Journal of The Korea Society of Computer and Information
Vol. 20, No. 2, February 2015
www.ksci.re.kr
http://dx.doi.org/10.9708/jksci.2015.20.2.131

화공약품 탱크 적재 문제의 최소 여유량 탱크 적재 알고리즘

이 상 운*

Minimum Margin Tank Loading Algorithm for Chemical Tank Loading Problem

Sang-Un Lee *

요 약

화공약품 탱크 적재 문제는 다항시간으로 해를 찾을 수 있는 알고리즘이 알려져 있지 않아 NP-완전으로 분류된 난제이다. 화공약품 탱크 적재 문제는 상자 포장 문제의 일종으로, Guéret et al.은 $O(m^4)$ 수행 복잡도의 선형계획법으로 해를 얻고자 하였다. 반면에, 본 논문에서는 최소 여유량을 가진 탱크에 적재하는 규칙인 $O(m)$복잡도의 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 첫 번째로 잔여량이 있는 탱크에 해당 화공약품을 적재하였다. 다음으로, 남은 화공약품을 적재할 수 있는 최소 여유량을 가진 탱크에 해당 화공약품을 적재하였다. 실험 결과, 제안된 알고리즘은 NP-완전 문제인 화공약품 적재 문제에 대해 선형계획법의 $O(m^4)$를 $O(m)$으로 단축시켰다.

▸ Keywords : 적재 용량, 최적화, 결정, 여유, 잔여

Abstract

The chemical tank loading problem has been classified as nondeterministic polynomial time (NP)-complete problem because of the polynomial-time algorithm to find the solution has been unknown yet. Guéret et al. tries to obtain the optimal solution using linear programming package with $O(m^4)$ time complexity for chemical tank loading problem a kind of bin packing problem. On the other hand, this paper suggests the rule of loading chemical into minimum margin tank algorithm with $O(m)$ time complexity. The proposed algorithm stores the chemical in the tank that has partial residual of the same kind chemical firstly. Then, we load the remaining chemical to the minimum marginal tanks. As a result of experiments, this algorithm reduces the $O(m^4)$ of linear programming to $O(m)$ time complexity for NP-complete chemical tank loading problem.

▸ Keywords : Capability, Optimization, Decision, Margin, Residual

---

•제1저자 : 이상운
•투 고 일 : 2014. 08. 27, 심사일 : 2014. 11. 13, 게재확정일 : 2014. 12. 31.
* 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 (Dept. of Multimedia Eng., Gangneung-Wonju National University)

I. 서 론

$s_i, (i=1,2,\cdots,m)$ 용량의 화공약품을 실은 운반선들 m척이 부두에 접안하였다. 이 화공약품들을 하역하여 $C_j, (j=1,2,\cdots,n)$ 용량을 가진 탱크들 T_j들에 적재하고자 한다. 이 경우, 일부 탱크에는 화공약품이 일정부분 남아 있으며, 다수의 화공약품들을 혼합하여 하나의 탱크에 저장할 수 없다. 이 문제는 $\Sigma s_i \le \Sigma C_j$인 경우로, 추후 입고될 화공약품의 저장을 고려하여 빈 탱크들을 최대로 확보하면서 저장하고자 한다. 이 문제를 탱크 적재 문제 (tank loading problem, TLP)라 한다[1].

TLP는 상자 포장 문제 (bin packing problem, BPP)의 특별한 경우로 볼 수 있다. BPP는 T 용량을 가진 $n>1$개 상자에 m개의 물품을 상자의 용량 제약조건만을 고려하여 물품을 분할하지 않고 채우는 문제이다[2,3]. 반면에, TLP는 하나의 상자에는 하나의 물품만을 채울 수 있으며, 하나의 물품은 분할이 가능하다[1,4]. BPP는 정확한 해를 찾는 다항시간 알고리즘이 알려져 있지 않아 NP-완전 (NP-complete)으로 분류되고 있다[3].

NP-완전인 m종의 화공약품을 n개 탱크에 저장하는 TLP에 대해 Guéret et al.[1]과 Edvall[4]은 최적화 문제 (optimization problem, OP)로 취급하였다. Guéret et al.[1]은 $O(m^4)$ 수행 복잡도의 선형계획법 (linear programming, LP) 최적화 패키지를, Edvall[4]은 MATLAB의 CPLEX 프로그램을 작성하여 적용하였다.

