1: 부품의 3가지 타입

구 분	[1]	[2]	[3]
재제조 활용 가능성	O	O	X
분해 전 검사로 판별 가능성	X	O	-

3.2.2 최초 목표부품모음(TCS, target component set) 생성

목표부품의 모음은 목표부품으로 구성된 집합이라고 할 수 있는데, 이는 목표부품을 조합하여 만들어 낼 수 있다. 이 단계에서는 목표부품모음(TCS)의 모든 경우의 수를 생성하는데, 표 3.1의 부품 분류를 활용한다. PRC는 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우로 나누어 선택적으로 반영하고 POC는 모든 목표부품모음(TCS)에 포함하여 최초 목표부품모음(TCS)을 생성한다. PRC의 경우 분해 전 검사 결과에 따라 목표부품인 경우와 목표부품이 아닌 경우가 모두 존재하기 때문에 목표부품모음(TCS)에 포함되는 경우와 포함하지 않는 경우가 모두 존재한다. POC의 경우 재사용이 가능한지 여부는 분해를 해야 확인이 가능하므로 선택적 분해에서 반드시 추출해야하는 목표부품에 해당한다. 따라서 모든 목표부품모음(TCS)에 포함된다. 최초 목표부품모음(TCS)의 수는 PRC의 개수에 의해 결정되는데, PRC의 개수가 m개일 때, 목표부품모음(TCS)은 2^m가지가 생성된다.

3.2.3 최초 분해작업목록(DTS, disassembly task set) 생성

최초 목표부품모음(TCS)의 모든 경우의 수를 생성한 이후에는 이 목표부품모음(TCS)을 추출하는 데 필요로 하는 분해작업목록(DTS)을 생성한다. 하나의 목표부품모음(TCS)에는 하나의 분해작업목록(DTS)이 존재한다. 하지만 서로 다른 목표부품모음(TCS)일지라고 하더라도 분해작업목록(DTS)이 같을 수 있다. 각 목표부품모음(TCS)의 분해작업목록(DTS)을 생성하기 위해서 부품을 추출하는데 필요한 필요작업목록(RDT)과 각 분해 작업의 선후 관계 정보를 활용하며, 이는 아래의 두 가지 단계를 통해서 생성할 수 있다. 이 알고리즘을 수식화하여 나타내면 (3.1)과 같다.

[1] 목표부품모음(TCS)에 속한 모든 목표부품에 대해서 이 각각의 목표부품을 추출하는데 필요 분해작업목록(RDT)을 합집합 한다.

[2] [1]에 속한 분해 작업을 수행하기 위해서 선행되어야 하는 분해 작업을 합집합 한다.

$$DTS_i = A \cup \left(\bigcup_{t_m \in A} pr_m \right), \ \mathrm{A} = \bigcup_{p_k \in TCS_i} rdt_k \qquad (3.1)$$

여기서 DTS_i는 i번째 목표부품모음(TCS)에 속한 모든 부품을 추출하기 위해 필요로하는 모든 분해작업들을 의미하며, rdt_k는 k번째 부품을(p_k) 추출하는 데 필요로 하는 분해 작업을 의미한다. pr_m는 분해 작업 m을 수행하기 위해서 선행되어야 하는 분해 작업을 의미한다. [2]의 과정은 분해 작업 간의 선후 관계로 인해서 해당 작업이 이뤄지기 위해서 반드시 선행되어야 하는 분해 작업을 고려하기 위해서 수행한다.

3.2.4 최종 목표부품모음(FTCS), 분해작업목록(FDTS) 생성

이번 단계는 POC의 기대수익을 고려하여 최종적인 목표부품모음(FTCS)과 분해작업목록(FDTS)을 생성하는 단계이다. POC의 기대수익은 POC의 기대가치에서 POC가 목표부품모음(TCS)에 포함됨에 따라서 수행 되어야 하는 분해 작업에 소요되는 비용을 뺀 값이며, POC의 기대가치는 재사용 가능 확률(reusability)에 가치를 곱한 값이다. 이때 계산한 POC의 기대수익이 양수인 경우에만 목표부품모음(TCS)에 POC를 포함하고 음수인 경우는 POC를 제외하여 최종 목표부품모음(FTCS)을 생성한다. 이 최종 목표부품모음(FTCS)을 추출하기 위한 최종 분해작업목록(FDTS)은 (3.1)을 활용하여 생성한다. 이 단계를 진행하는 이유는 분해 작업 간의 선후 관계와 제품의 아키텍처에 의해서 3.2.1에서 생성한 초기 목표부품모음(TCS)별로 POC를 추출하기위해서 추가로 수행 되어야하는 분해 작업이 다른 경우가 존재하기 때문이다. 이는 POC를 포함한 경우의 분해작업목록(DTS)에서 POC를 제외한 경우의 분해작업목록(DTS)을 제외하여 찾아낼 수 있다. 이렇게 추가되는 분해 작업이 서로 다르기 때문에 POC의 기대수익 즉, POC에 의해서 추가로 발생하는 분해 작업 비용 또한 목표부품모음(TCS)에 따라 서로 다르다.

3.3 수리적 모형

3.3.1 Notation

본 모델에서 사용되는 파라미터, 변수, 결정변수는 표 3.2과 같다. 결정변수는 라인별로 어떤 분해작업목록(DTS)으로 공정을 설정할 것인지, 각 목표부품모음(TCS)을 어느 라인에서 분해를 할 것 인지이다.

