

혼잡도를 고려한 항공화물터미널 인력 계획 수립 연구

정석재, 양현준

광운대학교 경영학과

sjjeong@kw.ac.kr, june6520@gmail.com

INDEX

1. **연구배경**
2. **연구목적 및 범위**
3. **선행연구 고찰**
4. **연구모형**
5. **실험결과**
6. **결론**

1. 연구배경

- Global supply chain 시대에서, 항공화물 터미널은 화물 적시성을 만족시키기 위한 연결고리 역할을 하고 있음.
- E-commerce의 빠른 발달과 함께 항공화물산업은 급격히 성장했으며, 전체 국제물류 중 30%가 항공 화물로 운송되고 있는 상황임.



대형 항공화물 터미널 업체들(대한항공, 아시아나항공 등)의 치열한 경쟁

1. 연구배경

K 항공화물터미널 프로젝트

- ① K 항공화물 터미널은 노동집약적 산업의 특징을 보임.
- ② 관리자들이 계획한 인력 스케줄과 현장에서 필요로 하는 인력 수의 차이 때문에 화물 적재의 실패가 발생했고, 이는 항공기의 출항 시간을 지연시켜 터미널의 서비스 수준을 감소시켰음.

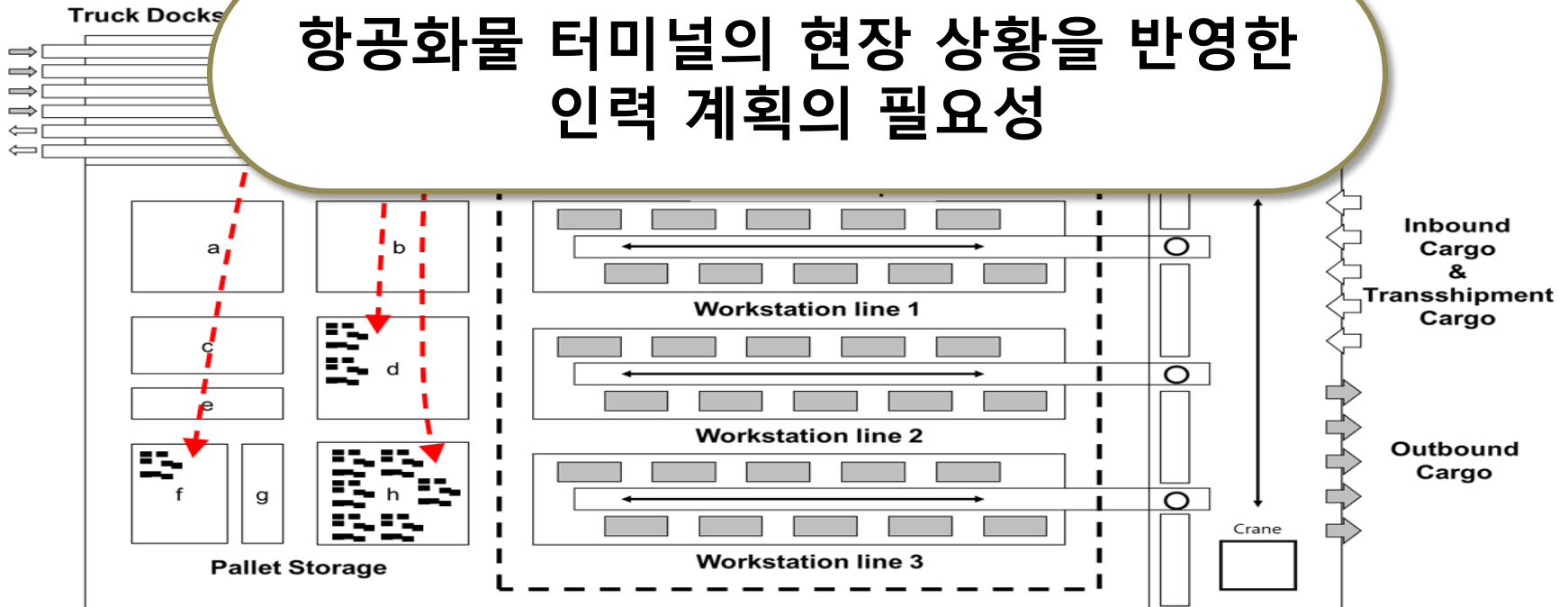
원인 분석

인력 스케줄 계획 시, 화물 도착 패턴의 불확실성과 터미널 내부의 혼잡도와 같은 현장상황을 인력스케줄에 반영하지 않음.

1. 연구배경

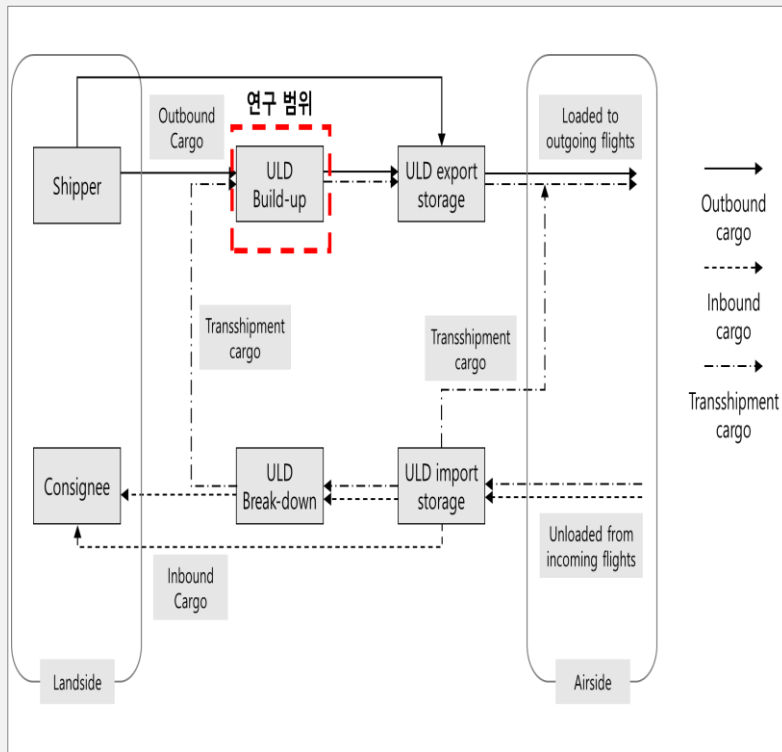
시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100 (1 대)	200 (2 대)	1000 (7 대)	300 (2 대)
Demand leveling, t	10	30	20	20	20			
Demand leveling, t+1		20	20	20	40	40		
Demand leveling, t+2			10	20	293	293	384	
Demand leveling, t+3				20	70	70	70	70
시간당 총 처리 물량	10	50	50	80	423	403	454	70
시간당 필요 인력 수	0.3	1.7	1.7	2.7	14.1	13.4	15.1	2.3
근무시간 최대 필요인력 수	3 명				16 명			

항공화물 터미널의 현장 상황을 반영한
인력 계획의 필요성



2. 연구범위

- 본 연구의 연구 범위는 항공화물터미널 내 가장 노동집약적인 ULD Build-up 프로세스로 한정함.
- ULD Build-up 프로세스는 Storage에 저장되어 있던 팔레트를 항공기에 적재하기 위해 ULD 단위로 포장하는 작업.



