



An investigation on the complexity of additive manufacturing and its impact on manufacturing performance

김규동 (학부 4학년)

윤도식 (학부 3학년)

정다은 (학부 3학년)

- **Additive Manufacturing**

- 최근 고객들은 다양한 제품들을 원하는 경향이 증가하고 있음 (Govers 2005)
- 적층 제조는 맞춤형 제품을 위한 금형 제작 및 툴링으로 인해 발생하는 추가 비용이 없기 때문에 대량 맞춤화에 효과적인 기술임 (Durakovic 2018)
- 적층 제조의 processing time은 기존 제조에 비해 짧음 (Achillas et al. 2015)
- 그러나 적층 제조의 특징인 대량 맞춤화로 인하여 발생하는 시스템 레벨에서의 프로세스는 다양하고 복잡함
- 적층 제조의 복잡성을 계산하고 평가하는 방법은 다양하며 복잡성은 적층 제조 이해를 위한 핵심 요소 중 하나임 (Fera et al. 2017) → 다양한 측면에서의 적층 제조 복잡성 평가 연구가 필요

- **Complexity of Conventional Manufacturing**

- 고객의 요구를 충족하기 위해 상품과 서비스를 제공하는 프로세스와 그 안에 포함 된 전략은 지난 몇 년 동안 지속적으로 변화하고 진화하여 효율성이 크게 향상되었지만 복잡성도 증가 (Stump and Badurdeen 2009)
- 불필요하게 복잡한 공장 및 과도한 수의 구성품은 복잡성을 증가시켜 공정의 신뢰성 및 통제성을 저하 (Frizelle 1996)
- 제품 설계상의 복잡성은 제조 복잡성으로 전가되며 제품 생산에 추가 비용이 발생 (Crespo-Varela 2011)
- 기존 제조의 복잡성은 제조성과에 부정적인 영향을 미침 → 하지만 적층 제조의 복잡성과 제조성과 관계에 관한 연구 부재 → 적층 제조 복잡성이 제조성과에 미치는 영향에 대한 이해가 필요

Main Objectives

적층 제조에 관련된 다양한 복잡성을 정의하고 제조성과에 미치는 영향을 규명

- Objectives

- 적층 제조에서 발생하는 복잡성을 문헌연구 및 shannon's information theory를 이용하여 제시
- Discrete event simulation을 이용하여 fused filament fabrication (FFF)방식의 CFR-PEEK 소재를 사용하는 가상 3D printer factory modeling → 앞서 정의한 복잡성이 대량 생산에서의 적층 제조 제조성과의 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위함
- 많은 연구 및 적층 제조를 적용하고 있는 aircraft component를 case study로 설정
- 복잡성에 따라 변하는 제조성과를 simulation model을 통해 결과 도출
- Regression analysis을 통해 complexity와 제조성과의 관계를 통계적으로 파악



적층 제조 성과 평가에 있어 다양한 적층 제조 기반 시스템에 적절하게 활용될 수 있는 복잡성 평가 프레임 워크의 기초 토대 제시

- **Complexity**

- 시스템의 복잡성이 높아지면 시스템의 불확실성이 증가 → 현재 시스템을 표현하기 위한 정보의 양이 증가함과 관련 (Shannon 1948, Efthymiou et al. 2016)
- Static complexity
 - 시스템구조 또는 물리적 구성과 관련된 time-independent complexity이며 시스템의 구조적 특성으로 인해 내재된 불확실성을 반영 (Frizelle 1996, Wu et al. 2007, Park and Kremer 2015)

- **Static Complexity of Additive Manufacturing**

- CAD 복잡성 평가를 위해 STL 구조와 전문가 의견을 이용 (Valentan et al. 2011)
- EBM에서의 mean connectivity value를 shape complexity로 반영하여 복잡성 정의 (Baumers et al. 2017)
- FFF에서의 shape complexity를 part의 표면적과 부피 비율을 이용하여 복잡성 정의 (Pradel et al. 2017)
- 3D CAD모델의 shape complexity를 volume complexity와 element complexity로 나타내어 CAD 모델 data size와 연관시켜 평가 (Kwon et al. 2016)
- 적층 제조에서의 복잡성을 shape complexity를 part volume과 envelope convex volume의 비율로 나타내고 이를 적층 제조과정에서의 비용에 어떤 영향을 미치는지 평가 (Fera et al. 2017)
- CAD모델의 design complexity를 부피와 면적 비율 및 STL 구조를 이용하여 정의하고 모델링 시간의 미치는 영향 평가 (Johnson et al. 2017)



Research Gaps

- 적층 제조 복잡성이 제품 형상에만 초점이 되어 이에 대한 제조성과에 관한 영향력 연구 부재
- 적층 제조 관점에서의 제조 프로세스 복잡성에 관한 연구 부재

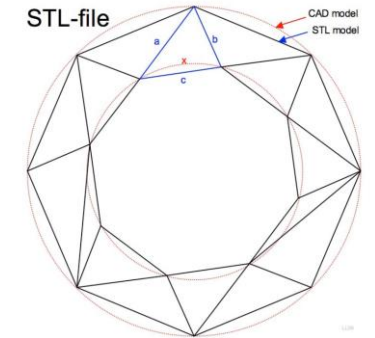
- 적층 제조의 static complexity를 design 및 manufacturing 관점에서 정의하여 수치화
- Design 및 manufacturing complexity와 제조성과 간에 역학 관계를 규명

• Static Design Complexity

- 적층제조에서의 design complexity를 제품의 형상 및 기하학적 구조와 연관하여 제시 → 기존연구를 토대로 제시

• STL (Standard Triangle Language) Complexity

- STL은 3차원 데이터를 표현하는 국제 표준 형식 중 하나로 대부분의 3D 프린터에서 입력 파일로 많이 사용 되고 있음
- CAD 모델의 형태는 STL모델의 삼각형으로 변환 될 수 있음
- STL의 삼각형 수는 CAD 모델에 대한 복잡한 설계를 의미 (Valentan et al. 2011)
- ***STL complexity = The number of triangle of the product in STL***



