

클러스터링을 활용한 상품 생애주기 분류 및 수요 예측을 통한 공급망 관리

양근호¹, 정병도^{1*}

¹연세대학교 산업공학과(Department of Industrial Engineering, Yonsei University)

2021.05.28.

이 논문은 중소기업청 및 한국산업기술진흥원의 World Class 300 기술지원사업의 일환으로 수행한 연구임
(S2482274, 미래형 스마트 차체 공장을 위한 다차종 유연 생산 플랫폼 기술 개발)

상품 군 단위에서 개별 상품 단위로 Product life cycle 개념 확장

▶ 상품 생애주기 (Product life cycle)

- 하나의 상품군이 시장에 도입되어 사라질 때까지의 수요패턴을 4단계로 구분하는 이론
- 많은 상품군들이 4 종류의 수요패턴을 갖는 s자 커브 패턴을 보임

▶ 상품 생애 주기의 개별 상품 단위로의 확장 가능성

- 일반적으로 상품군 단위로 사용되는 이론이지만, 수요 패턴에 한하여 상품 단위 별 확장 가능성 존재
-> 빠른 시장 변화, 기술의 발달로 인해 짧아진 제품 수명, 활발한 기술 연구 등
- 도입기 : 테스트 제품 생산 기간, 성장기 : 양산 시작 기간, 성숙기 : 양산 기간, 쇠퇴기 : 단종 기간

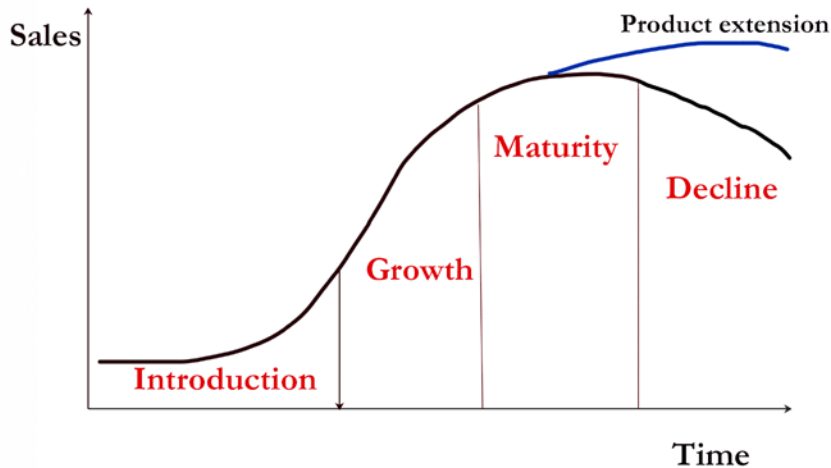


Figure 1. Product life cycle

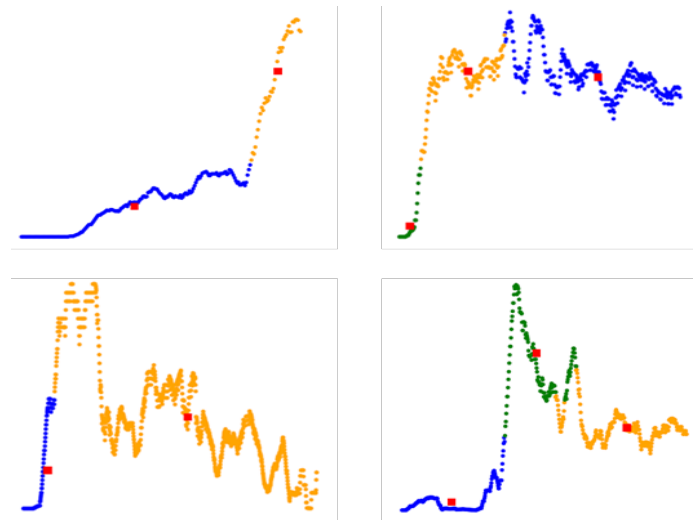


Figure 2. A 기업의 특정 시점 수요 패턴

공급망 관리에서 수요 예측의 정확성은 비용을 감축하는데 매우 중요

▶ 수요 패턴의 변화에 둔감한 대부분의 수요 예측 모델

- 일반적인 예측 모델들의 경우 수요의 패턴 변화가 발생하였을 때 성능 큰 폭으로 감소
- 수요의 패턴 변화 지점을 미리 파악 가능하다면, 구간별 모델 개발로 좋은 성능을 보일 수 있음

▶ 공급망 관리에서 수요 예측의 실패는 불필요한 비용을 야기

- 실제의 수요를 알 수 없기 때문에, 일부 모델을 제외하고 예측 수요를 기준으로 생산량을 결정
- 실제 수요와 예측치 간의 차이가 클 수록 불필요한 비용이 증가함 (재고 유지비, 잉여 생산물 폐기, 판매량 손실 등)