『화물 처리 프로세스 및 연구 범위』

ULD Building-UP 작업방식

- 인력 스케줄링의 기본 단위는 팀으로, 1팀은 작업 감독자 (1), 지게차 작업자 (1), 포장 작업자 (2)로 구성되어 있음.
- 포장 프로세스는 3단계로 구분됨
 - 1) 작업 감독자는 항공기 번호와 해당 항공기에 적재해야 될 팔레트의 위치(Storage)를 파악하여 지게차 작업자에게 지시
 - 2) 지게차 작업자는 Storage에서 팔레트를 Workstation으로 전달하는 작업을 반복 수행
 - 3) 포장 작업자는 팔레트가 어느정도 이상 쌓이면 그물로 포장하여 ULD 단위로 변환

3. 선행연구 고찰

1) 항공화물터미널의 인력 계획에 대한 선행연구 고찰

- 선행연구는 항공화물터미널의 인력 계획을 위해 대부분 최적화 모형을 활용하였음.
- 최적화 모형의 목적은 인건비 최소화이며, 제약식은 전체 항공기의 수요, 시간 별 처리량, 일일 최대 작업시간에 대한 규제 등을 만족하도록 구성되어 있음.
- 최적화 모형은 특정 상황을 표준화하여 간략하게 수리식으로 표현하고, 최적해를 구할 수 있다는 장점이 존재함.
- 하지만, 최적화 모형은 문제화를 위한 많은 가정 사항을 포함하는 한계점이 있기 때문에, 구체적인 현장 상황을 반영하기에는 어려움.

저자	논문 제목	키워드
Rong and Grunow (2009)	Shift Designs for Freight Handling Personnel at air cargo terminals	MILP model, Benchmark approaches, integration of two sub problem
Yan et al. (2006 b)	Long-term Manpower Supply Planning for Air Cargo Terminals	MIP model, scenario based approach, Flexibility in the shift designs
Yan et al. (2006 a)	Cargo Terminal Shift Setting and Manpower Supplying in Short-Term Operations	MIP model, short-term, Flexibility in the shift designs
Nobert and Roy (1998)	Freight Handling Personnel Scheduling at Air Cargo Terminals	IP model, Demand leveling, two sub problem

3. 선행연구 고찰

2) 현장 상황을 고려한 인력 계획 방법에 대한 선행연구 고찰

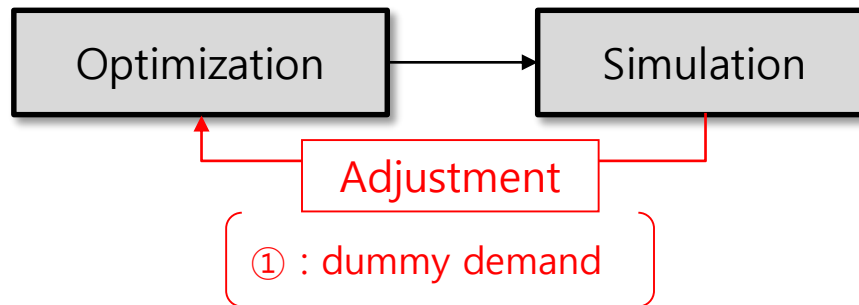
- 선행연구는 항공기 유지보수를 위한 인력 계획으로 최적화 모형, 시뮬레이션, 모형 개선이 혼합된 3단계 모델을 개발함.
 - ⊖ 최적화 모형 : 인건비를 최소화하는 최적화 모형을 통해 인력 계획을 산출하며, 시뮬레이션의 초기 데이터로 활용함.
 - ⊖ 시뮬레이션 : 현장 상황을 반영하고자 항공기 도착시간의 지연을 확률적으로 발생시킴. 인력계획의 적정성을 판단하기 위하여 서비스 수준(출항시간의 지연)을 파악함.
 - ⊕ 모형 개선: 서비스 수준의 증가를 위해 추가 인력을 산정하는 수리식을 설정하고, 최적화 모형에 반영함.
- 선행연구는 최적화 모형과 시뮬레이션을 혼합함으로써 현장 상황이 반영된 적정 인력계획을 도출하는 것이 장점임.

저자	논문 제목	키워드
De Bruecker et al. (2015)	A model enhancement heuristic for building robust aircraft maintenance personnel rosters with stochastic constraints	MILP model, Model Enhancement Heuristic, Stochastic robustness of rosters
Van den Bergh et al. (2013)	A three-stage approach for aircraft line maintenance personnel rostering using MIP, discrete event simulation and DEA	MILP model, Discrete Event Simulation(DES), Data Envelopment Analysis(DEA)

4. 연구모형

- 본 연구의 연구 모형은 기본적으로 최적화 모형과 시뮬레이션을 혼합하는 모형.

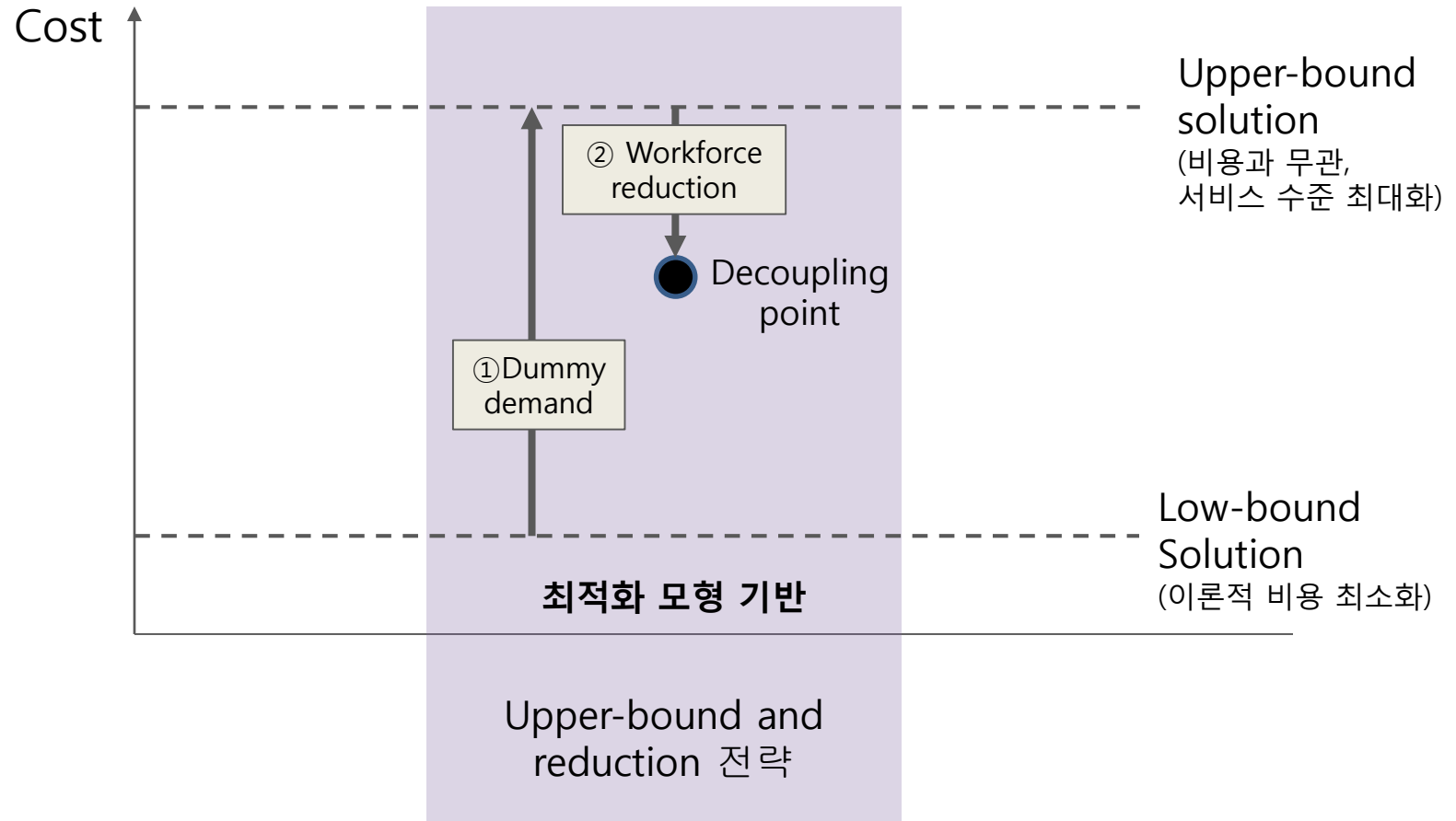
1) Optimization – Simulation Hybrid Approach



