

# IoT 기기 재설계를 위한 적층제조를 활용한 부품병합 설계 방법에 대한 연구

김삼연\*

전주대학교 기계시스템공학과 조교수

## A Study of Design for Additive Manufacturing Method for Part Consolidation to Redesign IoT Device

Samyeon Kim\*

Assistant Professor, Department of Mechanical Systems Engineering, Jeonju University

**요약** 최근 4차 산업혁명으로 인하여, 고객 제품형 제품 설계 및 새로운 서비스 개발을 위하여 IoT 기술이 주목받고 있다. 최근 적층제조 기술은 IoT 센서를 직접 제작하거나, 센서를 포함한 기기를 만드는 분야에 다양하게 활용되고 있다. IoT 기기를 적층제조를 활용하여 제작시, 적층제조 고유의 설계 장점을 활용하기 위해 다양한 부품들을 병합하는 설계 방법론이 큰 관심을 받고 있다. 부품병합을 통해 조립 공정을 단축하고, 부품 경량화 등의 장점을 이룰 수 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 적층제조를 활용한 부품병합을 지원하기 위한 설계 방법론을 개발하였다. 이를 통해 제품의 기능 및 제품 내 부품의 기능과 물리적 연결성을 분석한 제품 아키텍처를 생성하고, 인접한 기능들 및 부품을 Girvan Newman 알고리즘을 활용하여, 최종 부품병합 후보군을 선정하도록 지원한다. 제안한 설계 방법론을 검증하고자 사례연구를 통해 적층제조로 출력된 전기 자전거의 부품병합과정을 분석하였다.

**주제어** : IoT 기기, 적층제조, 부품병합, 그래프 클러스터링, 설계 방법론

**Abstract** Recently, IoT technology has great attention and plays a key role in 4<sup>th</sup> industrial revolution in order to design customized products and services. Additive Manufacturing (AM) is applied to fabricate IoT sensor directly or IoT sensor embedded structure. Also, design methods for AM are developing to consolidate various parts of IoT devices. Part consolidation leads to assembly time and cost reduction, reliability improvement, and lightweight. Therefore, a design method was proposed to guide designers to consolidate parts. The design method helps designers to define product architecture that consists of functions and function-part relations. The product architecture is converted to a network graph and then Girvan Newman algorithm is applied to cluster the graph network. Parts in clusters are candidates for part consolidation. To demonstrate the usefulness of the proposed design method, a case study was performed with e-bike fabricated by additive manufacturing.

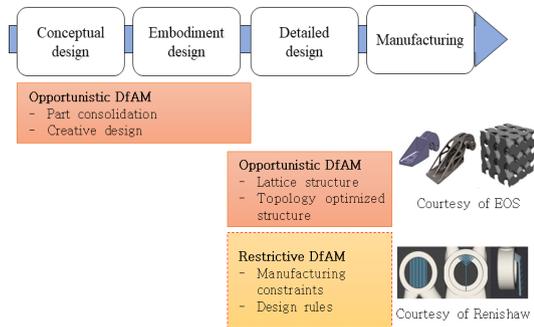
**Key Words** : IoT device, Additive Manufacturing, Part Consolidation, Graph Clustering, Design method

\*교신저자 : 김삼연(samyeon.kim@jj.ac.kr)

접수일 2022년 3월 5일 수정일 2022년 4월 11일 심사완료일 2022년 4월 14일

## 1. 서론

4차 산업혁명으로 인하여, IoT 센서를 기반으로 다양한 기기들이 개발되고 있으며, 이러한 기기들은 점점 소형화되고 있는 추세이다 [1-3]. 이를 통해 획득되는 다양한 데이터를 바탕으로 고객맞춤형 제품 및 서비스를 개발하고 있다. 또한 한가지 IoT 센서로 다양한 데이터를 획득하기 위해 적층제조 (또는 3D 프린팅) 기술이 적용되어, 복잡한 형태의 센서를 만들어 활용되고 있기도 하다. 이러한 센서는 복잡한 구조물에 직접 출력이 되어, 구조물 성능평가에 많이 활용된다. 따라서, IoT 센서가 부착될 기기나 복잡한 구조물 제작에 적층제조가 많이 활용되고 [4, 5], 구조물의 물성치를 파악하기 위한 연구들이 진행되고 있다 [6].