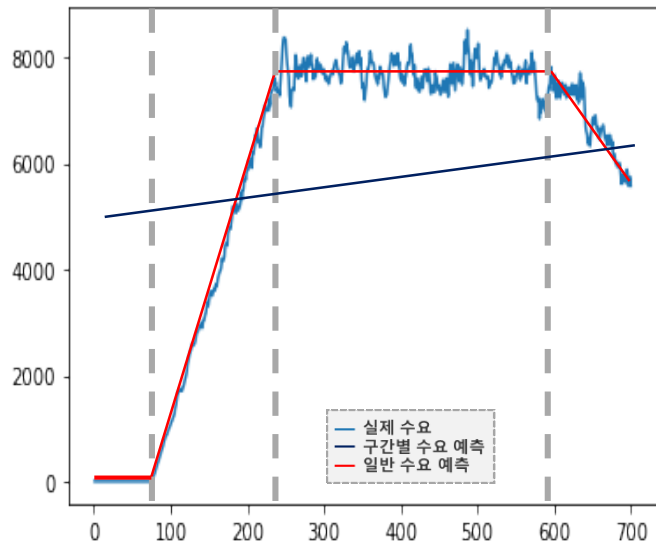


Figure 3. 수요 패턴이 변화하는 환경에서의 수요 예측



Figure 4. 수요 예측 실패로 인한 비용 발생

상품 생애주기 단계 식별을 위해 fuzzy clustering 알고리즘 적용

▶ Soft clustering

- 각각의 군집별로 모호성을 계산, 다른 군집과 상관없이 독립적으로 계산
-> 두 군집에 대한 유사도가 모두 높을 수 있음 (R에 0.7, B에 0.6 만큼 유사)

▶ 생애주기 식별을 위한 soft clustering (fuzzy) 개발

- 생애 주기 분류는 연속되는 수요 패턴이 어떤 단계(군집)에 속하는지 구분
-> 현 시점 생애주기 단계 구분 + 이전 시점의 생애주기 단계와의 관계 고려
- 시간 흐름에 따른 각 군집 분석 결과의 일관성 검증에 유리

각 데이터는 모든 군집에 대해
독립적으로 유사도 측정
ex) fuzzy measure

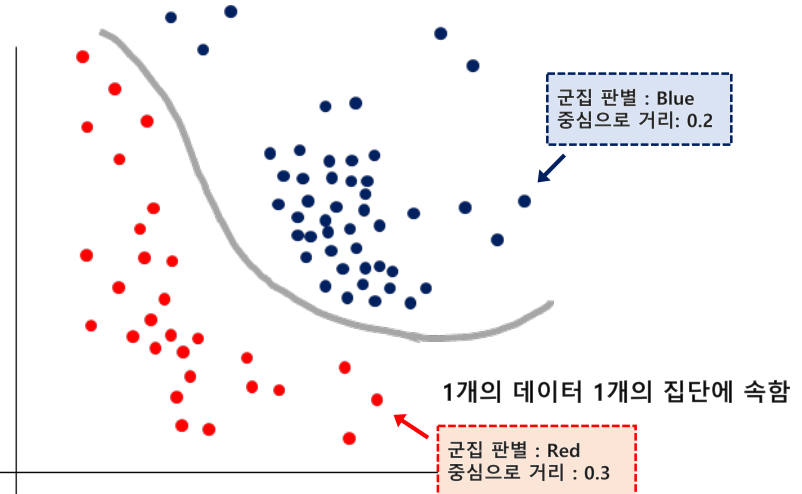
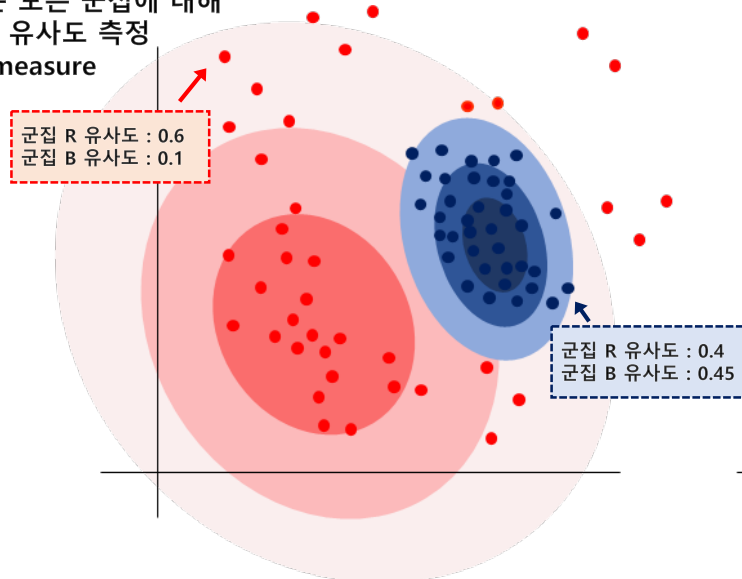