- Optimization** : 노동비용을 최소화하는 시간대 별 인력 스케줄을 생성함.
(풀 타임, 파트타임 구분)
- Simulation** : 항공 화물터미널의 현장을 나타냄. 최적화 모형에서 생성된 인력 스케줄의 서비스 만족도를 평가함 (비행기 지연시간)
- Adjustment** : 시뮬레이션 분석결과를 기반으로 비행기 출항 지연시간을 낮출 수 있는 인력스케줄을 산출하기 위해 최적화 모형을 Dummy demand로 조정.

4. 연구모형

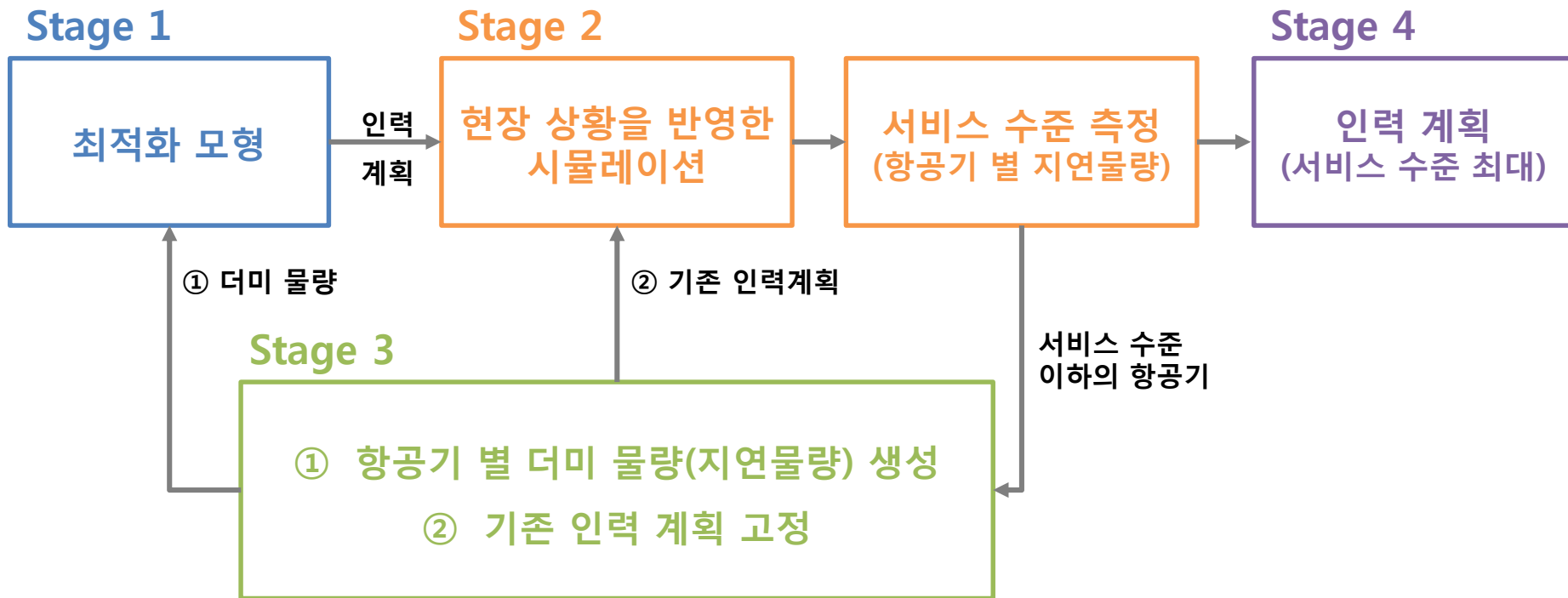
- 본 연구는 비용 최소화와 서비스 수준 최대화의 상충관계(Trade-off)에서 절충된 인력계획을 도출하기 위해 조정방법을 제안하고자 함.



4. 연구모형

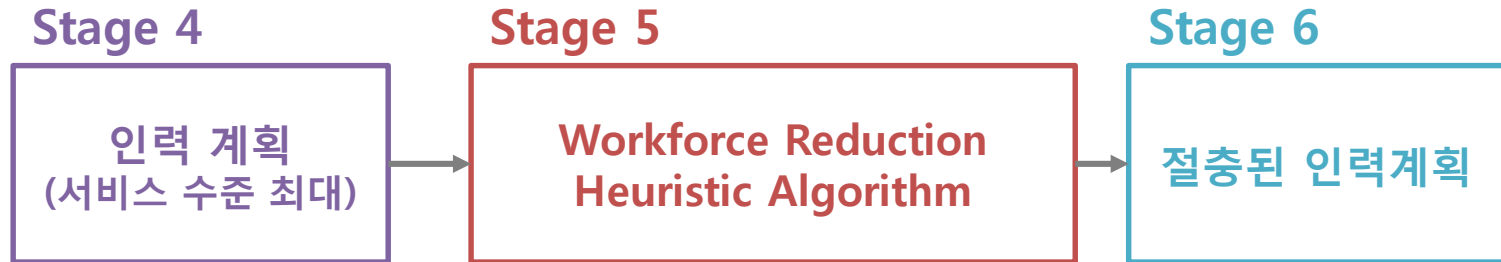
- Upper-bound and reduction strategy는 더미 항공기 물량을 통해 서비스 수준을 만족시킬 수 있는 인력을 계획한 후, 잉여인력을 감축하는 과정으로 절충된 인력 계획을 도출하고자 함.