<Triangle of STL model >

• Geometry Complexity

- Complexity는 제품의 면적 또는 부피에 의해 정의된 비율에 의해 도출 (Johnson et al. 2017)
- ***Geometry complexity = $V_R + A_R$***
 - V_P = The volume of the product
 - V_B = The volume of the bounding box of the product
 - $V_R = 1 - \frac{V_P}{V_B} = \text{Volume ratio}$ (Joshi and Ravi 2010)
 - A_C = The surface area of a cube of equal volume to that of the product
 - A_P = The surface area of the product
 - $A_R = 1 - \frac{A_C}{A_P} = \text{Area ratio}$ (Chougule and Ravi 2005)

• Static Manufacturing Complexity

- 적층 제조에 대한 제조 프로세스의 복잡성이 명확하게 논의되지 않음
- 복잡한 시스템은 신뢰성 및 통제성에 부정적으로 영향을 끼치며 이는 불필요한 비용을 야기시킬 수 있음 (Frizelle, 1996)
- 전통 제조에서는 manufacturing 관점에서의 complexity를 information theory를 이용하여 도출함 → 본 연구는 이를 적층 제조에 적용시켜 manufacturing 관점에서의 complexity를 새롭게 개발

• G-code Complexity

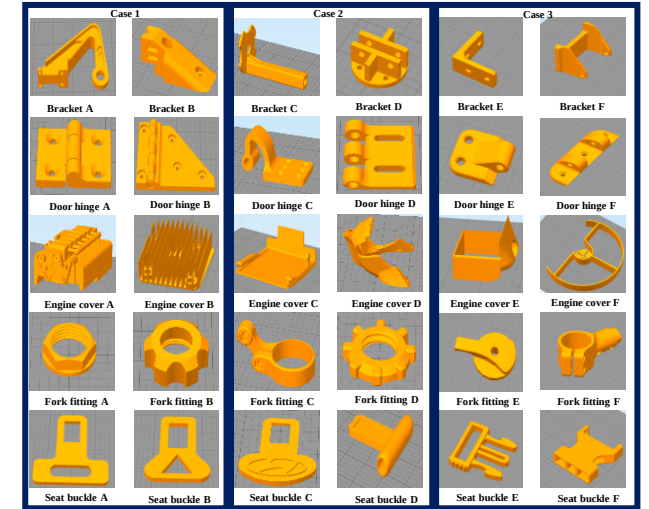
- 적층 제조에서 제품을 출력하기 위한 G-Code (X, Y)의 공통성에 대한 불확실성 고려하기 위함
- 복잡한 노즐의 움직임을 요구하는 제품들은 많은 양의 G-code와 다양한 G-Code (X, Y) 좌표를 요구하고 이는 적층 제조상의 제조 프로세스 복잡성으로 전가
- **G - code complexity** = $\sum_i I_i = \sum_i (-\log_2 C_i)$
- Total information content of a product for additive manufacturing
 - N = The number of total G - Code (X,Y) for building a product
 - n_i = The number of same G - Code (X,Y) $\forall i \in \text{kind of G - Code}$
 - $C_i = \frac{n_i}{N}$ = Probability (commonality) of being the same of each G - Code (X,Y) for building a product
 - $I_i = -\log_2 C_i$ = Individual information content of each G - Code (X,Y) for building a product

• Process Complexity

- Maximum system level 충족에 대한 불확실성 고려 (Suh, 1999)
- System level이 증가하면, 기계의 효율성은 증가하고 customer need에 부정적인 영향을 끼치는 system buffer은 감소
- **Process complexity** = $-\log_2 f_i$
- Information content of a product for additive manufacturing
 - $v_i = \frac{\text{Extruded filament volume of product (mm}^3\text{)}}{\text{Processing time of product (sec)}} = \text{Actual processing rate of 3D printer } \forall i \in \text{products}$
 - μ = Maximum processing rate of 3D printer
 - $f_i = \frac{v_i}{\mu} = \text{Probability of satisfying the capable of processing rate}$

- **Simulation** (by 'SIMIO' Simulation Tool) (<https://www.simio.com/index.php>)

- 적층 제조 기반의 대량생산에서 제조성과를 확인하기 위해, discrete event simulation을 이용하여 make-to-order 전략의 가상 3D 프린팅 공장을 모델링
- 샘플디자인은 온라인 CAD 데이터 베이스(<https://www.thingiverse.com/>)에서 수집하였고, 가상 3D 프린팅 공장은 30개의 항공기 부품들을 제조 (Bracket, Door hinge, Engine cover, Fork fitting and Seat buckle)
 - 해당 부품 유형은 적층 제조의 에너지 및 배출 절약 가능성 연구에 관련된 바 있음 (Huang et al. 2016)
- 모든 sample들의 형상 부피는 10cm^3 으로 동일하게 설정 → 형상 부피에 따른 비용 차이 발생을 제거
- 30개의 항공기 부품들을 10개씩 나누어 3개의 case로 분류하고, case 별로 시뮬레이션 모델을 구성
- 샘플들을 직접 출력하지 않고 적층 제조 slicing 및 설정 소프트웨어인 'Simplify 3D' (<https://www.simplify3d.com/>)를 이용하여 제조성과 측정에 필요한 데이터 수집
- 3D 프린터로는 'APIUM P220' 을 고려



<Aircraft component 30 samples for simulation>

- **Fused Filament Fabrication (FFF) using Carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone (CFR-PEEK)**

