

패킷 교환망 토폴로지 최적화를 위한 경험적 방법

우훈식**/임동순·오현승***

1. 서 론

21세기 지식정보사회에서는 지식과 정보에 대한 능력이 국가 경쟁력을 좌우할 뿐만 아니라 전쟁의 승패를 결정하는 핵심 요소가 되고 있다[2]. 이에 따라 국방부에서는 국방정보화 추진개념을 정립하여 2010년까지 미래 정보전 및 체계 통합전을 수행할 수 있는 정예 정보과학군을 육성하고, 발전된 C4I 체계를 중심으로 전력운용의 동시성과 통합성을 달성할 수 있도록 국방정보화를 추진하고 있다[2,4].

이러한 국방 정보화는 국방자원관리의 자동화 및 정보화 환경을 구축함으로써 전시 및 평시에 효율적이고 경제적인 군 운용이 가능하도록 하고, 미래 정보전에 대비하여 국방업무 전반에 걸친 정보화를 가속화하고자 하는 것이다[1]. 미래 정보전에 대비한 통합정보체계를 구축하기 위해서는 사용자들에게 대량의 다양한 정보를 신속하게 제공할 수 있도록 정보통신망을 우선적으로 구축하여야 한다. 즉 시간과 장소를 초월하여 사용자에게 원하는 형태의 멀티미디어 정보를 초고속으로 공유할 수 있도록 하는 국방정보통신망이 요구되는 것이다.

국방정보통신망은 군에서 요구하는 국방 정보를 관계자간 교환 및 공유하여 적시에 유통시킴으로써 국방 정보를 미래 전력으로 승화시키는 정보 통신 기술이 사용되는 기반체제라 할 수 있다. 최근에는 정보통신기술의 급격한 발전에 따라서 신속한 지휘 및 명령의 전달 체계 구축, 전장 상황의 실시간 모니터링, 국방 기간 업무 정보화 등이 국방 정보화의 대표적인 구현 형태로 추진되고 있으며 이에 따라 각 사용자 간의 데이터 전송량이 급격하게 증가하고 있으므로 데이터를 효율적으로 신속히 전달할 초고속 국방정보통신망의 구축이 요구된다[1].

* 본 내용은 '03년도 한국국방경영분석학회 추계학술대회 발표내용을 정리한 것임.

** 대전대학교 인터넷정보공학과

*** 한남대학교 시스템공학과

이러한 초고속 정보통신망에 대한 수요에 부응하여, 국방부에서는 기존의 전용 회선에 의한 일대일 통신을 개선하여 ATM (Asynchronous Transfer Mode) 기반의 패킷 교환망에 의한 교환 통신을 통해 복수 통신이 가능하도록 구축하였으며 표준 통계 체계인 TCP/IP를 사용함으로써 이기종간 상호 통신 및 신속한 정보 교환 및 공유를 보장하고 있다. ATM은 패킷 교환 방식의 주요 장점인 통계적 다중화를 제공하면서 시간 지연의 수준을 실시간 서비스가 가능한 낮은 수준으로 유지하도록 설계한 것이다. 이러한 ATM에서는 패킷의 크기를 53 바이트로 통일하여 광통신이 제공하는 대용량 및 최소 에러율 제공 기능을 이용하고 있다.

하지만, 정보화의 진행과 발전에 따라 사용자간 교환 및 공유되는 데이터량은 계속적으로 증가할 것이므로 지속적인 투자를 통하여 대역폭을 확장할 필요가 있다. 즉, 현재 수준의 정보화에서는 데이터 소통에 문제가 없지만, 지속적으로 네트워크의 사용이 증가하면 보다 충분한 대역폭이 필요하게 되므로 새롭게 네트워크를 구축하거나 확장할 필요가 있게 된다. 네트워크를 구축할 때 중요한 문제 중의 하나는 각 링크의 용량을 어느 정도로 설정해야 하는가이다. 일정 기준의 성능과 신뢰도 조건을 만족하면서 최소의 비용으로 통신망이 구성되도록 하는 네트워크 토폴로지를 결정하는 것이 매우 중요하다.

