

Minimum Network Connection Cost Algorithm for Partially Survivable Networks Problem of Cellular Telecommunication Systems

Sang-Un Lee*

Abstract

This paper suggests heuristic algorithm with $O(mn)$ polynomial time complexity using Excel for partially survivable networks optimization problem of cellular telecommunication systems with m cells and n hubs. This problem only can be get the solution using linear programming or LINGO software package. The proposed algorithm connects the cell to hubs in ring network with minimum cost as the connection diversity of each cell. If the traffic of ring network (T) is $T > 2K$ for ring capacity (K), we adjust the maximum cost hub to MTSO that has a ascending order of $(D/DC)/\Delta^+$ cell with each cell traffic demand (D) and $\Delta^+ = (\text{MTSO cost} - \text{maximum cost hub})$ than we get the $T \leq 2K$. Finally, we adjust MTSO to the removed maximum cost hub for the cell with $2K - T \geq (D/DC)$ and $\max \Delta^-$. While we using like this simple method, the proposed algorithm can be get the same optimal solution for experimental data as linear programing and LINGO software package.

▶ Keyword : Hub, MTSO, Connection diversity, Traffic demand, Ring network capacity

• First Author: Sang-Un Lee, Corresponding Author: Sang-Un Lee

*Sang-Un Lee (sulee@gwnu.ac.kr), Dept. of Multimedia Engineering, Gangneung-Wonju National University

• Received: 2015. 06. 24, Revised: 2015. 07. 23, Accepted: 2015. 10. 15.

I. Introduction

무선통신망 체계는 주어진 영역의 셀 (cells)들에 대해 허브들을 고리 (ring)로 연결한 수용력 K 인 고속 통신망을 형성하고 하나의 허브 (hub)가 MTSO (mobile telephone switching office)로 고리망의 통신량을 조정하며 무선망과 전화망간의 연결 기능을 수행한다. 이 경우, 한 셀에 존재하는 모바일 폰의 통신 요구량 (D)은 다수의 허브로 연결되는 연결 다양성 (connection diversity, CD)을 갖고 있어 각 허브로 D/CD 의 통신량이 발생하며, 이 통신량들은 MTSO로 전달된다. 이때 한 셀과 연결되는 허브 간에는 통신비용이 발생한다. 단, MTSO에 연결되는 경우 통신량 (T) = 0이다. 이 경우 MTSO까지 도달하는 총 통신량 (T)이 고리망의 수용력 (K)에 대해 $2K$ 이하가 되도록 최소의 통신비용을 만족하는 셀과 허브의 연결을 결정하는 문제를 부분적 생존 가능 망 문제 (partially survivable network problem, PSNP)라 한다[1,2]. PSNP는 NP-난제 (NP-hard)로 분류되어 최적해를 다항시간으로 얻는 알고리즘이 알려져 있지 않다[2,3].

셀의 수를 m , 허브 수를 n 이라 할 경우, PSNP에 대해 Guéret et al.[1]은 $O(m^4)$ 복잡도의 선형계획법 (linear programming, LP)[4] 소프트웨어 패키지를 적용하였으며, Dutta와 Kubat[2]는 LINGO 소프트웨어 패키지와 $O(m^2n \log mn)$ 복잡도의 라그랑제 완화법 (Lagrangian relaxation)[5]에 기반한 휴리스틱 알고리즘인 HOMING 법을 적용하였다. 그러나 Dutta와 Kubat[2]의 HOMING 법은 최적 해를 얻는데 실패하였다.

본 장에서 $O(mn)$ 의 다항시간 복잡도로 PSNP의 최적 해를 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 무선통신망 설계 문제를 고찰하고, 3장에서는 $O(mn)$ 복잡도로 최소의 비용으로 셀을 허브에 연결하는 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 실제 데이터에 적용하여 알고리즘 적합성을 평가해 본다.

II. Partially Survivable Networks Design Problem

본 장에서는 Guéret et al.[1]과 Dutta와 Kubat[2]에서 인용된 그림 1의 모바일 폰 망에 대해 고찰한다. 본 망은 허브들로 구성된 고리 구조의 망에서 운영되는 셀들을 보여주고 있다. 허브들 중 하나는 MTSO로 지정된다.