본 논문에서는 TLP를 단순한 결정문제 (decision problem, DP)로 취급하여 $O(m)$ 수행 복잡도의 적재 규칙을 제시한 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 Guéret et al.[1]이 제시한 TLP 사례를 고찰해 본다. 3장에서는 TLP에 대해 $O(m)$ 복잡도로 최적 해를 구할 수 있는 규칙을 제시한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 실제 데이터에 적용하여 알고리즘 적합성을 평가해 본다.

II. 화공약품 탱크 적재 문제

일반적으로 원유를 하역하는 경우, 하나의 물품 크기를 쪼개서 다수의 탱크에 저장할 수 있다. 반면에, 화공약품 적재 문제는 상자 포장 문제의 일종으로 볼 수 있으며 차이점은 다음과 같다. 상자 포장 문제는 다수의 물품이 하나의 상자에 적재가 가능하지만 물품을 쪼개서 다수의 상자에 적재할 수 없다. 반면에, 화공약품 적재 문제는 하나의 물품을 쪼개서 다수의 상자에 적재가 가능하며, 하나의 상자에는 하나의 물품만 적재가 가능하다.

그림 1은 화공약품 적재 문제를 표현하고 있다. 이 문제는 5척의 화공약품을 선적한 화학 운반선 (tanker ships)이 부두에 접안하여 하역을 기다리고 있다. 이 화공약품을 저장할 탱크들은 표 1과 같이 준비 되어 있으며, 일부 탱크에는 특정 화공약품이 일정량 남아 있다.

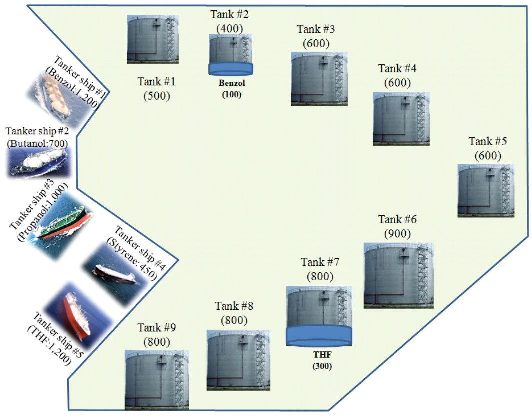

그림 1. 화공약품 적재 문제
Fig. 1. Chemical tank loading problem

표 1. 화공약품 적재 문제
Table 1. Chemical Tank loading problem

화공약품 운반선	S1	S2	S3	S4	S5
물품명	Bensol	Butanol	Propanol	Styrene	THF (Tetrahydrofura)
운반량	1,200 tons	700 tons	1,000 tons	450 tons	1,200 tons

Tanker									
Tank	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Capacity	500	400	400	600	600	900	800	800	800
Current product	-	Bensol	-	-	-	-	THF	-	-
Quantity	0	100	0	0	0	0	300	0	0

하역 대상 화공약품은 5대의 운반선에 적재된 총 4,550톤이며, 9개 탱크들의 총 여유 용량은 5,400톤으로 하역 대상 4,550톤을 모두 채우더라도 850톤의 여유가 있다. 이 문제는 화공약품들은 혼합하여 하나의 탱크에 저장할 수 없는 제약조건을 충족시켜야 한다. 즉, T2에는 벤졸만을, T7에는 THF 만을 채워야 한다.

하역은 5대의 운반선 각각에 탱크까지 해상계류시설 (single point mooring, SPM) 또는 돌출식 부두 (Jetty) 설비를 이용한다. SPM은 지름 약 15미터 원형시설로 닻으로 해저에

단단히 고정돼 있으며, SPM에 연결된 플로팅 호스를 운반선의 출하관에 연결하여 운반선으로부터 화공약품을 해저 파이프라인을 통해 육상에 있는 탱크에 저장한다. 반면에, Jetty는 그림 2와 같이 부두에 설치된 구조물로 운반선이 접안하여 화공약품을 직접 육상으로 하역할 수 있도록 저장탱크까지 이어진 파이프라인과 접안시설 등으로 이루어져 있다[5].