1) Dummy Demand를 통한 Upper-Bound Solution 도출 단계



4. 연구모형

2) 절충된 인력계획 도출을 위한 Workforce Reduction Heuristic Algorithm



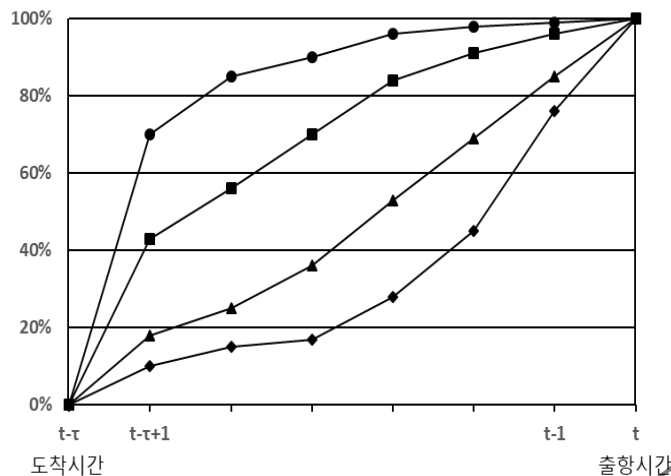
Workforce Reduction Heuristic Algorithm

- Step 1. 모든 Shift의 시간대 별 Utilization 산출
- Step 2. 추가된 Shift의 Utilization과 동 시간대에 작업하는 모든 Shift의 여유 Utilization의 합을 비교
- Step 3. 제거 가능한 Shift의 리스트 산출
- Step 4. 가장 늦은 시간대의 Shift부터 제거 후 Simulation 수행 및 항공기 별 Service level 산출
- Step 5. 적정 Service level(95%) 충족 시 해당 Shift 제거
- Step 6. 제거 가능한 Shift의 리스트가 없을 때 까지 Step 1~5를 반복
- Step 7. 휴리스틱 알고리즘 종료

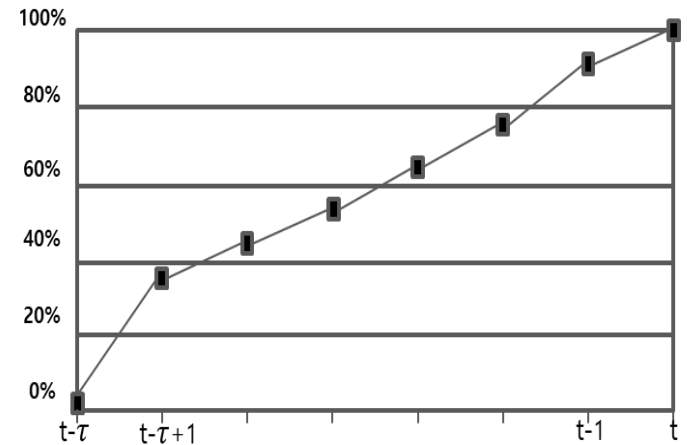
4.1. 최적화모형

- 실제 화물 도착 데이터를 최적화 모형에 반영하기 위하여 평균 값으로 변환하였음.
- Demand leveling은 시간대 별 작업량을 어떻게 할당할 것인가에 대한 방법이며, 시간대 별로 누적도착분포보다는 낮은 수준에서 작업량을 자유롭게 결정할 수 있도록 함.

실제 화물 도착 패턴 데이터



최적화 모형의 화물 도착 패턴



4. 최적화모형

- 본 연구의 최적화모형은 인건비 최소화를 목적으로 하며, 전체 수요 충족 등의 제약식으로 구성된 혼합정수계획법임.

Objective function : *Minimize* $\sum_{s \in S} \sum_{q \in Q} (c_{s,q}^{Build} g_{s,q}^{Build})$

Subject to :

$$\sum_{j=0}^{\tau^{FRT}-1} x_{t-j,t} = d_t^{FRT}, \quad t = 1, \dots, T$$

(1) t 시간에 출항하는 항공기(화물기, 여객기)의 수요를 모두 작업해야 함.

$$\sum_{i=0}^{\tau^{PAX}-1} y_{t-i,t} = d_t^{PAX}, \quad t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{j=k}^{\tau^{FRT}-1} x_{t-j,t} \leq L^{FRT}(k) \cdot d_t^{FRT}, \quad t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, \tau^{FRT}-1$$

(2) t 시간에 출항하는 항공기에 대해서, 화물의 누적도착분포보다 누적작업량은 작거나 같아야 함.

$$\sum_{i=k}^{\tau^{PAX}-1} y_{t-i,t} \leq L^{PAX}(k) \cdot d_t^{PAX}, \quad t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, \tau^{PAX}-1$$

4.1. 최적화모형

Subject to :

$$\sum_{j=0}^{\tau^{FRT}-1} x_{t,t+j} + \sum_{i=0}^{\tau^{PAX}-1} y_{t,t+i} = z_t \quad t=1, \dots, T$$

(3) t 기간의 총 작업량은 t 기간에 작업이 요구되는 항공기(화물기, 여객기)의 작업량을 모두 더한 것과 같음.

$$a z_t \leq \sum_{q \in Q} \sum_{s \in E_{q,t}} g_{s,q}^{Build}$$

(4) t 기간에 투입되는 작업자의 처리능력은 t 기간에 처리해야되는 총 작업량보다 크거나 같아야 함.

$$\sum_{q \in Q} \sum_{s \in E_{q,t}} g_{s,q}^{build} \leq N, \quad t=1, \dots, T$$

(5) t 기간에 투입되는 총 작업자의 수는 최대 작업자 수 보다 작거나 같아야 함.

$$\sum_{s \in S} g_{s,q}^{Build} \leq N_q^{Build}, \quad q \in Q$$

(6) 작업자의 유형(풀타임, 파트타임) 별 전체 작업자의 수는 유형 별 최대 작업자의 수보다 작거나 같아야 함.

$$\sum_{s \in S} r_p g_{s,p}^{Build} \leq \eta \sum_{s \in S} \sum_{q \in Q} r_q g_{s,q}^{Build}$$

(7) 파트 타임 작업자의 수를 전체 작업자 수의 비율(25%)로 제한함.