- 'APIUM P220' 은 CFR-PEEK 소재를 사용하는 특수 3D 프린터로, FFF방식을 이용
- FFF는 다양한 적층 제조 방법 중 가장 많이 사용되는 방법 (Ligon et al. 2017)
- CFR-PEEK은 항공기 부품에 대해 최적의 소재 (Ortega-Martinez et al. 2017)
- CFR-PEEK은 FFF 용 필라멘트 중 고성능 소재로 각광 받고 있음 (Apium Additive Technologies GmbH 2018)
- 그러나 CFR-PEEK은 고비용 소재이기 때문에 대부분의 기존 연구들은 저비용 소재인 polylactide (PLA)나 acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS)를 고려 (Park et al. 2020) → CFR-PEEK 산업화 및 대중화를 위해 관련 연구 필요
- CFR-PEEK은 고강도 경량 소재로 다른 소재에 비해 다루기가 어렵기 때문에 다른 소재에 비해 적층 제조의 복잡성에 따른 제조성과에 민감하게 적용 → 복잡성이 제조성과에 미치는 영향을 분석하기에 적합

Discrete Event Simulation Logic

Order

- The interarrival time은 normal distribution ($\mu = 4$ hours, $\sigma^2 = 0.8$ hours) 을 따름
- 이 모델에서 10개의 주문 유형 중 하나가 무작위로 각기 동일한 확률로 도착 (0.1)
- 각 주문의 주문 수량은 discrete normal distribution을 따름

Pre-processing

- 주문의 제품을 출력하기 위해 각 주문에 대한 CAD 파일을 인코딩 해야함
- 인코딩 processing time은 상수 값으로 설정 (5 min)

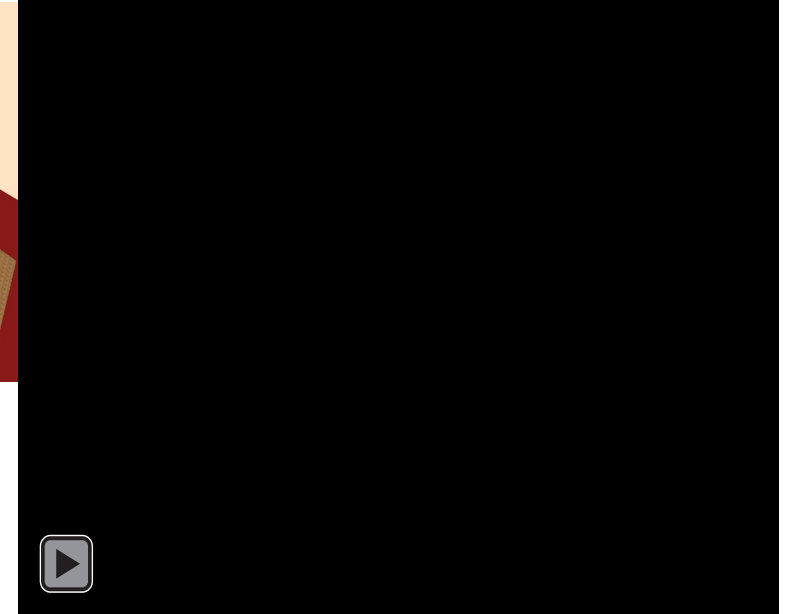
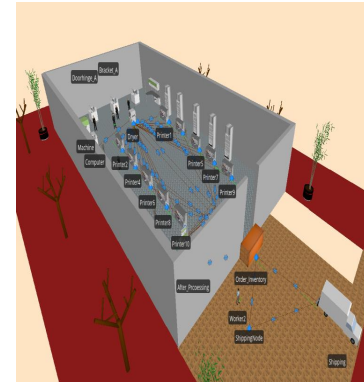
Processing

- 이 모델에서 3D 프린터의 개수는 10개로 고려
- Printing Time은 normal distribution ($\mu =$ build time for each order types, $\sigma^2 = 100$ sec) 을 따르고, Heating (4 min), Cooling (30 min)은 상수 값으로 설정

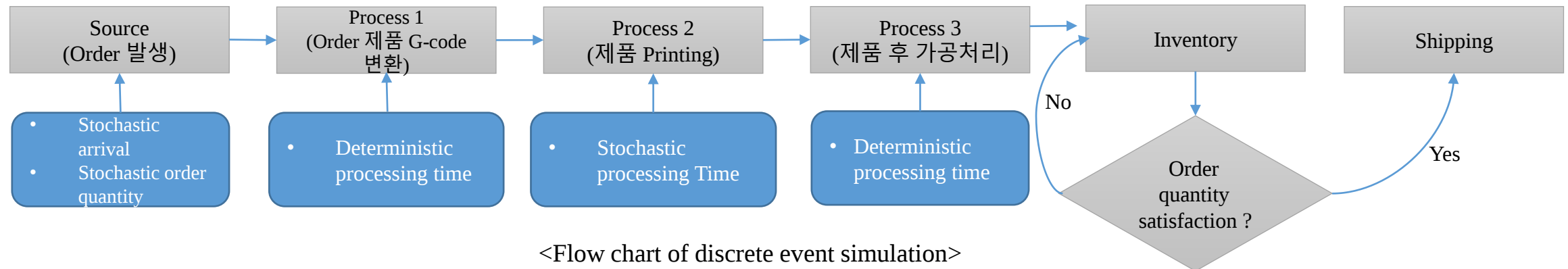
Pro-processing

- 제품 출력 후 brim및 support를 제거하는 등 제품을 매끄럽게 만드는 후 가공 필요
- 각 제품의 후 가공은 상수 값으로 설정 (10 min)

- 모든 프로세스가 완료되면 제품이 저장되고 주문 수량이 만족되면 주문이 고객에게 전달
- 이 모델에서 가상 3D 프린팅 공장은 30일동안 운영되도록 고려