무선통신망의 기본적인 지리적 영역을 셀 (cell)이라하며, 셀은 릴레이 (relay)라 부르는 송수신기를 통해 통신한다. 임의의 셀에 위치한 하나의 모바일 폰에서 시작된 호출은 첫 번째로 릴레이를 통해 전달된다. 모든 릴레이는 광섬유 케이블이나 전자기파를 통해 환승 노드 (transit node)인 허브 (hub)로 연결된다. 허브들 중 하나는 무선망의 통신량을 조정하며 무선망과 전화망간의 연결 기능을 수행한다. 이를 MTSO라 한다.

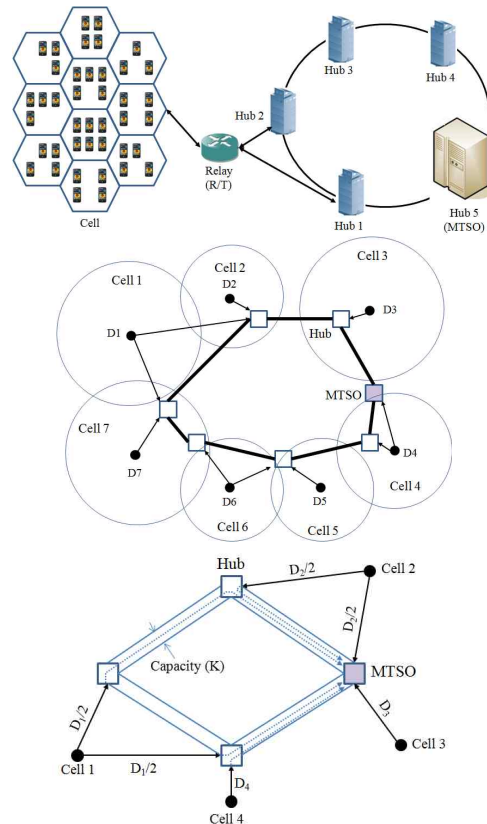


Fig. 1. Structure of a mobile phone network

허브와 MTSO간에는 광섬유 케이블의 대용량과 고 신뢰성을 가진 고리 구조로 연결되어 있다[6,7]. 현 기술수준으로는 릴레이와 MTSO 간의 동적 연결을 수행할 수 없다. 따라서 설계단계에서는 연결이 확정되어 있으며, 릴레이가 연결될 고리의 노드를 선택해야 한다. 하나의 셀과 고리 간의 연결 수 (number of links)를 셀의 연결 다양성 (connection diversity, CD)이라 하며, 1 이상인 연결 다양성은 시스템을 보다 신뢰성 있게 해주며, 자동복구와 전송실제 감소를 위해 추천된다[8-13]. 이 연결 다양성은 하나의 셀에 대한 통신 요구량(D)을 D/CD 로 분산시키는 효과가 있다.

허브들을 연결하는 고리구조 (ring structure) 망에서의 통신량 (traffic, T)은 64kbps를 가진 양방향 회로 (bidirectional circuits)로 전송된다. 가장 혼잡한 시기 (peak period) 동안의 동시 호출 수를 수용력 (capacity, K)이라 하며, 고리구조 망은 $2K$ 의 수용력을 가진다[14]. 한 셀로부터 발생하는 통신량 (TC)은 고리로 연결되는 연결 다양성 값으로 분할 (TC/CD)되어 분산되어 MTSO로 전송된다. 이 통신량은 고리를 통해 MTSO로 전송되고 다른 셀이나 허브로 전달된다. MTSO에 직접 연결된 릴레이는 통상적인 허브로 작동되어 고리를 통한 허브로부터의 MTSO까지의 통신량이 발생하지 않는다[15].

우리는 셀을 MTSO로 연결하는 망 최적화 설계를 할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다. 이 알고리즘은 기간 전송망에 대한 자동 복구 고리 망 기술을 활용하고, 신뢰성 요구사항을 충족시키기 위해 전송비용을 최소화시키는 것이 목적이다. 이 문제는 NP-난제로 분류되어 다항시간으로 최적 해를 얻는 알고리즘이 알려져 있지 않다

[2,3]. Guéret et al.[1]은 LP를, Dutta와 Kubat[2]은 라그랑제 완화법에 기반한 휴리스틱 알고리즘인 HOMING 법을 적용하였다.

