

A Heuristic for Drone-Utilized Blood Inventory and Delivery Planning

Jin-Myeong Jang* · Hwa-Joong Kim*[†] · Dong-Hoon Son**

*Graduate School Logistics, Inha University

**Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology

드론 활용 혈액 재고/배송계획 휴리스틱

장진명* · 김화중*[†] · 손동훈**

*인하대학교 물류전문대학원

**홍콩과학기술대학교 토목환경공학과

This paper considers a joint problem for blood inventory planning at hospitals and blood delivery planning from blood centers to hospitals, in order to alleviate the blood service imbalance between big and small hospitals being occurred in practice. The joint problem is to determine delivery timing, delivery quantity, delivery means such as medical drones and legacy blood vehicles, and inventory level to minimize inventory and delivery costs while satisfying hospitals' blood demand over a planning horizon. This problem is formulated as a mixed integer programming model by considering practical constraints such as blood lifespan and drone specification. To solve the problem, this paper employs a Lagrangian relaxation technique and suggests a time efficient Lagrangian heuristic algorithm. The performance of the suggested heuristic is evaluated by conducting computational experiments on randomly-generated problem instances, which are generated by mimicking the real data of Korean Red Cross in Seoul and other reliable sources. The results of computational experiments show that the suggested heuristic obtains near-optimal solutions in a shorter amount of time. In addition, we discuss the effect of changes in the length of blood lifespan, the number of planning periods, the number of hospitals, and drone specifications on the performance of the suggested Lagrangian heuristic.

Keywords : Blood inventory, Delivery planning, Drone, Lagrangian heuristic

1. 서론

대다수의 국가들은 생명과 연관이 있는 혈액을 공공재로 인식하고 혈액부족 발생 및 손실 방지를 위해 안정적인 수급 유지와 효율적인 재고관리에 주의를 기울이고 있다. 국내의 경우 대한적십자사 혈액관리본부에서 전국에 15개의 혈액원을 통해 혈액조달과 검사, 보관, 배송

및 공급을 담당하고 있으며, 혈액정보공유시스템을 활용하여 개별 병원 내 혈액재고까지 통합 관리하고 있다 [24]. 그러나 이러한 노력에도 불구하고, 소형병원과 중대형 병원 간 혈액공급 불균형이 지속적으로 발생하고 있다. 이에 대한 원인은 소형병원 행 다빈도 소량 혈액배송에 따른 고배송비 발생 때문인 것으로 알려져 있다 [15]. 이러한 상황에서, 개별 병원의 혈액 재고비용을 혈액원이 일부 분담하는 것으로 정부가 정책을 변경하여 혈액원의 혈액 관리비용이 가중되었다[20].

이러한 배경 하에서, 본 연구는 혈액원의 혈액 재고관리 및 혈액배송 최적화 문제를 다룬다. 국내 혈액원은 혈

Received 18 August 2021; Finally Revised 14 September 2021;

Accepted 15 September 2021

[†] Corresponding Author : hwa-joong.kim@inha.ac.kr

액배송 시 주로 밴, 트럭 등의 혈액배송차량을 활용하고 있는데, 최근 비용절감과 신속배송을 위해 드론이 대안으로 고려되고 있다. Thiels et al.[25]에 따르면, 혈액 및 의약품 배송분야에서 드론이 시간 측면에서 기존의 혈액배송차량보다 효과적이므로 응급상황 발생 시 효율적인 대안으로 활용될 수 있다. 한편, 혈액은 일반 상품과 달리 부패가 가능하기 때문에, 즉, 혈액수명(Blood lifespan)이 존재하기 때문에, 배송/재고관리 시 이를 고려하여야 한다[11]. 따라서, 본 논문은 혈액수명과 드론 배송을 고려한 재고관리 및 혈액배송 문제를 고려하며, 이 문제를 해결하기 위해 정수계획모형과 라그랑지안 휴리스틱을 제안한다. 이후, 현실상황에 근거하여 데이터를 생성한 후 제안한 휴리스틱의 성능 평가를 실시한다.

다음 제2장에서는 혈액배송과 혈액재고관리에 관한 선행연구를 분석하고, 본 연구의 차별성에 대해 기술한다. 제3장에서는 고려하는 문제에 대해 정의하고 개발된 정수계획모형을 제시한다. 제4장에서는 제안된 라그랑지안 휴리스틱을 기술한다. 제5장에서는 활용된 데이터 및 예제문제에 대해 설명하고, 제안한 알고리즘의 성능을 평가한다. 마지막으로 제6장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구 방향에 대해 논한다.

2. 문헌연구

본 절에서는 본 연구와 유관도가 높은 혈액재고관리, 드론 활용 혈액/의약품/의료장비 배송, 혈액재고관리 및 배송계획에 관한 선행연구를 검토 및 분석한다. 이후 본 연구의 차별성을 중심으로 한 의의를 기술한다.

혈액재고관리 관련 선행연구들은 개별 병원의 재고전략 및 재고계획모형 개발에 초점을 맞추었다. 먼저, Jennings[6]은 혈액원을 활용하여 개별병원의 혈액을 관리하는 것이 효율적이라고 주장하였다. 혈액원을 활용하는 경우, 개별병원은 혈액의 낭비를 줄일 수 있으며 고객 서비스를 충족시킬 수 있다고 주장하였다. Erickson et al.[1]은 지진으로 인해 혈액수요와 공급의 불균형이 발생하는 상황에서 혈액부족의 최소화를 위한 재고전략을 제시하였다. Gunpinar and Centeno[3]는 불확실한 혈액수요를 고려한 혈액재고계획 문제를 강건 정수계획모형을 개발하여 해결하였다. Najafi et al.[13]은 공급이 불확실한 상황에서 병원이 혈액재고 부족 및 폐기를 최소화하기 위한 다목적 기회제약 정수계획모형을 개발하였다. Huh et al.[5]은 국내 병원의 혈액 재고량 산출을 위해 호주에서 활용 중인 혈액 재고량 산정식을 활용하였다. 산정식에는 일일 혈액공급량 및 사용량, 사용 혈액의 변동량, 혈액 수송시간 등을 고려하였다. Rajendran and Ravindran[18]은 혈액원과 병원의 혈소판 공급 부족

및 폐기를 최소화하기 위한 주문 정책을 2단계 확률적 재고 통제모형으로 풀어냈다. Puranam et al.[17]은 혈액수요가 적은 병원에서 장기간 보관한 혈액을 혈액수요가 높은 병원에 공급하는 상황을 고려하였다. 혈액 부족 및 낭비를 최소화하기 위한 정기발주모형을 제안하였으며 동적계획법을 활용하였다. Zhou et al.[28]은 불확실한 수요 상황 하에서 혈액재고비용과 운송비용, 결손, 긴급발주 및 혈액폐기비용을 최소화하는 정기발주모형을 개발하였으며, 확률적 동적 계획법을 활용하여 주문량 및 긴급발주 수준을 결정하였다.