<Virtual 3D printing plant simulation model using SIMIO>



• Experiment

▪ Simulation settings

- Interarrival time을 normal distribution ($\mu = 4$ hours, $\sigma^2 = 0.8$ hours)로 고정하여 case1,2,3에 대하여 simulation 실시
- Simulation의 주문 유형은 각 case들의 항공기 부품으로 고려
- Simulation 결과를 이용하여 제조성과 각 제품들의 static complexity를 분석하여 static complexity가 제조성과의 어떤 영향을 미치는지 파악

▪ Statistical analysis

- 이전 연구에서 product family의 design 및 manufacturing complexity와 제조성과의 역학관계 규명을 regression T-test를 통하여 분석 (Park and Kremer 2015) → 본 연구에서도 적층 제조의 design 및 manufacturing complexity와 제조성과의 역학관계 규명을 위해 regression analysis 수행
- Single linear regression을 이용하여 단일 static design 및 manufacturing complexity가 제조성과에 어떤 영향을 미치는지 분석 → Regression T-test를 통해 영향력 분석
- Multiple regression을 이용하여 static complexity 및 manufacturing complexity가 복합적으로 작용 될 시 제조성과에 어떤 영향을 미치는지 분석 → Regression T-test를 통해 영향력 분석
 - ✓ Factorial plot을 통해 제조성과의 가장 많은 영향을 미치는 complexity 파악
 - ✓ Contour plot을 통해 제조성과의 영향을 미치는 complexity를 통한 제조 시스템상의 적절한 운영 상황을 파악 및 설정

• Manufacturing Performance of Additive Manufacturing

→ 이전 연구에서 행했던 적층 제조에서의 제조성과 평가 연구를 이용하여 본 연구가 평가 하려는 제조성과 도출 (Li et al. 2017)

▪ **Lead time** = $t_{comp} - t_{order}$

- t_{comp} = time for completing the order (hours)
- t_{order} = order time (hours)

▪ **Machine cost** = $\frac{c_{machine}}{t_{dep} \times e_u} \times \Delta t_{process}$

- $c_{machine}$ = machine cost (\$) = (\$ 55,8092 → A purchase price of APIUM P220)
- t_{dep} = duration for machine depreciation (96month)
- e_u = monthly utilization rate (%)
- $\Delta t_{process}$ = processing time for a sample (hours) → ‘Simplify 3D’를 이용

▪ **Material cost** = $c_{material} \times \Delta v_{sample}$

- $c_{material}$ = price for material (\$/mm) (\$ 0.0034/mm → A purchase price of CFR-PEEK)
- Δv_{sample} = filament length for a sample (mm)

▪ **Energy cost** = $(p_{avg} \times \Delta t_{process}) \times c_{energy}$

- c_{energy} = electricity price (\$/Wh) (\$ 0.000133/Wh → Industrial electricity price)
- $\Delta t_{process}$ = processing time for a sample (hours) → ‘Simplify 3D’를 이용
- p_{avg} = power demand in manufacturing (W) → 실험을 통하여 Power Demand 예측 식 도출
 - ✓ 각기 다른 Process Parameter의 Cubic 30개의 샘플을 3번 반복하여 총 90개의 데이터 수집
 - ✓ 90개의 데이터 셋을 이용하여 Power Demand를 예측하는 회귀 식 도출
 - ✓ $Power\ Demand\ (W) = 197.5 \times 10.96MAR$

$$\diamond \quad MAR = \frac{Consumed\ Filament\ volume(mm^3)}{Build\ time\ (sec)}$$

▪ **Labor cost** = $c_{labor} \times \Delta t_{labor}$

- S_{labor} = Average salary per hours (\$ 11.1/hours → Minimum wages in New York)
- t_{labor} = Net time a worker is working (hours)

Results : Static complexity

- Calculation of Proposed Static Complexity

	Bracket A	Bracket B	Bracket C	Bracket D	Bracket E	Bracket F	Door hinge A	Door hinge B	Door hinge C	Door hinge D	Door hinge E	Door hinge F
STL Complexity	10660	798	2246	1168	2340	3350	3650	15998	2176	1392	2162	14320
Geometry Complexity	1.79037069	1.552725463	1.860665507	1.593711695	1.682259522	1.772081168	1.409696239	1.565566442	1.74322324	1.510432318	1.545025358	1.513765446
G-code Complexity	258630.3504	464275.372	333479.7741	91212.95189	116880.1771	242227.2695	378290.778	324622.3	435397	210605.9	257986.5	394366.5
Process Complexity	1.860504589	1.694826889	1.824759195	1.782954504	1.781095914	2.036671976	1.769171157	1.834484083	1.778850632	1.726765168	1.637127663	1.684159519
	Engine cover A	Engine cover B	Engine cover C	Engine cover D	Engine cover E	Engine cover F	Fork fitting A	Fork fitting B	Fork fitting C	Fork fitting D	Fork fitting E	Fork fitting F
STL Complexity	22000	5662	1294	9000	5452	4898	3622	3056	10354	4832	772	26072
Geometry Complexity	1.615010404	1.751193886	1.818513771	1.884382457	1.822049333	1.892143827	1.691163844	1.513889818	1.83878033	1.521481165	1.515327579	1.690476076
G-code Complexity	296494.2	646904.2	161441	2343307	634946.7	712148.9	383523.5	1264873	644797.2	705068.8	246800.7	1912252
Process Complexity	1.817772181	2.379018651	1.848451951	1.973346386	2.151140857	2.566083566	1.834855851	1.751532202	2.027266113	1.718751452	1.603103372	2.007549175
	Seat buckle A	Seat buckle B	Seat buckle C	Seat buckle D	Seat buckle E	Seat buckle F						
STL Complexity	388	312	1268	3248	28342	19592						
Geometry Complexity	1.486413048	1.45164755	1.550435207	1.783256154	1.59867291	1.496042501						
G-code Complexity	51417.36	64120.79	59082.17	500219.6	561987.5	311378.8						
Process Complexity	1.769209297	1.743901204	1.571055765	1.811787616	1.948966971	1.751833708						