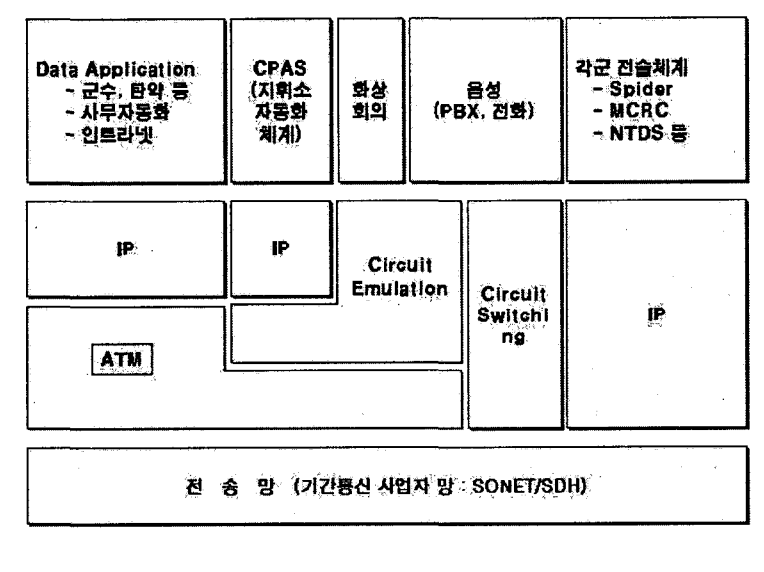
통신 네트워크 토폴로지 문제는 기본적으로 순열 최적화 문제로 NP Hard 문제이다[9,13]. 따라서, 네트워크 교환 노드의 수가 증가하는 경우 제한된 시간 안에 최적해를 산출하는 것은 매우 어려우며 결국 제한된 시간에 우수한 해를 제공하는 휴리스틱 알고리즘을 사용하는 것이 보다 합리적이다.

본 연구에서는 국방정보통신망의 네트워크 설계를 위하여 사용이 가능한 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 메타휴리스틱의 일종으로 순열 최적화 문제에서 매우 우수한 결과를 생성한 시뮬레이티드 애닐링을 이용한 것으로 최소의 비용으로 동일한 수준의 네트워크 성능 및 신뢰도를 제공하는 토폴로지를 제공한다. 개발된 알고리즘의 실용적인 적용을 위하여 시뮬레이션 실험을 통하여 알고리즘의 응용 절차를 제시하였으며, 특히 기간통신망 사업자의 실제 비용표를 이용하여 실험을 실시하였다.

2. 국방 정보통신망 토폴로지 문제

국방부의 정보화 중장기 계획에 의하면 우리 군은 2015년을 목표로 [표 1]과 같이 정보전 수행 능력을 갖춘 정예의 정보화 강군의 육성 계획을 수립하고 있다[6]. 이러한 목표가 달성되면 우리 군은 지휘 통제 분야와 자원 관리 분야에서 정보화를 달성하게 되며 이를 통한 강군 육성이 가능해지는 것이다.

이러한 정보화 강군의 육성을 위한 기본 체계로 국방 정보통신망이 요구되며 국방 정보통신망은 [그림 1]과 같이 기간통신 사업자망인 전송망위에 ATM망이 구축된 상태이다[4,6]. 현재 운용중인 국방 정보통신망은 국방정보통신망 고도화 계획에 의하여 ATM 망으로 통합되었으며 현재 군에서는 국방정보통신망 위에서 다양한 형태의 정보화 업무 지원을 위하여 각 군별 각 부대별로 TCP/IP 기반의 인터넷 웹 서비스, POP3 기반의 전자 메일 시스템, 전자결재 서비스, 지휘소 자동화 체계, 화상회의 시스템, 야전제대 인사업무 시스템, 자체 상황관리 시스템 등을 사용하고 있다[5]. 이러한 정보 통신 서비스의 증대에 따라 국방정보통신망 내의 데이터 전송량이 매우 급격하게 증가하고 있으며 증대된 데이터 전송량을 효율적으로



[그림 1] 국방정보통신망 프로토콜 구조[7]

로 신속히 전달할 초고속 국방 정보통신망의 신설 혹은 대역폭 확장 등이 필요하게 되었다.