Figure 5. soft clustering & hard clustering

클러스터링 알고리즘 개발을 위한 두 가지 유형의 표준화 진행

▶ 현재 시점까지의 상대적인 정보를 활용한 표준화 (동적 표준화)

- 해당 시점까지의 수요의 최댓값과 최솟값을 활용하여 minmax 변환 시행 (0~1사이로 표준화)
-> 시점마다 그래프의 개형이 달라지기 때문에 현 시점 수요에 대한 상대적인 위치 정보를 반영함

▶ 예상되는 전체 평균 값 정보를 활용한 표준화 (추정 표준화)

- 해당 부품의 최대 예상 수요량을 기준으로 현 시점 수요의 위치를 표준화 (최대 예상 수요량 = 1)
-> 예상되는 수요 수준에 비해 현재 어느 수준까지 수요가 발생하는지에 대한 정보를 반영
- 제품의 예상 수명을 기준으로 제품의 도입된 이후 소요된 시간을 표준화 (제품의 예상 수명 = 1)
-> 도입 후 소요 기간을 통해 제품의 기대 수요량을 추정 (3분의 2 지점에서 하락 쇠퇴기 예상)
-> 시점에 대한 정보는 항상 1을 갖기 때문에 동적 표준화 불가

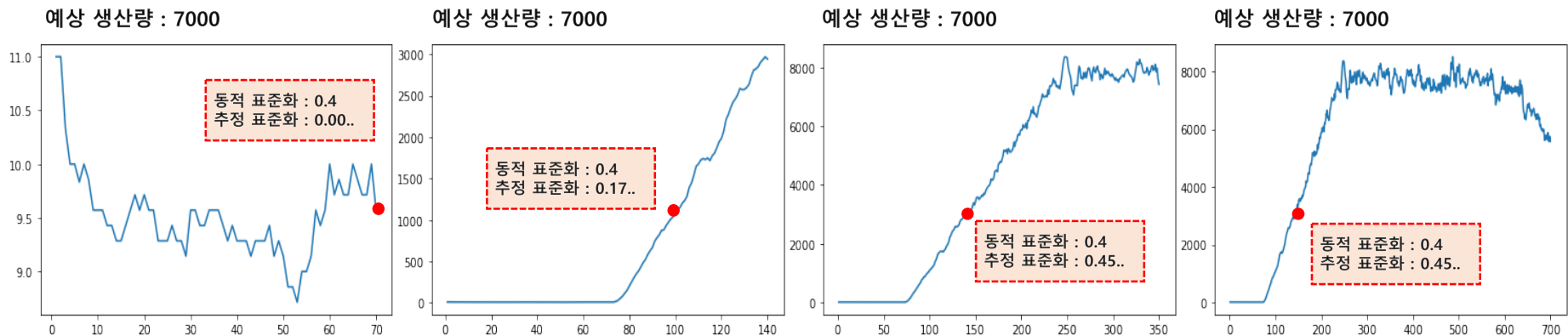


Figure 6. 시점 별 그래프 개형 변화에 따른 유형별 수요 표준화 값 변화

상품 생애주기 단계 식별을 위한 fuzzy clustering 모델 개발

▶ 간단한 생산량 결정 문제에 적용

- 예측수요를 기반으로 단일 기업의 생산량을 결정하는 확정적 선형 모델을 개발
- 생산비/운송비/재고 유지비/폐기 처리비/판매수익을 고려
- 예측수요를 기반으로 결정된 생산량을 대입하여 실수요에 맞게 나머지 의사결정 변수 결정