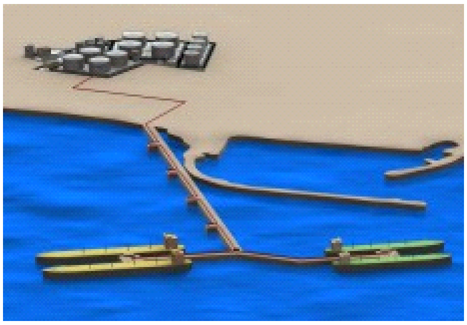

그림 2. Jetty를 이용한 하역
Fig. 2. Unloading using jetty

화공약품 회사의 하역 책임자는 추후 입고될 화공약품 저장 여유를 최대로 확보하기 위해 빈 탱크 개수를 최대화 시키도록 모든 화공약품을 탱크들에 저장하고자 한다.

Guéret et al.[1]은 표 1의 문제에 대해 선형계획법 패키지를 활용하여 표 2와 그림 3의 결과를 제시하였다. Edvall[4]은 동일한 문제를 MATLAB의 CPLEX 프로그램을 작성하여 해를 얻었다. 즉, T4=600 탱크를 빈 상태로 유지하여 추후 입고될 화공약품 저장 여유를 확보하였으며, T1=50, T8=100,T9=100의 여유량을 갖고, T2, T3, T5, T6과 T7은 완전히 채운 상태이다.

표 2. LP와 CPLEX의 최적 배정
Table 2. Optimal assignment of LP and CPLEX

구분	LP & CPLEX								
	Tank								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
용량	500	400	400	600	600	900	800	800	800
현 저장량	0	100	0	0	0	0	300	0	0
추가 저장량	**450**	**300**	**400**	-	**600**	**900**	**500**	**700**	**700**
계	450	400	400	-	600	900	800	700	700
여유량	**50**	**0**	**0**	**600**	**0**	**0**	**0**	**100**	**100**
화공약품	**Styrene**	**Bensol**	**Propanol**	-	**Propanol**	**Bensol**	**THF**	**THF**	**Butanol**

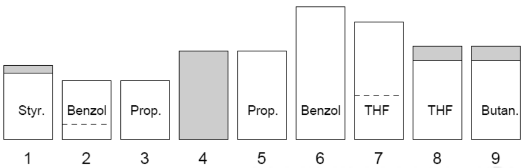

그림 3. LP와 CPLEX의 최적 탱크 저장
Fig. 3. Optimal tank filling of LP & CPLEX

제품과 공정 설계, 생산, 물류, 교통통제와 전략적 계획 등과 같이 실세계에서 부닥치는 많은 문제들은 최적화 문제들이다. 이 문제들은 전통적인 방법으로는 휴리스틱 방법으로 모수들에 대한 선택의 가능한 경우수를 고려한 전수조사법 (brute-force method)을 적용하고 있다. 최근 들어 이를 시뮬레이션을 이용한 최적화 기법을 적용하고 있다. 전통적인 기법들은 적절한 결과를 얻는데 반해 최적 해를 보증하지 못하거나 근사 해를 얻기도 한다. 이 기법은 매우 복잡한 문제나 재정적 영향을 크게 미치는 결정을 요구하는 경우 특히 골칫거리가 된다. 반면에, 수학적 기법의 시뮬레이션을 통한 최적화는 인간이 포착하기 어려운 복잡한 문제에 대해서도 통제와 조절이 가능하기 때문에 매우 많은 연구가 수행되었다[6].

주어진 문제를 최적화 문제로 본 사례는 Hopfield와 Tank[7]의 신경망 기법, Kallrath[8]의 혼합된 정수계획법 등이 있으며, 최적화와 결정 문제에 대한 선택은 Wright[9]이 제시하였다.

본 논문에서는 주어진 문제를 최적화 문제로 보지 않고 결정 문제로 보고자 한다. 결정문제로 볼 경우, 적용할 수 있는 휴리스틱 기법으로는 탐욕 알고리즘 (greedy algorithm)이 있다[10]. 탐욕 알고리즘은 현 시점까지 얻을 수 있는 정보들 중에서 최적의 대상을 선택하는 방법이다. 상자포장 문제에 대한 다항시간 알고리즘으로는 Lee[11]이 있으며, 바지선 적재문제의 다항시간 알고리즘으로는 Lee[12]이 있다. 본 논문은 상자포장 문제를 CLP에 적합하도록 변형시켜 적용하고자 한다.

CLP에 대해 Guéret et al.[1]이 적용한 선형계획법은 $O(m^4)$ 수행 복잡도를 갖는 최적화 방법이다. 3장에서는 선형계획법의 $O(m^4)$을 $O(m)$복잡도의 규칙을 제시한 탐욕 알고리즘을 제안한다.