다음으로, 드론 활용 혈액/의약품/의료장비 배송 관련 선행연구에 대해 살펴보면, 먼저, Haidari et al.[4]은 백신 공급 네트워크 구축에 있어 드론 활용에 따른 비용 및 접근성 측면의 우수성을 이산사건 시뮬레이션을 통해 분석하였다. Pulver et al.[16]은 자동심장충격기 긴급배송에 있어 기존 육상운송차량 대신 드론 활용 시의 시간 효과성을 분석하기 위해 집합커버링모형(Set covering model)을 활용하였다. Scott and Scott[21]은 혈액 배송시간 최소화를 위한 예산제약 고려 드론데포(Drone depot) 입지 선정문제를 다루었으며, 이 문제를 비선형 중력모형을 확장하여 모형화하였다. Kim et al.[9]은 드론 활용 의약품 공급 네트워크 문제를 2단계로 나누어 해결하였다. 먼저, 집합커버링모형을 활용하여 드론데포의 수와 위치를 결정한 후 다특성 드론의 경로 설정모형을 통해 드론의 수를 최소화하였다. Nedjati et al.[14]는 지진 발생에 따른 구호물품 배송네트워크 문제에서 드론을 활용한 배송네트워크를 고려하였으며, 드론의 운송시간 최소화를 목적식으로 드론의 운송 계획을 결정하는 정수계획모형을 개발하였다.

마지막으로, 혈액재고관리 및 배송계획을 함께 고려한 선행연구는 (본 연구자들의 분석으로는) Kazemi et al.[7]이 유일하다. Kazemi et al.[7]은 본 연구와 유사하게 혈액원에서 다수의 병원으로 혈액을 공급하는 상황을 고려하였고 혈액운송비용, 재고비용, 폐기비용의 최소화를 목적식으로 하는 비선형계획모형을 제안하였다. 로트사이징 모형을 기반으로 하며 병원들의 목표 재고량을 만족시키는 만큼만 정기적으로 배송하는 것으로 가정하였다. 즉, 일반적인 확률적 정기발주모형이 아닌 수요가 확정적인 정기발주 로트사이징모형이라고 할 수 있다. 또한 혈액수명을 고려하기 위해 비선형 제약식을 활용하였다. 더불어, 강건확률계획 모형(Robust probabilistic planning model) 개발을 통해 수요, 공급, 비용의 불확실성을 추가로 고려하였으며, 문제해결을 위해 분기절단(Branch and cut) 알고리즘을 개발하였다.

앞서 선행연구의 분석을 토대로 본 연구가 갖는 의의를 기술하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 혈액 배송 시 4차산업 혁명의 주요 운송수단인 드론의 활용을 모색하고 주요 운영

이슈인 배송계획 수립 시 이를 고려한다는 데 의의가 있다. 둘째, 드론 활용을 고려한 선행연구의 경우, 주로 드론 네트워크 문제인 드론대포 입지선정문제 또는 운송시간을 최소화하기 위한 배송계획을 주제로 연구가 진행되었다. 그러나 본 연구에서는 실제 드론을 효율적으로 운영하기 위한 비용 최소화관점에서 드론 배송계획을 고려하였으며, 일반적인 수송문제와 달리 혈액수명을 추가적으로 고려한 배송시기 및 배송량을 결정하였다. 셋째, 드론 활용을 고려한 혈액재고관리와 배송계획을 함께 다룬 선행논문은 Kazemi et al.[7]이 유일하고 본 연구는 추가로 드론 활용까지 고려한 차별점이 있다. 넷째, Kazemi et al.[7]은 목표 재고수준을 만족시킬 만큼 배송하기 때문에 과다한 재고를 발생시킬 가능성이 있으나, 본 논문의 모형은 이러한 목표재고수준을 고려하지 않고 좀 더 일반적인 로트사이징모형을 기반으로 하기 때문에 과다 재고를 발생시키지 않는다. 다섯째, Kazemi et al.[7]은 혈액의 필수 고려사항인 혈액수명을 고려하는 데 있어 비선형 제약식을 활용하였으나, 본 연구는 선형 제약식을 활용한다. 사실, Kazemi et al.[7]가 비선형 제약식을 쓸 수밖에 없었던 이유는 일반 재고흐름보존 제약식(Inventory flow conservation constraint) 기반의 모형이기 때문인 것으로 분석된다. 그러나 비선형 제약식을 선형화 하는 경우, 불필요한 제약식이 추가적으로 발생하게 되어 문제의 복잡도가 증가하는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이를 극복하고자 수송문제(Transportation problem) 기반의 로트사이징모형인 Madan and Gilbert[12]의 모형을 확장하여 혈액수명 관련 제약을 고려함으로써 선형모형을 제안하였다.

3. 문제 정의

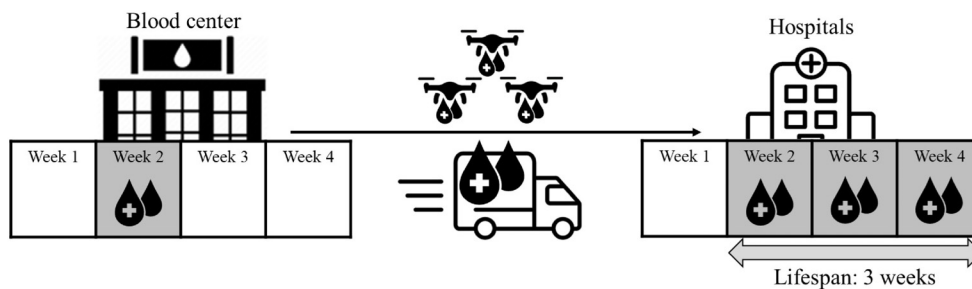
본 절에서는 가정사항, 목적식, 제약식 등에 대해 자세히 서술하여 고려한 문제를 정확히 정의하고, 정수계획모형을 통해 고려한 문제를 수리적으로 표현한다.

<Figure 1>은 본 연구에서 고려한 혈액 재고/배송계획 문제를 도식화한 것이다. 그림에서는 하나의 혈액원(Blood center)과 병원(Hospital)이 존재하는 것처럼 보이

지만, 고려한 문제에서는 다수의 혈액원과 다수의 병원을 상정하였다. 그림의 오른쪽에 있는 병원은 계획된 수술일정 등으로 인해 기간별로 확정적 혈액수요가 존재한다. 이 혈액수요를 충족시키기 위해, 혈액원이 혈액을 생산하고 드론 또는 혈액배송차량을 활용하여 해당 병원으로 배송한다. 이때, 혈액배송 및 재고보관 시, 혈액의 안전한 사용을 위해 혈액원은 혈액의 수명을 고려하여야 한다. 이 혈액수명은 선행연구나 현장에서 일반적으로 고정된 기간으로 간주하며 이를 혈액의 고정수명(Fixed lifespan)이라고 한다. 본 연구는 혈액의 장기보관을 위해 지속적으로 연구 진행 및 실제 시행 중인 냉동보관 방식을 고려하였다[1, 8, 10, 22]. 따라서 혈액원은 배송이 되는 시기에 냉동혈액을 해동하여 배송하는 것으로 가정하였으며, 해동시기로부터 혈액수명이 정해지게 된다. <Figure 1>은 이러한 혈액수명과 배송시기 때 해동을 설명하고 있다. 즉, 3주의 혈액수명을 가졌다고 가정할 시, 2주차에 혈액원에서 해동 및 배송된 혈액은 2~4주차의 혈액수요까지 만족시킬 수 있다.