Results : Static complexity

• Single Regression Analysis of Static Complexity

- T-test 결과를 통해 각 complexity별 lead time, machine cost, energy cost에 통계적으로 유의미한 영향을 파악 할 수 있음

• STL Complexity	Lead Time	Machine Cost	Energy Cost	Material Cost
1. Regression Equation	$y = 7.209 + 0.000026x$	$y = 551.8 + 0.00412x$	$y = 16.954 + 0.000121x$	$y = 2900 + 0.0147x$
2. R-sq	4.63%	9.68%	9.51%	6.97%
3. Test for β_0	$t = 31.00, p = 0.000^{**}$	$t = 22.08, p = 0.000^{**}$	$t = 22.85, p = 0.000^{**}$	$t = 27.20, p = 0.000^{**}$
4. Test for β_1	$t = 1.17, p = 0.254$	$t = 1.73, p = 0.094$	$t = 1.72, p = 0.097$	$t = 1.45, p = 0.159$
• Geometry Complexity	Lead Time	Machine Cost	Energy Cost	Material Cost
1. Regression Equation	$y = -1.26 + 5.244x$	$y = -294 + 530.3x$	$y = -8.47 + 15.93x$	$y = 944 + 1218x$
2. R-sq	63.65%	53.35%	54.77%	15.94%
3. Test for β_0	$t = -1.01, p = 0.320$	$t = -1.89, p = 0.069$	$t = -1.87, p = 0.072$	$t = 1.14, p = 0.265$
4. Test for β_1	$t = 7.00, p = 0.000^{**}$	$t = 5.66, p = 0.000^{**}$	$t = 5.82, p = 0.000^{**}$	$t = 2.30, p = 0.029^{**}$
• G-Code Complexity	Lead Time	Machine Cost	Energy Cost	Material Cost
1. Regression Equation	$y = 6.915 + 0.000001x$	$y = 531.9 + 0.000098x$	$y = 16.335 + 0.000003x$	$y = 2865 + 0.000276x$
2. R-sq	26.24%	22.64%	23.33%	10.25%
3. Test for β_0	$t = 32.28, p = 0.000^{**}$	$t = 21.95, p = 0.000^{**}$	$t = 22.84, p = 0.000^{**}$	$t = 26.12, p = 0.000^{**}$
4. Test for β_1	$t = 3.16, p = 0.004^{**}$	$t = 2.86, p = 0.008^{**}$	$t = 2.92, p = 0.007^{**}$	$t = 1.79, p = 0.085$
• Process Complexity	Lead Time	Machine Cost	Energy Cost	Material Cost
1. Regression Equation	$y = 1.64 + 3.099x$	$y = -101 + 367.1x$	$y = -1.68 + 10.50x$	$y = 3044 - 22x$
2. R-sq	48.33%	55.62%	51.69%	0.01%
3. Test for β_0	$t = 1.45, p = 0.158$	$t = -0.87, p = 0.392$	$t = -0.47, p = 0.643$	$t = 4.17, p = 0.000^{**}$
4. Test for β_1	$t = 5.12, p = 0.000^{**}$	$t = 5.92, p = 0.000^{**}$	$t = 5.47, p = 0.000^{**}$	$t = -0.06, p = 0.955$

$\alpha = 0.05^{**}$

- T-test 결과를 통해 STL complexity는 제조성과에 통계적으로 유의미한 영향을 끼치지 않음
- T-test 결과를 통해 geometry complexity는 모든 제조 성과에 통계적으로 유의미한 영향을 끼침 → 부정적 영향
- T-test 결과를 통해 G-code , process complexity는 lead time, machine cost, energy cost에 통계적으로 유의미한 영향을 끼침 → 부정적 영향

Results : Static complexity

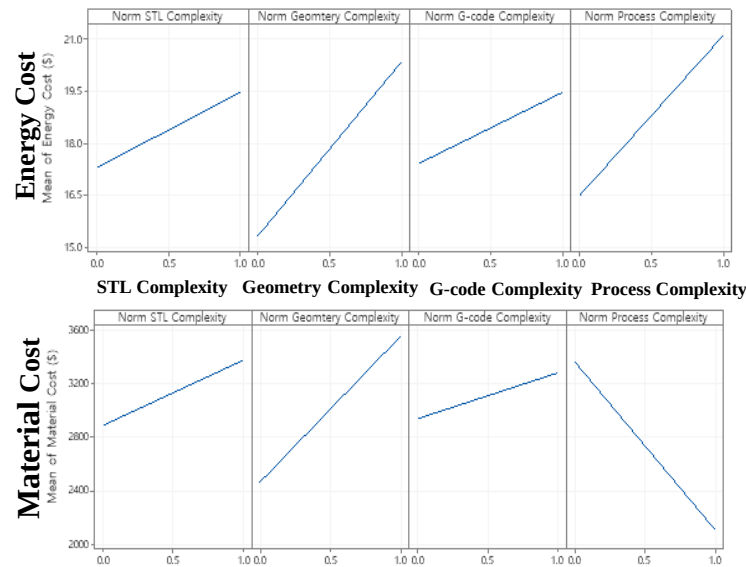
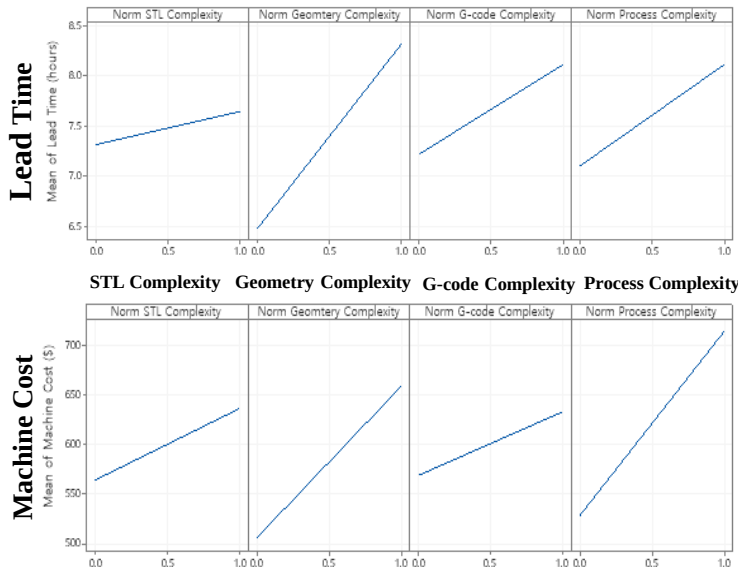
Multiple Regression Analysis of Static design and Manufacturing Complexity