현재 구축된 국방 정보통신망은 기간통신사업자망인 전송망 위에 ATM망으로 구축되며 주요 지역간은 T3급으로 전송로가 구성되어 있다. [표 2]는 2002년 기준으로 각 군별 장거리 통신망(WAN)의 설치 현황을 표현한 것이다[3]. 이러한 자료에 의하면 국방 정보통신망은 국가 초고속 기간망을 활용할 수 있도록 국방 전산망과 전화망, 지휘소 자동화망의 회선 통합을 추진하였고, 편성 대대급 이상을 대상으로 광역통신망(WAN)을 구축 완료하였으며, 근거리통신망(LAN)은 91% 정도 구축하였다[4]. 그러나 현재 편성 대대급을 대상으로 구축된 정보통신망은 국가 정보통신망 수준에 비교하면 열악한 수준으로 이에 대한 대책이 보완되어야 한다[1].

이러한 국방 정보통신망을 패킷 기반의 네트워크로 수식화하면 그래프 $G = (N, L)$ 로 표현되며, N 은 노드의 집합을 나타내고 L 는 노드 쌍 간의 링크를 나타낸다. 이때, 노드의 총수를 n , 링크의 수를 m 이라고 정의하면 주어진 노드의 위치 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, 통신량 매트릭스 $R = r_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, n$, 최대 지연 시간 T_{\max} , 네트워크 용량 기준 $C = c_k$, 그리고 네트워크 노드 연결도 u 하에서 네트워크 토폴로지 설계 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Min } TC = \sum_{k=1}^m TC_k(c_k)$$

$$\text{s.t. } T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^m \frac{f_k}{c_k - f_k} \leq T_{\max} \quad (1)$$

이때, 총비용 TC 는 각 링크별 회선을 설치할 때 발생하는 용량별 링크의 길이에 따라 발생하는 가변 비용으로 정의되며, T 는 패킷당 평균 지연 시간으로 f_k 는 트래픽 매트릭스 $R = r_{ij}$ 에 의해 결정되는 트래픽 양으로 $f_k \leq c_k$ 이며 γ 는 네트워크 내의 전체 트래픽 양이다.

[표 1] 국방정보화 증장기 계획[6]

단계	추진목표	추진중점
1단계('99~'05)	기반 및 핵심 체계구축	- 정보화 환경여건 정비 - 정보통신기반 (LAN, WAN)구축 - 핵심체계(C4I, CALS) 구축
2단계('06~'10)	기능확장 및 체계통합	- 국방 초고속 정보통신망 구축 - 국방통합 C4I, CALS 체계 구축
3단계('11~'15)	선진 정보 체계 완성	- 국방 초고속 정보통신망 완성 - 국방통합 C4I, CALS 체계 완성 - 전자국방업무 수행체계 구축

[그림 2] 국방 정보통신망 구성도[4,6]



[표 2] 장거리 통신망 설치 현황 (단위: 회선)

구분	계	육군	해군	공군	국직
소계	853	566	101	94	92
T3	37	18	8	4	7
E1	24	15	3	0	6
T1	144	91	14	19	20
64Kbps	648	442	76	71	59

3. 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘

시뮬레이티드 애닐링 알고리즘은 열탕에서의 유리 결정의 물리적 생성공정을 컴퓨터 상에서 모의 실험하는 Metropolis 등[10]의 알고리즘에서 유래한 휴리스틱 최적화 기법이다. 일반적인 조합 최적화 문제에 대한 시도는 Kirkpatrick 등[10]과 Cerny[8]에 의해 각각 독자적으로 연구되었다. 최근에는 네트워크 설계 문제 등에도 폭넓게 사용되었으며, 기존의 휴리스틱 기법과 비교하여 효과적이라고 발표되었

다[8].