본 연구에서 고려된 문제는 병원의 혈액수요를 충족시키기 위하여, 혈액원에서 병원으로 혈액을 배송하는 문제이다. 본 문제에서는 혈액 배송량, 배송시기, 배송수단을 결정하며, 병원에서의 재고량을 결정한다. 이때 발생하는 배송비용과 혈액 재고유지비용의 합을 최소화하는 것을 목적함수로 한다. 본 문제는 혈액원 관점에서의 문제로 병원에서 발생하는 혈액재고유지비용은 병원이 지불해야할 비용으로 보지 않고 혈액원이 지불해야 할 비용으로 보았다. 이러한 가정은 앞서 언급한 것과 같이 개별 병원의 혈액 재고유지비용의 일부를 혈액원이 부담하는 정책의 변화를 반영하기 위해서이다[20].

현장에 따르면, 혈액배송차량은 1회 배송으로 배송할 혈액을 모두 배송이 가능한 것으로 알려져 있다. 즉, 혈액배송차량의 적재용량은 무한대다. 그러나 드론의 경우 최대 적재용량이 존재하고, 이는 운송량이 많을 시 다회 배송을 필요로 할 수도 있다. 이때 일몰 후 드론 배송이 현실적으로 힘든 것을 감안하여, 운영이 가능한 하루 최



<Figure 1> Conceptual Drawing of the Blood Inventory and Delivery Planning

대 시간 내에 드론 배송을 수행하는 것으로 한정하였다. 마지막으로 문제정의를 위한 여타 가정사항을 정리하면 다음과 같다.

- 혈액원에는 적재용량, 배터리 용량, 속도와 같은 제한이 동일한 드론을 운영한다.
- 드론은 탈부착 방식인 배터리를 사용하며, 충전시간을 고려하지 않는다. 또한 배송 출발 시, 배터리의 용량은 가득 찬 상태이다.
- 혈액원 및 병원의 직선거리를 통해 드론 배송 거리를 고려하였으며, 이착륙 및 준비시간은 혈액원과 병원 구분없이 모두 동일하다.
- 혈액원에서 부담하는 혈액 재고유지비용은 모두 동일하다.
- 혈액 폐기는 허용하지 않는다.

다음으로, 정의된 문제를 정수계획모형을 활용하여 모형화한다. 상기하였듯이, 본 연구에서는 일반 로트사이징모형에서 활용되는 재고흐름보존 제약식 기반의 모형을 활용하지 않고, 수송문제 기반의 로트사이징모형인 Madan and Gilbert[12]의 모형을 확장하였다. 이는 Kazemi et al.[7]와 달리 혈액수명을 선형모형으로 모형화하기 위해 도입한 것이다. 모형과 제안된 휴리스틱에서 활용된 기호들을 정리하면 다음과 같다.

집합

- B : 혈액원 집합
- H : 병원 집합
- T : 시간 집합 [주(week) 집합]
- N : 한 주의 구성 일 집합 [일(day) 집합]. 통상 N 의 크기는 한 주 7일인 7이지만, 날씨가 안 좋을 때는 N 의 크기 7보다 작을 수 있음
- G_k : k 주차에 병원으로 배송된 혈액이 사용 가능한 기간의 집합 [주(week) 집합],
 $G_k = \{x | k \leq x \leq \beta_k, x \in T\}$

모수

- α_t : t 주차의 혈액수요를 만족시키기 위해 사용될 수 있는 혈액의 가장 늦은 배송시기 [주(week)],
 $\alpha_t = \max\{1, t - f + 1\}$. 여기서 f 는 기간 이산화된 혈액수명을 의미
- β_k : k 주차에 배송 받은 혈액의 최대 사용 가능 기한 [주(week)], $\beta_k = \min\{k + f - 1, |T|\}$
- c : 드론의 적재 가능한 최대 용량 [포]
- c_{ij}^D : 혈액원 i 에서 병원 j 로 왕복 혈액 배송 1회 당 드론의 배송비용 [원]

- c_{ij}^V : 혈액원 i 에서 병원 j 로 혈액 배송차량의 배송비용 [원]
- d_{jt} : 병원 j 의 t 번째 주차에 필요한 혈액수요 [포]
- h : 혈액 1포 당 혈액원이 부담하는 병원의 주별 혈액 재고유지비용 [원]
- M : 임의의 큰 수
- p_i : 혈액원 i 내 보유 드론의 하루 총 가용 시간
- t_{ij} : 혈액원 i 에서 병원 j 로 왕복 1회시 드론의 배송 소요시간 [시간]

결정변수

- X_{ijkt} : 혈액원 i 로부터 병원 j 로 t 주차의 혈액 수요를 공급하기 위해 k 주차에 배송된 혈액량 [포]
- Y_{ijk} : 혈액원 i 로부터 병원 j 로 기존의 혈액 배송차량을 통해 k 주차에 배송되는 경우 1, 아니면 0
- Z_{ijkn} : 혈액원 i 에서 병원 j 로 k 주차 내 n 번째 일에 비행된 드론의 왕복 운행횟수

제안된 정수계획모형을 제시하면 다음과 같다. 모형에서 혈액원과 병원간 거리가 드론의 최대 비행가능거리보다 더 큰 병원의 경우, 드론을 활용한 배송이 발생하지 않도록 해당 링크 연결을 제거하였다.

$$[P1] \text{ Minimize } \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} c_{ij}^V Y_{ijk} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} \sum_{n \in N} c_{ij}^D Z_{ijkn} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} \sum_{t=k}^{\beta_k} h(t-k) X_{ijkt}$$

subject to

$$\sum_{i \in B} \sum_{k=\alpha_t}^t X_{ijkt} = d_{jt} \quad \forall j \in H, t \in T \quad (1)$$

$$\sum_{t=k}^{\beta_k} X_{ijkt} \leq M \cdot Y_{ijk} + c \sum_{n \in N} Z_{ijkn} \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in H} t_{ij} Z_{ijkn} \leq p_i \quad \forall i \in B, j \in H, n \in N \quad (3)$$

$$Y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T \quad (4)$$

$$Z_{ijkn} \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T, n \in N \quad (5)$$

$$X_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T, t \in G_k \quad (6)$$