표 3.2: 파라미터, 변수, 결정변수

파라미터	p_k	k 번째 Component, $k = 1, 2, \cdots, K$
	TCS_i	i 번째 Target Component Set(TCS), $i = 1, 2, \cdots, I$
	t_m	m번째 Disassembly task, $m = 1, 2, \cdots, M$
	DTS_j	j 번째 Disassembly Task Set(DTS), $j = 1, 2, \cdots, J$
	d_l	l 번째 Disassembly line, $l = 1, 2, \cdots, L$
	c_m	t_m에 소요되는 cost
	c_j	DTS_j 에 소요되는 cost
	v_k	p_k를 분해했을 때 얻을 수 있는 value
	v_i	TCS_i를 분해했을 때 얻을 수 있는 value
	s_{ij}	TCS_i를 DTS_j에서 분해했을 때 얻지 못하는 value
	r_k	p_k의 reusability
	q_i	TCS_i의 비율
변수	X_{ij}	TCS_i를 DTS_j로 모두 획득 가능한 경우 1, 아닌 경우 0
	W_{kj}	p_k를 DTS_j로 통해 모두 획득 가능한 경우 1, 아닌 경우 0
	U_{ki}	p_k가 TCS_i에 포함되어 있는 경우 1, 아닌 경우 0
	S_{mj}	t_m이 DTS_j에 포함되어 있는 경우 1, 아닌 경우 0
	E_k	p_k가 pre-inspection 품목인 경우 1, 아닌 경우 0
결정변수	Y_{jl}	DTS_j가 라인 l에 배정되는 경우 1, 아닌 경우 0
	Z_{il}	TCS_i가 라인 l에 배정되는 경우 1, 아닌 경우 0

3.3.2 목적함수

본 모델의 목적함수는 (3.2)과 같다. 분해공정을 통해서 수익을 최대화하는 것을 목적함수로 하며 이 수익은 전체 분해공정을 통해서 얻을 수 있는 부품의 가치 총합에서 분해하는데 소요되는 비용의 총합을 뺀 값으로 구한다. 이때 가치는 추출한 부품을 재제조에 활용했을 때의 경제적 가치를, 비용은 장비 및 시설 운영유지비, 분해에 소요되는 시간에 따른 인건비 등을 포함한 분해공정이 진행되는 동안 소요되는 모든 비용을 포함한다. 이 부품의 가치와 소요되는 비용을 계산하는 식은 (3.3), (3.4)와 같다. (3.3)에서 앞쪽의 부분은 목표부품모음(TCS)에 있는 목표부품을 모두 얻었을 때 부품 가치의 총합이며, 뒤쪽 식은 목표부품모음(TCS)을 모두 추출할 수 있는 분해작업목록(DTS)이 아닌 분해작업목록(DTS)으로 설정된 라인에서 분해를 하게 되면 추출할 수 없어 포기하는 목표부품 가치의 합이다. (3.4)은 설정된 분해라인에서 분해했을 때 드는 비용의 합을 의미한다.

$$Maximize\ Revenue = \sum Value - \sum Cost \tag{3.2}$$

$$\sum Value = \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} v_i q_i Z_{il} Y_{jl} - \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} s_{ij} q_i Z_{il} Y_{jl} \left(1 - X_{ij}\right) \tag{3.3}$$

$$\sum Value = \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_j q_i Z_{il} Y_{jl} \tag{3.4}$$

(3.3), (3.4)는 목표부품모음(TCS)과 분해작업목록(DTS) 레벨에서의 가치와 비용을 계산하는 식을 나타내며, 이를 분해 작업과 부품 레벨에서 계산하는 식은 아래의 (3.5), (3.6), (3.7), (3.8)과 같다.

$$v_i = \sum_{k \in K} U_{ki} E_k v_k + \sum_{k \in K} U_{ki}(1 - E_k) v_k r_k \tag{3.5}$$

$$p_i = \prod_{p_k \in TCS_i} r_k \prod_{p_k \notin TCS_i} (1 - r_k), \quad E_k = 1 \tag{3.6}$$

$$s_{ij} = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (1 - W_{kj}) Z_{il} Y_{jl} v_k \tag{3.7}$$

$$c_j = \sum_{m \in M} S_{mj} c_m \tag{3.8}$$

(3.5)는 i번째 목표부품모음(TCS)을 분해했을 때 얻을 수 있는 가치인데, 앞쪽 부분은 PRC의 가치, 뒤쪽 부분은 POC의 가치를 의미한다. PRC인 경우 목표부품모음(TCS)에 포함된 목표부품의 가치를 전부 합하고, POC인 경우에는 목표부품의 재사용 가능성(reusability)를 고려하여 기대가치를 더한다. 이는 POC의 경우 서로 다른 목표부품모음(TCS)에 동일하게 포함되었다 할지라도 필요 분해 작업이 다를 수 있으므로 기대가치 또한 다를 수 있기 때문이다. (3.6)는 목표부품 모음(TCS)별 비율을 결정하는 식으로, PRC에 대해서 중 목표부품 모음(TCS)에 포함된 목표부품일 때 r을, 포함되지 않았을 때 (1-r)을 곱하여 계산할 수 있다. POC는 각 목표부품모음(TCS) 별로 기대수익에 의해서 목표부품 모음(TCS)에서 일괄적으로 제외되거나 포함되기 때문에 목표부품모음(TCS)의 발생 비율에는 영향을 미치지 않는다. (3.7)은 i번째 목표부품모음(TCS)을 j번째 분해작업목록(DTS)으로 설정된 라인에서 분해하였을 때, 포기해야 하는 목표부품의 가치를 나타내며, (3.8)은 j번째 DTS에 소요되는 비용으로 DTS_j에 속한 분해 작업의 비용의 합과 같다.