- Multiple regression 적용을 위해 complexity에 normalization (Min-Max feature scaling) 사용 $\rightarrow x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$

	Lead Time	Machine Cost	Energy Cost	Material Cost
1. Regression Equation	$y = 5.939 + 0.329x_1 + 1.837x_2 + 0.891x_3 + 1.006x_4$	$y = 422.3 + 71.6x_1 + 152.7x_2 + 63.7x_3 + 185.7x_4$	$y = 13.082 + 2.17x_1 + 5.01x_2 + 2.05x_3 + 4.61x_4$	$y = 2640 + 485x_1 + 1091x_2 + 342x_3 - 1259x_4$
2. R-sq	74.81%	72.56%	71.68%	43.99%
3. Test for β_0	$t = 29.58, p = 0.000^{**}$	$t = 18.25, p = 0.000^{**}$	$t = 18.76, p = 0.000^{**}$	$t = 19.00, p = 0.000^{**}$
4. Test for β_1	$t = 0.89, p = 0.382$	$t = 1.68, p = 0.106$	$t = 1.69, p = 0.103$	$t = 1.89, p = 0.070$
4. Test for β_2	$t = 4.20, p = 0.000^{**}$	$t = 3.03, p = 0.006^{**}$	$t = 3.30, p = 0.003^{**}$	$t = 3.61, p = 0.001^{**}$
4. Test for β_3	$t = 1.82, p = 0.081$	$t = 1.13, p = 0.269$	$t = 1.20, p = 0.240$	$t = 1.01, p = 0.322$
4. Test for β_4	$t = 1.65, p = 0.111$	$t = 2.64, p = 0.014^{**}$	$t = 2.18, p = 0.039^{**}$	$t = -2.99, p = 0.006^{**}$

$x_1 = STL\ Complexity_{norm}, x_2 = Geometry\ Complexity_{norm}, x_3 = G-code\ Complexity_{norm}, x_4 = Process\ Complexity_{norm}, \alpha = 0.05^{**}$

Factorial Plot for Manufacturing Performance



Result of Multiple Regression Analysis

- Geometry complexity는 multiple complexity 관점에서도 모든 제조성과에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 것을 알 수 있음
- Process complexity는 multiple complexity 관점에서 lead time에는 통계적으로 유의미한 영향을 주지 않는 것을 알 수 있음
- Material cost를 제외한 나머지 제조성과의 R-sq값이 70%를 넘기 때문에 제조성과를 예측하는데도 설명력을 가짐

The Effect of Complexity on Manufacturing Performance based on the Results of Factory Plots

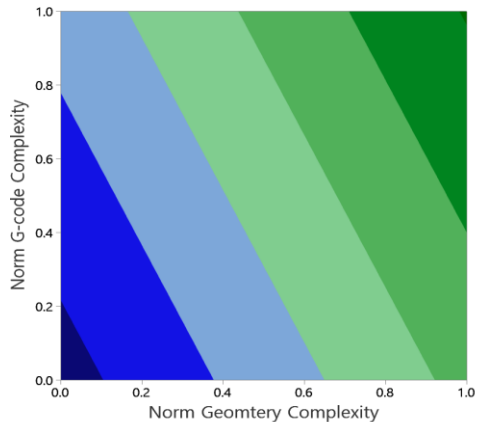
- Geometry complexity $\rightarrow$ lead time 과 energy cost에 주 영향을 미침
- Process complexity $\rightarrow$ machine cost 과 material cost에 주 영향을 미침

Results : Static complexity

Contour Plot of Static Complexity

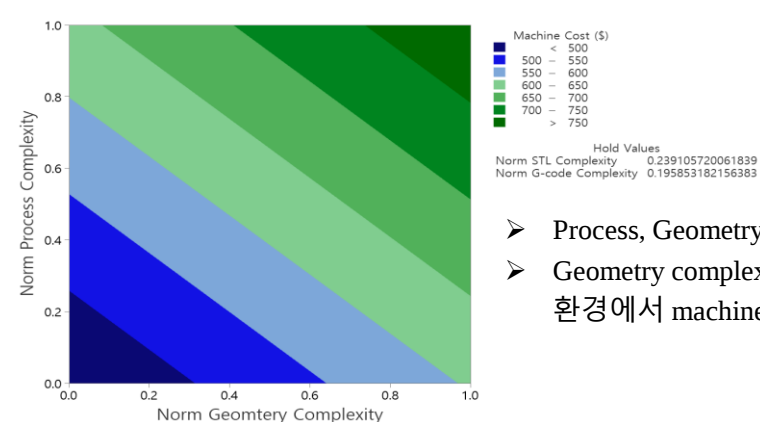
- Multiple regression 결과를 통해 각 제조성과에 관련이 있는 complexity에 대한 contour plot만을 사용함
- Multiple regression 결과를 통해 contour plot을 도출하고 이를 통해 각 제조성과와 complexity의 관계가 파악 가능하며 이를 통한 적층제조 상의 운영전략 제시