4.1. 최적화모형

Subject to :

$$\sum_{s \in S} h_{s,q} \leq D \cdot l_q, \quad q \in Q$$

(8) 작업자 유형 별 Shift의 총 개수는 유형 별 최대 Shift의 개수보다 작거나 같아야 함.

$$g_{s,q}^{Build} \leq M h_{s,q}, \quad q \in Q, s \in S$$

(9) 작업자 유형 별 Shift에 할당된 작업자의 수는 제한이 없음.

$$h_{s,q} = h_{s+jB,q}, \quad q \in Q, s=1,...,B, j=1,...,D-1$$

(10) 작업자 유형 별 Shift의 시작시간은 일 별로 같아야 함.

$$x_{t-j,t} \geq 0, \quad t=1,...,T, j=0,...,F\tau-1$$

$$y_{t-j,t} \geq 0, \quad t=1,...,T, j=0,...,P\tau-1$$

$$z_t \geq 0, \quad t=1,...,T$$

(11) 항공기 유형(화물기, 여객기)별 작업량은 양의 값을 가짐

$$g_{s,q}^{Build} \geq 0 \text{ and integer}, \quad q \in Q, s \in S$$

(12) 작업자의 수는 양의 값을 갖는 정수임.

$$h_{s,q} \in \{0,1\}, \quad q \in Q, s \in S$$

(13) 작업자 유형 별 Shift는 0 또는 1의 값을 가지는 이진변수

4.1. 최적화모형

<표 1> t, t+1, t+2, t+3에 출항하는 모든 비행기의 총 수요

시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100 개	200 개	1000 개	300 개

<표 2> t 시점에 출항하는 비행기들의 화물 도착 패턴

시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t
도착 분포	10%	30%	20%	20%	20%
누적 분포	10%	40%	60%	80%	100%

<표 3> t, t+1, t+2, t+3에 출항하는 모든 비행기의 화물 도착 패턴

시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100	200	1000	300
t 도착 화물 물량	10	30	20	20	20			
t+1 도착 화물 물량		20	60	40	40	40		
t+2 도착 화물 물량			100	300	200	200	200	
t+3 도착 화물 물량				30	90	60	60	60

4.1. 최적화모형

<표 3> t, t+1, t+2, t+3에 출항하는 모든 비행기의 화물 도착 패턴

시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100	200	1000	300
t 도착 화물 물량	10	30	20	20	20			
t+1 도착 화물 물량		20	60	40	40	40		
t+2 도착 화물 물량			100	300	200	200	200	
t+3 도착 화물 물량				30	90	60	60	60

<표 4> t, t+1, t+2, t+3에 출항하는 모든 비행기의 화물의 Demand leveling을 하지 않았을 때

시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100	200	1000	300
Demand leveling, t	10	30	20	20	20			
Demand leveling, t+1		20	60	40	40	40		
Demand leveling, t+2			100	300	200	200	200	
Demand leveling, t+3				30	90	60	60	60
시간당 총 처리 물량	10	50	180	390	350	300	260	60
시간당 필요 인력 수	0.3	1.7	6	13	11.7	10	8.7	2
근무시간 최대 필요인력 수 (N)	13 명				12 명			

4.1. 최적화모형

<표 3> t, t+1, t+2, t+3에 출항하는 모든 비행기의 화물 도착 패턴

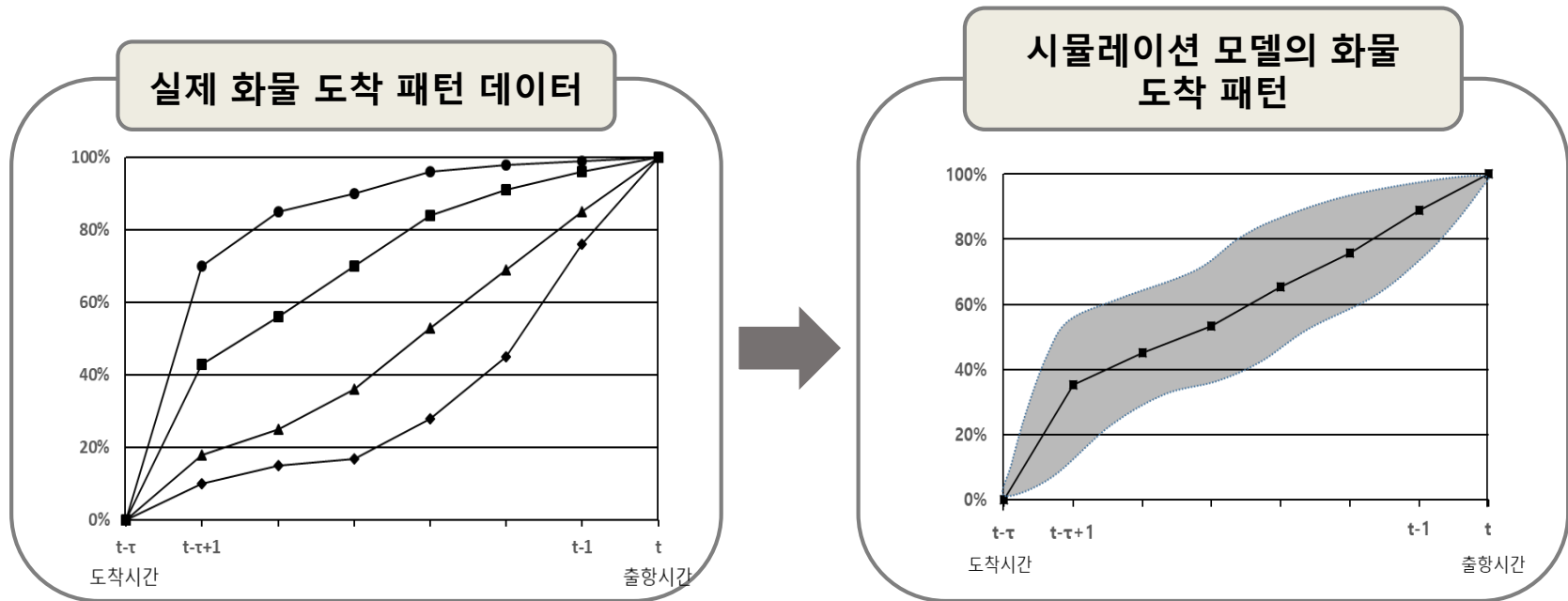
시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100	200	1000	300
t 도착 화물 물량	10	30	20	20	20			
t+1 도착 화물 물량		20	60	40	40	40		
t+2 도착 화물 물량			100	300	200	200	200	
t+3 도착 화물 물량				30	90	60	60	60

<표 4> t, t+1, t+2, t+3에 출항하는 모든 비행기의 화물의 Demand leveling, N

시간	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1	t+2	t+3
수요					100	200	1000	300
Demand leveling, t	10	30	20	20	20			
Demand leveling, t+1		20	20	20	40	40		
Demand leveling, t+2			10	20	293	293	384	
Demand leveling, t+3				20	70	70	70	70
시간당 총 처리 물량	10	50	50	80	423	403	454	70
시간당 필요 인력 수	0.3	1.7	1.7	2.7	14.1	13.4	15.1	2.3
근무시간 최대 필요인력 수 (N)	3 명				16 명			

4.2. 시뮬레이션 모델

- 본 연구의 시뮬레이션 모델은 항공화물터미널의 프로세스를 표현하였으며, 현장 상황을 반영하기 위해 혼잡도로 인한 작업 시간의 불확실성을 포함하여 시간의 흐름에 따라 진행됨.



4.2. 시뮬레이션 모델

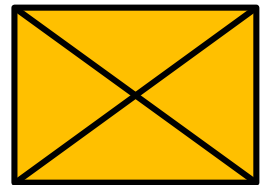
- 본 연구의 시뮬레이션 모델은 현장 상황을 반영하고자 Storage 내부의 물량에 따른 혼잡도에 의해 지게차의 작업시간에 대한 불확실성이 발생하도록 설계하였음.