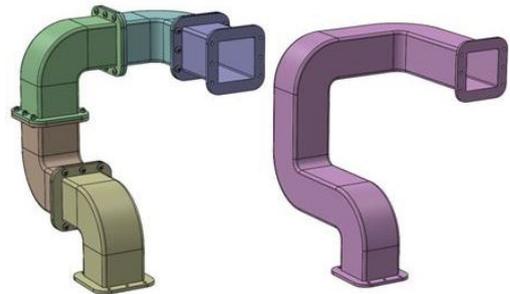
[Fig. 1] Scope of DfAM

이러한 기술을 활용하기 위해, 적층제조고려설계 (Design for Additive Manufacturing (DfAM))에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Fig. 1에서처럼 적층제조 고려설계는 크게 2가지로 구분되는데, 기회적 DfAM 과 제한적 DfAM 이 있다 [7]. 기회적 DfAM 대부분은 세부 부품 설계 단계에서 단일 부품에 격자구조 및 위상최적화 구조를 적용하는 것을 주 목적으로 하고 있고, 부품 병합과 같이 설계 초기 단계에서 다루어져야 할 적층제조 설계 장점에 대한 연구는 미미하다. 제한적 DfAM 은 제조제약조건 파악을 위해 실험적 방법들을 통해 재료-장비의 조합으로 발생하는 규칙들 파악하는데 집중하고 있다.

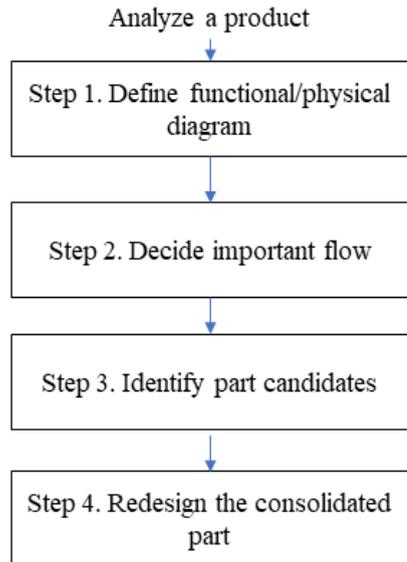
본 연구는 제품초기 단계에서 부품병합을 다룸으로써 적층제조 장점 최대한 활용하고자 한다. 부품병합 (Part Consolidation)은 여러개의 부품들을 단일부품으로 병합하는 것으로, 부품의 기하학적 구조가 복잡하게 되지만, 부품 소형화, 경량화 등의 설계 목표를 달성할

수 있게 된다 [13]. Fig. 2 는 부품 병합에 대한 예를 보여주고 있다. 예제는 에어 덕트로 원래의 제품 (왼쪽)은 5개의 주부품 및 24개의 조립용 볼트와 너트로 구성되어 있지만, 부품이 병합이 된 후 (오른쪽) 1개의 부품으로 제작이 되어, 조립공정을 간소화하도록 하였다.

부품병합시 우선 고려해야할 부분은 부품 후보군을 찾는 것이다. 부품 후보군은 적층제조 장비에서 출력 가능한 사이즈, 부품 사이즈, 재료 사용 가능성, 유지보수 주기에 따른 부품간 관련성 등을 고려하여 선정이다 [8]. 하지만, 부품 선정에 관한 가이드라인 및 설계 방법이 부족하다.



[Fig. 2] An example of air duct before consolidation (left) and after consolidation (right) [5]



[Fig. 3] The proposed design method for part consolidation

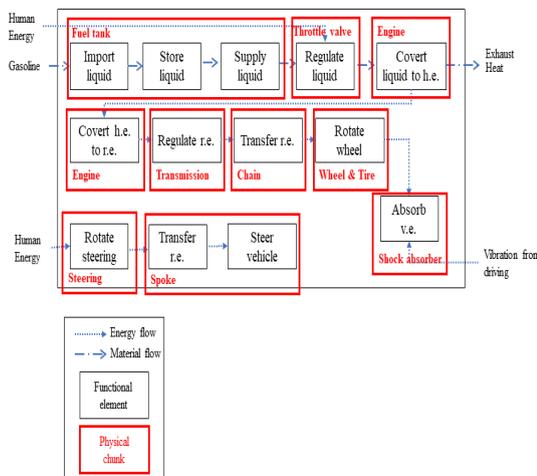
따라서, 본 연구에서는 부품병합을 위한 후보군 선정 및 재설계를 위한 설계방법론을 제시하였다.