Guéret et al.[1]은 10개 셀과 K=48인 5개 허브 노드로 구성된 고리 구조를 사례로 P_1 문제를 제시하였다. 이 망에 대한 연결비용, 통신 요구량 (D)과 셀당 연결 다양성 (CD)을 표 1과 같이 제시하였다. 여기서, 연결 비용 단위는 \$1,000이다. 여기서 최소의 통신비용이 소요되도록 각 허브에 연결할 수 있는 셀 개수 (CD) 만큼 셀들을 연결하는 문제이다.

Table 1. Connection costs, traffic and number of connections per cell

	Cost									
	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7	Cell 8	Cell 9	Cell 10
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24
Hub 3	7	8	7	9	21	15	21	15	14	13
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4
Hub 5(MTSO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11
Demand Traffic (D)	22	12	20	12	15	25	15	14	8	22
Connections diversity	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2
Capacity (K)=48	Ring: 2-1-5-4-3-2									

Table 2. Result of linear programming for P_1 problem

	Cost										Traffic (T)	Cost (\$1000)
	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7	Cell 8	Cell 9	Cell 10		
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25	10	8+19=27
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24	23	6+5+9=20
Hub 3	7	8	7	9	21	15	21	15	14	13	34	7+8+9+15+14=53
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4	27	5+19+20+4=48
Hub 5 (MTSO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11		10+15+6+17+22+20+11=101
Traffic capacity (TC)	22	12	20	12	15	25	15	14	8	22	94	249
Connections Diversity (CD)	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2		
Host nodes	3,5	3,4	2,5	2,3	1,4,5	5	1,4,5	2,3	3,5	4,5		
D/CD	11	6	10	6	5	25	5	7	4	11		

III. Minimum Cost Network Connection Algorithm

본 장에서는 각 셀에서 최소비용을 가진 허브를 CD 개수 만큼 선택하여 고리망의 통신량 T 를 계산한다. 만약, $\Sigma T > 2K$ 이면 MTSO를 선택하지 않은 셀들을 대상으로 $\Delta^+ = (\text{MTSO 비용} - \text{허브의 최대 비용})$ 를 계산하여 Δ^+ 오름차순으로 선택된 최대비용 허브를 MTSO로 변경시켜 $\Sigma T \leq 2K$ 가 되면 알고리즘을 종료하고, $\Sigma T > 2K$ 이면 $\Sigma T \leq 2K$ 가 될 때까지 이 과정을 반복 수행한다.

제안된 방법을 선택-변경 알고리즘 (select-change algorithm, SCA)이라 한다. SCA는 다음과 같은 과정으로 수행되며, Excel을 활용하여도 간단히 최적 해를 얻을 수 있다.

- K: 고리망의 수용력
- T: 고리망의 실제 통신량
- cost: 고리망의 허브 연결 비용

Step 1. 초기치 설정

for $i=1$ to n /* 셀 기준 */
 각 셀에서 CD 수 만큼 최소 비용 선택

Guéret et al.[1]은 표 1의 문제에 대해, LP를 적용하여 표 2의 결과를 얻었다. 즉, $2K=48 \times 2=96$ 에 대해, 각 허브에서 선택된 셀의 $\Sigma D/CD$ 로 통신량을 구하면 Hub 1은 10, Hub 2는 23, Hub 3은 34, Hub 4는 27을 얻으며, Hub 5는 MTSO로 0이다. 따라서 $\Sigma T=94$ 의 통신량을 얻어 $2K=96$ 을 만족한다. 이 경우의 전송 비용은 각 허브에서 선택된 셀들의 비용 합을 모두 합한 $27+20+53+48+101=249$ 로 \$249,000을 얻었다.

선형계획법은 $O(n^4)$ 의 수행 복잡도로 알려져 있으며, 선형 계획법 패키지를 적용하지 않을 경우 해를 구하기 어려운 단점이 있다.

3장에서는, 표 1의 문제에 대해, 셀 수를 m , 허브 수를 n 이라 할 경우 n 개 허브에 대해 m 개의 셀들 중 어떤 것을 선택하느냐의 문제로 $O(mn)$ 의 다항시간으로 최적 해를 구할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

end

for $j=1$ to m /* 허브 기준 */

 각 허브의 선택된 셀의 D/CD 합을 구함

end

ΣT 를 구함

if $\Sigma T \leq 2K$ then

 비용 합 $\Sigma cost$ 를 구함, 알고리즘 종료

else if $\Sigma T > 2K$ then step 2 수행

Step 2. 통신량 제약조건 충족, 허브 연결 변경 (T 감소)

MTSO가 미 선택된 셀들을 대상으로 Δ^+ 를 구함.