3.3.3 제약조건

모델에서 적용되는 제약조건은 4가지로 아래의 (3.9), (3.10), (3.11), (3.12)과 같다.

$$\sum_{j \in J} Y_{jl} = 1 \tag{3.9}$$

$$\sum_{l \in L} Y_{jl} \leq 1 \tag{3.10}$$

$$\sum_{i \in I} Z_{il} \geq 1 \tag{3.11}$$

$$\sum_{l \in L} Z_{il} = 1 \tag{3.12}$$

(3.9)는 각 라인은 1개의 분해작업목록(DTS)으로 설정된다. 즉, 라인은 운영 중에 변경 없이 운영한다는 것을 의미하고, (3.10)은 다른 라인에는 서로 다른 분해작업목록(DTS)으로 설정한다는 것을 의미한다. (3.11)의 경우 라인별로 목표부품모음(TCS)이 1개 이상 배정된다. 즉, 가동되지 않는 라인은 없다는 것을 의미하고, (3.12)의 경우 목표부품모음(TCS)은 각각 하나의 라인에서만 분해된다는 것을 의미한다.

제 4 장 사례 연구

사례연구에 활용한 제품의 구조는 그림 4.1과 같으며, Kwak 등(2009)에서의 제품구조를 일부 변경하여 활용하였다. A, B, C, D, E, F는 부품을 의미하고 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥은 결합을 끊어내는 분해 작업을 나타낸다. 분해 작업의 선후 관계를 그래프와 매트릭스 형태로 나타낸 것은 그림 4.2와 같다. (a)에서 노드는 분해 작업을, 화살표는 분해 작업의 선후 관계 즉, 좌측의 분해 작업이 선행되어야 우측의 분해 작업이 가능함을 나타낸다. (b)에서 행과 열은 각각 분해 작업을 의미하고 매트릭스의 값을 p_{ab} 라고 했을 때, a 행의 작업을 수행하기 위해서 b 열의 작업이 선행되어야 하는 경우를 1로 나타낸다. 예를 들어 분해 작업 ④를 수행하기 위해서는 분해 작업 ①, ②가 선행되어야 함을 나타낸다.

모델은 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 프로그램의 22.1.0.0 버전을 통해 구현하였으며, 라인의 개수는 3개인 경우로 사례연구를 진행하였다.

4.1. 부품 분류

부품에 대한 타입 분류와 그에 대해 주어진 정보는 표 4.1과 같다. B, D, F 3개의 부품은 PRC이며, C는 POC에 해당한다. A, E의 경우 활용가치가 없어 별도 추출이 필요 없는 부품에 해당한다. A와 E를 제외한 부품의 재사용 가능확률은 0.7, 0.6, 0.4, 0.4이며 이들의 재사용 가치는 각각 10, 20, 4, 5이다.

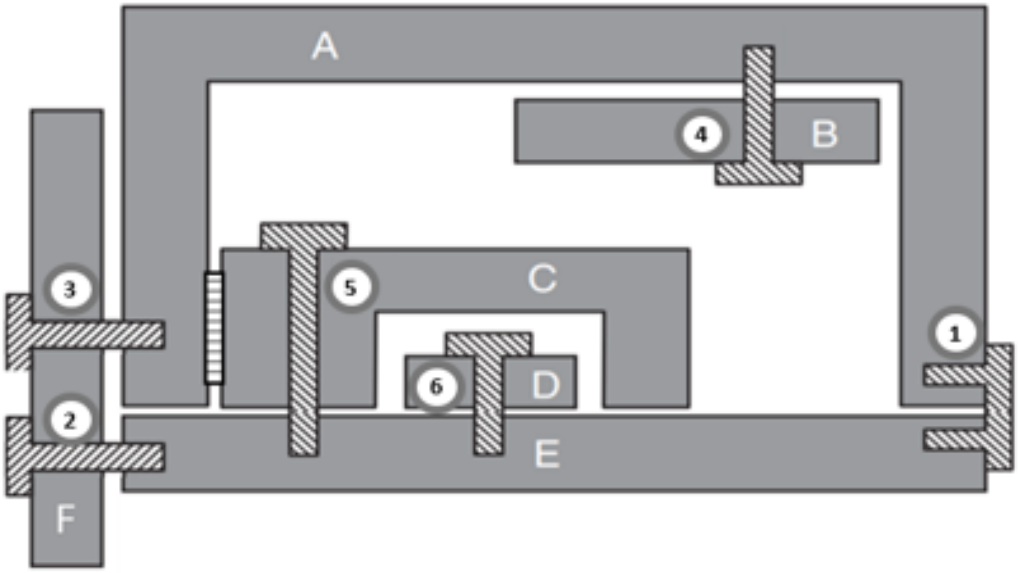
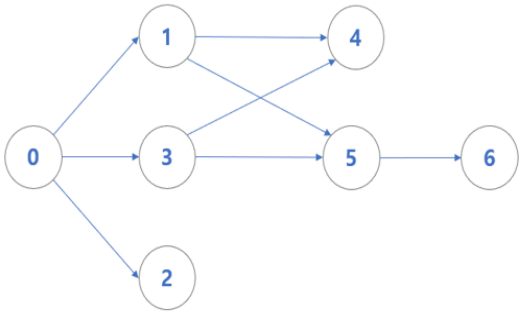


그림 4.1: 제품 구조



(a) 선후관계 그래프

	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4	1		1			
5	1		1			
6	1		1		1	

(b) 선후관계 매트릭스

그림 4.2: 분해작업의 선후 관계

표 4.1: 부품 분류 및 정보

부품	A	B	C	D	E	F
p_k	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
부품 타입	[3]	[2]	[1]	[2]	[3]	[2]
가치(v_k)	0	10	20	4	0	5
재사용 가능확률 (q_k)	-	0.7	0.6	0.4	-	0.4

[1] 반드시 분해해야 하는 부품(POC)

[2] 상태에 따라 선택적으로 분해하는 부품(PRC)

[3] 분해가 불필요한 부품

4.2. 초기 목표부품모음(TCS) 생성

POC는 모든 초기 목표부품모음(TCS)에 포함되며, PRC는 선택적으로 포함되어 서로 다른 목표부품모음(TCS)을 생성한다. PRC의 개수가 3개이기 때문에 8(2^3)가지의 목표부품모음(TCS)이 생성되고 여기에 POC는 모두 포함되어 있다. 생성한 초기 목표부품모음(TCS)은 표 4.2와 같다.