위 수리모형의 목적함수는 혈액배송으로 인해 발생하는 배송비용과 개별 병원의 혈액 재고유지비용 중 혈액원이 부담하는 비용의 합을 최소화하는 것을 의미한다. 제약식(1)은 혈액수명을 고려하면서 개별 병원의 주(week)별 수요를 만족시키는 제약식이다. 혈액수명을 고려하기 위해 혈액수요를 충족하기 위한 혈액원의 배송시점을 제한하였다. 예를 들어, 혈액수명이 5주라고 하면, 8주차의 혈액수요를 만족시키기 위해 사용될 수 있는 혈

액의 가장 오래된 배송시기인 α_i 는 $4(=\max\{1, 8-5+1\})$ 이다. 따라서, 8주차의 혈액수요를 만족시키기 위해 사용되는 혈액은 4주차부터 8주차까지 배송된 혈액으로 제한한다. 제약식(2)는 혈액원으로부터 드론 혹은 혈액배송차량을 활용하여 배송이 되는 것을 표현하며, 혈액배송차량의 사용유무와 드론의 일별 왕복횟수를 결정한다. 제약식(3)은 드론은 하루 운영이 가능한 시간 내에서만 운영되어야 한다는 것을 표현한다. 제약식(4)-(6)은 결정변수에 대한 제약식이다.

4. 라그랑지안 휴리스틱

본 연구는 모형[P1]의 문제해결을 위해 라그랑지안 휴리스틱을 개발하였다. 라그랑지안 휴리스틱은 정수계획 모형 내 제약식 중 문제를 복잡하게 만드는 제약식을 라그랑지안 승수와 곱하여 목적함수로 올리는 라그랑지안 완화를 통해 복잡한 문제를 간단한 문제로 변환 후 해결하는 휴리스틱 기법이다[2].

본 연구에서 제안한 라그랑지안 휴리스틱은 제약식(2)의 라그랑지안 완화를 기반으로 한다. 완화의 효과를 높이기 위해, 먼저 제약식(2)내 임의의 큰 수 M 를 식 (1)을 활용하여 다음의 식으로 변경한다.

$$M = \sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt}$$

위 식에서 $\sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt}$ 는 병원 j 의 k 주차에 고려되는 최대 혈액수요를 의미한다. 그러면 제약식(2)는 다음과 같이 변경된다.

$$\sum_{t=k}^{\beta_k} X_{ijkt} \leq \sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt} Y_{ijk} + c \sum_{n \in N} Z_{ijkn} \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T \quad (2a)$$

그리고 제약식(2a)에 음이 아닌 라그랑지안 승수 λ_{ijk} 를 곱한 후 완화하면 다음과 같은 완화모형[LR]이 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{[LR] Minimize } & \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} (c_{ij}^V - \lambda_{ijk} \sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt}) Y_{ijk} \\ & + \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} \sum_{n \in N} (c_{ij}^D - c \lambda_{ijk}) Z_{ijkn} \\ & + \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} \sum_{t=k}^{\beta_k} ((t-k)h + \lambda_{ijk}) X_{ijkt} \\ \text{subject to } & (1), (3)-(6) \end{aligned}$$

완화모형[LR]은 다음과 같이 3개의 독립적인 부분모형으로 나누어진다.

$$\begin{aligned} \text{[SP1] Minimize } & \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} (c_{ij}^V - \lambda_{ijk} \sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt}) Y_{ijk} \\ \text{subject to } & (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{[SP2] Minimize } & \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} \sum_{n \in N} (c_{ij}^D - c \lambda_{ijk}) Z_{ijkn} \\ \text{subject to } & (3) \text{ and } (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{[SP3] Minimize } & \sum_{i \in B} \sum_{j \in H} \sum_{k \in T} \sum_{t=k}^{\beta_k} ((t-k)h + \lambda_{ijk}) X_{ijkt} \\ \text{subject to } & (1) \text{ and } (6) \end{aligned}$$

부분모형[SP1]은 이진변수인 Y_{ijk} 만 가진 모형이므로 아래의 식을 활용해 최적 Y_{ijk}^* 를 구할 수 있다.

$$Y_{ijk}^* = \begin{cases} 0 & \text{if } c_{ij}^V - \lambda_{ijk} \sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt} \geq 0 \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

부분모형[SP2]는 정수배낭모형(Integer Knapsack model)이므로 선행연구[26]에서 제시된 동적계획법을 활용하여 최적해값을 구할 수 있다. 마지막으로, 부분모형[SP3]는 선형계획모형이므로 CPLEX와 같은 최적화 소프트웨어를 활용하여 쉽게 해를 구할 수 있다.

라그랑지안 완화법에서 원 문제[P1]의 하한값(lower bound)은 라그랑지안 승수 λ_{ijk} 에 의해 결정되게 된다. 라그랑지안 승수를 구하는 문제는 라그랑지안 쌍대문제[LD]라고 부르며 해당 모형은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{[LD] Maximize } & LR(\lambda) \\ \text{subject to } & \lambda_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T \quad (7) \end{aligned}$$

위 모형에서 λ 은 λ_{ijk} 로 이루어진 벡터를 의미하며, $LR(\lambda)$ 은 λ 가 주어진 상황에서의 완화모형[LR]의 최적해값을 의미한다. 라그랑지안 쌍대문제[LD]는 많이 활용되는 서브그레디언트(Subgradient) 휴리스틱을 활용하여 해결한다. 먼저, r 번째 반복(iteration)의 서브그레디언트 $\pi_{ijk}^{[r]}$ 는 다음의 수식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} \pi_{ijk}^{[r]} = & \sum_{t=k}^{\beta_k} X_{ijkt}^{[r]} - \sum_{t=k}^{\beta_k} d_{jt} Y_{ijk}^{[r]} - \sum_{n \in N} c Z_{ijkn}^{[r]} \\ & \forall i \in B, j \in H, k \in T \end{aligned}$$

이때, $X_{ijkt}^{[r]}$, $Y_{ijk}^{[r]}$, $Z_{ijkn}^{[r]}$ 은 각각의 r 번째 반복에서의 부분

문제들의 최적해를 의미한다. 그리고 라그랑지안 승수값은 아래의 수식을 통해 갱신한다.

$$\lambda_{ijk}^{[r+1]} = \max\{\lambda_{ijk}^{[r]} + \theta^{[r]}\pi_{ijk}^{[r]}, 0\} \quad \forall i \in B, j \in H, k \in T$$

위 식에서 $\lambda_{ijk}^{[r]}$ 은 r 번째 반복시점의 라그랑지안 승수값을 의미한다. 스텝사이즈(Step size)인 $\theta^{[r]}$ 은 아래 식으로 도출한다.

$$\theta^{[r]} = \phi^{[r]} \frac{Z^* - Z_{LR}(\lambda^{[r]})}{\|\pi^{[r]}\|^2}$$

비율수 $\phi^{[r]}$ 는 초기값을 2로 설정하였다. 라그랑지안 휴리스틱이 Q 회 반복 시행하더라도 하한값이 개선되지 않을 경우 $\phi^{[r]}$ 에 0.5를 곱하여 변경하였다. 그리고 하한값이 개선되면 다시 초기값으로 설정하였다. 또한, Z^* 는 r 번째 반복까지의 원모형[P1]의 가장 좋은 가능해값을 의미한다. $Z_{LR}(\lambda^{[r]})$ 는 $\lambda^{[r]}$ 이 주어진 상황에서 완화모형[LR]의 최적해값 또는 원 문제[P1]의 하한값이다. 마지막으로 $\|\cdot\|$ 은 벡터 \cdot 의 유클리디언 거리이다.