III. 최소 여유량 탱크 적재 알고리즘

BPP는 빈 상자들을 대상으로 혼재된 물품들을 채울 수 있는 반면에, TLP는 잔여량이 있는 탱크에는 해당 화공약품만을 채워야 하는 제약조건을 만족시켜야 한다. 따라서, 본 장에서 제안되는 알고리즘은 첫 번째로, 잔여량이 있는 탱크에 해당 화공약품을 가득 채운 초기 결과를 얻는다.

두 번째로, 최소 여유량이 남는 탱크들에 동일한 화공약품을 가득 채우고, 부족시 다음의 여유 있는 탱크에 채우는 규칙을 적용한다.

두 번째 규칙을 적용하면 추후 입고될 화공약품 저장을 위한 빈 탱크 개수를 최대화시킬 수 있는 장점을 갖고 있다.

제안된 알고리즘을 최소 여유량 탱크 적재 알고리즘 (minimum remaining tank loading algorithm, MRTLA)이라 하며, 다음과 같이 수행된다.

Step 1. 잔여량 탱크에 동일 화공약품 가득 채우기
i번째 화공약품의 잔여량 r_i이 있는 탱크 T_j에 화공약품 i를 $L_i = {}_{\min}\{s_i, C_j - r_i\}$로 가득 채운다.

Step 2. 빈 탱크에 나머지 화공약품을 최적으로 채우기

for $k=1$ to $\sum_{j=1}^{n} C_j / {}_{\max}s_i$

빈 탱크 T_{jk}의 C_{jk}들에 대해, $s_i \le {}_{\max}\sum_{j=1}^{k} C_j$ 인 남은 화공약품 i의 s_i를 ${}_{\min}(\sum_{j=1}^{k} C_j - s_i) \ge 0$인 T_{jk}들에 채운다.

end

제안된 알고리즘은 m개 화공약품을 저장할 n개중 해당 탱크를 선택하는데 $O(m)$수행 복잡도가 요구된다.

Guéret et al.[1]은 이를 최적화 문제로 보아 $O(m^4)$ 수행 복잡도를 갖는 선형계획법의 최적화 문제를 풀고자 한 반면 제안된 알고리즘은 결정 문제로 보고 $O(m)$복잡도로 보다 단순화 시킬 수 있었다.

IV. 실험 및 결과 분석

본 장에서는 Guéret et al.[1]이 제시한 표 1의 문제에 대해 MRTLA를 적용하여 본다. 표 1의 문제에 대해 MRTLA를 적용한 결과는 표 3과 같다.

첫 번째로, T2에는 벤졸이 100, T7에는 THF가 300이 남아 있으므로, 각 탱크를 가득 채우기 위해 T2에는 벤졸 300을, T7에는 THF 500을 채운다.

$\sum_{j=1}^{n} C_j / {}_{\max}s_i$에 대해, ${}_{\max}s_i$는 벤졸의 1200-300=800과 THF의 1200-500=700이며, 프로판올 1000 중에서 프로판올 1000임을 알 수 있다. 이를 채울 수 있는 탱크 수는 $k=2$이다. 즉, 2개 탱크에 저장할 수 있다.

따라서, $k=1$로 1개의 빈 탱크에 채울 수 있는 화공약품과 탱크들을 결정한 결과는 다음과 같다. 빈 탱크의 최대 용량은 T6의 900으로 이를 만족하는 화공약품은 벤졸 900, 부탄올 700, 스티렌 450과 THF 700이며, 프로판올은 1000으로 1개 빈 탱크의 용량을 초과한다. 따라서, 벤졸 900, 부탄올 700, 스티렌 450과 THF 700을 최소 여유량이 존재하는 탱크에 배정한 결과 벤졸 900은 T6로, 부탄올 700은 T8로, 스티렌 450은 T1으로, THF 700은 T9로 결정되었다.