## 2. 부품병합을 위한 설계 방법론

본 연구에서 제시한 부품 병합 설계 방법론은 초기 설계 단계에서 설계자에게 적층제조로 출력될 부품 후보군을 제시하고, 이를 재설계 할 수 있도록 가이드를 제공한다. Fig. 3 은 본 연구에서 제안한 방법론의 4가지 단계에 대해 보여주고 있다.

첫 번째 단계에서는 제품의 세부 기능과 그 기능을 구현하기 위한 부품들로 구성된 제품 아키텍처 (Product Architecture) 다이어그램을 만든다 [9]. 이 다이어그램은 제품의 주요 기능들을 세분화하여 표현하고, 세분화된 기능들의 흐름을 표현한다. 기능의 흐름은 크게 3가지로 재료 흐름, 신호 흐름, 에너지 흐름으로 나뉘어, 박스 형태로 표현된 기능들의 연결성을 표현해준다. Fig. 4 에 보여지는 제품 아키텍처는 모터사이클의 주요 기능 및 부품들을 보여주고 있다.

두 번째 단계에서는 제품 아키텍처에서 표현된 기능의 흐름 중 주요 흐름을 분석하여, 그 흐름과 관련된 기능들 및 부품들을 탐색하는 과정이다. 예를들어, Fig 2. 에 있는 에어덕트는 공기의 흐름이 주요 흐름으로 선택되어, 그와 관련된 부품들이 병합되기 위해 선택되었다. Fig 3. 의 경우에선, 주요 흐름을 재료 흐름으로 선정한 경우, 가솔린과 관련된 기능과 부품들 (예를들어, 연료탱크, 쓰로틀 밸브, 엔진 등)이 부품병합 후보군으로 선택될 것이고, 에너지 흐름을 선택할 경우에는 조향과 관련된 기능 및 부품 (예, 스티어링 핸들, 스포크 등)이 부품병합 후보군으로 선택될 것이다. 따라서, 이 주요 흐름을 재설계 목적에 맞게 잘 선택해야 한다.



[Fig. 4] Product architecture of a motorcycle [10]

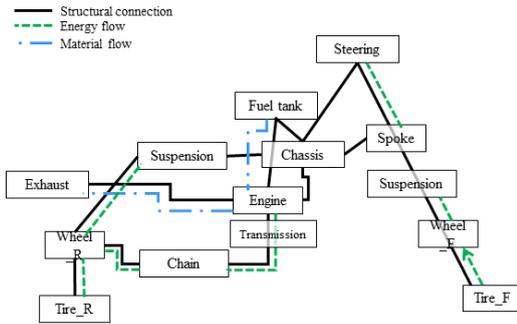
세 번째는 주요 흐름을 선정 후 부품후보군을 최종적으로 선택하고, 이를 그래프 네트워크 형태로 표현한다. 네트워크에서 노드(Node)는 부품이 되고, 엣지(Edge)는 부품간 연결성을 표현한다. 부품 병합 후보군 선정을 위하여 그래프 클러스터링 방법 중 하나인 Girvan Newman 알고리즘을 활용하였다 [11]. 아래의 공식을 이용하여 매개 중심성 (Betweenness Centrality,  $C_B$ )을 측정한다.  $C_B(e)$  는 시작노드  $s$ 에서 종점노드  $t$  까지의 모든 최단경로 중 엣지  $e$ 를 지나는 최단경로의 비율을 더한 값으로 나타낸다. 계산된  $C_B(e)$ 값 중 높은 값을 가진 엣지를 삭제하여, 노드들을 그룹화 하는데에 Girvan Newman 알고리즘을 사용하였다.

$$C_B(e) = \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma(s,t|e)}{\sigma(s,t)}$$