다음으로, 원문제[P1]의 가능해(Feasible solution)을 구하는 방법을 설명한다. 부분문제[SP1], [SP2], [SP3]에서 구해진 해 중 X_{ijkt} 은 그대로 활용되거나 Y_{ijk}, Z_{ijkn} 은 주어진 X_{ijkt} 를 활용하여 변경된다. 예를 들어, 특정 i, j, k, t 에서 $X_{ijkt} = 0$ 인 경우, 혈액 배송량이 없으므로 배송수단을 선택하는 결정변수인 Y_{ijk}, Z_{ijkn} 의 값은 0이 된다. 반면 $X_{ijkt} > 0$ 인 경우, 혈액원 i 에서 병원 j 로 k 주차에 혈액이 배송되므로 배송수단인 혈액배송차량 또는 드론을 활용해야 한다. 먼저, 혈액 배송량에 따른 드론의 왕복횟수와 소요시간, 그리고 혈액원 i 의 드론 총 운영가능시간을 고려하여, 혈액원 i 의 드론 배송 가능여부를 확인한다. 만약 드론으로 배송이 가능한 경우, 드론 활용에 따른 혈액배송비용과 혈액운송차량의 혈액배송비용을 비교하여 저비용의 배송수단을 선택함으로써 Y_{ijk}, Z_{ijkn} 의 값을 결정한다.

가능해 및 상한값 도출

단계 1: (초기화) 완화문제[LR]의 해를 활용하여 Y_{ijk}, Z_{ijkn} 값을 초기화한 후 혈액원별 드론 운영시간을 계산한다.

단계 2: (배송 여부 조정) 모든 i, j, k, t 에 대해서 $X_{ijkt} = 0$ 인 경우, Y_{ijk}, Z_{ijkn} 의 값을 0으로 변경하며 드론 운영시간을 조정한다.

단계 3: $X_{ijkt} > 0$ 인 경우, 드론 운영시간을 고려하여

드론으로 배송 가능 여부를 확인한다. 가능한 경우 단계 4로 이동하며, 불가능한 경우 단계 5로 이동한다.

단계 4: 드론으로 혈액 배송 시 소요되는 비용과 혈액원으로부터 혈액배송차량으로 배송 시 소요되는 비용을 비교한다. 드론 활용 시의 비용이 더 낮은 경우, 드론 배송인 Z_{ijkn} 을 조정하며 $Y_{ijk} = 0$ 으로 설정 후 단계 6으로 이동한다. 혈액배송차량의 비용이 더 낮은 경우 단계 5로 이동한다.

단계 5: 혈액배송차량으로 배송수단을 설정하기 위해 $Y_{ijk} = 1$ 로 조정하며, 모든 n 에 대하여 $Z_{ijkn} = 0$ 으로 변경 및 드론 운영시간을 조정 한 후 단계 6으로 이동한다.

단계 6: $k = k+1$ 로 설정하며, $k > T$ 인 경우 $k = 1$, $j = j+1$ 로 설정한다. $k > T, j > H$ 인 경우 단계 7로 이동한다.

단계 7: 구해진 해를 활용하여 해값을 도출한다. 도출된 해값은 휴리스틱의 해값이다.

마지막으로, 라그랑지안 휴리스틱을 다음의 절차로 정리한다.

라그랑지안 휴리스틱

단계 1: (초기화) 반복 $r = 1$, 라그랑지안 승수 $\lambda_{ijk} = 0$ 으로 설정하고, 최상한값(Best upper bound)은 무한대로 최하한값(Best lower bound)은 0으로 설정한다.

단계 2: (하한값 구하기) 부분문제[SP1]과 [SP2], [SP3]를 각각 풀어 완화문제[LR]의 해를 도출한다. 이때 구해진 하한값이 기존 최하한값보다 좋은 경우 최하한값을 갱신한다.

단계 3: (가능해 및 상한값 구하기) 위에서 언급한 방법으로 가능해를 구하고 상한값(가능해 값)이 기존 최상한값보다 좋은 경우 최상한값을 갱신한다. 이때 최상한값과 최하한값이 동일한 경우 단계 5로 간다.

단계 4: $r = r+1$ 로 설정하며 $r > R$ 인 경우 단계 5로 간다. 그렇지 않은 경우, 위에서 설명한 서브그라디언트 휴리스틱을 활용하여 라그랑지안 승수를 갱신 후 단계 2로 이동한다.

단계 5: 본 절차를 종료한다. 구해진 최상한값은 라그랑지안 휴리스틱의 해값이며, 최상한값을 주는 가능해는 휴리스틱의 해이다.

5. 실험 결과

본 절에서는 제안된 라그랑지안 휴리스틱의 성능을 평가한다. 해당 알고리즘은 C++로 구현하였으며, Intel(R) Core (TM) i5-8400 CPU@2.80GHz, 8GB PC 환경에서 수행하였다. 알고리즘의 성능평가는 최적화 소프트웨어 CPLEX 12.8.0의 해(최대 연산시간 3,600초)와 비교하여 평가하였다. 또한, 사전실험을 통해 라그랑지안 휴리스틱 내 모수 Q는 200, R은 3,000으로 설정하였다. 알고리즘 성능평가를 위해 본 연구에서는 혈액원을 총 3곳으로 설정하였다. 또한 서로 다른 병원 수(30, 40, 50), 고려 기간(10, 20, 30), 혈액수명(5, 6, 7)에 대해 각 조합별로 독립적인 3개의 문제를 생성하였다. 혈액수명을 달리하는 것은 혈액의 종류에 따라 혈액수명이 달라질 수 있기 때문에 이를 반영하고자 하는 것이다. 따라서 총 81개의 예제문제를 생성하여 본 실험을 진행하였다.