최적화 문제에 대한 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘의 사용은 유리 결정을 생성하는 물리적 애닐링 공정과 유사하다. 물리화적인 의미에서의 시스템 목적 함수는 잠재 에너지를 최소화하는 것으로, 고려된 시스템은 운동 파동의 특위성 때문에 글로벌 최소값에 도달하지 못하며 따라서 로컬 최소값에 머무는 것이다[11]. 이러한 상황을 극복하기 위하여, 시스템의 온도 즉 냉각 정도를 낮추면 낮출 수록 궁극적으로 시스템의 에너지를 낮출 수 있는 것이다. 최적화 문제의 경우, 온도는 최적화 과정 중에 변화하는 조정 변수 S 로, 시스템의 에너지 수준은 목적함수값 $f(\cdot) = \sum_{k=1}^m TC_k(c_k)$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 물리적 애닐링 공정의 냉각 스케줄 S

는 목적함수값을 증진시키기 위해 한 상태에서 다른 상태로 변환하는 서치 과정과 유사하며 이러한 유사성이 시스템의 상태수가 제한적이지만 그 수가 기하급수적인 예를 들어 NP-hard의 특성을 갖는 외판원 문제 등에 유용하게 사용될 수 있다.

또한, 시뮬레이티드 애닐링은 “uphill move”라는 개념을 도입하여 목적 함수를 증진시키지 못하는 해에 대하여도 교체확률 함수 가정하에 받아들인다. 이러한 열등한 해에 대해 확률적으로 인정하는 시뮬레이티드 애닐링의 특징이 기존의 반복적 실험 방법과 구별되는 특징이며, 이러한 시도가 로컬 해로 부터 진행 방향을 바꾸는 수단을 제공함으로써 실제적인 문제에서의 근사 최적해를 추구하는 것이다. 따라서, 열등한 목적함수를 제공하는 후보해 Y 도 현재해 X 가 될 수 있도록 q 번째의 후보해 생성 반복수에서 다음과 같은 교체확률 분포가 적용된다.

$$\Pr\{\text{replace } X \text{ by } Y\} = \min\{1, \exp(-(f(x) - f(Y))/S_q)\} \quad (2)$$

위 관계식에서 $\{\exp(-(f(x) - f(Y))/S_q)\}$ 은 S_q 의 온도가 높으면 낮은 온도의 경우에 비하여 상대적으로 해가 교체될 확률이 크다. 따라서, 실험 반복수가 증가할 때 S_q 의 값이 감소되도록 하면, 열등한 해가 현재해가 될 확률이 점차로 감소하게 되어 최종적으로 근사 최적해를 추구하게 된다. 즉, 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘은 우선 높은 S_q 값에서 시작하여 천천히 온도를 낮추는 것으로 이 과정을 냉각 스케줄(cooling schedule) 이라고 부른다. 냉각 스케줄은 각각의 문제 성격에 따라 달라진다. 일반적으로 사용하는 선형 형태의 냉각 스케줄은 다음과 같다.

$$S_{q+1} = S_q(1 - \beta)$$

$$0 < \beta < 1$$

시뮬레이티드 어닐링의 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

단계 0: $R = 1$, $L(q)$, N 을 초기화

초기 해 X 결정, 가장 좋은 해 $Z = X$

단계 1: 다음 절차를 $L(q)$ 번 반복한다.

1) 후보해 Y 를 생성한다.

2) 만약, $f(Y) < f(X)$ 이면 $X = Y$

아니면 만약 $\{ \exp(-(f(x) - f(Y))/S_q) \} > \text{random}[0, 1]$ 이면 $X = Y$

만약 $f(Y) < f(X)$ 이면 $Z = X$

단계 2: $R = R + 1$

만약 $R > N$ 이면 정지하고, 아니면 단계 1로 이동.