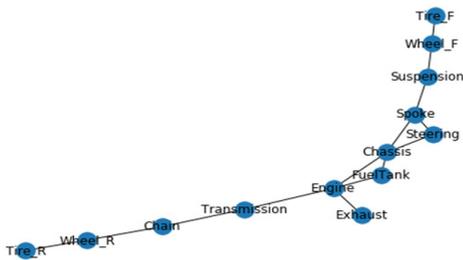
이렇게 해서, 같은 제품 내에서 다양한 그룹화 결과가 산출된다. 예를 들면, 제품이 5개의 부품 (A, B, C, D, E)으로 구성된다고 가정될 경우, 알고리즘을 통해 그룹화 대안 1 에서는 (A,B) (C, D, E) 2개의 그룹이 생성되고, 대안 2에서는 (A,B) (C,D), (E) 3개의 그룹이 생성되는 등 다양한 대안들이 생성된다. 이 결과를 평가하기 위해 모듈화 수치 (Modularity value,  $Q$ )을 아래의 식을 이용하여 계산 후, 높은  $Q$  값을 가진 그룹화된 제품을 최종 후보군으로 선정하였다 [11].  $Q$  값이 높다는 것은 그룹내 부품간 연결성은 복잡하지만, 그룹 간 연결성은 약하다는 의미이다. 일반적으로  $Q$  값은 0.3보다 크면, 클러스터링이 잘 이루어졌다고 판단한다. 아래 식에서  $i$  와  $j$  는 노드를 뜻하고, 파라미터  $k_i$  는 노드  $i$  에 연결된 모든 엣지들의 인접강도에 대한 합이다.  $A_{ij}$  는 인접 행렬이고,  $c_i$  는 노드를 포함한 그룹을 뜻한다. 즉,  $\delta(c_i, c_j) = 1$  이면, 노드  $i$  와  $j$  는 같은 그룹내에 있음을 뜻하고, 반대의 경우는  $\delta(c_i, c_j) = 0$  이다. 이 공식은 모듈 설계시 자주 쓰이는 공식이기도 하다.

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j)$$

마지막 단계는 각 그룹들은 기존 부품들 중 병합을 위해 선정이 되었고, 선정된 부품을 병합 후 재설계를 지원하는 단계이다. 부품 재설계시 재설계 목적에 따라 격자 구조 및 위상최적화 구조 등을 사용할 수 있다 [12, 14].



[Fig. 5] Function-part diagram of a motorcycle



[Fig. 6] Graph network of a motorcycle based on structural connections

### 3. 사례연구

제안한 설계 방법론의 유용성을 보여주기 위해 사례연구를 실시하였다. 사례연구 대상은 기존 내연기관 모터사이클을 전기자전거로 재설계하는 과정을 표현하였고, 전기 자전거는 BigRep 회사에서 제작한 대형 FDM (Fused Deposition Modeling) 방식 적층제조로 제작되었다 [15].

첫 번째 단계에서 모터사이클의 주요 기능 및 부품에 대한 제품 아키텍처가 개발되었고, 이는 Fig. 4 와 같다. Fig. 5 는 제품 아키텍처의 기능을 부품에 중첩시켜 표현한 것이다.

두 번째 단계에서는 주요 기능 흐름을 선정해야 한다. 이 사례연구에서는 부품 병합을 위해 부품간의 거리가 가깝고 비슷한 기능을 수행하는 부품들이 병합될 확률이 높으므로, 구조적 연결 (Structural connections)를 우선 고려하였다. Fig. 5에서 구조적 연결만 고려하여 이를 그래프로 표현하면 Fig. 6 와 같다. 원형으로 표현된 것은 부품의 이름이며, 엣지는 부품간 구조적 연결을 의미한다.

세 번째 단계에서는 Girvan Newman 알고리즘을 통해 Fig. 5의 그래프 네트워크에서 다양한 그룹들을 생성하였다. 이 중 모듈화 수치 Q 가 제일 높은 그룹들 (Q = 0.45)을 선정하였고, Table 1. 에서와 같이 그룹의 갯수는 총 4개이다.

네 번째 단계에서는 선택된 후보군들을 적층제조 장점을 활용하여 재설계한다. 3번 그룹을 제외한 다른 그룹들은 부품병합 및 추가적인 적층제조 장점 (예, 격자구조, 부품 내부에 매립 등)을 활용하여, 새롭게 재설계되었음을 알 수 있다. 재설계되는 과정은 설계자의 창의력과 적층제조 장점에 대한 높은 이해도가 필요하다. 이러한 단계를 거쳐 최종적으로 FDM으로 제작된 전기자전거는 Fig.7 에 보여지고 있다 [15].