Contour Plot for Lead Time



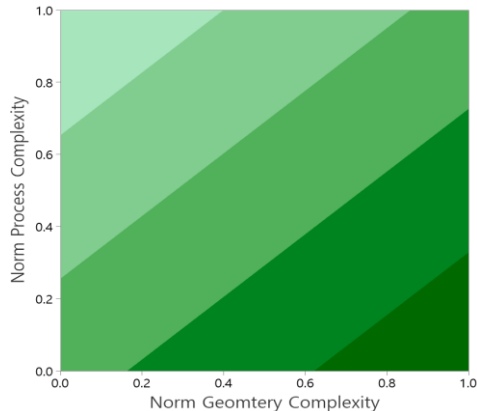
- G-code, Geometry complexity가 lead time에 영향을 줌
- Geometry complexity < 0.1, G-code complexity < 0.2의 환경에서 lead time을 최소화 시킬 수 있음

Contour Plot for Machine cost



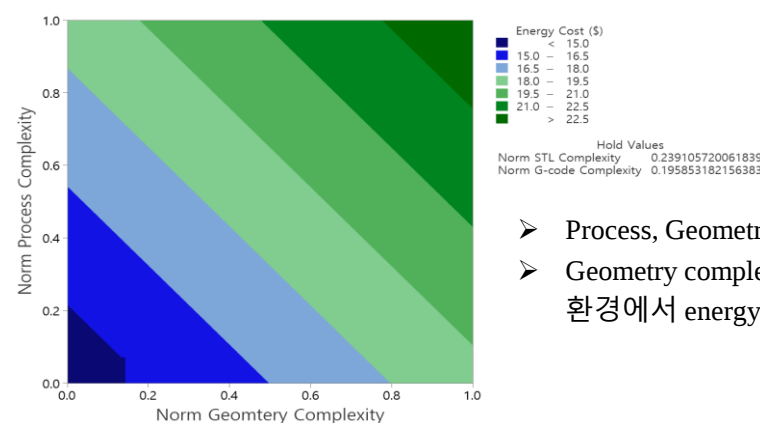
- Process, Geometry complexity가 machine cost에 영향을 줌
- Geometry complexity < 0.2, Process complexity < 0.3의 환경에서 machine cost를 최소화 시킬 수 있음

Contour Plot for Material cost



- Process, Geometry complexity가 lead time에 영향을 줌
- Geometry complexity < 0.4, Process complexity > 0.7의 환경에서 material cost를 최소화 시킬 수 있음

Contour Plot for Energy cost



- Process, Geometry complexity가 lead time에 영향을 줌
- Geometry complexity < 0.1, Process complexity < 0.2의 환경에서 energy cost를 최소화 시킬 수 있음

- **Individual Static Complexity effects from Single Linear Regression**

- Single linear regression 을 통해 제조성과에는 개별적인 static complexity가 큰 영향을 주진 않음
 - R-sq 값이 모두 70%를 넘지 않는데 이는 training data가 부족하여 underfitting 현상이 발생하거나 또는 제조성과에는 여러 요소가 영향을 주기에 하나의 complexity가 큰 영향을 미치지 않는다고 보여짐
 - Single linear regression을 통해 STL complexity는 제조 성과에 유의미한 영향을 미치지 않는다고 보여짐
 - STL의 개수는 파일의 용량과 관련이 있어 컴퓨터 상 CAD 로드나 변환과정에서의 delay에 영향을 미칠 수는 있지만, 실제 제품을 출력하는 과정에서의 제조 성과에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보여짐
- Geometry complexity만이 material cost에 부정적인 영향을 주는 것으로 보여짐
 - 같은 부피의 제품들일지라도 복잡한 형상은 많은 서포트를 요구하여 FFF 방식에서 추가적인 재료를 소모하게 만들어 material cost에 영향을 미침
 - G-code complexity나 process complexity는 노즐의 움직임이나, 기계의 효율성에 관한 적층 제조 프로세스 상의 복잡성이므로, 적층 제조 프로세스 상의 복잡성은 material cost에 영향을 미치지 않은 것으로 보여짐

- **Multiple Static Complexity effects from Multiple Regression**

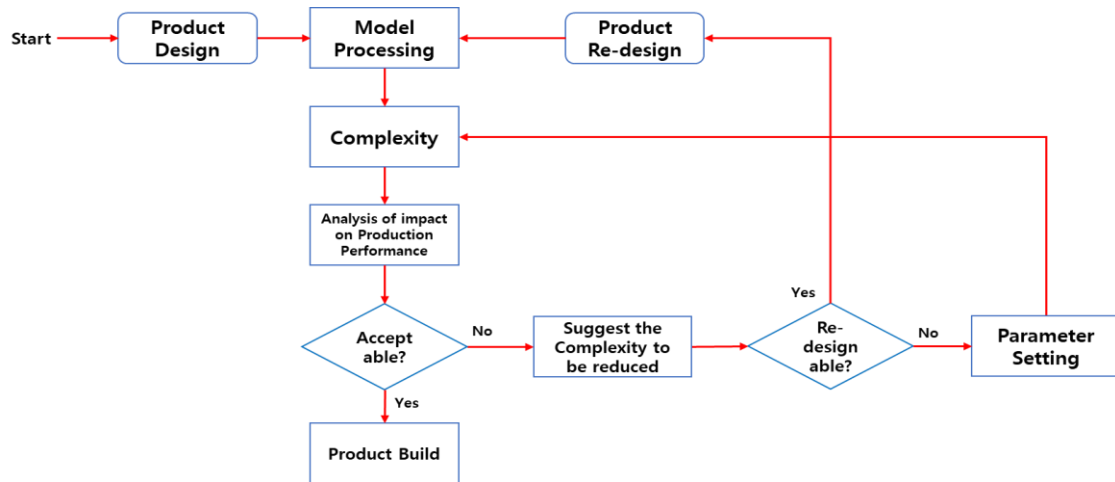
- Multiple regression을 통해 static complexity가 복합적으로 작용 할 때 material cost를 제외한 제조성과를 예측하는데 설명력이 있다고 보여짐
 - Material cost를 제외한 제조성과 예측모델의 R-sq값이 70%를 넘음 → single regression 결과에서 R-sq 값은 떨어지지만 통계적으로 유의한 complexity들이 존재하고 이 complexity를 종합하여 예측하였기에 R-sq값이 single regression결과보다 높게 나온 것으로 보임
 - Material cost 만 R-sq 값이 70%를 넘지않았는데 이는 single regression에서 유의한 complexity가 geometry complexity 뿐이었기에 multiple regression 예측모델에서도 낮은 결과를 보여줌
- Multiple regression을 통해 static complexity가 복합적으로 작용 할 때 제조 성과에 미치는 영향은 single linear regression과 다른 영향을 나타냄
 - Multiple regression일 경우 geometry complexity와 process complexity만 제조성과에 영향을 미침 → geometry complexity와 process complexity가 제조성과에 미치는 영향력이 나머지 complexity에 비해 매우 높기 때문