Flight 2		Flight 1			Flight 3
	Flight 1	Flight 3	Flight 3	Flight 4	
	Flight 2		Flight 3		Flight 3



Storage exit

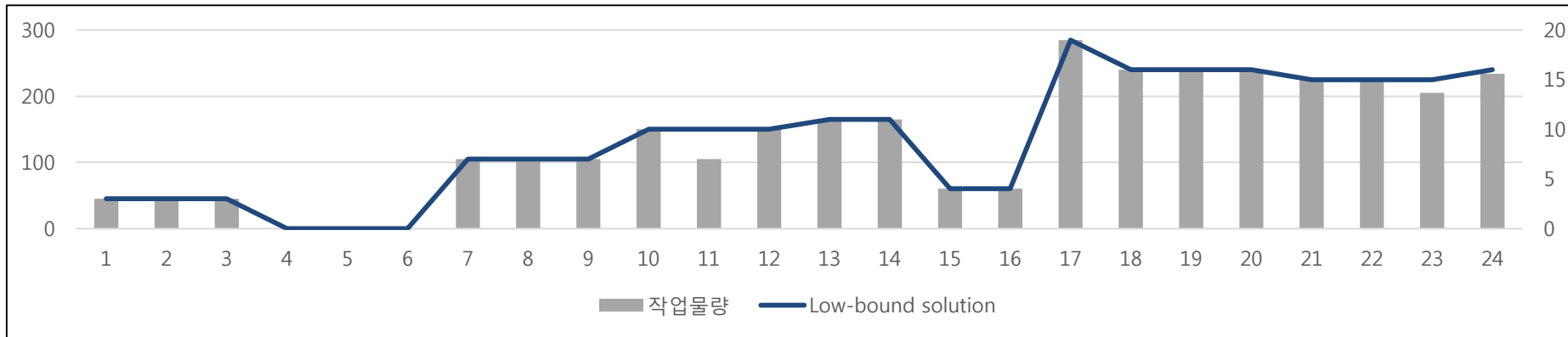
Workstation



5. 실험결과

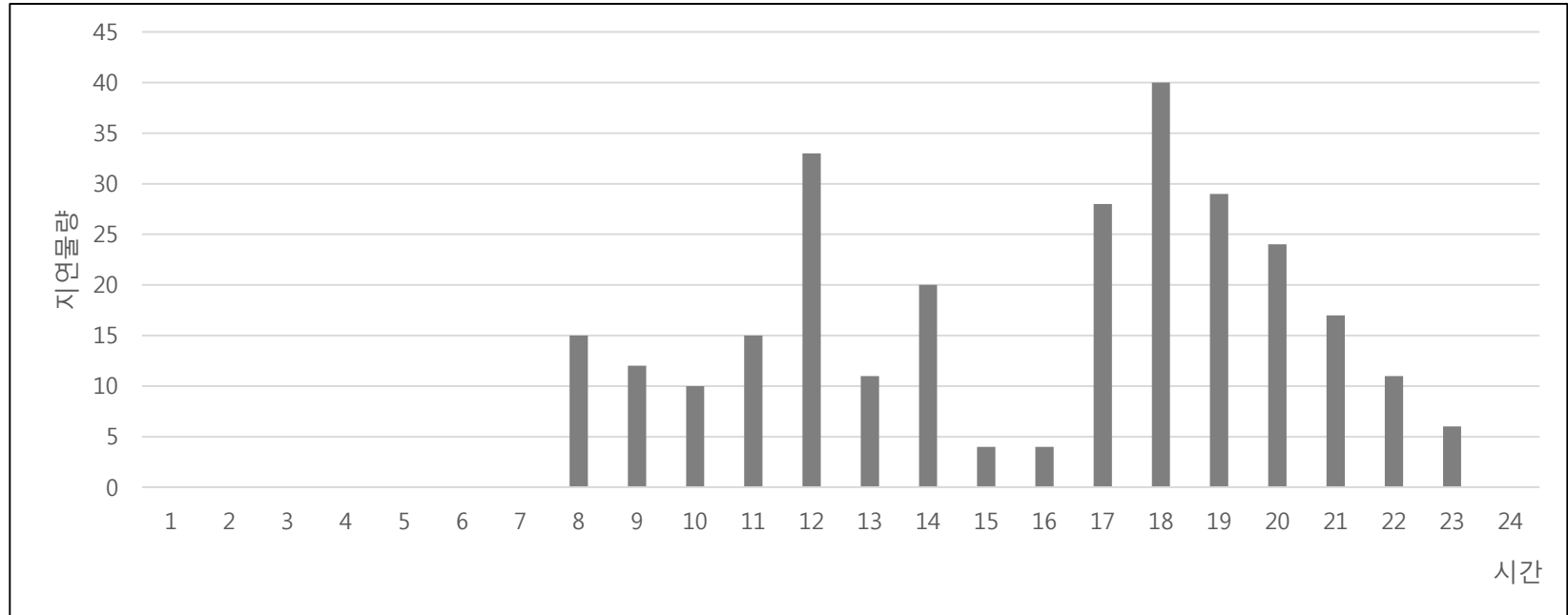
Step 1. 최적화 모형으로부터 도출된 인력 스케줄

시간	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Shift 166P	1																							
Shift 168P	2	2	2																					
Shift 6P						1	1	1	1															
Shift 7F							5	5	5	5	5	5	5	5										
Shift 8F								2	2	2	2	2	2	2	2									
Shift 8P								2	2	2	2													
Shift 10P										1	1	1	1											
Shift 14F														3	3	3	3	3	3	3	3			
Shift 15F															2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Shift 16F																4	4	4	4	4	4	4	4	
Shift 17F																	5	5	5	5	5	5	5	5
Shift 18P																		1	1	1	1			
Shift 20P																				1	1	1	1	
Shift 21P																					2	2	2	2
Shift 22P																						1	1	1
Shift 24P																								1
총 작업인원	3	2	2	0	0	1	6	10	10	10	10	8	8	10	7	9	14	15	15	16	18	15	13	9