표 3. MRTLA의 최적 배정
Table 3. Optimal assignment of MRTLA

Tank	Capacity	Benzol	Butanol	Propanol	Styrene	THF	여유량
		1200	700	1000	450	1200	
T1	500	0	0	0	0	0	500
T2	**400**	**100+300**	0	0	0	0	0
T3	400	0	0	0	0	0	400
T4	600	0	0	0	0	0	600
T5	600	0	0	0	0	0	600
T6	900	0	0	0	0	0	900
T7	**800**	0	0	0	0	**300+500**	0
T8	800	0	0	0	0	0	800
T9	800	0	0	0	0	0	800
현 저장량		100	0	0	0	300	
추가 저정량		**300**	0	0	0	**500**	
총 저장량		400	0	0	0	800	
미하역량		**900**	700	1000	450	**700**	

Tank	Capacity	Benzol	Butanol	Propanol	Styrene	THF	여유량
		1300	700	1000	450	**1500**	
T2	**400**	**400**	0	0	0	0	**0**
T7	**800**	0	0	0	0	**800**	**0**
T1	500	0	0	0	0	0	**500**
T3	400	0	0	0	0	0	**400**
T4	600	0	0	0	0	0	**600**
T5	600	0	0	0	0	0	**600**
T6	900	0	0	0	0	0	**900**
T8	800	0	0	0	0	0	**800**
T9	800	0	0	0	0	0	**800**
미하역량		**900**	**700**	**1000**	**450**	**700**	

Tank	Capacity	Benzol	Butanol	Propanol	Styrene	THF	여유량
		1300	700	1000	450	1500	
T2	400	400	0	0	0	0	0
T7	800	0	0	0	0	800	0
T1	500	0	0	0	**450**	0	**50**
T3	400	0	0	0	0	0	400
T4	600	0	0	0	0	0	600
T5	600	0	0	0	0	0	600
T6	900	**900**	0	0	0	0	**0**
T8	800	0	**700**	0	0	0	**100**
T9	800	0	0	0	0	**700**	**100**
미하역량		0	0	1000	0	0	

Tank	Capacity	Benzol	Butanol	Propanol	Styrene	THF	여유량
		1300	700	1000	450	1500	
T2	400	400	0	0	0	0	0
T7	800	0	0	0	0	800	0
T6	900	900	0	0	0	0	0
T1	500	0	0	0	450	0	50
T8	800	0	700	0	0	0	100
T9	800	0	0	0	0	700	100
T3	400	0	0	**400**	0	0	**0**
T4	600	0	0	**600**	0	0	**0**
T5	600	0	0	0	0	0	600
미하역량		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**850**

마지막으로 남은 프로판올 1000은 남은 빈 탱크 T3=300, T4=600, T5=600으로 $k=2$의 2개 빈 탱크에 분산하여 배정할 수 있으며, 이 경우 T3, T4 또는 T3, T5의 2가지 경우가 존재한다. 여기서는 T3에 400, T4에 600을 배정하였다. 제안된 알고리즘으로 배정된 결과는 그림 4와 같다.

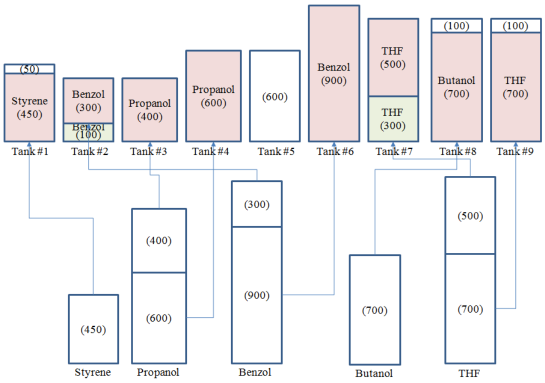

그림 4. MRTLA의 최적 탱크 저장
Fig. 4. Optimal tank filling of MRTLA

제안된 MRTLA와 LP, MATLAB의 성능을 요약하여 표 4에 제시하였다.

표 4. 알고리즘 성능 비교
Table 4. Compare with algorithm performance

문제	알고리즘		
	LP[1]	CPLEX[4]	MRTLA
빈 탱크	T4 (600 톤)	T4 (600 톤)	T5 (600 톤)
탱크 여유량	850 톤	850 톤	850 톤

제안된 MRTLA는 LP의 $O(m^4)$ 복잡도를 여유량이 최소인 탱크에 화공약품을 배정하는 $O(m)$복잡도로 단순화시키면서도 동일한 최적 해를 얻을 수 있었다.

즉, 선형계획법과 같은 수학적 프로그램 패키지의 도움을 받지 않고도 잔여량이 있는 탱크에 해당 화공약품을 가득 채우고, 빈 탱크에 나머지 화공약품을 최적으로 채우는 단순한 규칙을 적용하여 해를 구할 수 있음을 보였다.