<Table 1> Result of part consolidation

No.	Candidates	Consolidated and redesigned part
1	<p>Tire_F, Wheel_F, Suspension_F</p>	<p>Airless tire</p>
2	<p>Steering, Chassis, Spoke</p>	<p>Forkless steering</p>
3	<p>Exhaust, Engine, Fuel tank</p>	<p>Parts related combustion engine are replaced by battery and motor.</p>
4	<p>Chain, Wheel_R, Tire_R, Transmission, Suspension_R</p>	<p>Motor-embedded wheel</p>



[Fig. 7] Redesigned e-bike with part consolidation [15]

#### 4. 결론

부품병합은 적층제조 설계 장점을 활용하기 위한 가장 중요한 방법 중 하나이다. 이 연구를 통해 부품병합 설계 방법론을 제시하였다. 본 연구의 기여도는 IoT 기기를 포함한 다양한 어플리케이션의 부품병합 후보군을 선정하고 재설계할 수 있도록 지원하는 것이다. 부품 병합을 위해서는 먼저 제품의 기능과 부품간의 관련성을 이해한 다음, 병합된 부품의 기하학적 복잡도를 높이기 위해 그 래프 클러스터링 기법을 통해 최종 부품 후보군을 선정하였다. 부품 후보군 선정 이후에는 적층제조 설계장점을 재설계 목적에 맞게 선정하여, 부품 병합시 설계변경을 한다. 본 연구를 바탕으로 한 미래연구에서는 부품후보군에 적합한 적층제조 설계 장점을 자동으로 선정해주는 의사결정 방법론에 대해 연구를 진행할 것이다.

#### REFERENCES

- [1] D.G.Kim, H.S.Lee, T.W.Kim and H.W.Lee, "LBS/GPS based Bicycle Safety Application with Arduino," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.2, No.1, pp.7-15, 2016.
- [2] T.K.Kim, "IoT(Internet of Things)-based Smart Trash Can," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.6, No.1, pp.17-22, 2020.
- [3] S.C.Jang and J.W.Lee, "Development of Intelligent IoT Exhaustion System for Bag Filter Collector," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.5, No.1, pp.29-34, 2019.
- [4] B.Stucker, I.Gibson, and D.Rosen, Additive Manufacturing Technologies, 2nd ed., New York: Springer, 2015.
- [5] T.Wohler, Wohlers report 2018, Wohlers Associates Inc. 2018.
- [6] I.H.Ahn, "A Study for the Mechanical Properties with Infill Rate in FDM Process to Fabricate the Small IoT

Device," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.6, No.3, pp.77-82, 2020.

- [7] D.W.Rosen, "Research supporting principles for design for additive manufacturing," Virtual and Physical Prototyping, Vol.9 No.4, pp. 225-232, 2014.
- [8] S.Yang, F.Santoro, and Y.F.Zhao, "Towards a Numerical Approach of Finding Candidates for Additive Manufacturing-Enabled Part Consolidation," Journal of Mechanical Design, Vol.140, No.4, 2018.
- [9] S.D.Eppinger and K.T.Ulrich, "Product design and development," New York: McGraw-Hill, 2003.
- [10] S.Kim, Y.Tang, D.Rosen, "Design for additive manufacturing: Simplification of product architecture by part consolidation for the lifecycle," Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas, USA, 2019.
- [11] M.E.J.Newman, "Analysis of weighted networks," Physical Review E, Vol.70, 056131, 2004.
- [12] M.Kumke, H.Watschke, P.Hartogh, A.K.Bavendiek, and T.Vietor, "Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials," International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Vol.12, No.2, pp. 481-493, 2018.
- [13] S.Kim, S.K.Moon, "A Part Consolidation Design Method for Additive Manufacturing based on Product Disassembly Complexity," Applied Sciences, Vol.10, No.3, 2020.
- [14] A.Blosch-Paidosh, and K.Shea, "Design Heuristics for Additive Manufacturing Validated Through a User Study," Journal of Mechanical Design, Vol.141, No.4, 2019.
- [15] BigRep GmbH, 2019, NERA e-motorbike[Internet], <https://bigrep.com/posts/deeper-look-into-the-fully-3d-printed-e-bike-nera/>

김 삼 연(Samyeon Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 전북대학교 기계공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 전북대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 2017년 5월 : Nanyang Technological University, 기계공학 (공학박사)
- 2017년 5월 ~ 2020년 8월 : Singapore University of Technology and Design, Research Fellow
- 2017년 10월 ~ 2018년 1월 : National Institute of Standards and Technology, 연구원
- 2020년 9월 ~ 현재 : 전주대학교 기계시스템공학과, 조교수

<관심분야>

사물인터넷, 적층제조, 스마트 제조, 제품 설계 및 개발