이 알고리즘에서 주어져야 할 중요한 모수 값은 $L(q)$, N , S_q 이다. 이미 언급했듯이 이 값들은 문제에 특성에 따라 결정되어야 한다. 본 연구에서 사용된 모수는 다음과 같다.

1) S_q 의 초기치는 대부분의 이동이 채택될 정도로 커야 한다. 선형형태의 냉각 스케줄에서 $0.8 < 1 - \beta < 0.99$ 로 한다.

2) $L(q)$ 의 값은 모든 q 에 대해 동일하게 정한다.

3) N 의 값은 2000으로 정한다.

4. 모의 실험

본 연구에서 개발한 시뮬레이트 애닐링 기반의 알고리즘의 유용성을 실험하기 위하여 노드 수 $n=21$ 과 연결도 $u=2$ 의 문제에 대하여 모의실험하고 응용 방법을 정립하였다. 본 실험에서는 최대 지연 시간을 패킷당 $T_{\max} = 50$ ms로 설정하였고 각 노드간의 트래픽은 초당 10 패킷이라고 가정하였으며 또한 패킷당 1000 비트의 크기를 갖는다고 가정하였다. [표 3]은 네트워크 설계가 필요한 도시 간의 거리를 나타낸 것이며, [표 4]는 네트워크 용량의 크기와 관련된 거리별 비용을 기록한 것이다.

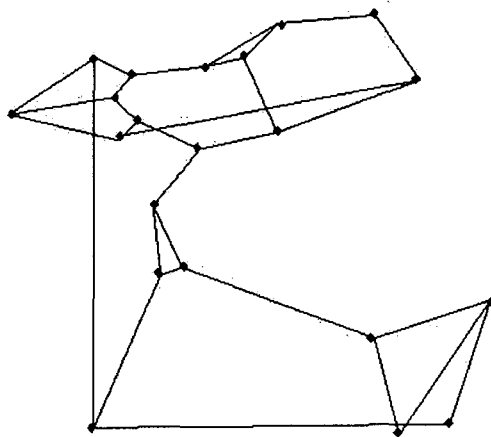
[그림 2]는 초기해 토폴로지를 나타낸다. 현재 전체 링크의 수는 31이며 이러한 구성 하에 전체 비용은 1억2천6백3십1만8천9백원으로 계산되었다. 이러한 초기 토폴로지에 대하여 개발된 시뮬레이티드 애닐링 기반의 휴리스틱 알고리즘이 적용되었으며 [그림 3]은 개발된 알고리즘이 적용되었을 때 알고리즘이 실행되면서 전체 비용이 감소되는 모습을 그래프로 나타낸 것이다. 이러한 그림에 의하면 알고리즘 실행이 증가하면 할수록 전체 비용이 감소되는 설계 구성도를 얻을 수 있었으며 특히 반복수 50까지 매우 급격한 수준의 비용 절감이 실현되었다. 이러한 실험의 결과로 전체 비용이 3천8백1십2천1백원이 되는 토폴로지 [그림 4]를 얻을 수 있었다.

[표 3] 도시간 거리 (단위: km)