본 논문은 실증적인 연구결과를 도출하기 위해 현실 상황에 근거한 데이터들을 수집 후 실험을 진행하였다. 자료는 대한적십자사, 국가종합전자조달, 아마존 프라임 에어 분석자료 및 혈액배송 드론 기업자료, 논문과 보고서 등 신뢰할 만한 곳[3, 19, 21, 27]에서 수집하였다. 먼저, 혈액배송차량의 km당 배송 비용은 국가종합전자조달 사이트에 서울동부혈액원이 게시한 혈액배송운영 입찰공고문[23]을 활용하여 2,360원으로 설정하였다. 드론의 km당 배송비용은 드론 제조기업인 'Matternet'에서 발표한 자료[19]를 활용하여 11.3원으로 설정하였다. 드론의 제원은 최대속력 40km/h, 최대비행거리 20km, 이착륙 및 준비시간 6분이며, 최대 적재용량은 혈액 4포로 설정하였다[19, 26]. 드론의 배송 소요시간 t_{ij} 은 왕복 비행시간과 이착륙 및 준비시간 st^D 을 합하여 산정하였으며 아래의 산식과 같다.

$$t_{ij} = \frac{2d_{ij}^D}{s^D} + st^D$$

위 식에서 d_{ij}^D 는 드론 배송거리이며 s^D 는 드론 최대속력이다. 드론 배송거리는 드론의 최대 비행거리를 고려하여 $DU(3, 20)$ 에서 임의로 생성하였다. $DU(a, b)$ 는 $[a, b]$ 구간에서 이산균등분포를 의미한다. 혈액배송차량의 배송거리는 드론의 배송 거리에 일정 배수만큼 멀리 있는 것으로 설정하였으며, 배수는 1.2배에서 2배까지 0.1배의 간격으로 구간을 설정한 후 임의 생성하였다.

본 연구에서 고려한 병원은 혈액을 보관하기 위한 혈액은행 또는 보관시설을 갖춘 병원으로, 앞에서 기술하였던 부분처럼 소형 병원과 중대형 병원을 구분하여 혈액 수요를 설정하였다. 대한적십자사로부터 받은 의료기관별 혈액

출고 월간데이터를 활용하여 주간 수요량을 설정하였으며, 소형병원은 $DU(1, 15)$, 중대형 병원은 $DU(300, 500)$ 에서 임의로 설정하였다. 소형과 중대형 병원 수는 균등하게 구성하였다. 혈액 재고유지비용은 국내에서는 주별 혈액 재고유지비용에 대한 자료를 확인할 수 없어 미국 지역 병원들의 실제 혈액 재고유지비용을 활용하였으며 1,015원으로 설정하였다[3]. 알고리즘 성능평가는 CPLEX를 통해 도출된 해값과 연산시간을 비교하였다. 과도한 연산시간을 피하기 위해 CPLEX의 최대 연산시간을 3,600초로 제한하였다. 제한시간 내에 최적해를 도출하지 못하는 경우에는 종료시점까지 도출된 CPLEX의 하한값(LB_{CPLEX})과 본 연구에서 제안한 알고리즘의 해 값(O_{LR})의 차이의 비율을 활용하여 해의 품질을 계산하였다. 이에 대한 산식은 $100*(O_{LR} - LB_{CPLEX})/LB_{CPLEX}$ 으로 정의할 수 있으며 본 연구에서 제안한 알고리즘의 해값과 최적해의 하한값과의 차이율을 의미한다. 연산시간에 대한 성능평가는 상용소프트웨어와 알고리즘이 해를 도출하는데 소요되는 연산시간을 단순 비교하였다.

알고리즘 성능평가 결과는 <Table 1>에 정리되어 있다. 먼저, 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 전반적인 성능은 양호한 것으로 사료된다. CPLEX의 경우 본 연구의 모든 생성문제에서 주어진 연산시간 내에 최적해를 도출하지 못하였다. 이는 문제에 대한 계산 복잡도가 높기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 반면, 본 연구의 알고리즘은 CPLEX 대비 빠른 시간 내에 해 값을 도출하는 것을 확인할 수 있다. 해의 품질을 측정하였을 때, CPLEX의 하한값과 알고리즘의 해값은 최대 2.27% 차이를 보였으나 대부분의 경우 2% 이내의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안한 문제의 복잡성을 고려하였을 때, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 해가 최적해와 충분히 근사한 특성이 존재한다고 추정할 수 있다. 이를 통해, 드론 활용 혈액배송 및 재고관리 시 본 알고리즘이 최적화 상용 소프트웨어를 충분히 대체할 수 있는 대안이 될 것으로 사료된다. 반면, 라그랑지안 완화법의 하한값(LB_{LR})과의 차이에 대한 산식은 $100*(O_{LR} - LB_{LR})/LB_{LR}$ 로 정의할 수 있다. 일반적으로 라그랑지안 완화법의 하한값과의 차이는 도출된 실행가능해의 최적해와의 차이를 계산하는 척도를 제공해주는데 활용될 수 있다. 또한 알고리즘의 해를 일찍 결정할 수 있어, 최적해와 가까운 라그랑지안 완화법의 하한값을 찾는 것이 중요하다. 그러나 CPLEX를 통해 도출된 최적해의 하한값과의 차이와는 다르게, 최대 393.38% 차이를 보이는 것으로 보아 라그랑지안 완화법의 하한값의 품질은 좋지 않은 것으로 사료된다. 따라서, 추후 하한값의 품질을 향상을 위한 알고리즘을 개발할 필요성이 존재한다.

다음으로, 혈액수명, 계획기간과 병원 수에 따른 해의 품질의 변화를 살펴보면, 혈액수명은 계획기간과 병원 수 대비 휴리스틱의 해 품질에 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. <Table 1>에서 확인할 수 있듯이, 계획기간이 짧은 경우, 혈액수명이 증가할수록 해의 품질이 향상되는 반면 계획기간이 긴 경우 혈액수명이 증가하더라도 해의 품질이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 계획기간이 짧고 혈액수명이 길어지게 되는 경우, 문제의 복잡도가 상대적으로 낮아지게 되어 해의 성능이 증가하게 되지만, 계획기간이 긴 문제에서는 혈액수명의 증가가 문제의 단순화에 크게 영향을 주지 않기 때문으로 보인다. 반면, 계획기간에 상관없이, 병원의 수가 증가할수록 해의 품질은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 병원의 수가 증가할수록 문제 복잡도가 증가하지만, 병

원의 수 또한 증가함으로써 드론의 활용도가 증가하기 때문으로 보인다. 또한, 앞에서 언급한 혈액수명의 변화에서도 고려하는 기간이 길더라도 병원의 수가 많은 경우 혈액수명이 증가할수록 해의 품질이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 병원의 수가 많을수록 본 연구에서 제안하는 휴리스틱의 해 품질이 증가할 것으로 보인다.

또한 드론의 제원에 따른 해의 품질 변화를 파악하기 위해 드론의 속도와 적재가능한 최대 용량을 변화시켜가며 실험을 실시하였다. 실험에 앞서, 병원 수, 고려기간, 혈액수명은 문제에서 고려했던 크기의 중간 값으로 각각 40, 20, 6으로 고정하였다. 드론의 속도와 적재가능한 최대 용량은 각각 1배, 1.25배, 1.5배하여 실험을 진행하였으며 각 3개의 독립적인 문제를 생성하여 평균치를 계산하였다.