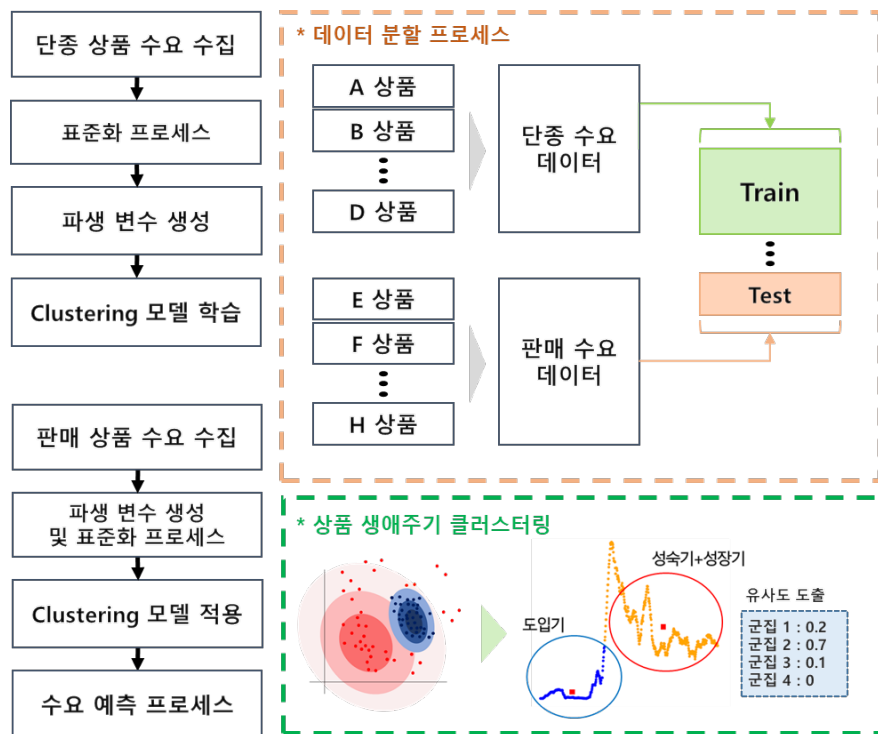
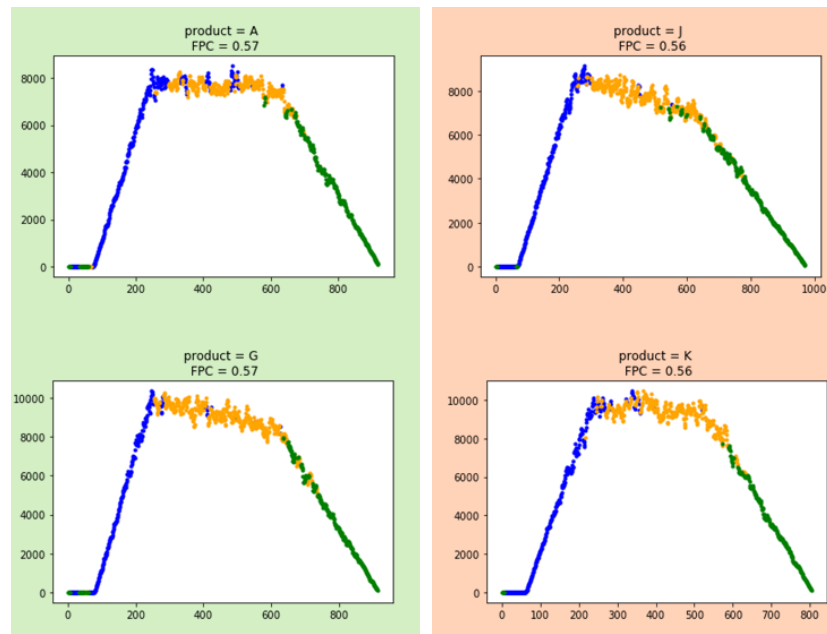


Figure 7. 상품 생애주기 클러스터링 알고리즘 프로세스

단종 상품 클러스터링 (train) 판매 상품 클러스터링 (test)



* 실제 실험에 사용된 실험 데이터

Figure 8. 실험에 사용된 Clustering 모델 결과

생애주기 클러스터링 알고리즘을 적용한 수요 예측 프로세스

▶ Clustering 결과에 대한 시간적 연속성을 고려한 학습 데이터 생성

- 최근 7일 간의 가장 유사했던 군집을 대표 군집으로 설정
- 설정된 Cutoff를 기준으로 대표 군집 유사도가 미달 될 때까지 학습 데이터 생성, (최소 7시점 이상)
- 학습 데이터를 통해 수요 예측 모델 개발, 예측 값에 학습된 모델을 적용하는 방식으로 1주일 간 수요 예측
-> 수요 예측 시점 이후 정보를 방지하기 위한 프로세스 (공급망 모델 (생산량 결정) 기간 : 7일)