- **Factorial Plot**

- Factorial plot을 통해 특정 제조성과를 위해서는 어떤 static complexity에 좀 더 초점을 두어서 적층 제조를 운영하는 것이 효과적인지 통계적으로 알 수 있음

- **Contour Plot**

- Contour plot을 통해 전략적인 제조성과를 위한 static complexity의 범위를 설정하고 적층 제조를 운영



<Diagram of Product Design & Development Phase for Additive Manufacturing >

- **Product Design & Development Phase for Additive Manufacturing**
 - Static complexity와 제조 성과 간의 regression 식을 통하여 complexity에 따른 예상되는 운영비용을 도출하여, 이를 적층 제조를 위한 제품 디자인 및 개발 단계의 적용
 - 적층 제조에서 제품을 설계 할 때 복잡성을 제어하여, 허용 가능한 운영 비용 내에서 제품을 구축하는 데 도움이 되는 지침을 제공 → 복잡성을 이용한 최적의 운영비용 도출 가능
 - 제품을 자유롭게 re-design 할 수 있다면, 제품 디자인 재설계를 통해 제품의 복잡성을 줄임
 - 필요한 제품 디자인이 고정되어 재설계가 불가능한 경우 process parameter를 조정하여 복잡성을 줄임
- **Future Research Direction**
 - Data를 추가적으로 수집하여 높은 예측력을 가지는 regression model 구축
 - Dynamic complexity의 제조 수행성과 영향 분석
 - Static complexity와 dynamic complexity 평가 비교 연구

[Reference]

- Achillas, C., et al. (2015), A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory, *Journal of Manufacturing Systems*, **37**, 328-339.
- Apium Guide_Material_Extrusion_3D_Printing_of_PEEK
- Baumers, M., et al. (2017), Shape Complexity and Process Energy Consumption in Electron Beam Melting: A Case of Something for Nothing in Additive Manufacturing?, *Journal of Industrial Ecology*, **21**(S1), 157-167.
- Crespo-Varela, J. R. (2011), A Multi-Metric Analysis to Quantify and Assess the Design, *etda.libraries.psu.edu*.
- Durakovic, B. (2018), Design for Additive Manufacturing: Benefits, Trends and Challenges, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, **6**(2), 179-191.
- Fera, M., et al. (2017), A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **95**(1-4), 673-685.
- Frizelle, G. (1996), Getting the Measure of Complexity, *Manufacturing Engineer*, **75**(6), 268-270
- Govers, P.C.M. (2005), Product personality and its influence on consumer preference, *Journal of Consumer Marketing*.
- <https://www.simio.com/index.php>
- <https://www.thingiverse.com>
- <https://www.simplify3d.com>
- Huang, R., et al. (2016), Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, *Journal of Cleaner Production*, **135**, 1559-1570.
- Johnson, M. D., et al. (2017), An investigation and evaluation of computer-aided design model complexity metrics, *Computer-Aided Design and Applications*, **15**(1), 61-75.
- Kwon, S., et al. (2016), Feature shape complexity: a new criterion for the simplification of feature-based 3D CAD models, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **88**(5-8), 1831-1843.
- Ligon, S. C., et al. (2017), Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing, *Chemical reviews*, **117**(15), 10212-10290.
- Li, Y., et al. (2017), Cost, sustainability and surface roughness quality – A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **16**, 1-11.
- Ortega-Martinez, J., et al. (2017), Polyetheretherketone (PEEK) as a medical and dental material. A literature review, *Medical Research Archives*, **5**(4).
- Park, K., et al. (2020), Identification of Optimal Process Parameter Settings Based on Manufacturing Performance for Fused Filament Fabrication of CFR-PEEK, *Applied Sciences*, **10**(13).
- Pradel, P. B., et al. (2017), Complexity is not for free the impact of component complexity on additive manufacturing build time, *Rapid Design, Prototyping & Manufacturing (RDPM2017)*.
- Shannon, C.E. (1948), A Mathematical Theory of Communication, *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, **5**(1), 3-55.
- Stump, B. and Badurdeen, F. (2009), Integrating lean and other strategies for mass customization manufacturing: a case study, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **23**(1), 109-124.
- Suh, NP. (1999), A theory of complexity, periodicity and the design axioms, *Research in Engineering Design*, **11**(2), 116-132.
- Valentan, B., et al. (2011), Development of a Part-Complexity Evaluation Model for Application in Additive Fabrication Technologies, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, **57**(10), 709-718.