<Table 1> Performance of the LR Heuristic

Blood lifespan	No. periods	No. hospitals	Percentage deviation (%)				CPU seconds			
			CPLEX ^a		LR ^b		LR		CPLEX	
			Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
5	10	30	1.22	1.49	184.80	188.34	70.11	70.98	3600	3600
		40	1.33	1.65	192.80	196.59	94.96	97.98	3600	3600
		50	1.09	1.31	195.16	198.01	122.80	127.57	3600	3600
	20	30	1.44	1.80	242.69	244.29	154.09	163.27	3600	3600
		40	1.51	1.69	252.28	254.24	193.72	201.83	3600	3600
		50	1.36	1.51	273.00	302.91	217.39	225.14	3600	3600
	30	30	1.60	2.01	268.45	276.46	199.20	212.21	3600	3600
		40	1.48	1.59	279.49	281.89	285.35	300.31	3600	3600
		50	1.23	1.45	287.09	293.65	374.67	388.91	3600	3600
6	10	30	1.01	1.33	198.30	201.07	93.90	95.49	3600	3600
		40	0.99	1.13	205.20	209.52	117.97	118.52	3600	3600
		50	0.93	1.01	210.09	214.64	143.27	143.72	3600	3600
	20	30	1.92	2.27	278.67	281.92	178.17	178.59	3600	3600
		40	1.17	1.37	286.61	289.94	227.00	233.08	3600	3600
		50	1.29	1.50	295.32	297.28	241.66	250.62	3600	3600
	30	30	1.83	2.01	321.01	324.35	227.81	231.85	3600	3600
		40	1.39	1.42	328.46	333.49	320.51	330.10	3600	3600
		50	1.37	1.60	337.94	343.18	414.23	420.15	3600	3600
7	10	30	1.15	1.50	212.40	214.04	106.52	110.75	3600	3600
		40	0.91	1.12	216.59	218.15	131.24	133.67	3600	3600
		50	1.19	1.36	222.36	224.71	151.94	152.73	3600	3600
	20	30	1.58	1.76	309.69	313.55	205.71	214.20	3600	3600
		40	1.16	1.37	322.77	334.97	259.54	265.25	3600	3600
		50	1.27	1.39	326.85	328.26	318.04	327.25	3600	3600
	30	30	1.82	2.02	360.32	369.27	295.41	297.40	3600	3600
		40	1.36	1.36	371.10	376.55	376.55	379.09	3600	3600
		50	1.08	1.23	387.29	393.38	464.06	464.91	3600	3600

^a Percentage deviation of the solution value of the LR heuristic from the lower bound of CPLEX.

^b Percentage deviation of the solution value of the LR heuristic from the lower bound of Lagrangian relaxation.

<Table 2> Effect of Drone Specifications on the Performance of the LR Heuristic

Multiple rate		Percentage deviation (%)				CPU seconds			
Drone speedy	Drone capacity	CPLEX ^a		LR ^b		LR		CPLEX	
		Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
1	1	1.17	1.37	286.61	289.94	227.00	233.08	3600	3600
	1.25	0.6	0.65	280.95	281.34	207.14	211.91	3600	3600
	1.5	0.52	0.55	272.88	276.48	207.52	208.45	3600	3600
1.25	1	0.81	0.87	283.90	289.23	214.38	222.61	3600	3600
	1.25	0.43	0.49	275.57	275.61	205.36	206.48	3600	3600
	1.5	0.58	0.96	256.35	268.11	211.95	212.58	3600	3600
1.5	1	0.21	0.27	273.72	274.65	203.92	204.38	3600	3600
	1.25	1.03	1.12	255.20	256.39	203.22	203.59	3600	3600
	1.5	1.53	1.92	246.27	249.98	208.26	209.83	3600	3600

^{a, b} See the footnotes in <Table 1>.

각 제원에 따른 변화를 비교 분석하기 위해, 드론의 제원을 제외한 다른 요인들은 동일하다고 가정하였다. 드론 속도 및 적재가능한 최대 용량에 따른 알고리즘 성능평가는 <Table 2>에서 확인할 수 있다. 먼저, 드론의 속도가 1배인 경우, 드론 적재용량이 증가할수록 알고리즘의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 드론의 적재용량이 1배일 때도 드론의 속도가 증가할수록 알고리즘의 성능이 향상된다. 이는 드론 활용도의 증가로 문제의 복잡도가 상대적으로 낮아지게 되었기 때문으로 보인다. 그러나 드론의 속도가 1.25배일 때 드론의 적재용량 증가 시 그리고 드론의 적재용량이 1.25배일 때 드론의 속도 증가 시, 해의 품질이 향상된 후 다시 저하되는 것을 볼 수 있다. 마지막으로, 드론의 속도가 1.5배일 때 적재용량 증가 시 그리고 적재용량이 1.5배일 때 드론속도 증가 시, 알고리즘의 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 종합해 보면, 일정부분까지는 드론 제원이 좋아질수록 해의 품질이 향상되었지만 더 좋아지면 해의 품질을 낮추는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구는 혈액원이 개별 병원의 혈액 주간 수요를 만족시키기 위한 혈액 배송시기, 혈액 재고량, 혈액 배송량을 결정하는 문제를 고려하였다. 혈액배송은 통상 활용되는 혈액배송차량과 대한적십자사에서 운영하는 것을 고려 중인 드론이 담당하는 것으로 상정하였다. 혈액배송 및 재고보유 시 필수 고려사항인 혈액수명을 선행연구에서는 비선형 제약식으로 고려하였으나, 본 연구는 수송모형기반의 모형으로 선형제약식으로 고려하였다. 해당 문제의

해결을 위해 라그랑지안 완화법을 활용하였고 라그랑지안 휴리스틱을 제안하였다. 그리고 국내 혈액원 운영자의 입장을 반영하기 위해, 혈액원에서 구한 실제 자료와 그 신뢰할 만한 곳으로부터 구한 자료를 바탕으로 자료를 랜덤 생성하여, 제안된 휴리스틱의 성능을 평가하였다. 성능 실험 결과, 제안한 휴리스틱이 CPLEX보다 비교적 빠른 시간 내에 최적해와 충분히 근사한 해를 도출할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 혈액수명, 계획기간과 병원 수에 대한 해의 품질변화에 대해 살펴본 결과 혈액수명의 변화는 다른 두 요인 대비 해의 품질에 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 또한 계획기간이 짧을수록 해의 품질이 높으며, 병원의 수가 많을수록 해의 품질이 높은 것을 확인하였다. 다음으로 드론의 제원(속도 및 최대 적재용량)에 따른 알고리즘 성능 변화를 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 실험결과, 일정부분까지는 드론 제원이 좋아질수록 해의 품질이 향상되었지만 더 좋아지면 해의 품질을 낮추는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 향후 다음과 같이 연구 발전이 가능할 것으로 보인다. 먼저, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 하한값의 품질이 좋지 않아 이를 개선한 알고리즘 개발이 필요할 것으로 보인다. 또한 드론 도입에 따른 기존 혈액 배송체계 대비 운영비용 감축에 대한 정확한 비교를 위해선 드론 구매 비용 및 기타 시설 도입 비용을 고려할 필요성이 존재하며, 효율적인 드론 배치에 관한 연구 필요성이 존재한다. 다음으로, 본 연구에서는 혈액수요가 주간 수요이며, 확정적인 것으로 고려하였으나 응급상황 등을 고려하기 위해 불확실성을 고려한 혈액의 일간 수요를 고려하여 접근할 수 있다. 나아가 혈액공급에 대한 불확실성 및 혈액폐기 등을 고려한 연구가 진행될 수 있을 것으로 보인다.

