

생존도를 고려한 광통신망 설계 알고리즘의 구현 기법과 관로 이용

조성준* · 한치근**

Algorithm Implementation Issues and Use of Conduits in Design of Optic Fiber Based Survivable Network

Sungzoon Cho · Chi-Geun Han

(Abstract)

The current copper-based communication network is going to be replaced with an optic fiber network. The new technology allows a larger amount of information to be transmitted than before. Due to its bandwidth and relatively high installation cost, however, the optic fiber network does not exhibit the inherent structural redundancy provided by the conventional copper-based network. We propose to supply it by adding multiple paths between important nodes. This so-called network survivability problem is computationally expensive to solve exactly. We report the application of a heuristic algorithm to this problem. Also discussed is the issue of how to make use of existing conduits.

1. 서 론

최근 등장한 광섬유(optic fiber) 기반의 전송방식은 기존의 구리(copper) 기반의 전송방식에 비하여 월등히 많은 정보량을 전송할 수 있게 되었다. 그러나 구리망의 자연스런 중복 연결이 불필요하게 됨에 따라 비용은 감소했지만 광통신망에서는 전화국에서의 고장이 전체 망에 커다란 손실을 끼칠 수 있게 되었다. 이에 따라 고장시에도 전체 망 동작에 영향을 끼치지 않고 안정된 서비스를 제공하기 위하여 주요 전화국 간 우회 통신망을 설치할 필요가 대두되었다.

두 전화국사이에 두(세) 개의 독립 통신경로(광 전

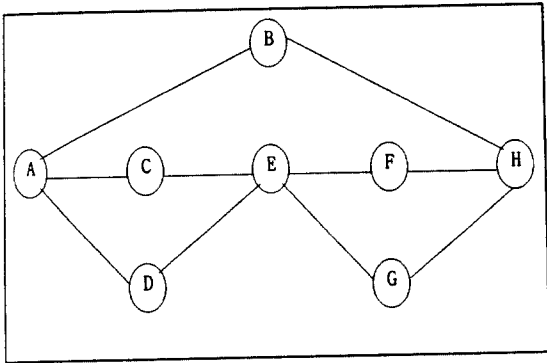
송로)가 있는 경우 연결도 2(3)이라고 한다. 전화국(실제로는 DCS: Digital Cross -Connect System[1])을 노드로 표시하고 선로를 에지로 표시하면 <그림 1>과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 이때 노드 A에서 노드 H사이에는 중복되는 노드가 없는 두 개의 경로(A→B→H, A→C→E→F→H)가 존재하는데 이때 A와 H 사이의 연결도(혹은 생존도)를 2라고 한다. 즉, A와 H를 제외한 어느 한 노드의 고장시에도 A와 H간의 연결이 보장된다는 의미이다. 두 개 노드의 고장시에도 연결을 보장하기 위하여는 세 개의 경로가 필요하다. 참고로 A→D→E→G→H는 3중 연결을 보장하지 못한다. 그것은 노드 E가 앞에서의 경로 A→C→E→F→H

* 포항공과대학교 산업공학과/전자계산학과

** 경희대학교 전자계산공학과

에서 중복사용되기 때문이다. 일부 망의 손실에도 전체 망 서비스가 가능하도록 망을 설계하는 문제를 망의 생존도 문제라고 한다.

구체적으로 생존도를 고려한 망설계 문제는 다음과 같다. 먼저 고려 대상 전화국(노드)이 정의된다. 둘째, 각 전화국마다 필요 연결도가 정의된다. 예를 들어 서울, 대구, 부산과 같은 노드는 3중, 포항, 울산과 같은 노드는 2중 연결도가 필요하게 되는데, 이는 모든 3중 노드 간에는 중복노드가 없는 세 개의 경로, 모든 2중 노드 간에는 중복 노드가 없는 두 개의 경로가 필요하다는 의미이다. 또한 2중과 3중 노드 사이에는 두개의 경로가 필요하다. 셋째로 각 전화국(노드) 사이의 선로 설치 비용 행렬이 정의된다. 이때 비용 행렬은 소위 삼각 부등식(Triangular Inequality)을 반드시 만족하지 않을 수 있다고 가정한다. 이제 문제는 에지의 집합 E의 부분 집합 F를 위의 연결도를 만족하면서 비용이 최소화되도록 선택하는 것이다. 즉, 어느 노드간에 선로를 건설할 것인가를 결정하는 문제이다.