표 4.2: 초기 목표부품모음(TCS)

목표부품모음	목표부품
TCS_1	$\{p_2, p_3\}$
TCS_2	$\{p_3, p_4\}$
TCS_3	$\{p_3, p_4, p_6\}$
TCS_4	$\{p_3, p_6\}$
TCS_5	$\{p_2, p_3, p_4\}$
TCS_6	$\{p_2, p_3, p_6\}$
TCS_7	$\{p_2, p_3, p_4, p_6\}$
TCS_8	$\{p_3\}$

4.3. 초기 분해작업목록(DTS) 생성

분해작업목록(DTS)을 구성하고 있는 분해 작업에 대한 정보는 표 4.3과 같은데, 분해비용은 해당 분해 작업에 드는 에너지, 자원 등을 고려한 비용을 의미하고, pr_m은 t_m을 수행하기 위해서 선행되어야 하는 분해 작업을 의미한다. 예를 들어 t_5는 t_1, t_3이 선행되어야 가능하며 t_6은 t_1, t_3, t_4, t_5이 선행되어야 수행될 수 있음을 의미한다. 이를 기반으로 하여 각 분해 작업의 선후 관계를 고려한 각 부품의 필요 분해작업목록(RDT, Required Disassembly Task)를 구하면 표 4.4와 같다. 여기서 필요 분해작업목록(RDT)은 목표부품을 추출하는 데 필요로 하는 분해 작업의 집합을 의미한다.

표 4.3: 분해 작업(Disassembly task) 정보

구분	분해비용	선행 필요작업(pr_m)
t_1	3	{ }
t_2	2	{ }
t_3	1	{ }
t_4	2	{ }
t_5	5	$\{t_1,\ t_3\}$
t_6	6	$\{t_1,\ t_3, t_4,\ t_5\}$

표 4.4: 부품별 필요 분해작업목록

부품(p_k)	부품 타입	RDT(Required Disassembly Task)
p_1	-	$\{t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_4\}$
p_2	**PRC**	$\{t_1,\ t_3,\ t_4\}$
p_3	**POC**	$\{t_1,\ t_3,\ t_5\}$
p_4	**PRC**	$\{t_1,\ t_3,\ t_5,\ t_6\}$
p_5	-	$\{t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_5,\ t_6\}$
p_6	**PRC**	$\{t_2,\ t_3\}$

표 4.3에서의 선행필요작업(pr_m)과 표 4.4 부품의 필요 분해작업목록(RDT)을 활용하여 (3.1)의 알고리즘을 통해서 생성한 초기 분해작업목록(DTS)은 표 4.5와 같다. 초기 목표부품모음(TCS)와 동일하게 8개가 생성되었다.

4.4. 최종 목표부품모음(FTCS), 분해작업목록(FDTS) 생성

POC인 p_3 가 목표부품모음(TCS)에 포함됨으로 발생하는 비용과 그의 기대수익을 계산하면 표 4.6과 같다. TCS_1, TCS_4, TCS_6, TCS_8 의 경우 POC로 인해서 추가적 분해 작업이 필요하지만, TCS_2, TCS_3, TCS_5, TCS_7 의 경우에는 POC가 제외되든 추가적 분해 작업이 없는 경우이다. POC의 기대가치는 재사용 가능 확률(reusability)과 가치를 곱한 값으로 2이다. 이를 고려했을 때 TCS_1, TCS_4, TCS_6, TCS_8의 경우 기대수익이 음수 즉, p_3는 추출하지 않는 것이 더 경제적이기 때문에 최종 목표부품모음(FTCS)에서 제외한다. 따라서 최종적으로 선정된 최종 목표부품모음(FTCS)은 표 4.7과 같다.

표 4.5: 초기 분해작업목록(DTS)

초기 목표부품모음	초기 분해작업 목록
TCS_1	$DTS_1 = \{t_1, t_3, t_4, t_5\}$
TCS_2	$DTS_2 = \{t_1, t_3, t_5, t_6\}$
TCS_3	$DTS_3 = \{t_1, t_2, t_3, t_5, t_6\}$
TCS_4	$DTS_4 = \{t_1, t_2, t_3, t_5\}$
TCS_5	$DTS_5 = \{t_1, t_3, t_4, t_5, t_6\}$
TCS_6	$DTS_6 = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$
TCS_7	$DTS_7 = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$
TCS_8	$DTS_8 = \{t_1, t_3, t_5\}$

표 4.6: POC의 기대수익

초기 목표부품모음	추가 분해작업	추가 분해비용	기대가치	기대수익
TCS_1	t_5	5	2	-3
TCS_2	-	0		2
TCS_3	-	0		2
TCS_4	$t_1,\ t_5$	8		-6
TCS_5	-	0		2
TCS_6	t_5	5		-3
TCS_7	-	0		2
TCS_8	$t_1,\ t_3,\ t_5$	9		-8

표 4.7: 최종 목표부품모음(FTCS)

최종 목표부품모음	목표 부품
$\overline{TCS}_1$	$\{p_2\}$
$\overline{TCS}_2$	$\{p_3,\ p_4\}$
$\overline{TCS}_3$	$\{p_3,\ p_4,\ p_6\}$
$\overline{TCS}_4$	$\{p_6\}$
$\overline{TCS}_5$	$\{p_2,\ p_3,\ p_4\}$
$\overline{TCS}_6$	$\{p_2,\ p_6\}$
$\overline{TCS}_7$	$\{p_2,\ p_3,\ p_4,\ p_6\}$
$\overline{TCS}_8$	$\{\ \}$

표 4.7의 최종 목표부품모음(FTCS)에 대해서 (4.1)의 알고리즘을 통해서 최종 분해작업목록(FDTS)을 생성하면 표 4.8과 같다.