Acknowledgements

This work was supported by Inha University Research Grant.

References

- [1] Erickson, M.L., Champion, M.H., Klein, R., Ross, R.L., Neal, Z.M., and Snyder, E.L., Management of blood shortages in a tertiary care academic medical center: The Yale-New Haven Hospital frozen blood reserve, *Transfusion*, 2008, Vol. 48, No. 10, pp. 2252-2263.
- [2] Fisher, M.L., An applications oriented guide to Lagrangian relaxation, *Interfaces*, 1985, Vol. 15. No. 2, pp. 10-21.
- [3] Gunpinar, S. and Centeno, G., Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals, *Computers & Operations Research*, 2015, Vol. 54, pp. 129-141.
- [4] Haidari, L.A., Brown, S.T., Ferguson, M., Bancroft, E., Spiker, M., Wilcox, A., and Lee, B.Y., The economic and operational value of using drones to transport vaccines, *Vaccine*, 2016, Vol. 34, No. 34, pp. 4062-4067.
- [5] Huh, J.Y., Lim, Y.A., Hong, Y.J., Kim, K.H., Kim, J.N., Oh, J.A., and Choi, J.K., The experience of applying an Australian red blood cell safety stock calculation to Korean hospitals, *The Korean Journal of Blood Transfusion*, 2018, Vol. 29, No. 2, pp.140-150.
- [6] Jennings, J.B., Blood bank inventory control, *Management Science*, 1973, Vol. 19, No. 6, pp. 637-645.
- [7] Kazemi, S.M., Rabbani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., and Shahreza, F.A., Blood inventory-routing problem under uncertainty, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2017, Vol. 32, No. 1, pp. 467-481.
- [8] Kim, J., Choi, K.Y., Youn, K.W., Kim, Y., Min, H.K., and Kim, H.O., Requirement of establishment of frozen blood storage system for management of rare blood supply and strategic national stockpile, *The Korean Journal of Blood Transfusion*, 2018, Vol. 29, No. 1, pp. 3-17.
- [9] Kim, S.J., Lim, G.J., Cho, J., and Côté, M.J., Drone-aided healthcare services for patients with chronic diseases in rural areas, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, Vol. 88, No. 1, pp. 163-180.
- [10] Lim, Y., Alterobiotech “Use the freeze protection agent obtained in Antarctica to increase the blood lifespan by six times,” Korean Economy Bio Insight, 2020.
- [11] Lucas, M., Novak, D., and Puranam, K., On the challenges of blood inventory management, *Arch Blood Transfusion Disorders*, 2018.
- [12] Madan, M.S. and Gilbert, K.C., An exact solution algorithm for a class of production planning and scheduling problems, *Journal of the Operational Research Society*, 1992, Vol. 43, No. 10, pp. 961-970.
- [13] Najafi, M., Ahmadi, A., and Zolfagharinia, H., Blood inventory management in hospitals: Considering supply and demand uncertainty and blood transshipment possibility, *Operations Research for Health Care*, 2017, Vol. 15, pp. 43-56.
- [14] Nedjati, A., Vizvari, B., and Izbirak, G., Post-earthquake response by small UAV helicopters, *Natural Hazards*, 2016, Vol. 80, No. 3, pp. 1669-1688.
- [15] Oh, D.J., Safety issues and blood supplying hospitals, *The Korean Journal of Blood Transfusion*, 2015, Special lecture 2, pp. 59-60.
- [16] Pulver, A., Wei, R., and Mann, C., Locating AED enabled medical drones to enhance cardiac arrest response times, *Prehospital Emergency Care*, 2016, Vol. 20, No. 3, pp. 378-389.
- [17] Puranam, K., Novak, D.C., Lucas, M.T., and Fung, M., Managing blood inventory with multiple independent sources of supply, *European Journal of Operational Research*, 2017, Vol. 259, No. 2, pp. 500-511.
- [18] Rajendran, S. and Ravindran, A.R., Inventory management of platelets along blood supply chain to minimize wastage and shortage, *Computers & Industrial Engineering*, 2019, Vol. 130, pp. 714-730.
- [19] Raptopoulos, A., *Physicaltransport*, Talk at Solve for X. 2012.
- [20] Salary Guidance Office, Guidance on salary standard revisions, Health Insurance Review & Assessment Service, 2014.
- [21] Scott, J. and Scott, C., Drone delivery models for healthcare, In *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2017. Hawaii, USA, 2017.
- [22] Seo, J.-W., Han, K.-S., Comparison of cryopreservation methods of rare red blood cells used for antibody

- identification tests, *The Korean Journal of Blood Transfusion*, 2008, Vol. 19, No. 2, pp. 120-131.
- [23] Seoul Eastern Blood Center, Bidding announcement for blood transportation services, Korean On-line E-procurement System, 2016.
- [24] The Korean Red Cross, 2018 Annual Report on Blood Business Statistics, 2019.
- [25] Thiels, C.A., Aho, J.M., Zietlow, S.P., and Jenkins, D.H., Use of unmanned aerial vehicles for medical product transport, *Air Medical Journal*, 2015, Vol. 34, No. 2, 104-108.
- [26] Toth, P. and Martello, S., *Knapsack problems: Algorithms and computer implementations*, Wiley, 1990.
- [27] Welch, A., A Cost-benefit Analysis of Amazon Prime Air, University of Tennessee at Chattanooga, 2015.
- [28] Zhou, D., Leung, L.C., and Pierskalla, W.P., Inventory management of platelets in hospitals: Optimal inventory policy for perishable products with regular and optional expedited replenishments, *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011, Vol. 13, No. 4, pp. 420-438.

ORCIDJin-Myeong Jang | <http://orcid.org/0000-0003-3166-1488>Hwa-Joong Kim | <http://orcid.org/0000-0003-4976-4813>Dong-Hoon Son | <http://orcid.org/0000-0003-1313-3315>