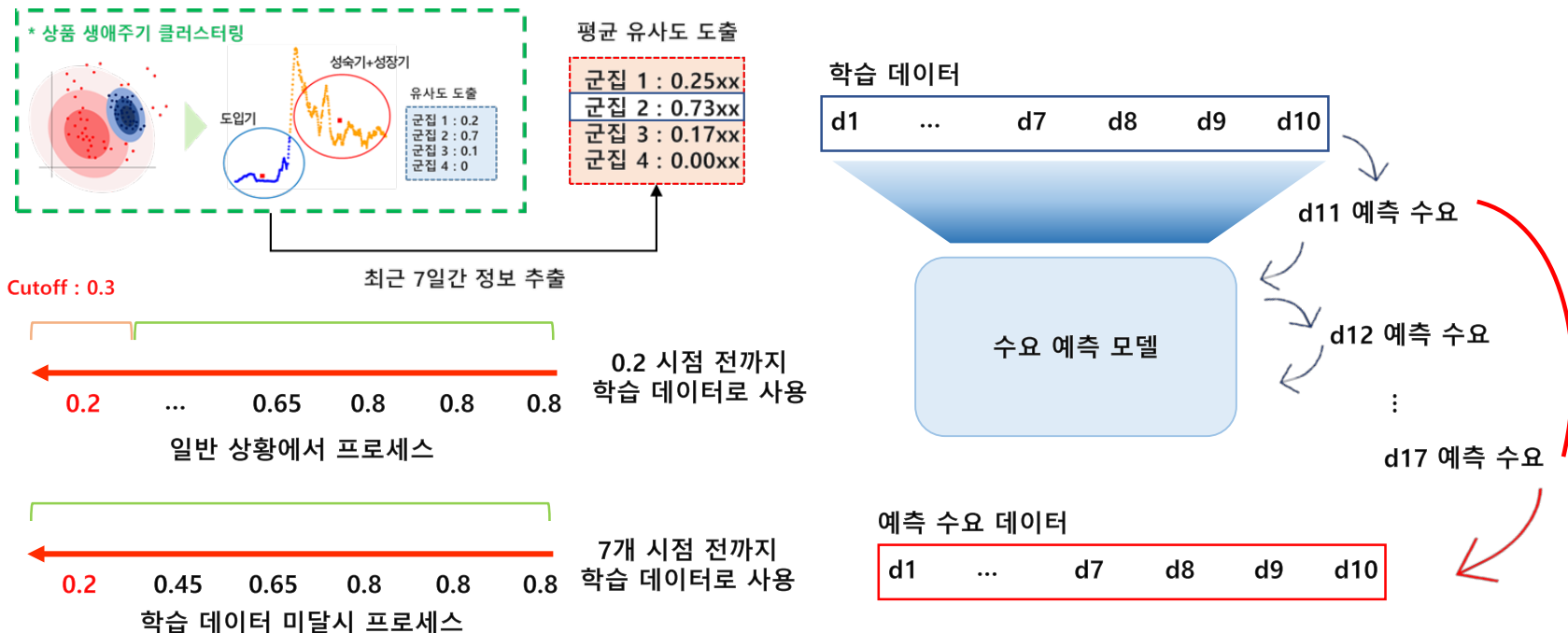


Figure 9. 생애주기 클러스터링을 적용한 수요 예측 프로세스

수치 실험을 위한 공급망 관리 모델 개발 및 시뮬레이션 프로세스 설계

▶ 간단한 생산량 결정 문제에 적용

- 예측수요를 기반으로 단일 기업의 생산량을 결정하는 확정적 선형 모델을 개발
- 생산비/운송비/재고 유지비/폐기 처리비/판매수익을 고려
- 예측수요를 기반으로 결정된 생산량을 대입하여 실수요에 맞게 나머지 의사결정 변수 결정
- 상품이 단종 되더라도, 폐기 처분을 진행하지 않으면, 지속적으로 재고 유지비 발생
- 실현된 재고량을 초기 재고량을 하여 해당 프로세스 반복

• 기본 Planning model

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (\rho^p p_{i,t} + \rho^w w_{i,t} + \rho^s s_{i,t} + \rho^d x_{i,t} - \mu x_{i,t})$$

s.t.

$$x_{i,t} < d_{i,t}^p, \forall i, t$$

$$\sum_{i=1}^I p_{i,t} < C^p, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^I s_{i,t} < C^s, \forall t$$

$$s_{i,t} = s_{i,t-1} + p_{i,t} - x_{i,t} - w_{i,t}, \forall i, t$$

$$s_{i,0} = \Omega, \forall i$$

<Index>

기호	의미
t	의사 결정 시점 $\{t = 0, 1, \dots, T\}$.
i	상품 종류 $\{i = 1, 2, \dots, I\}$.