$\Delta^+ = \text{MTSO 비용} - \text{선택된 허브의 최대 비용}$

[방법 1]

Δ^+ 오름차순, D/CD 내림차순으로 셀 순위 결정

[방법 2]

 (D/CD)/ Δ^+ 내림차순으로 셀 순위 결정

 순위별로 해당 셀의 허브 중 최대비용 셀을 MTSO 비용으로 이동, ΣT 를 구함

if $\Sigma T \leq 2K$ then

$\Sigma cost$ 를 구함, 알고리즘 종료

else if $\Sigma T > 2K$ then $\Sigma T \leq 2K$ 가 될 때까지 T 를

 반복적으로 증가, step 3 수행

Step 3. $2K - \Sigma T \geq D/CD$ 인 셀들을 대상으로 $\Delta^- = \text{MTSO}$

비용-선택된 허브의 최대 비용을 구해 $\max \Delta^-$ 인 셀에

 대해 MTSO 비용을 삭제된 허브의 최대 비용으로 이

 동, ΣT 를 구함.

단계	Cell	Δ^+	D/CD	(TC/CD)/ Δ^+	Rank
T 감소 [방법 2]	Cell 1	2	11	5.50	1
	Cell 7	2	5	2.50	2
	Cell 6	10	25	2.50	3
	Cell 3	8	10	1.25	4
	Cell 9	4	4	1.00	5
	Cell 2	6	6	1.00	6
	Cell 8	10	7	0.70	7
	Cell 4	15	6	0.40	8
	Cell 5				
	Cell 10				
단계	Cell	Δ^-	D/CD	선택	T
T 증가	Cell 2	14-8=6	6	○	88+6=94
	Cell 7	22-21=1	5		
	Cell 9	20-16=4	4		

따라서 2가지 방법 모두 동일한 결과를 얻는다. 이 결과는 Step 3에서는 $2C-T=8$ 을 충족하는 D/CD 셀들 중에서 삭제된 1~4 허브의 최대 비용을 가진 셀들인 셀 2, 셀 7과 셀 9를 대상으로 $\max \Delta^-$ 인 셀 2가 수행되어 T=94를 얻었다. 이후 $96-94=2$ 인 D/CD를 갖는 셀이 존재하지 않아 알고리즘이 종료되었다.

P_1 에 대해 제안된 알고리즘 수행 결과를 Guéret et al.[1]의 LP와 비교하여 표 5에 제시하였다. 표에서 SCA는 LP와 동일한 결과를 얻었음을 알 수 있다. LP는 $O(m^4)$ 의 수행 복잡도를 갖는 반면에, SCA는 $O(mn)$ 복잡도로 간단히 수행된다.

Table 5. Compare with algorithm performance for P_1 data

알고리즘	수행 복잡도	연결										통신량	연결 비용
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10		
LP	$O(m^4)$	3.5	3.4	2.5	2.3	1.45	5	1.45	2.3	3.5	4.5	94	\$249,000
SCA	$O(mn)$	3.5	3.4	2.5	2.3	1.45	5	1.45	2.3	3.5	4.5	94	\$249,000

제안된 알고리즘의 적합성을 검증하기 위해 Dutta와 Kubat[2]에서 인용된 표 6의 P_2 데이터의 4가지 경우에 대해 추가로 적용하여 본다. P_2 는 10개 셀과 K=48인 6개 허브 노드로 구성된 고리 구조이며, D가 4가지 경우 수를 갖는 문제로 세부적으로는 4개 문제로 볼 수 있다.

Table 6. Experimental data of P_2

Cost	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7	Cell 8	Cell 9	Cell 10	
Hub 0 (MISO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11	
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25	
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24	
Hub 3	7	8	16	9	21	15	21	15	14	13	
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4	
Hub 5	6	17	13	9	17	9	9	4	17	20	
D	Case 1	22	12	20	12	15	25	15	14	8	22
	Case 2	22	18	20	12	15	25	15	20	8	22
	Case 3	22	18	20	18	15	25	21	20	12	22
	Case 4	22	22	20	18	15	25	21	20	18	22
CD	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2	

Capacity=48, Ring capacity=48x2=96

표 6의 P_2 데이터에 대해 SCA를 적용한 결과는 표 7에 제시되어 있다.