〈그림 1〉 통신망에서의 연결도

위의 문제는 전형적인 제한식을 동반한 조합최적화(Constrained combinatorial optimization) 문제로서 NP-complete임을 증명할 수 있다. 따라서 과거에 제안된 해법은 주로 국부탐색(Local Search)에 기초를 둔 휴리스틱 방법이였다. 먼저, 1961년 Gomory와 Hu[2]는 주어진 망이 생존 가능한 지를 점검하는 문제를 노드 n개의 Maximum Flow 문제로 전환하여 해결할 수 있음을 보여 주었다. Steiglitz, Weiner, Kleitman(SWK 알고리즘)[3]은 망의 생존도 문제를 국부탐색을 이용하

휴리스틱으로 해결하였으며, Eswaran과 Tarjan[4]은 주어진 그래프가 Hamiltonian Circuit을 가지는지의 문제를 Minimum-Weight Two Connected Spanning Network 문제로 다루었다. 1980년 중반 이후 Monma는 생존도를 고려한 망을 국부탐색의 휴리스틱으로 노드 이중 연결성을 만족하도록 설계할 수 있는 방법을 제시하였고 일반적인 k-연결도(k-connected) 망의 성질에 관한 연구를 수행하였다[5,6]. 또한 Monma는 동일한 문제를 정수계획법이 가능한 형태로 정형화시켜서 Cutting Plane Algorithm을 사용하여 해결하였다[7,8]. 1993년 Goemans와 Bertsimas는 생존도를 고려한 망설계 문제를 선형계획법을 이용하여 접근하였다[9].

위에서 언급된 해법의 대다수는 실제로 전국에 광통신망을 새로이 구축하고자 할 때 직접 사용할 수 없는 두가지 문제점을 내포하고 있다. 첫째, 현실적인 시간 제약내에서 최적해에 근접된 해를 제공하는 휴리스틱 방법 가운데 3중 연결도 조건을 충족시킬 수 있는 방법은 SWK 알고리즘이 유일하다. 80년대 이후 제안된 많은 휴리스틱 알고리즘은 2중 연결까지만 해결할 수 있다. 그런데 SWK 알고리즘은 구체적 구현 방식에 대한 언급이 없어 이에 대한 연구가 필요하다. 둘째, 모든 제안된 알고리즘은 기존 선로가 전무하다는 가정으로 문제를 단순화하고 있다. 그러나 실제로는 많은 수의 주요 전화국이 주변 전화국과 이미 관로(conduit)로 연결이 되어 있다. 관로란 교량, 도로, 철도 건설시 미래의 사용을 위해 구축해 놓은 통신구를 뜻한다. 관로를 이용하면 새로이 광 케이블을 설치할 경우에 비하여 망 설치 비용이 20분의 1로 감소된다. 그러나 관로의 양 쪽 끝 전화국을 모두 전체 망의 노드로 고려하게 되면 문제의 크기가 수십배 이상 커지므로 그 복잡도가 지수비로 증가하게 되어 현실적으로 풀 수가 없게 된다.

본 논문에서는 위에서 지적한 두 가지 문제점에 대한 해를 제시한다. 첫째, SWK 알고리즘의 구현에 필요한 구체적인 탐색 방식들을 제시한다. 그리고 20개 노드의 가상망 설계 문제에 적용하여 각 방식을 실험적으로 비교한다. 둘째, 전국 주요 전화국(23개) 간의 실제 망설계 문제에 적용한 후 관로를 이용하는 방식들을 제안하고 각 방식의 장단점 등을 토론한다. 따

라서 본 논문의 결과는 생존도를 고려한 실제 망 설계에 직접 적용될 수 있으며 학술적으로 제안된 알고리즘을 실제 망 설계시 적용할 때 나타나는 문제에 대한 해를 제시했다는 점이 그 의의가 되겠다.

다음 절에서는 SWK 알고리즘을 소개하고 제3절에서는 제안된 탐색 알고리즘과 가상망 실험 결과가 소개된다. 제4절에서는 실제망 적용 결과와 관료 이용 방법에 대한 토론이 이어진다. 끝으로 제5절에서는 결론이 제시된다.