표 4.8: 최종 분해작업목록(FDTS)

최종 목표부품모음	최종 분해작업목록
$\overline{TCS}_1$	$\overline{DTS}_1 = \{t_1, t_3, t_4\}$
$\overline{TCS}_2$	$\overline{DTS}_2 = \{t_1, t_3, t_5, t_6\}$
$\overline{TCS}_3$	$\overline{DTS}_3 = \{t_1, t_2, t_3, t_5, t_6\}$
$\overline{TCS}_4$	$\overline{DTS}_4 = \{t_2, t_3\}$
$\overline{TCS}_5$	$\overline{DTS}_5 = \{t_1, t_3, t_4, t_5, t_6\}$
$\overline{TCS}_6$	$\overline{DTS}_6 = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$
$\overline{TCS}_7$	$\overline{DTS}_7 = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$
$\overline{TCS}_8$	$\overline{DTS}_8 = \{\ \ \}$

4.5. 사례연구 결과

실험한 결과는 표 4.9과 같다. 각 case 별로 서로 다른 결과값을 산출하는 것을 확인할 수 있었으며, Case 5 즉 $\overline{TCS}_1$, $\overline{TCS}_4$, $\overline{TCS}_6$ 은 $\overline{DTS}_1$ 으로 설정된 라인에서, $\overline{TCS}_2$, $\overline{TCS}_3$은 $\overline{DTS}_2$로 설정된 라인에서, $\overline{TCS}_5$, $\overline{TCS}_7$은 $\overline{DTS}_5$로 설정된 라인에서 분해를 할 때 가장 좋은 성과를 나타내는 것을 알 수 있다.

표 4.9: 사례연구 결과

구분	라인 1	라인 2	라인 3	결과
Case1	$\overline{DTS}_1$ $\overline{TCS}_1, \overline{TCS}_4, \overline{TCS}_6$	$\overline{DTS}_5$ $\overline{TCS}_2, \overline{TCS}_5, \overline{TCS}_7$	$\overline{DTS}_3$ $\overline{TCS}_3$	8.992
Case2	$\overline{DTS}_5$ $\overline{TCS}_2,\ \overline{TCS}_3,\ \overline{TCS}_5, \overline{TCS}_7$	$\overline{DTS}_6$ $\overline{TCS}_4, \overline{TCS}_6$	$\overline{DTS}_1$ $\overline{TCS}_1$	9.024
Case3	$\overline{DTS}_5$ $\overline{TCS}_2,\ \overline{TCS}_3,\ \overline{TCS}_5, \overline{TCS}_7$	$\overline{DTS}_1$ $\overline{TCS}_1, \overline{TCS}_6$	$\overline{DTS}_6$ $\overline{TCS}_4$	9.040
Case4	$\overline{DTS}_6$ $\overline{TCS}_1, \overline{TCS}_4, \overline{TCS}_6$	$\overline{DTS}_2$ $\overline{TCS}_2,\ \overline{TCS}_3,$	$\overline{DTS}_3$ $\overline{TCS}_5, \overline{TCS}_7$	9.048
Case5	$\overline{DTS}_1$ $\overline{TCS}_1, \overline{TCS}_4, \overline{TCS}_6$	$\overline{DTS}_2$ $\overline{TCS}_2, \overline{TCS}_3$	$\overline{DTS}_5$ $\overline{TCS}_5, \overline{TCS}_7$	**9.064**
⋮		⋮		

4.6. 유효성 입증

본 연구에서 제안한 모델에서 찾은 최적값이 어느 정도의 효용성을 갖고 있는지 확인하기 위해서 서로 다른 대안을 적용한 결과와 비교하였다.

4.6.1 유효성 평가 대안

본 연구의 유효성을 평가하기 위해서 활용하는 대안은 3가지로 다음과 같으며, 이에 대해서 주요 키워드별로 구분하면 표 4.10와 같다. 3가지의 대안은 선택적 분해에서 목표부품을 어떠한 기준으로 선정하느냐를 기준으로 선정하였다.

[대안 1] 모든 부품이 목표부품인 경우(완전 분해)

[대안 2] 기대수익 최대화하는 목표부품모음(TCS) 1가지

[대안 3] PRC는 검사 결과에 따라, POC는 모두 포함

[본 연구] PRC는 검사 결과에 따라, POC는 기대수익 양수인 경우만 포함

대안 1은 특정 목표부품만 추출하는 선택적 분해가 아닌 모든 부품을 분해하는 완전 분해이며, 대안 2는 분해 전 검사와 관계없이 단순 reusability만을 고려하여 기대수익을 최대화할 수 있는 1개의 분해 순서를 모든 라인에서 동일하게 적용하는 것이다. 마지막 대안 3에서 PRC는 분해 전 검사에 따라서 목표부품에 포함되며, POC는 모든 목표부품모음(TCS)에 포함되는 경우 즉, POC의 기대수익을 고려하지 않은 경우가 이에 해당한다.