표 6의 데이터에 대해 SCA와 Dutta와 Kubat[2]의 결과를 비교하여 표 8에 제시하였다. LINGO 소프트웨어 패키지를 적용한 최적 해와 비교시 Dutta와 Kubat[2]의 HOMING 방법은 Case 4를 제외한 3개 경우에 대해 최적 해를 얻지 못한 반면에, 제안된 SCA는 4개 경우 모두에서 최적 해를 얻었음을 알

수 있다.

Table 7. Result of SCA for P_2 data

Case 1													
Cost	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	T	Cost	
Hub 0 (MISO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11			101
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25	10	27	
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24	23	20	
Hub 3	7	8	16	9	21	15	21	15	14	13	16	31	
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4	17	9	
Hub 5	6	17	13	9	17	9	9	4	17	20	28	36	
D	22	12	20	12	15	25	15	14	8	22	94	224	
CD	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2			
Host nodes	0.5	0.4	0.2	2.3	0.15	0	0.15	0.5	0.3	0.4			
D/CD	11	6	10	6	5	25	5	7	4	11			
Case 2													
Cost	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	T	Cost	
Hub 0 (MISO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11			126
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25	10	27	
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24	16	11	
Hub 3	7	8	16	9	21	15	21	15	14	13	19	31	
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4	20	9	
Hub 5	6	17	13	9	17	9	9	4	17	20	31	36	
D	22	18	20	12	15	25	15	13	2	2	96	240	
CD	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2			
Host nodes	0.5	0.4	0.2	2.3	0.15	0	0.15	0.5	0.3	0.4			
D/CD	11	9	10	6	5	25	5	10	4	11			
Case 3													
Cost	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	T	Cost	
Hub 0 (MISO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11			144
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25	12	27	
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24	19	11	
Hub 3	7	8	16	9	21	15	21	15	14	13	6	14	
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4	26	25	
Hub 5	6	17	13	9	17	9	9	4	17	20	33	36	
D	22	18	20	18	15	25	21	20	12	22	96	257	
CD	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2			
Host nodes	0.5	0.4	0.2	2.3	0.15	0	0.15	0.5	0.3	0.4			
D/CD	11	9	10	9	5	25	7	10	6	11			
Case 4													
Cost	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	T	Cost	
Hub 0 (MISO)	10	14	15	24	6	17	22	25	20	11			164
Hub 1	15	9	12	17	8	7	19	20	21	25	12	27	
Hub 2	8	11	6	5	22	25	25	9	22	24	19	11	
Hub 3	7	8	16	9	21	15	21	15	14	13	9	14	
Hub 4	11	5	15	18	19	9	20	18	16	4	22	9	
Hub 5	6	17	13	9	17	9	9	4	17	20	33	36	
D	22	22	20	18	15	25	21	20	18	22	95	261	
CD	2	2	2	2	3	1	3	2	2	2			
Host nodes	0.5	0.4	0.2	2.3	0.15	0	0.15	0.5	0.3	0.4			
D/CD	11	11	10	9	5	25	7	10	9	11			

Table 8. Compare with algorithm performance for P_2 data

문제	알고리즘					
	LINGO (최적 해)		HOMING		SCA	
	T	Cost	T	Cost	T	Cost
Case 1	-	224	-	233	94	224
Case 2	-	240	-	251	96	240
Case 3	-	257	-	261	96	257
Case 4	-	261	-	261	95	261

V. Conclusions

본 논문은 선형계획법과 같은 패키지를 활용하지 않고는 해를 얻지 못할 수도 있는 모바일 폰의 m 개 셀을 n 개의 통신망 허브로 최소의 비용으로 연결하는 문제에 대해 $O(mn)$ 의 방향시간 복잡도로 간단히 풀 수 있는 방법을 제안하였다.