2. SWK 알고리즘

먼저, 여기서 사용한 기호와 부호는 <표 1>과 같다. SWK 알고리즘은 임의의 두 노드 i 와 j 사이의 노드 연결도 r_{ij} 를 만족시키면서(feasibility), 최소의 비용을 갖는(optimality) 에지의 집합을 찾는 반복적(iterative) 알고리즘이다. 즉, 연결 요구도를 만족시키는 초기해(initial feasible network)를 구축한 후 매단계 국부탐색(local search)을 통하여 연결요구도를 계속 만족시키면서 비용을 감소시켜나가는 것이다.

<표 1> 사용 기호와 부호

i, m	노드(전화국) i 와 m
(i, m)	노드 i 와 m 사이의 에지(선로)
$C(i, m)$	노드 i 와 m 사이의 선로 설치 비용
r_{ij}	노드 i 와 j 사이의 생존도 또는 연결요구도
R	생존도 행렬 (위의 r_{ij} 를 행렬로 나타낸 것)
r'_{ij}	X-변환 과정에서 나타나는 현재의 실질 생존도, 즉, 지금까지 만족된 생존도

이제 초기해를 구하는 방법과 국부변환 방법에 대하여 자세히 알아본다.

2.1 SWK 초기해

노드 i 의 결합도를 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Deficiency}(i) = \text{Max}_{\text{all } j} r_{ij} - \text{degree}(i).$$

이때, $\text{degree}(i)$ 는 노드 i 에 연결되어 있는 에지의 갯수를 의미한다.

단계 1. 양(positive)의 결합도값을 가진 노드 가운데 결합도가 가장 큰 노드를 선정한다(결합도가 같은 것이 발견되는 경우 임의로 선정한다).

단계 2. 결합도가 다음으로 큰 노드를 선정한다. 결합도가 같은 것이 발견되는 경우 단계 1에서 선정한 노드와의 사이의 에지 비용이 가장 적은 노드를 선정한다(비용이 같은 것이 발견되는 경우 임의로 선정한다).

단계 3. 단계 1에서 구한 노드와 단계 2에서 구한 노드를 에지로 연결한다.

단계 4. 단계 1과 단계 2에서 선정한 노드의 결합도를 1씩 감소시킨다.

단계 5. 아직 결합도가 양의 값을 가진 노드가 있을 때에는 단계 1로 돌아 간다. 없으면 종료한다.

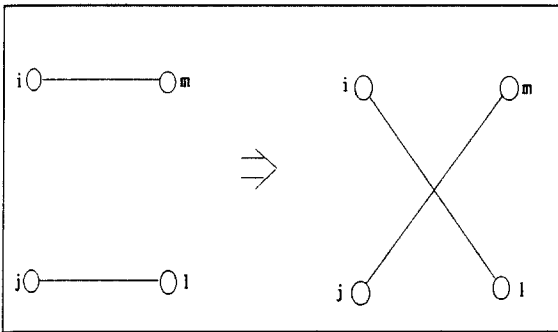
즉, 이 방법은 노드 i 에게 다른 노드와의 최고 노드 연결요구도($\text{MAX } r_{ij}$ for all j) 개수 만큼의 에지 갯수를 확보해 주자는 휴리스틱 개념인데, 노드 i 가 다른 특정 노드 j 와 3중 연결도를 요구할 때는 노드 i 는 최소한 3개의 에지를 갖고 있어야 한다는 사실로부터 출발한 휴리스틱이다.

초기해를 구한 후에는 그 해가 가능해(feasible)인지를 확인해 볼 필요가 있다. 각 노드쌍에 대하여 Maxflow 알고리즘을 수행하면, 각 노드쌍 사이에 존재하는 독립적인 경로의 갯수를 알 수 있다. 즉, 노드 i, j 간에 Maxflow가 3이라고 하는 것은 i 와 j 사이에 flow를 3만큼 흘릴 수 있다는 것을 의미하며, 이것은 i 와 j 간에 독립적인 3개의 경로가 있음을 나타낸다. 모든 노드쌍에 대하여 Maxflow를 구하게 되면 계산시간이 많이 소요되는데 SWK는 정리 1에서 "노드의 연결도를 확인하여야 할 노드쌍이 (a, b) 이고 $r_{ab} = k$ 라 하면 $r'_{am} \geq r_{ab}$ 와 $r'_{bm} \geq r_{ab}$ 를 만족하는 노드 m 을 k 개 찾을 수 있으면 a, b 간에는 k 개의 독립적인 경로가 존재하게 된다.(이때, 노드 m 은 a, b 와는 달라야 한다.)"는 것을 밝힘으로써 계산량을 크게 줄일 수 있었다.