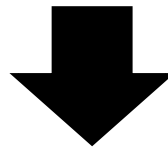


5. 실험결과

Step 2. 시뮬레이션을 이용한 서비스 수준 평가



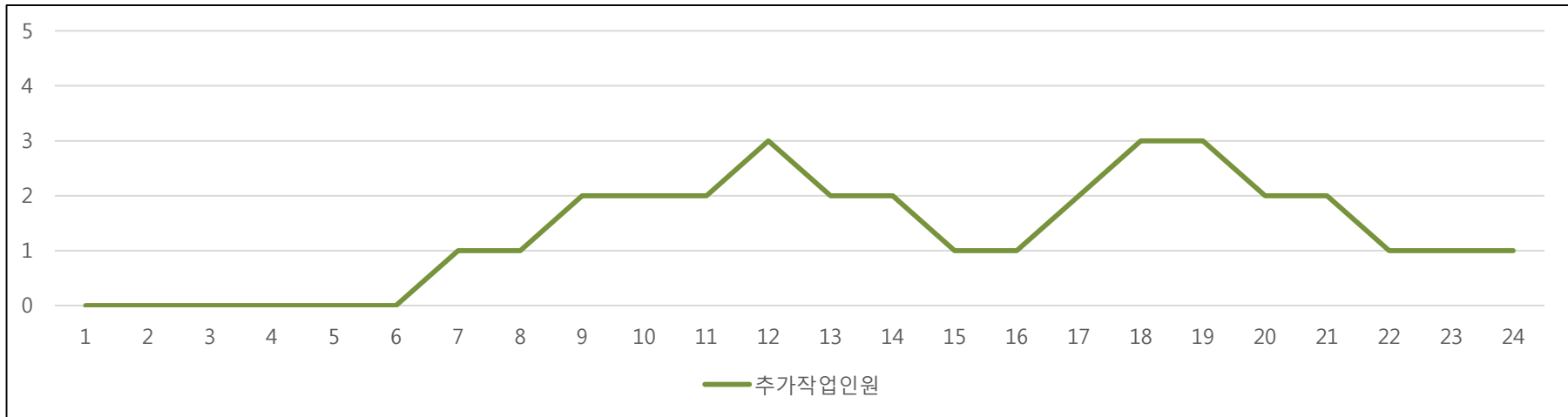
t 시점에 출항하는 항공기에 대한 지연물량



Dummy Demand

5. 실험결과

Step 3. Dummy Demand를 이용한 추가 인력 생성 (최적화 모형)

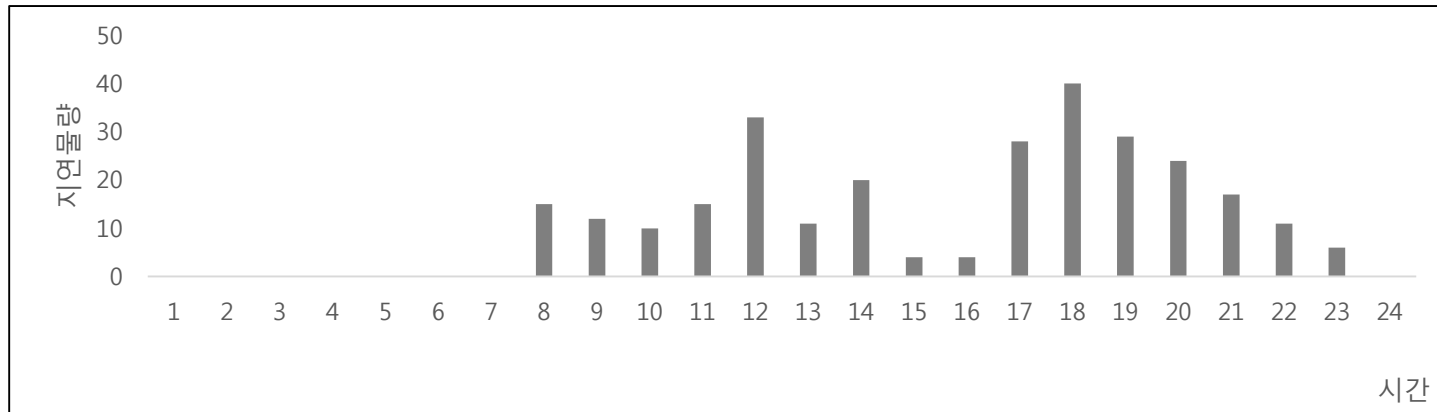


시간	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Shift 7P_1							1	1	1	1														
Shift 9P_1									1	1	1	1												
Shift 11P_1											1	1	1	1										
Shift 12P_1												1	1	1	1									
Shift 16P_1																1	1	1	1					
Shift 17P_1																	1	1	1	1				
Shift 18P_1																		1	1	1	1			
Shift 21P_1																					1	1	1	1