<의사결정변수>

기호	의미
$x_{\varepsilon,t}$	시점 t 동안 납품량
$p_{\varepsilon,t}$	시점 t 시작시 결정하는 목표 생산량
$s_{\varepsilon,t}$	시점 t 끝날때 재고량
$w_{\varepsilon,t}$	시점 t 동안 폐기 비용

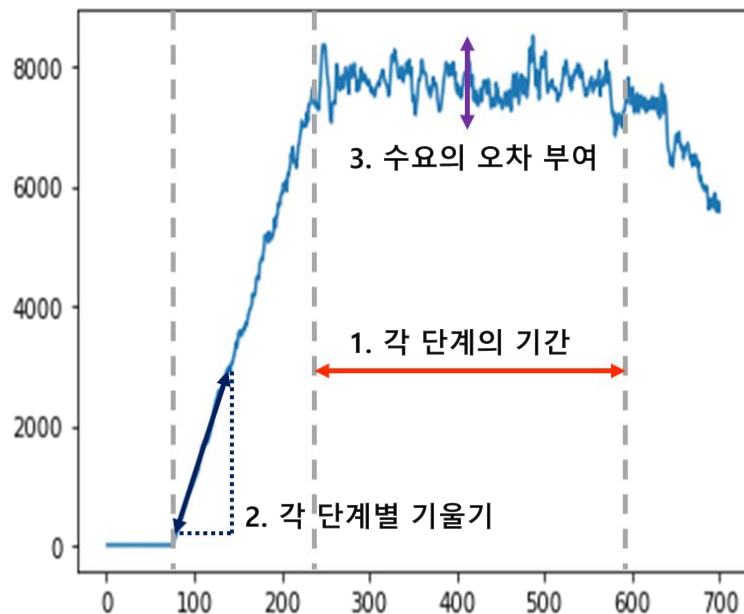
<Parameter>

기호	의미
C^p	한 시점 동안 가능한 최대 생산량
C^s	보관 가능한 최대 재고량
Ω	초기 보유 재고량
ρ^p	단위당 생산 비용
ρ^s	기준 단위당 재고 유지 비용
ρ^w	기준 단위당 폐기 비용
ρ^d	기준 단위당 운송 비용
μ	기준 단위당 판매 수익
μ	시점 t 에 예측한 $t+1$ 시점에 대한 예상 수요량

상품별 수요 패턴의 다양성 확보를 위한 데이터 생성 프로세스

▶ 3 종류의 난수 조건을 활용한 가상 수요 데이터

- 각 단계별 종료 시점, 기울기를 다르게 부여하여, 생애 주기 패턴의 차별화 부여
- 생애 주기 단계별 난수에 따라 기준 수요 계산 (기준 수요 = 기준 수요 + 각 단계 기울기)
- 계산된 기준 수요에 난수 설정을 부여하여 오차 부여 (최종 수요 = 기준 수요 + 오차)
- 각 단계별 기울기가 매 시점 변화하는 동적 기울기 조건과 고정 기울기 조건으로 실험 데이터 생성



<수요 난수 조건>

도입기 종료시점	양산 후 59~87까지, (동일 확률 부여)
성장기 종료시점	양산 후 180~254까지, (동일 확률 부여)
성숙기 종료시점	양산 후 수요가 0이 될 때까지
단종 시점	수요가 0 보다 작아질 때
성장기 기울기	30~60, (동일 확률 부여)
성숙기 기울기	1~4, (동일 확률 부여)
쇠퇴기 기울기	20~40, (동일 확률 부여)
수요 난수	Normal~(수요, 0.1*수요), 정수로 근사

Figure 10. 실험용 수요 데이터 생성 난수 종류 및 설정 조건

상품 도입 프로세스 설계 및 생산 관련 파라미터 값 설정

▶ 생산 상품이 계속 변화하는 환경 구현

- 특정 주기에 따라 지속적으로 신상품 추가
- 모든 상품은 생애주기를 따르되, 난수 설정을 통해 서로 다른 패턴을 보이도록 설정
- 상품의 수요가 0이 될 경우, 해당 상품의 수명이 종료된 것으로 취급
- 최대 생산 규모 등을 고려하여, 기본 용량 제약 규모 설정