위의 방법으로는 초기해를 하나 밖에 구하지 못한

다. 그러나 SWK 알고리즘이 국부최적해만을 제공하므로 실제 문제를 풀 경우에는 다수의 초기해로부터 다수의 국부최적해를 구하게 되므로 다수의 초기해가 필요하다. 그러므로, 여기서는 단계 1과 단계 2를 수용하면서 다양성을 부여하기 위하여 단계 2에서 비용이 가장 적은 노드를 연결하려고 할 때, 이미 연결이 되어 있으면 무작위(random)로 다음의 노드를 선택하여 그것과 생존도가 같은 것 중에서 비용이 가장 적은 것을 연결한다. 그리하여 서로 다른 값을 가지는 여러개의 초기해를 만든다.

2.2 국부 변환(Local Transformation)



〈그림 2〉 X변환

현재 해가 에지 (i, m)과 (j, l)을 선택하고 있을 때, 만일 $C(i, m) + C(j, l) > C(i, l) + C(j, m)$ 이면 선택된 에지를 (i, l), (j, m)으로 바꾸어서 전체 비용을 감소시킬 수 있다. 그러나, 여기에서 전체 노드들 간의 연결도의 보장을 확인해 보는 절차가 필요하다. 그 보장 방법으로는 만일 제거되는 에지 (i, m)의 두 노드가 3중 연결이 요구되는 노드라면 X변환(eXchange) 후에도 노드 i, m간에 3중 연결이 보장되는지 확인하면 되고, 제거되는 에지의 두 노드가 2중 연결이 요구되는 노드라면 X변환 후에도 노드 i와 m간의 2중 연결이 보장되는지를 다른 모든 3중 연결도를 요구하는 노드들 간의 3중 연결도가 유지되는지를 확인하면 된다.

실제로 이 과정도 단순화되었다. SWK의 정리 2에

의하여 즉, X변환을 한 후의 실행 가능성 조사는 제거될 에지가 (i, m), (j, l)이라면 기본적으로 $r'_{im} \geq r_{im}$, $r'_{jl} \geq r_{jl}$ 을 확인하고 이외에 $r_{ab} > \min(r_{im}, r_{jl})$ 인 a와 b의 쌍에 대한 r'_{ab} 를 조사하는 것으로 단순화되었다. $r_{ab} \leq \min(r_{im}, r_{jl})$ 인 a, b의 쌍에 대해서는 조사할 필요가 없다.

3. 제안된 국부 변환 탐색 알고리즘과 가상망 실험 결과

앞에서 제시한 SWK의 국부 변환은 매우 추상적인 방식(method)이다. 본 절에서는 이 방식을 실제 구현할 때 사용할 수 있는 탐색 알고리즘들을 제안하고 가상 데이터를 사용한 실험을 통하여 소요시간, 출력해의 비용 등을 비교한다.

국부 변환 문제는 특정 형태의 망 형태(network configuration)들의 공간상에서의 탐색 문제로 볼 수 있다. 즉, 주어진 초기해를 국부 변환시켜 가면서 더 이상의 비용 향상(즉, 감축)이 불가능한 국소 최적해를 찾아 나가는 탐색 문제이다. 따라서 잘 알려진 탐색 기법들인 깊이우선탐색(Depth First Search), 최선우선탐색(Best First Search)들을 이용한다. 먼저 깊이우선탐색(DFS)은 비용을 감소시키는 변환을 찾자마자 그 감소량에 관계없이 무조건 변환을 시켜나가는 방식이다. 최선우선탐색(BFS)은 비용을 감소시키는 변환 가운데 그 감소량이 가장 큰 변환을 선택하여 나가는 탐색하는 방식이다.