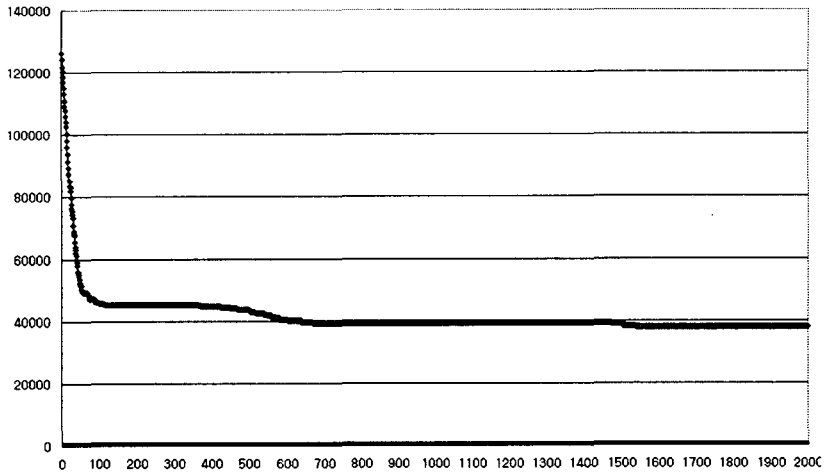
	대전	논산	대구	부산	포항	진해	광주	원주	강릉	속초	양구	춘천	가평	의정	성남	파주	인천	수원	천안	이천
서울	141	143	241	322	263	314	268	93	164	156	108	78	55	21	21	34	58	34	88	60
대전		15	120	195	172	181	141	121	198	228	202	174	161	157	121	174	155	108	60	96
논산			130	203	185	187	131	132	211	240	212	183	168	161	124	176	151	113	56	103
대구				82	73	78	172	176	212	262	259	240	238	251	219	273	269	215	163	182
부산					102	29	200	255	281	334	336	320	319	333	300	354	348	296	242	263
포항						119	245	180	185	240	251	241	246	269	243	293	303	243	202	203
진해							172	254	288	339	337	318	315	326	292	347	336	286	231	257
광주								262	335	369	343	314	299	287	251	299	258	237	185	234
원주									86	108	86	64	65	92	77	116	146	86	90	46
강릉										56	85	95	115	155	155	176	222	168	175	132
속초											51	78	101	140	154	156	213	169	194	144
양구												32	54	91	110	106	163	126	161	110
춘천													23	63	78	82	135	94	130	79
가평														40	56	61	112	72	114	65
의정															37	24	72	50	105	69
성남																55	69	16	68	40
파주																	63	64	121	91
인천																		62	106	105
수원																			57	43
천안																				51

[표 4] 거리별 네트워크 비용 (단위: 천원)

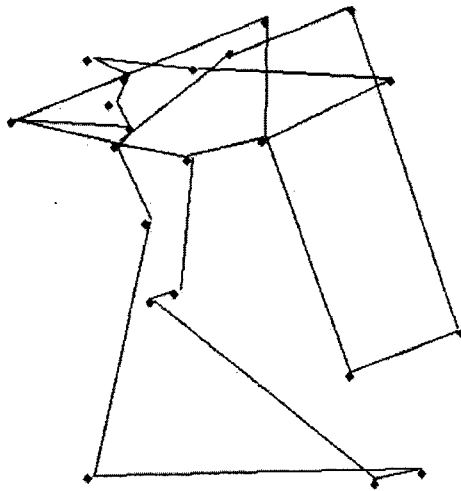
BPS	~ 10Km	~ 30Km	~ 50Km	~100Km	~200Km	~300Km	~300Km	400Km~
2400	90.1	157.6	220	345.5	394.105	441.705	476.9	500.8
4800	117.1	204.8	286	451.7	512.3	574.2	619.9	651.6
9600	135.1	236.3	330	521.1	591.1	662.5	715.3	751.2
64000	270.3	472.6	659.9	1042.4	1182.3	1325.1	1430.7	1502.4
128000	286.6	505.7	706.3	1125.9	1379.3	1545.9	1669.1	1752.8
192000	368.5	650.2	908.1	1147.6	1773.4	1987.6	2146	2253.6
256000	491.4	867	1210.8	1930.2	2364.6	2650.2	2861.4	3004.8
384000	573.3	1011.5	1412.6	2251.9	2758.7	3091.9	3338.3	3505.6
448000	614.2	1983.7	1513.5	2412.7	2955.7	3312.7	3576.7	3756
512000	696.1	1228.2	1715.3	2734.4	3349.8	3754.4	4053.6	4256.8
768000	819	1445	2018	3217	3941	4471	4769	5008
1024000	923.8	1630	2276.3	3628.8	4445.4	4982.4	5379.4	5649
1544000	1154.8	2037.5	2845.4	4536	5556.8	6228	6724.399	7061.3
2048000	1539.7	2716.6	3793.8	6048	7409.1	8304	8965.7	9415
4500000	11561.1	20388.6	28469.8	45376.6	55571.9	62285.3	67258.9	70614.7
15500000	23122.2	40777.2	56939.6	90753.2	111143.8	124570.6	134517.8	141229.4