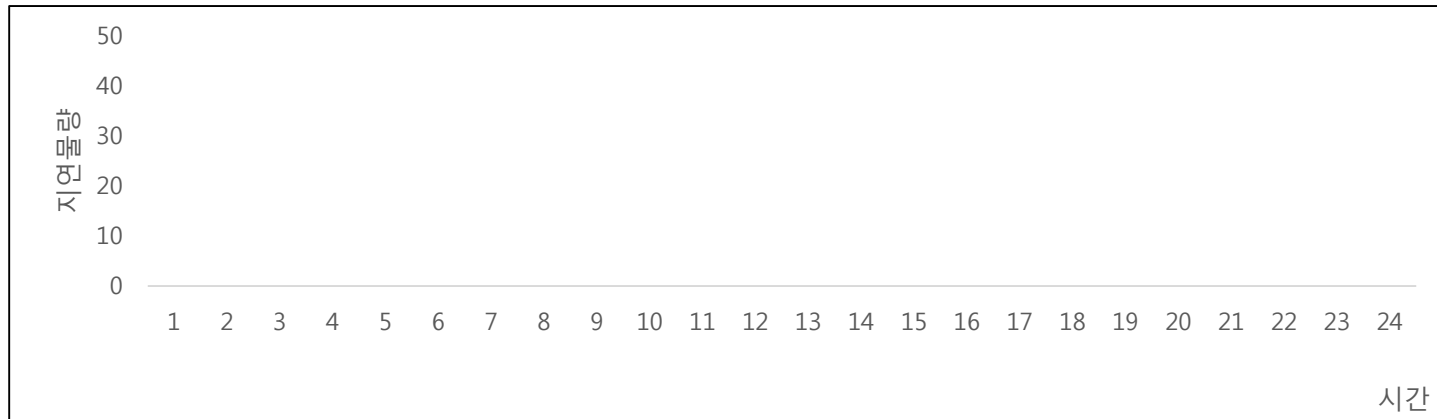
5. 실험결과

Step 4. 추가 인력이 고려된 인력스케줄에 대한 시뮬레이션 분석

초기 인력스케줄에 대한 자연물량



추가인력을 고려한 인력스케줄에 대한 자연물량

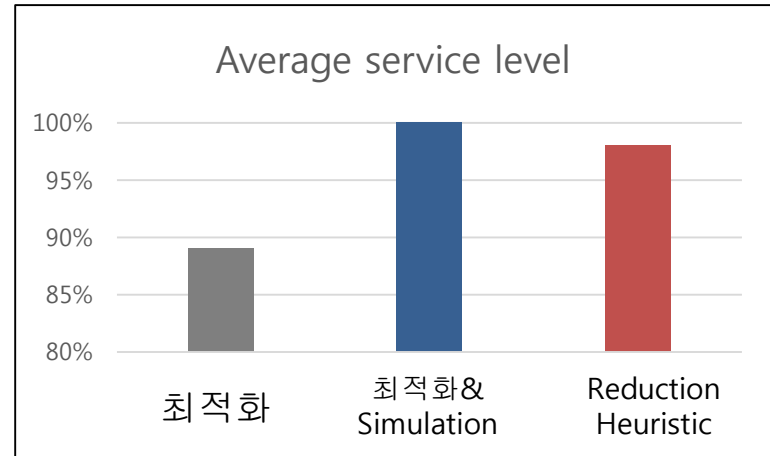
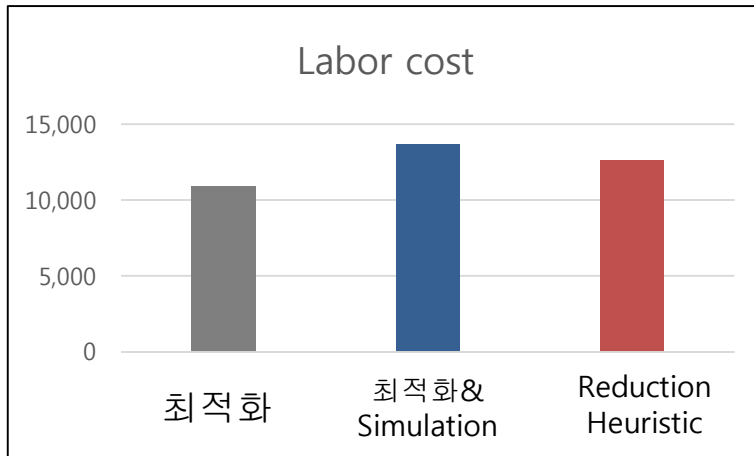
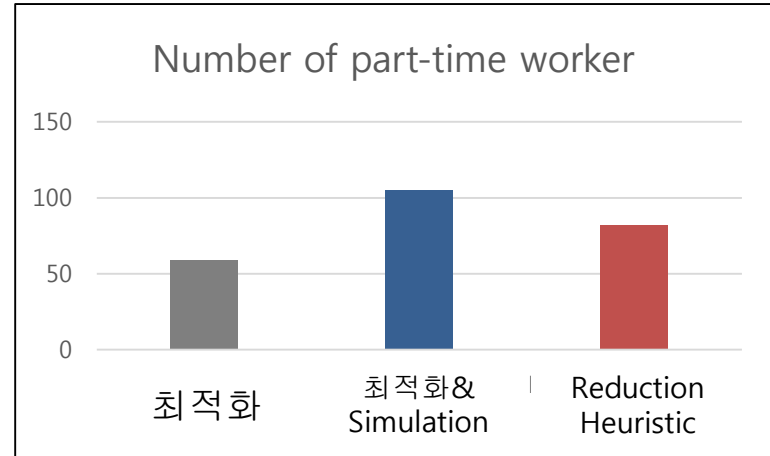
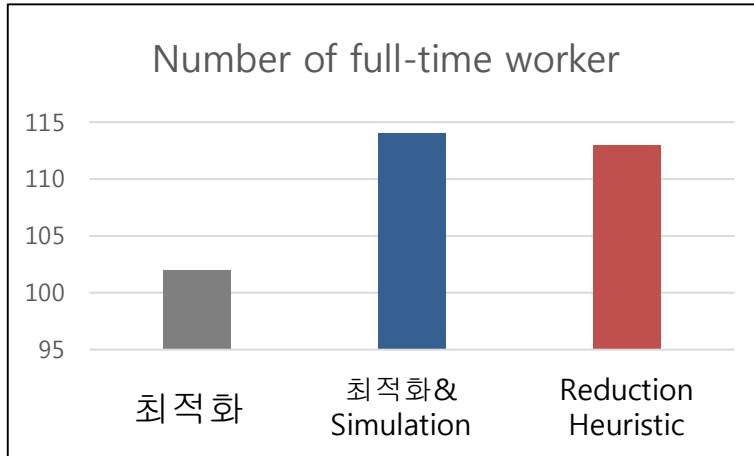


5. 실험결과

Step 5. 불필요한 추가 인력을 줄이기 위한 인력스케줄 별 Utilization

[illegible]

5. 실험결과



6. 결론

- 본 연구는 실제 항공화물 터미널의 운영상황을 반영한 인력 스케줄을 수립하는 연구임.
 - 기존 연구에서는 주로 Demand와 Shift가 고정된 최적화 모형을 고려했기 때문에 시뮬레이션 & 최적화 하이브리드 모형을 적용할 수 있으나, 본 연구와 같이 Demand leveling과 Shift가 고정되지 않은 최적화 모형에서는 하이브리드 모형을 적용하기 어려움.
 - 본 연구에서는 Demand leveling과 Shift가 결정되는 인력 스케줄 최적화 모형에 대해서 실제 운영 프로세스를 반영하여 인력스케줄을 수립할 수 있는 휴리스틱 방법을 제안함.
-
- 추후 연구 계획
 - 비용-서비스 수준 교환 관계 (Trade-off)를 통한 최적 전략 제시
 - 연구방법의 강건성을 검토하기 위해 민감도 분석 수행
 - ① 항공기 별 수요량 변화에 따른 분석 (Low, Mid, High)
 - ② 혼잡도 증가(특정 시간대에 물량 급증)에 따른 분석 (Low, Mid, High)
 - 전체 인력 계획 기간 확대(현재 1 Week 에서 12 Week, 24 Week)에 따른 연구방법의 강건성 강화
-

참고문헌

- Beliën, J., Cardoen, B., & Demeulemeester, E. (2012). Improving workforce scheduling of aircraft line maintenance at Sabena Technics. *Interfaces*, 42(4), 352-364.
- Brusco, M. J., Jacobs, L. W., Bongiorno, R. J., Lyons, D. V., & Tang, B. (1995). Improving personnel scheduling at airline stations. *Operations Research*, 43(5), 741-751.
- De Bruecker, P., Van den Bergh, J., Beliën, J., & Demeulemeester, E. (2015). A model enhancement heuristic for building robust aircraft maintenance personnel rosters with stochastic constraints. *European Journal of Operational Research*, 246(2), 661-673.
- Rong, A., & Grunow, M. (2009). Shift designs for freight handling personnel at air cargo terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(5), 725-739.
- Nobert, Y., & Roy, J. (1998). Freight handling personnel scheduling at air cargo terminals. *Transportation Science*, 32(3), 295-301.
- Sabar, M., Montreuil, B., & Frayret, J. M. (2009). A multi-agent-based approach for personnel scheduling in assembly centers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), 1080-1088.
- Sabar, M., Montreuil, B., & Frayret, J. M. (2012). An agent-based algorithm for personnel shift-scheduling and rescheduling in flexible assembly lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-12.
- Van den Bergh, J., De Bruecker, P., Beliën, J., De Boeck, L., & Demeulemeester, E. (2013). A three-stage approach for aircraft line maintenance personnel rostering using MIP, discrete event simulation and DEA. *Expert Systems with Applications*, 40(7), 2659-2668.
- Yan, S., Yang, T. H., & Chen, H. H. (2004). Airline short-term maintenance manpower supply planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(9), 615-642.
- Yan, S. Y., Chen, C. K., & Chen, C. H. (2006). Cargo terminal shift setting and manpower supplying in short-term operations. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(2), 109-118.
- Yan, S., Chen, C. H., & Chen, C. K. (2006). Long-term manpower supply planning for air cargo terminals. *Journal of Air Transport Management*, 12(4), 175-181.
- Zülch, G., Rottinger, S., & Vollstedt, T. (2004). A simulation approach for planning and re-assigning of personnel in manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 90(2), 265-277.
-