〈표 2〉는 노드가 20개인 가상의 문제 두 개를 생성하여 앞에서 제안된 방식의 성능을 전역 탐색(Global Enumerative Search) 방식과 비교한 것이다. 전역탐색이란 매 단계마다 가능한 모든 비용 감소 변환을 전부 수행하는 방식으로서 앞의 두 방식에 비해 더 많은 시간을 투자하여 더 우수한 해를 찾는 것이 그 목적이 되겠다. 〈표 2〉에 따르면 시도된 X변환 횟수가 DFS와 BFS는 예상대로 전역 탐색보다 거의 20분의 1로 감소하고 따라서 변환 시간도 50분의 1로 감소하였다.(모든 알고리즘은 486 PC상에서 C 언어로 구현하였으며 시간 단위는 초이다.) 반면 최소국부해의 비용면에서는 전역탐색방식에 비하여 커다란 차이가 없

〈표 2〉 깊이우선탐색, 최선우선탐색, 전역탐색 방법의 비교

문 제	깊이우선탐색(DFS)				최선우선탐색(BFS)				전역탐색(GES)			
	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값
1	369	35	162	176	426	46	162	176	6848	18387	160	172
2	340	45	196	210	390	57	198	211	7327	29810	196	208
평균	354	40	179	193	408	51	180	194	7087	24098	178	190

노드는 총 20개이며 이 가운데 3중 연결 노드 수는 4개, 나머지는 모두 2중 연결이며 노드의 좌표는 0-40사이에서 임의로 생성되었다. 비용은 두 노드간의 거리로 정하였고 각 문제당 국부최적해 20개를 찾는다.

었다. 따라서 제안된 두 방식이 최종해의 질에서는 크게 뒤지지 않으면서 수행 속도 면에서는 크게 앞서고 있다

이제 더 많은 가상 문제에 대하여 DFS와 BFS 두가지 방식을 비교하면 〈표 3〉과 같다. 최종해의 비용은 커다란 차이가 없으나 수행 시간에서 DFS가 약 20% 정도 더 우수한 것으로 나타났다. 그러나 BFS의 구현

방식을 개선함으로써 계산 속도를 단축할 수 있었다 (〈표 4〉 참조). 즉, 매번 "이웃" 해를 새로 계산하지 않고 "이웃" 해 집합을 유지하면서 X변환할때 마다 "이웃" 해 집합을 첨가하거나 삭제함으로써 소요 시간을 깊이우선탐색의 70% 수준으로 단축할 수 있었다. 최종해의 비용은 차이가 나지 않는다.

〈표 3〉 깊이우선탐색, 최선우선탐색, 전역탐색 방법의 비교

문 제	깊이우선탐색(DFS)				개선된 최선우선탐색(BFS)			
	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값
1	462	67	97	101	358	46	97	101
2	561	80	94	97	382	50	94	97
3	624	116	110	112	459	68	110	112
4	558	89	98	100	422	58	98	99
5	637	104	112	113	471	64	112	113
6	634	90	95	97	413	41	95	97
7	686	136	97	98	480	80	97	98
8	693	100	107	109	487	58	107	109
9	744	137	101	101	515	79	101	102
10	609	94	102	106	459	68	102	105
평균	621	101	101	103	444	61	101	103

노드는 총 20개이며 이 가운데 3중 연결 노드 수는 4개, 나머지는 모두 2중 연결이며 노드의 좌표는 0-40사이에서 임의로 생성되었다. 비용은 두 노드간의 거리로 정하였고 각 문제당 국부최적해 20개를 찾는다.