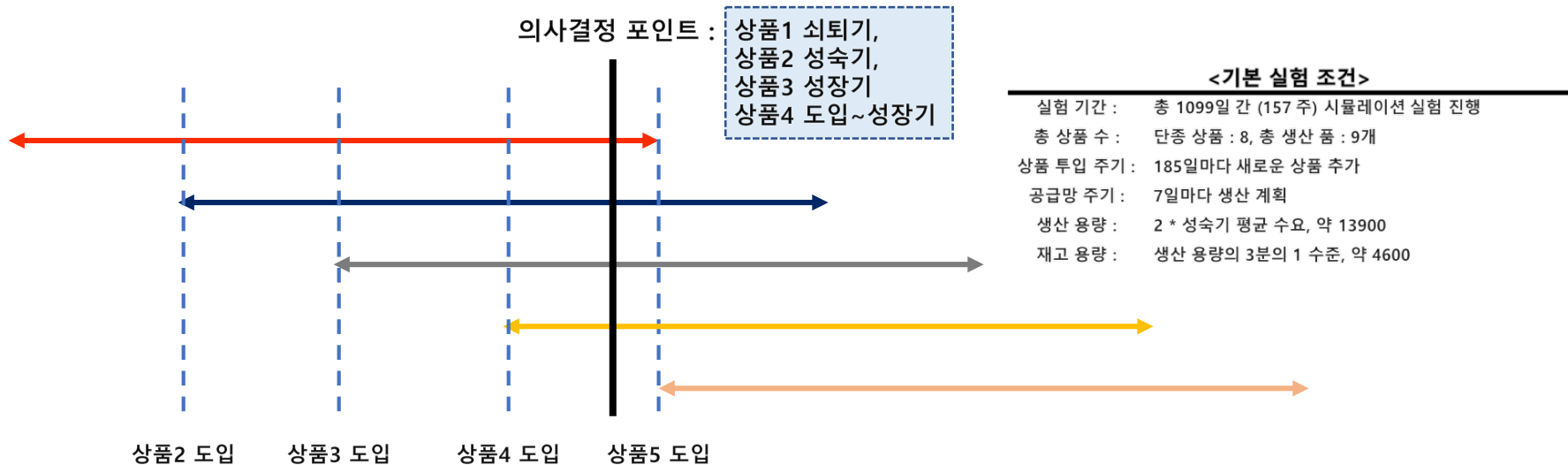


Figure 11. 신상품 도입 프로세스 및 파라미터 설정 조건

모든 실험 조건에서 PLC 수요 예측을 적용한 공급망 모델이 우수

▶ 다양한 실험 조건 하에 실험 기간 동안의 순이익 비교 실험 진행

- 생산 용량/재고 용량/생산비/재고비/폐기 처리비를 변화시켜가며 성능 비교
- 변화 조건을 제외하고, 나머지 기준은 기본 모형과 동일하게 설정
- 수요 생성 방식에 관계없이 PLC 모델이 우수한 성능을 보임
- 공급망 관리 모델에서 비용 최소화 관점에서 생애주기 단계 식별의 필요성을 입증.

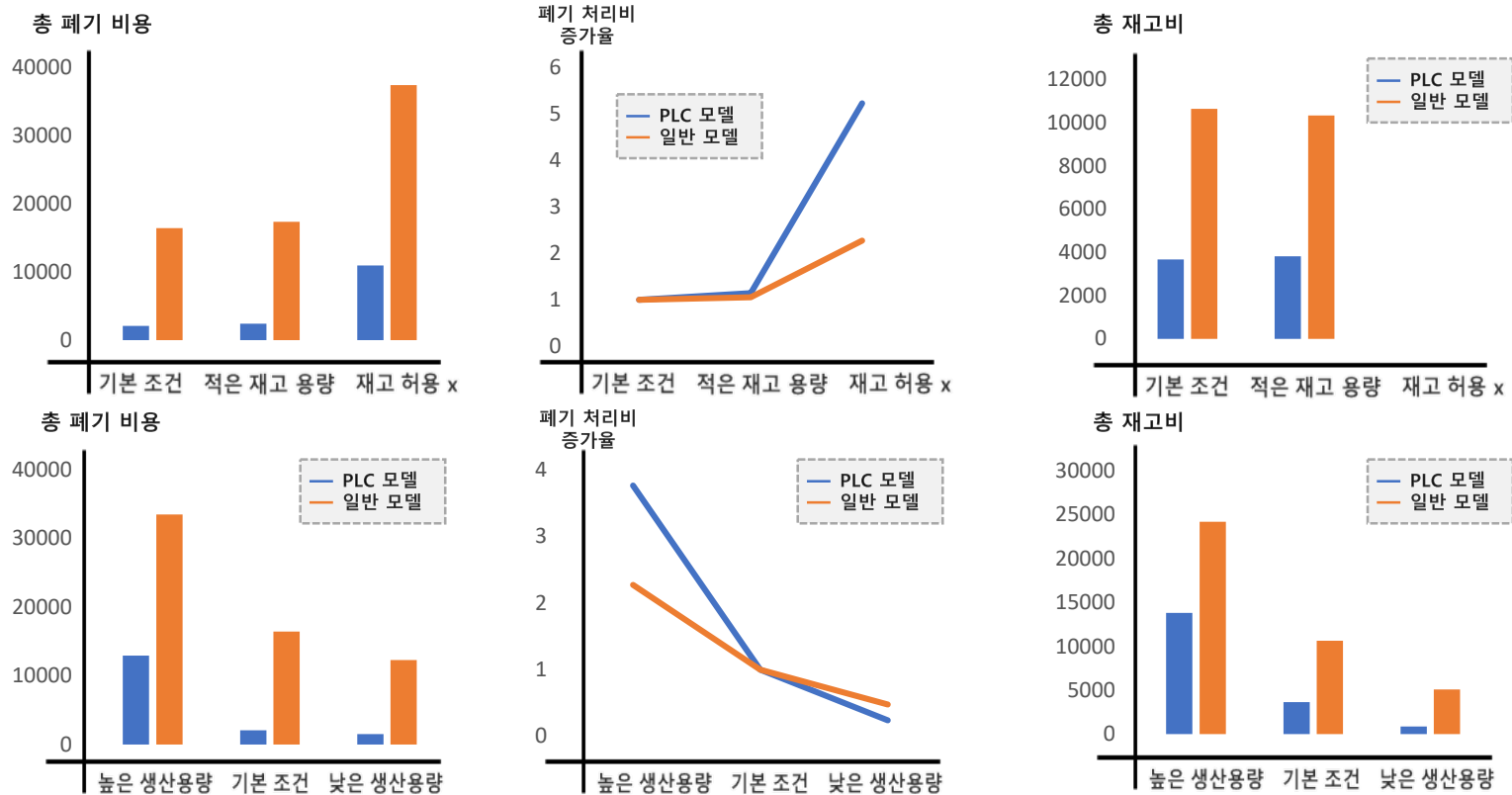
Table 1. 다양한 실험 조건에서 공급망 순이익 비교 (실험 수익 - 총 비용)