표 4.10: 유효성 입증 대안 비교

대안	선택적 분해	reusability 고려	라인별 차별화	Inspection 고려	POC 기대수익 고려
대안 1	X	X	X	X	-
대안 2	O	O	X	X	-
대안 3	O	O	O	O	X
본 연구 방법론	O	O	O	O	O

4.6.2 유효성 평가 결과

4.6.1에서 설정한 대안들의 결과는 표 4.11과 같다. 본 연구에서 제안한 모델의 성과가 가장 좋았으며, 대안 3, 대안 2, 대안 1 순으로 좋은 성과를 나타냄을 확인할 수 있다.

표 4.11: 유효성 입증 결과

구분	best case	라인 1	라인 2	라인 3	결과
대안 1	task	$t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_4,\ t_5,\ t_6$			3.60
	target	$m_1,\ m_2,\ m_3,\ m_4,\ m_5,\ m_6$			
대안 2	task	$t_1,\ t_3,\ t_4,\ t_5,\ t_6$			4.0
	target	$m_2,\ m_3,\ m_4,$			
대안 3	task	DTS_6	DTS_5	DTS_1	8.40
	target	TCS_4, TCS_5, TCS_6	TCS_2, TCS_3, TCS_7	TCS_1, TCS_8	
본 연구 방법론	**task**	$\overline{DTS}_1$	$\overline{DTS}_2$	$\overline{DTS}_5$	**9.064**
	target	$\overline{TCS}_1, \overline{TCS}_4, \overline{TCS}_6$	$\overline{TCS}_2, \overline{TCS}_3$	$\overline{TCS}_5, \overline{TCS}_7$	

제 5 장 결론 및 향후 연구 방향

5.1 결 론

환경적인 이슈와 자원의 유한성을 고려하면 생산된 제품이 수명을 다한 이후의 활용에 대해서 고려해야 한다. 재활용, 재사용, 재제조가 바로 그것인데, 이를 위해서는 분해의 과정은 필수적이다. 이런 필수적인 분해과정을 효율적으로 그리고 경제적으로 하는 것이 분해에 관한 연구의 궁극적인 목표라고 할 수 있다. 수명을 다하고 폐기된 제품은 생산된 제품과는 다르게 매우 다양한 환경에서 사용되었기 때문에 그 상태 즉, 제품과 구성품의 품질이 매우 다양하다. 품질을 판단하고 그 부품이 재사용 가능한지 아닌지는 검사를 통해서 가능한데, 이는 여러 기술의 발전으로 인해서 분해 전에 완성품 단계에서 가능한 부품이 있고, 한편으로는 분해 전 검사로 판단이 제한되어 분해를 반드시 한 이후에 가능한 부품이 있다. 검사 결과로 재사용이 가능한 부품에 따라서 회수된 폐기제품을 그룹화할 수 있다. 이렇게 구분된 그룹의 수는 상태가 좋다면 재사용 될 수 있는 부품의 수에 따라 결정되며 이는 매우 많다. 경제성을 고려했을 때, 라인은 가동중에는 변경 없이 고정된 형태로 운영하는 것이 좋은데, 이러한 상황에서 라인이 어떤 부품을 추출할 수 있도록 설정할 것인지와 또 그룹별 폐기제품을 어느 라인에서 분해할 것인지를 결정하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 고정된 형태로 라인을 운영할 때 발생하는 손실을 고려하여 수익을 최대화할 수 있는 조합을 찾는 모델을 제시하였다. 선택적 분해에 관한 기존의 연구와는 달리 목표부품은 사전에 정해진 것이 아니라 사용되었던 환경에 의해서 서로 다르고 이는 검사의 과정을 통해서 결정될 수 있다는 점을 고려하여 모델 수립에 반영하였다. 이때 잠재적인 목표부품을 분해 전 완성품 상태에서

재사용 가능성을 판단할 수 있는 부품(PRC, Pre-inspection Component)과 분해를 해서 부품 단위로 확인을 해야 재사용 가능성을 판단할 수 있는 부품(POC, Post-inspection Component)으로 구분하였으며, POC의 경우 잠재적인 기대수익을 고려하여 분해계획 수립에 반영하였다. 모델을 활용하여 수익을 최대화할 수 있는 분해계획을 찾아내었고, 이를 다른 방식을 적용한 대안들과 비교하여 가장 좋은 성과를 나타냄을 확인하였다. 이는 기존의 분해계획 수립과 관련된 연구와 달리 제품 측면의 분해계획인 분해 planning과 라인 측면의 분해계획인 라인밸런싱을 동시에 고려한 분해계획이라는 점에서 타 분해계획 수립 연구와의 차별성을 갖는다.

5.2 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 둘 이상의 라인을 가동하는 환경에서 최적의 라인설정과 라인을 고려한 분해계획을 찾을 수 있는 모델을 제안하였다. 하지만 본 연구에서 제안한 모델은 다음의 몇 가지 한계와 개선점을 갖는다.

첫 번째로 라인별 가동률 측면을 고려하지 않았다. 제약식을 통해서 가동되지 않는 라인이 없도록 하였으나, 라인별로 업무량 배분에 대한 고려가 없어 특정 라인에 작업량이 몰릴 수 있다. 실제 본 연구에서 찾은 최적의 Case에서도 특정라인에 임무가 46%가량 몰리는 결과가 발생하였다. 이렇게 되면 전체적 시간이 지연되고 특정 라인에 업무과다로 효율적인 공장운영이 제한될 수 있다. 라인별 작업 배분량을 고려하기위한 적절한 제약조건에 대한 연구가 필요하다.