〈표 4〉 깊이우선탐색과 개선된 최선우선탐색 방법의 비교

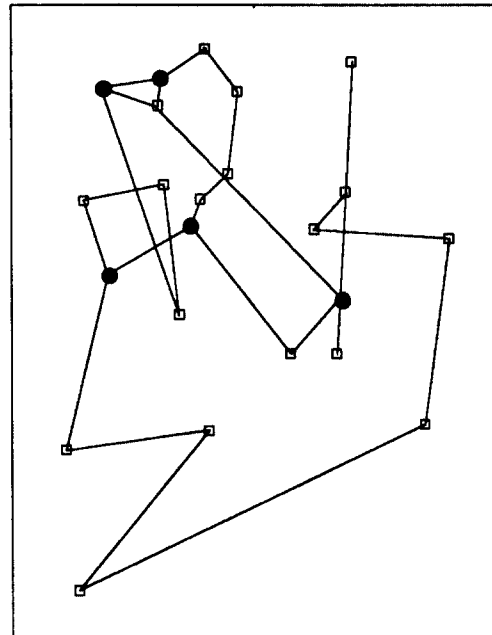
문 제	깊이우선탐색(DFS)				최선우선탐색(BFS)			
	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값	X-변환 횟 수	X-변환 시 간	최 소 국부값	평 균 국부값
1	540	70	185	205	638	82	185	205
2	1016	98	204	219	1246	147	204	219
3	804	148	221	238	984	198	221	238
4	616	135	215	229	746	156	215	229
5	1072	145	203	217	1228	181	203	217
6	1246	238	225	239	1500	295	222	239
7	881	180	216	233	1030	213	216	233
8	1435	236	210	224	1728	306	210	233
9	1090	154	197	225	1366	201	197	225
10	971	174	209	232	1182	233	209	232
평균	967	158	209	226	1165	201	208	226

4. 실제망 설계

끝으로 전국 23개 주요 전화국을 대상으로 SWK 알고리즘을 적용한 예를 보인다. 23개의 노드를 가진 그래프가 주어지는데 5개의 최중요 노드는 3중 연결도로 나머지 18개의 노드는 2중 연결도로 주어졌다. 편의상 노드간 에지의 비용은 두 노드 사이의 거리로 정하였다. 50개의 초기해를 구한 후 최선 우선 탐색 방식으로 X변환을 수행한 결과 네트워크중 비용이 최소인 네트워크를 구하였다(〈그림 3〉, 〈그림 4〉). 최종해는 주어진 연결 요구도를 모두 만족하고 있으며 그 비용은 X변환을 통하여 초기해의 75% 정도 수준이었다.

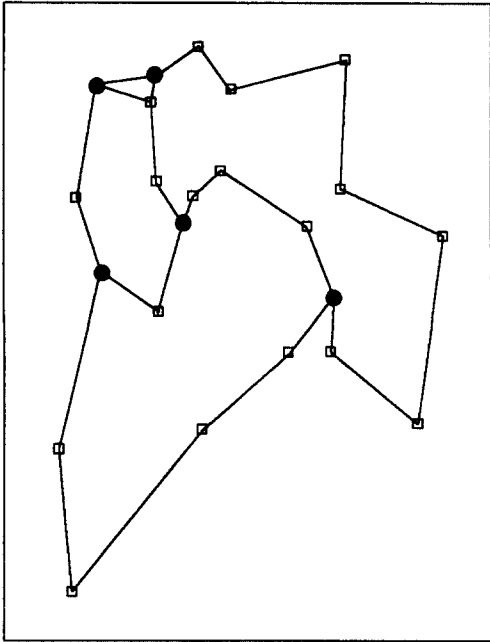
4.1. 관로

기존의 생존도 망 설계 문제에서는 노드간에 기존 선로가 전무하여 전부 새로 설치한다고 가정하고 있으나, 실제로는 많은 전화국 주변에는 관로(conduit)가 이미 설치되어 있다. 이 관로를 사용할 경우 광 케이블 설치 비용이 20분의 1로 감소되는 효과가 있다. 따라서 실제 최적 망 설계에서는 이 기존 관로를 얼마



〈그림 3〉 X변환전의 초기해

(●은 3중 연결도 노드이고 □은 2중 연결도 노드이다.)



〈그림 4〉 X변환후의 최종해

나 많이 이용하느냐에 따라 최적해가 결정될 수 있다. 문제는 관로의 수가 약 600개로서 관로의 양끝지점들 노드로 간주하게 되면 약 1000여개의 노드의 생존도 문제를 풀어야 되므로 현실적으로 해를 얻기가 어렵게 된다는 점이다.

4.2. 관로 이용 방안

관로의 양쪽 끝 지점을 노드로 고려하지 않으면서 관로를 이용하는 방안은 다음의 네 가지가 있을 수 있다.