type	고정 기울기		가변 기울기	
	PLC 모델	일반 모델	PLC 모델	일반 모델
높은 생산 용량	5195876.2	5107888.7	5074699.2	4960635.5
기본 모형	4597264.3	4537308.1	4581048.5	4502355.7
낮은 생산 용량	3971746.1	3927943.5	3970411.5	3919355.1
기본 모형	4597264.3	4537308.1	4581048.5	4502355.7
적은 재고 용량	4596006.7	4534182.3	4578544	4498565
재고 허용 x	4567287.8	4469338.8	4513436.4	4392780

type	고정 기울기		가변 기울기	
	PLC 모델	일반 모델	PLC 모델	일반 모델
낮은 폐기 비용	4595722	4535990	4574835	4496608
기본 모형	4597264	4537308	4581049	4502356
높은 폐기 비용	4597080	4536569	4582528	4503535
낮은 재고 비용	4605721	4583486	4604878	4580554
기본 모형	4597264	4537308	4581049	4502356
높은 재고 비용	4587854	4507157	4553511	4448100
낮은 생산 비용	1523142	1463106	1507379	1429823
기본 모형	4597264	4537308	4581049	4502356
높은 생산 비용	7671363	7611345	7655114	7576135

PLC 적용 유무에 따라 증가하는 폐기 처리비와 재고비

- ▶ 불필요한 재고 수준과 과도한 잉여 생산물을 갖는 일반 모델
 - 다양한 생산 환경 하에 PLC 적용 유무에 따른 두 모델의 성능 비교
 - 특히, 재고비와 폐기 처리비에서 큰 차이를 보임
 - PLC 모델에 비해 일반 모델에서 조건에 따라 높은 편차를 보임



▶ 일반화 된 생애주기 판별 Clustering 알고리즘 개발

- 다양한 난수 조건에도 불구하고, 학습에 사용되지 않은 상품에 대해 생애주기 판별
- 일반화 된 생애주기 분류 모델 개발의 가능성을 보임
- 모델 범용성과 우수성 입증 추후 더 다양한 수요 패턴이 혼합되어 있는 상황에서의 실험이 필요

▶ 다양한 방식의 표준화 프로세스 정립

- 동적 표준화와 추정 표준화를 활용하여 서로 다른 상품들을 상대적 위치 값으로 표준화
- 수요 패턴과 단위가 다름에도 불구하고, 성공적인 Clustering 알고리즘 개발

▶ 공급망 관리 측면에서 우수한 성능을 보이는 PLC 수요 예측

- 다양한 생산 환경에서 PLC 적용시 더 좋은 성능을 보임
- 특히, 재고비와 폐기 처리비에서 발생하는 차이가 두드러짐
- 생산 조건 변화에 따른 편차 또한 낮은 경향을 보임

▶ 해당 생애 주기 분류 방식에 우수성 입증

- PLC 분류 자체의 필요성은 입증하였으나, PLC 분류 방식에 대한 우수성 입증은 명확치 않음
- PLC 분류를 위한 다양한 방식의 알고리즘들과 Fuzzy clustering 방식의 PLC 분류 모델의 비교 예정

Q & A