두 번째는 유연한 라인의 운영을 고려하지 못하였다. 예를 들어 설명하자면 A, B, C, D를 추출할 수 있도록 설정된 분해라인에 A, B, C가 재사용 가능한 폐기제품을 분해할 경우 A, B, C까지만 분해하고 이후는 분해하지 않도록 한다면

불필요한 작업을 줄일 수 있을 것이다. 하지만 본 모델에서는 D까지 분해를 하여 불필요한 분해작업이 추가로 소요된다. 이러한 경우와 같이 폐기제품의 목표 부품모음(TCS)에 따른 그룹별 유사도를 고려하여 유연하게 운영한다면 불필요한 작업을 최소화 할 수 있어 더 효율적이고 완성도 높은 모델이 될 것이다.

세 번째로 본 연구는 간단한 구조를 가진 제품을 통해서 모델의 성능을 평가하였지만, 더 복잡한 구조를 가진 제품을 대상으로 모델에 대한 추가적인 검증이 필요하다. 수식의 복잡도가 높기 때문에 부품과 분해작업의 수가 많은 복잡한 구조를 가진 제품에서는 문제가 풀리지 않을 수 있다. 이에 대한 검증과 더불어 모델의 복잡도를 줄일 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

Ashby, M. F. (2012) Materials and the Environment, Eco-informed Material Choice. 2nd ed

Babu, B. R., Parande, A. K., & Basha, C. A. (2007). Electrical and electronic waste: A global environmental problem. Waste Management and Research, 25(4), 307–318.

Bentaha, M. L., Battaiä, O., & Dolgui, A. (2015). An exact solution approach for disassembly line balancing problem under uncertainty of the task processing times. International Journal of Production Research, 53(6), 1807–1818.

Bentaha, M. L., Dolgui, A., Battaïa, O., Riggs, R. J., & Hu, J. (2018). Profit-oriented partial disassembly line design: dealing with hazardous parts and task processing times uncertainty. International Journal of Production Research, 56(24), 7220–7242.

Bentaha, M. L., Voisin, A., & Marangé, P. (2020). A decision tool for disassembly process planning under end-of-life product quality. International Journal of Production Economics, 219(July 2019), 386–401.

Boothroyd, G., & Alting, L. (1992). Design for Assembly and Disassembly. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 41(2), 625–636.

Cao, H., & Folan, P. (2012). Product life cycle: The evolution of a paradigm and literature review from 1950-2009. Production Planning and Control, 23(8), 641–662.

Cevikcan, E., Aslan, D., & Yeni, F. B. (2020). Disassembly line design with multi-manned workstations: a novel heuristic optimisation approach. International Journal of Production Research, 58(3), 649–670.

Colledani, M., & Battaïa, O. (2016). A decision support system to manage the quality of Endf-of-Life products in disassembly systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65(1), 41–44.

Denis, F., Vandervaeren, C., & Temmerman, N. De. (2018). Using network analysis and BIM to quantify the impact of Design for Disassembly. Buildings, 8(8), 1–22.

Eguia, I., Lozano, S., Racero, J., & Guerrero, F. (2011). A methodological approach for designing and sequencing product families in Reconfigurable Disassembly Systems. Journal of Industrial Engineering and Management, 4(3), 418–435.

Favi, C., Marconi, M., Germani, M., & Mandolini, M. (2019). A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling. Advanced Engineering Informatics, 39(May 2018), 62–79.

Güngör, A. & Gupta, S. M., (1999). Disassembly Line Balancing. Proceedings of the 1999 Annual Meeting of the Northeast Decision Sciences Institute. 93-195

Güngör, A., & Gupta, S. M. (2002). Disassembly line in product recovery. International Journal of Production Research, 40(11), 2569–2589.

Güngör, A. (2006). Evaluation of connection types in design for disassembly (DFD) using analytic network process. Computers and Industrial Engineering, 50(1–2), 35–54.

Guo, X., Zhou, M., Liu, S., & Qi, L. (2021). Multi resource-Constrained Selective Disassembly with Maximal Profit and Minimal Energy Consumption. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 18(2), 804–816.

Hischier, R., Wäger, P., & Gauglhofer, J. (2005). Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). Environmental Impact Assessment Review, 25(5 SPEC. ISS.), 525–539.

Kalayci, C. B., Polat, O., & Gupta, S. M. (2016). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem. Annals of Operations Research, 242(2), 321–354.

Kalaycilar, E. G., Azizoɨlu, M., & Yeralan, S. (2016). A disassembly line balancing problem with fixed number of workstations. European Journal of Operational Research, 249(2), 592–604.

Kara, S., Pornprasitpol, P., & Kaebernick, H. (2006). Selective disassembly sequencing: A methodology for the disassembly of end-of-life products. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55(1), 37–40.

Kim, H. J., Lee, D. H., & Xirouchakis, P. (2007). Disassembly scheduling: Literature review and future research directions. International Journal of Production Research, 45(18–19), 4465–4484.

Kim, H. J., Lee, D. H., Xirouchakis, P., & Züst, R. (2003). Disassembly scheduling with multiple product types. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 52(1), 403–406.

Kim, H. J., & Xirouchakis, P. (2010). Capacitated disassembly scheduling with random demand. International Journal of Production Research, 48(23), 7177–7194.

Kim, H. W., Park, C., & Lee, D. H. (2018). Selective disassembly sequencing with random operation times in parallel disassembly environment. International Journal of Production Research, 56(24), 7243–7257.

Kim, J., Park, S., & Kim, H. M. (2022). Optimal Modular Remanufactured Product Configuration and Harvesting Planning for End-of-Life Products. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 144(4), 1–9.

Kuo, T. C., Huang, S. H., & Zhang, H. C. (2001). Design for manufacture and design for "X": Concepts, applications, and perspectives. Computers and Industrial Engineering, 41(3), 241–260.