방법 1. 전처리(preprocessing)로 초기해를 구축하기 전에 관로를 이용하는 방법이다. 즉, 각 중요노드(2중, 3중 연결도 요구)간의 에지 비용을 계산할 때 사용 가능한 관로를 이용하여 계산하는 방식이다. 먼저, 망 전체 에지와 관로 전체 중에서 관로를 사용하였을 때, 비용을 가장 많이 개선하는 에지 (i, j)와 관로 (k, l)을 선택하여 새로운 경로를 만든다. 그리고, 새로 생

기는 에지 ((i, k), (j, l))를 망에 첨가하고 사용된 관로 (k, l)은 관로에서 제거를 한다. 그리고, 노드 k, l에 연결된 모든 관로를 제거한다.(단, 노드 k가 망에 포함된 노드라면 관로 (k, l)만 제거한다. 노드 l도 노드 k와 마찬가지로 적용을 한다.) 이것을 더 이상 비용의 개선이 없을 때까지 수행을 한다.

방법 1은 전단계에서 단 한 번만 관로 사용을 고려하면 그 다음 부터는 관로에 대하여 무시를 하고 국부 변환을 적용할 수 있다는 장점이 있다. 소요시간이 적은 것이 장점이나 특정 주요 노드간의 에지가 해의 일부로 선택되지 않게 되면 그 에지에 포함된 관로들은 최종해에서 제외되므로 비용 절감에 도움을 주지 못한다는 문제가 있다.

방법 2. 초기해를 구한 직후 관로를 이용하여 초기해를 변환시킨다. 이 방법은 초기해를 구할 때마다 관로를 적용을 하여야 하기 때문에 시간이 많이 소요된다. 그리고, 이미 초기해가 구축이 되어 있기 때문에 국부 변환을 할 때 초기해에 사용된 에지와 그외 에지(초기해에 포함되지 않는 에지)의 비용의 차이가 크므로 변환에 제한을 받는다. 예를 들면 초기해의 모든 에지가 관로를 사용하여 비용이 개선이 되었다면 최적 에지 변환에서 가장 큰 비용을 가지는 에지 (i, j)와 가장 가깝고 가장 큰 비용을 가지는 에지 (l, m)을 선택하였을 때, 에지 (i, l)와 에지 (j, m)는 관로를 사용하지 않았기 때문에 원래의 비용 $C(i, j) + C(l, m)$ 보다 X변환하려고 하는 에지의 비용의 합 $C(i, l) + C(j, m)$ 이 더 클 것이다. 이런 경우에는 변환이 일어나지 않는다. 이러한 경우가 초기해에서 관로를 이용하여 비용을 모두 개선하였기 때문에 많이 일어날 수 있다. 이러한 점으로 볼 때, 비용 절감 면에서 효율적이지 못하다.

방법 3. 국부 변환을 마친 후 관로를 적용하는 방법이다. 이것도 모든 국부 최적해에 관로이용 변환을 하여야 하기 때문에 시간이 많이 소요된다. 그리고, 국부 변환 이전에 관로를 적용시켰을 때 비용 개선이 더 클 수 있는 에지로의 변환을 제한한다. 예를 들어, 최종해에서 에지 (i, j)가 관로 (l, m)을 이용하여 비용을 개선할 수 있다하더라도 이 관로 (l, m)을 최종해를 만들기 전에 에지 (k, n)에 사용하여 더 큰 비용을 개선

할 가능성도 있기 때문이다.

방법 4. 국부 변환과 관로 이용 변환을 동시에 적용한다. 이 방법은 방법 2나 방법 3보다 관로를 적용하는 횟수가 훨씬 많기 때문에 시간이 훨씬 많이 소요된다. 여기에서도 X변환에서 새로 생기는 에지 (i, j)에 관로 (l, m)을 적용하면 그 당시의 비용은 절감가능하지만 그 다음 X변환 혹은 몇 차례의 X변환후 새로 생기는 에지 (k, n)이 그 관로 (l, m)을 이용하여 더 큰 비용을 개선할 수 있는 기회를 막을 수 있다.

위에서 제안된 어느 방법도 기존 관로를 최대한 이용하지는 못한다. 따라서 소요 시간이 가장 작은 방법 1을 구현하여 전국망 설계 문제의 전처리에 사용하였다. 이로 인하여 비용이 약 33% 정도 감소된 해를 구하였다.