[그림 2] 초기해 토폴로지



[그림 3] 시뮬레이티드 애닐링 프로세스



[그림 4] 우수해 토폴로지

5. 결론

국방 정보화는 최근의 발달된 정보 통신 기술을 이용하여 정보화 및 과학화된 선진 강군을 육성하기 위해 전투 체계와 전시 및 평시 국방 업무의 정확성 및 효율

성을 극대화하기 위한 자원 관리 등 국방구조 전반을 정보 및 지식 구조로 전환시키는 제반 활동으로 정의된다. 이러한 국방 정보화에서는 관계자간 필요로 하는 국방 정보의 교환 및 공유가 매우 중요하며 정보화의 진전에 따라 데이터 전송량은 급격하게 전송하게 되므로 이를 신속하고 효율적으로 전달하기 위해서는 초고속 국방 정보통신망의 신설과 확장 등이 필요하다.

국방부에서는 ATM 기반의 패킷 교환망으로 국방정보통신망을 구축하였으며 향후 지속적으로 신설 및 확장 중이다. 이렇게 ATM을 기반으로 네트워크를 신설 및 확장할 때 각 링크의 네트워크 용량을 설계하는 것이 매우 중요한 문제이며 특히 일정 기준의 성능과 신뢰도가 필수인 국방 정보통신망의 경우는 최대 지연 시간과 네트워크 연결성이 보다 보수적으로 고려되어야 한다.

본 연구에서는 국방정보통신망의 네트워크 설계를 위하여 사용이 가능한 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 메타휴리스틱의 일종으로 순열 최적화 문제에서 매우우수한 결과를 생성한 시뮬레이티드 애닐링을 이용한 것으로 최소의 비용으로 동일한 수준의 네트워크 성능 및 신뢰도를 제공하는 토폴로지를 제공한다. 개발된 알고리즘의 실용적인 적용을 위하여 시뮬레이션 실험을 통하여 알고리즘의 응용 절차를 제시하였으며, 특히 기간통신망 사업자의 실제 비용표를 이용하여 실험을 실시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 국방부, “2002년 국방정책”, 1998.
- [2] 국방부, “2000년 국방백서”, 2000.
- [3] 국방부, “2002 정보통신장비비유현황”, 국방부 정보화기획관실, 2002.
- [4] 국방부, “국방정보화 추진계획”, 2003.
- [5] 김광영, 이승종, “국방정보체계의 서비스 품질(QoS) 보장을 위한 정책기반 (Policy-Based) 네트워킹 적용에 관한 연구”, 한국국방경영분석학회지, 29/1, pp. 57-75, 2003.
- [6] 신유찬, 남길현, “WEB 환경에서 국방정보통신망 정보보호체계 구축에 관한 연구”, 한국국방경영분석학회지, 28/1, pp. 115-135, 2002.
- [7] 황상근, “WDM 발전 방향 및 응용 전망”, 제2회 국방정보화기술심포지엄, 2001.
- [8] Cerny, V., “A thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm”, Journal of Optimization Theory and Application, Vol. 45, pp. 41-51, 1985.
- [9] Garey, M. R, Johnson, D., Computers and intractability: a guide to the theory

- of NP-completeness, Freeman, New York, 1977.
- [10] Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. 220, pp. 671-680, 1980.
- [11] Lundy M. and A. Mees, "Convergence of an annealing algorithm", *Mathematical Programming*, Vol. 34, pp. 111-124, 1986.
- [12] Metropolis, N., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, and A. H. Teller, "Equation of state calculation by fast computing machines", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
- [13] Pierre S., Legault, G. "An evolutionary approach for configuring economical packet switched computer networks", *Artificial Intelligence in Engineering*, 10, 1996.