Kwak, M. J., Hong, Y. S., & Cho, N. W. (2009). Eco-architecture analysis for end-of-life decision making. International Journal of Production Research, 47(22), 6233–6259.

Lambert, A. J. D. (2003). Disassembly sequencing: A survey. International Journal of Production Research, 41(16), 3721–3759.

Lambert, A. J. D. (1997). Optimal disassembly of complex products. International Journal of Production Research, 35(9), 2509–2524.

Lee, D. H., Rang, J. G., & Xirouchakis, P. (2001). Disassembly planning and scheduling: Review and further research. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215(5), 695–709.

Lee, D. H., Xirouchakis, P., & Zust, R. (2002). Disassembly scheduling with capacity constraints. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 51(1), 387–390.

Ma, Y. S., Jun, H. B., Kim, H. W., & Lee, D. H. (2011). Disassembly process planning algorithms for end-of-life product recovery and environmentally conscious disposal. International Journal of Production Research, 49(23), 7007−7027.

Mishra, A., Verma, P., & Tiwari, M. K. (2021). A circularity-based quality assessment tool to classify the core for recovery businesses. International Journal of Production Research(Online).

Mitrouchev, P., Wang, C. G., Lu, L. X., & Li, G. Q. (2015). Selective disassembly sequence generation based on lowest level disassembly graph method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(1−4), 141−159.

Moussa, M., & ElMaraghy, H. (2022). Multi-period additive/subtractive product platform design and inventory management. International Journal of Production Research(Online).

Nwankpa, C., Eze, S., Ijomah, W., Gachagan, A., & Marshall, S. (2021). Achieving remanufacturing inspection using deep learning. Journal of Remanufacturing, 11(2), 89−105.

Ondemir, O., & Gupta, S. M. (2014). A multi-criteria decision making model for advanced repair-to-order and disassembly-to-order system. European Journal of Operational Research, 233(2), 408−419.

Ong, S. K., Chang, M. M. L., & Nee, A. Y. C. (2021). Product disassembly sequence planning: state-of-the-art, challenges, opportunities and future directions. International Journal of Production Research, 59(11), 3493−3508.

Özceylan, E., Kalayci, C. B., Güngör, A., & Gupta, S. M. (2019). Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions. International Journal of Production Research, 57(15−16), 4805−4827.

Reveliotis, S. A. (2007). Uncertainty management in optimal disassembly planning through learning-based strategies. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), 39(6), 645−658.

Ridley, S. J., & Ijomah, W. (2015). A novel pre-processing inspection methodology to enhance productivity in automotive product remanufacture: an industry-based research of 2196 engines. Journal of Remanufacturing, 5(1).

Slama, I., Ben-Ammar, O., Masmoudi, F., & Dolgui, A. (2019). Disassembly scheduling problem: Literature review and future research directions. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 601–606.

Smith, S., Smith, G., & Chen, W. H. (2012). Disassembly sequence structure graphs: An optimal approach for multiple-target selective disassembly sequence planning. Advanced Engineering Informatics, 26(2), 306–316.

Soh, S. L., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2014). Design for disassembly for remanufacturing: Methodology and technology. Procedia CIRP, 15, 407–412.

Tang, Y., & Zhou, M. (2006). A systematic Approach to Design and Operation of Disassembly Lines IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 3(3), 324–329.

Villalba, G., Segarra, M., Chimenos, J. M., & Espiell, F. (2004). Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly. Ecological Economics, 50(3–4), 195–200.

Wang, K., Li, X., Gao, L., Li, P., & Gupta, S. M. (2021). A genetic simulated annealing algorithm for parallel partial disassembly line balancing problem. Applied Soft Computing, 107, 107404.

Williams, E. D., & Sasaki, Y. (2003). Energy analysis of end-of-life options for personal computers: Resell, upgrade, recycle. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 187–192.

Yeh, W. C. (2012). Simplified swarm optimization in disassembly sequencing problems with learning effects. Computers and Operations Research, 39(9), 2168–2177.

Zhou, Z., Liu, J., Pham, D. T., Xu, W., Ramirez, F. J., Ji, C., & Liu, Q. (2019). Disassembly sequence planning: Recent developments and future trends. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 233(5), 1450–1471.

Zikopoulos. C., Panagiotidou. S., & Nenes. G. (2010). The value of sampling inspection in a single-period remanufacturing system with stochastic returns yield. IFIP Adv Inf Commun Technol 338, 128-135.

Abstract

Planning for selective disassembly considering condition of End-of-Life product and operation of disassembly line

Dongseok Son
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Companies must strive not only to make profits but also to prevent and improve environment. Therefore, it is necessary not only to simply produce and sell products, but also to consider deeply the post-disposal stage. Recycling products after the disposal provides great effects in terms of economy and environment, and the process of disassembly is essential to do recycling. Therefore, it is important to establish an efficient and economical disassembly plan, which is the core of research on disassembly.

In the framework of selective disassembly based on inspection, this study proposes an optimization model that simultaneously determines how to organize the disassembly process for each line and which line to disassemble for each group of EOL products. This is different from previous studies in that it is a disassembly plan that considers both product and line aspects. Since the condition of the EOL product varies depending on the environment in which the product was operated, the target component is determined through inspection rather than pre-determined, and the method of this inspection can be divided into pre-disassembly and post-disassembly inspection. In addition, it is considered that the revenue and cost would vary depending on the setting of the disassembly line. The model of this study aims to maximize net profits and validated its effectiveness through comparison with disassembly plans using other methods.

keywords: Selective disassembly, Various condition of EOL product, Target component, Inspection
Student Number: 2021-27053