5. 결 론

기존의 생존도를 고려한 망설계 방법에는 크게 국부탐색에 기초를 둔 휴리스틱 방법과 정수계획법으로 나눌 수 있다. 단, 정수계획법으로 3중연결 노드가 포함된 문제를 해결하려 할 경우 제약식의 수가 폭발적으로 증가하여 현실적인 문제해결이 매우 어려운 것으로 판단된다. 따라서, 연결도 요구사항을 만족하는 초기 망을 구축한 후, 비용이 감소하는 방향으로 망을 변화시키는 SWK라는 반복적 휴리스틱 방법을 본 연구에서 사용하였다. 휴리스틱 방법은 정수계획법에 비해 최적해 여부를 보장할 수 없다는 단점은 있으나, 수행 속도가 빠르고 구현이 간단하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 SWK 알고리즘을 구현하는데 있어서 X변환 탐색 방식들을 제안하고 실험, 비교하였다. 먼저, 깊이우선탐색(Depth First Search)과 최선우선탐색(Best First Search) 방식이 전역탐색(Global Enumerative Search)에 비하여 최종해의 비용은 비슷하면서 수행 시간이 훨씬 작다는 점을 보였다. 또한 개선된 최선우선탐색 방식이 깊이우선탐색이나 최선우선탐색에 비하여 거의 동일한 비용 수준의 해를 30% 이상 빨리 찾는다는 것도 보였다. 실제 국내 23개 주요 전화국

간의 망 설계 문제를 제안된 구현 알고리즘으로 풀어 보았다. 끝으로 기존의 모든 생존도 알고리즘으로는 관로를 이용한 망 설계 문제를 푸는데 적합하지 않다는 점과 이에 대한 해결 방안을 제안하였고 수행시간이 비교적 현실적인 방안을 구현하였다. 관로를 고려한 생존도 문제는 아직 체계적으로 연구된 바 없으나 이에 대한 연구는 실제 상황에서의 응용면에서 매우 중요하다고 하겠다.

【참고문헌】

- [1] T. Wu, Fiber Network Service Survivability, Artech House, Inc. 1992
- [2] R. Gomory and T. Hu, "Multi-Terminal Network Flows", SIAM Journal on Applied Mathematics, vol. 9, pp.551-570, 1961
- [3] K. Steiglitz, P. Weiner, and D. Kleitman, "The Design of Minimum-Cost Survivable Networks", IEEE Transaction on Circuit Theory, vol. 16, No. 4, pp.455-460, 1969.
- [4] K. Eswaran and R. Tarjan, "Augmentation Problems", SIAM Journal on Computing, vol. 5, pp.653-665, 1976.
- [5] R. Cardwell, C. Monma, and T. Wu, "Computer-Aided Design Procedures for Survivable Fiber Communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 7, No. 8, pp.1188-1197, 1989.
- [6] D. Bienstock, E. Brickell, and C. Monma "On the Structure of Minimum-Weight k-Connected Spanning Networks", SIAM Journal on Discrete Mathematics, Vol. 3, No. 3, pp.320-329, 1990
- [7] M. Grötschel and C. Monma, "Integer Polyhedra Arising from Certain Network Design Problems with Connectivity Constraints", SIAM Journal on Discrete Mathematics, Vol. 3, No. 4, pp.502-523, 1990.
- [8] M. Grötschel, C. Monma, and M. Store, "Computational Results with a Cutting Plane Algorithm for Designing Communication Networks with Low-

Connectivity Constraints", Operations Research, vol. 40, No. 2, pp.309-330, 1992.

- [9] M. Goemans and D. Bertsimas, "Survivable Networks, Linear Programming Relaxations and the Parsimonious Property", Mathematical Programming, vol. 66, pp.145-166, 1993.



조성준

현재 포항공과대학교 산업공학과/전자계산학과 조교수로 재직중이다. 서울대학교 산업공학과에서 학사, 석사, 워싱턴대학교(University of Washington) 컴퓨터과학과에서 석사, 메릴랜드대학교(University of Maryland) 컴퓨터과학과에서 박사학위를 취득하였다. 주요 관심분야는, 신경회로망 인공지능 등이다.



한치근

현재 경희대학교 전자계산공학과 부교수로 재직중이다. 서울대학교 산업공학과에서 학사, 석사, 펜실바니아주립대학교(Pennsylvania State University) 컴퓨터과학과에서 석사, 박사학위를 취득하였다. 주요 관심분야는 알고리즘, 계산이론, 멀티미디어 문서 등이다.