제안된 방법은 첫 번째로, 각 셀에서 최소 비용을 가진 허브로 연결 다양성 (CD) 만큼 선택하였다. 이 결과 통신량 (T)이 허브

의 고리 구조 수용력 (C)에 대해 $T > 2C$ 이면 T 를 감소시키기 위해 MTSO의 최소 비용 증가분을 가진 셀을 대상으로 MTSO가 아닌 허브의 선택된 최대 비용을 MTSO로 이동시켰다. 이 과정을 $T \leq 2C$ 가 될 때까지 수행하고, $TC/CD \leq 2C - T$ 를 가진 셀이 존재하면 이 셀에 대해 다시 MTSO에서 기존에 삭제된 허브의 비용으로 이동시켰다. 제안된 알고리즘은 이와 같이 단순한 기법을 적용하였음에도 불구하고, 실험 데이터에 적용한 결과 LP와 동일한 최적해를 얻을 수 있었다.

결론적으로, 제안된 알고리즘은 간단하고 쉽게 해를 구할 수 있어 모바일 폰의 셀을 통신망 허브로 최소의 비용으로 연결하는 문제에 대해 실제로 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] C. Guéret, X. Prins, and M. Sevaux, "Applications of Optimization with Xpress-MP: 12.2 Dimensioning of a Mobile Phone Network," Dash Optimization Ltd., pp. 176-179, Feb. 2005.
- [2] A. Dutta and P. Kubat, "Design of Partially Survivable Networks for Cellular Telecommunications Systems," European Journal of Operational Research, Vol. 118, No. 1, pp. 52-64, Feb. 1999.
- [3] M. R. Garey and D. S. Johnson, "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness," W. H. Freeman & Co., New York, USA, 1990.
- [4] F. A. Potra, "Interior Point Methods: Twenty Years After," Department of Mathematics and Statistics, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, USA, NIST, Sep. 2003.
- [5] R. Khandekar, "Lagrangian Relaxation Based Algorithms for Convex Programming Problems," Department of Computer Science and Engineering, Indian Institute of Technology, Delhi, Degree of Doctor of Philosophy, Mar. 2004.
- [6] P. Kubat and R. Vachani, "Facilities Planning for Cellular Networks," 13th International Teletraffic Congress - Discussion Circles, Copenhagen, Denmark, Elsevier, Amsterdam, pp. 263-266, 1990.
- [7] A. Ruiz, J. A. Herrera, and A. J. Gomez, "Optimization of the Interconnection Links in Cellular Telephone Networks," Fourth INFORMS Telecommunication Conference, Boca Raton, Florida, 1998.
- [8] R. H. Cardwell, C. L. Monma, and T. H. Wu, "Computer Aided Design Procedures for Survivable Fiber Optic Telephone Networks," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 7, No. 8, pp. 1188-1197, Oct. 1989.
- [9] J. Sosonsky and T. H. Wu, "SONET Ring Applications for Survivable Fiber Loop Networks," IEEE Communications Magazine, Vol. 29, No. 6, pp. 51-58, Jun. 1991.
- [10] T. H. Wu and W. I. Way, "A Novel Passive Protected SONET Bi-directional Self-healing Ring Architecture," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 9, pp. 1314-1322, Sep. 1992.
- [11] T. H. Wu, "Fiber Network Service Survivability," Artech House, Boston, 1992.
- [12] P. Asnaghi, R. Cislighi, and S. Rigobello, "Transmission Network Protection and Reconfiguration by means of Digital Cross-Connect Systems: L. Lada (Ed.), Network Planning in the 1990s," Elsevier, North-Holland, Amsterdam, pp. 335-378, 1989.
- [13] A. Shulman, R. Vachani, P. Kubat, and J. Ward, "Multicommodity Flows in Ring Networks," INFORMS Journal on Computing, Vol. 8, No. 3, pp. 235-242, Aug. 1996.
- [14] J. E. Goldman, "Applied Data Communications," 2nd ed., Wiley, New York, 1998.
- [15] W. C. Y. Lee, "Mobile Cellular Telecommunications Systems," McGraw-Hill, New York, 1989.

Authors



Sang Un Lee received the B. Sc. degree in avionics from the Korea Aerospace University in 1997. He received the M. Sc. and Ph. D. degrees in Computer Science from Gyeongsang National University, Korea, in 1997 and 2001, respectively.

He is currently Professor with the Department of Multimedia Science, Gangneung-Wonju National University, Korea. He is interested in software quality assurance and reliability modeling, software engineering, software project management, neural networks, and algorithm.