V. 결론

NP-완전으로 분류된 상자 포장 문제의 일종인 다품종의 화공약품 적재 문제에 대해, Guéret et al.[1]은 $O(m^4)$ 복잡도의 선형계획법 최적화 기법으로 해를 얻고자 하였다. 반면에, 본 논문에서는 이 문제에 대해 $O(m)$복잡도의 결정기법으로 최적 해를 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다.

제안된 방법은 기존에 잔유량이 존재하는 탱크에는 동일한 화공약품을 가득 채우고, 나머지 탱크들을 대상으로 화공약품을 저장시 최소 여유량을 가지는 탱크에 적재하는 단순한 규칙을 적용하였다.

실험 결과, 제안된 알고리즘은 NP-완전 문제인 TLP에 대해 선형계획법의 $O(m^4)$ 수행 복잡도를 $O(m)$으로 단축시키면서도 동일한 최적 해를 얻을 수 있었다.

결론적으로, 제안된 알고리즘은 간단히 해를 구할 수 있는 관계로 화공약품 운반선의 화공약품들을 하역하여 탱크들에 적재하는 계획을 수립하는데 있어 실제로 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

REFERENCES

[1] C. Guéret, X. Prins, and M. Sevaux, "Applications of Optimization with Xpress-MP: 9.3 Tank Loading," Dash Optimization Ltd., pp. 128-130, Feb. 2005.

[2] E. Falkenauer, "A Hybrid Grouping Genetic Algorithm for Bin Packing," Journal of Heuristics, Vol. 2, No. 1, pp 5-30, Aug 1996.

[3] A. Lodi, S. Martello, and D. Vigo, "Recent Advances on Two-Dimensional Bin Packing Problems," Discrete Applied Mathematics, Vol. 123, No. 1-3, pp. 379-396, Nov. 2002.

[4] M. Edvall, "Tank Loading," Tomlab Optimization Inc, http://tomsym.com/examples/tomsym_tank loading.html, Apr. 2009.

[5] E. Hussain, "VTTI to Build Major Fuel Terminal in Cyprus," http://www.arabianoilandgas .com/article-7602-vtti-to-build-major-fuel-terminal-in-cyprus/, arabianOilandGas.com, Jul. 2010.

[6] J. Kallrath, and A. Schreieck, "Discrete Optimisation and Real World Problems," Europe '95 Proceedings of the International Conference and Exhibition on High-Performance Computing and Networking, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 919, pp. 351-359, May 1995.

[7] J. J. Hopfield, and D. W. Tank, "Neural Computation of Decisions in Optimization Problems," Biological Cybernetics, Vol. 52, No. 3, pp. 141-152, Jul. 1985.

[8] J. Kallrath, "Mixed Integer Optimization in the Chemical Process Industry: Experience, Potential and Future Perspectives," Chemical

Engineering Research and Design, Vol. 78, No. 6, pp. 809-822, Sep. 2000.

[9] P. Wright, "Consumer Choice Strategies: Simplifying vs. Optimizing," Journal of Marketing Research, Vol. 12, No. 1, pp. 60-67, Feb. 1975.

[10] G. Bendall and F. Margot, "Greedy Type Resistance of Combinatorial Problems," Discrete Optimization, Vol. 3, No. 4, pp. 288-298, Dec. 2006.

[11] S. U. Lee, "A Polynomial Time Optimal Algorithm for Linear Bin Packing Problem," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 11, No. 8, pp. 9-16, Aug. 2013.

[12] S. U. Lee, "Maximum Profit Priority Goods First Loading Algorithm for Barge Loading Problem," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 10, pp. 169-173, Oct. 2014.

저 자 소 개

이 상 운(Sang-Un, Lee)
1983년 ~ 1987년 :
한국항공대학교 항공전자공학과 (학사)
1995년 ~ 1997년 :
경상대학교 컴퓨터과학과 (석사)
1998년 ~ 2001년 :
경상대학교 컴퓨터과학과 (박사)
2003.3 ~ 현 재 :
강릉원주대학교 멀티미디어공학과 부교수
관심분야 : 소프트웨어 프로젝트 관리,
소프트웨어 개발 방법론,
소프트웨어 신뢰성,
그래프 알고리즘
e-mail : sulee@gwnu.ac.kr