

계층화된 링크-상태 인터넷 라우팅에서 가상 링크 운용 최적화를 위한 다기준 유전자 알고리즘의 응용

김도훈[†]

경희대학교 경영대학

Optimal Operations of the Virtual Link System in Hierarchical Link-State Routing: A Multi-Criteria Genetic Algorithm Approach

Dohoon Kim

College of Business Administration, Kyung Hee University, Seoul, 130-701

This paper presents a multi-criteria decision model and Multi-Criteria Generic Algorithm(MCGA) approach to improve backbone topology by leveraging the Virtual Link(VL) system in an hierarchical Link-State(LS) routing domain. Given that the sound backbone topology structure has a great impact on the overall routing performance in an hierarchical LS domain, the importance of this research is evident. The proposed decision model is to find an optimal configuration of VLs that properly meets two-pronged engineering goals in installing and maintaining VLs: i.e., operational costs and network reliability. The experiment results clearly indicates that it is essential to the effective operations of hierarchical LS routing domain to consider not only engineering aspects but also specific benefits from systematical layout of VLs, thereby presenting the validity of the decision model and MCGA.

Keywords: link-state internet routing, virtual links, multi-criteria genetic algorithm, network reliability

1. 서론

인터넷 이용자가 급증하면서 라우팅 프로토콜(routing protocol)의 제어와 관련된 규모성 문제(scalability issues)는 ISP(Internet Service Provider)의 네트워크 운용에 있어서 핵심적인 사안으로 부상하였다. 규모성 문제를 해결하기 위하여 ISP들은 자신이 관리하는 네트워크(이를 자치 시스템, Autonomous System, AS라고 한다)를 논리적으로 분할하여 계층적으로 운용하기 시작하였다. 이에 따라 라우팅 프로토콜의 제어는 분할된 각 지역영역(Local Area, LA)별로 독립적으로 수행된다.

그러나 계층적 네트워크 운용은 몇 가지 부작용을 수반하는데, 대표적으로 라우팅 프로토콜의 제어가 국지적인 정보에만

의존하기 때문에 AS 전체에 걸친 안정적 연결성의 정도가 감소된다는 것이다. 특히 계층화된 네트워크 운용은, LA를 연결시키는 역할을 하는 상위계층인 기간영역(Backbone Area, BA)의 네트워크 신뢰성(network reliability)에 크게 의존하게 된다. 링크-상태(Link-State, LS)방식을 적용하는 라우팅 프로토콜에서의 이와 같은 문제점들은 이미 Kim & Tcha(2000), Moy (1998), Parkhurst(2002), Thomas & Thomas(2003) 등을 통하여 지적되어 왔다. 이들 연구의 결론을 종합하면, BA의 네트워크 토폴로지적 특성은 계층화된 LS 라우팅의 전반적인 성능을 결정하는 핵심 요인이라는 것으로 요약된다.

본 연구에서는 상기한 문제인식하에, 계층적 구조를 가지는 LS AS를 대상으로 하여 BA 네트워크 토폴로지의 구조적 안정

[†]연락처 : 김도훈, 130-701 서울시 동대문구 회기동 1번지, 경희대학교 경영대학, Fax : 02-961-0515, E-mail : dyohaan@khu.ac.kr

성을 향상시키는 의사결정모형을 소개한다. 특히 LS 라우팅 프로토콜은 가상 링크(Virtual Link, VL)를 이용하여 BA에서의 네트워크 토폴로지를 개선시킬 수 있는 방식을 제공한다. VL은 추가적인 금전적 비용을 수반하지 않기 때문에 위와 같은 목적에서 최우선적으로 고려되는 옵션이다. 그러나 VL 구성과 운용과정에서 네트워크 유지/보수 복잡성이나 문제해결(trouble shooting)의 어려움 등을 가중시키는 비금전적 비용이 수반된다. 따라서 BA 네트워크의 신뢰성을 증진시킬 수 있는 한에서만 VL을 구현하는 것이 적절하다. 본 논문은 최적 VL 구성을 위한 의사결정 모형을 제공한다.

먼저, 2절에서는 VL 시스템에 대하여 간단히 소개한다. VL 시스템 운영상에서 제기되는 의사결정문제를 정식화하고 이를 위한 다기준 유전자 알고리즘(Multi-Criteria Genetic Algorithm, MCGA) 기반 해법이 이어서 제공된다. 대다수의 ISP가 채택하고 있는 LS 라우팅 프로토콜의 운영상의 난점을 해결한다는 점에서 본 연구는 현실성 차원에서 기여하는 바가 크다. 실제로 VL의 새로운 운용가능성을 제시한다는 점에서도 실제 네트워크 운영자에게 시사하는 바가 크다. 연구의 기대효과를 포함하여 향후 연구방향에 대한 제안이 본 논문의 마지막 절의 내용이다.

2. 계층화된 LS AS에서의 가상 링크(VL) 시스템

2.1 계층화된 LS AS 네트워크 운용

LS 라우팅 프로토콜에서는 라우터들이 자신에 연결된 링크

들의 상태정보를 교환하면서 전체 AS 네트워크를 표현하는 토폴로지 DB(topological DB, TDB)를 구축한다. 이러한 TDB는 모든 라우터에게 동일하여야 하기 때문에 LS 라우팅 프로토콜은 라우터의 수에 비례하여 운용 복잡도가 급격하게 증가하는 현상을 보인다. 이를 라우팅 계위(layer)에서의 규모성 문제라고 한다(Moy, 1998; Thomas and Thomas, 2003).

규모성 문제를 해결하기 위하여 전체 AS를 두 계위로 논리적으로 구분하는 계층화 운용방법이 도입되었다. 하위 계위는 복수의 작은 LA로 구성되며 라우팅 프로토콜의 제어는 해당 LA 내부로 제한된다. 상위 계위는 LA들을 엮어주는 역할을 하는 특별한 영역으로 BA라고 부른다. 따라서 BA의 안정성과 신뢰성은, 전체 AS 네트워크 상의 임의의 두 지점 사이의 안정적 연결을 위해 필수적이다.

Kim(2003), Kim & Tcha(2000), Parkhurst(2002), Thomas & Thomas(2003) 등의 연구에서는 BA 네트워크 연결성(connectivity)의 정도가 BA 네트워크의 안정성과 신뢰성을 평가하는 주요 요인임을 지적하였다. 특히 Kim & Tcha(2000)에서는 BA 네트워크의 연결성이 VL 시스템을 이용하여 개선될 가능성을 보여 주었다. 본 연구에서는 VL를 이용한 BA 네트워크 토폴로지의 변화를 BA 구조개선(augmentation)으로 부르기로 한다. <그림 1>은 계층화된 LS AS와 VL의 설치에 의한 BA 구조개선의 예를 보여준다.

2.2 VL 시스템과 BA Augmentation

VL은 하나의 LA가 두 개 이상의 BA와의 접점 라우터(Kim & Tcha, 2000; Moy, 1998; Thomas and Thomas, 2003 등을 참조)를 가

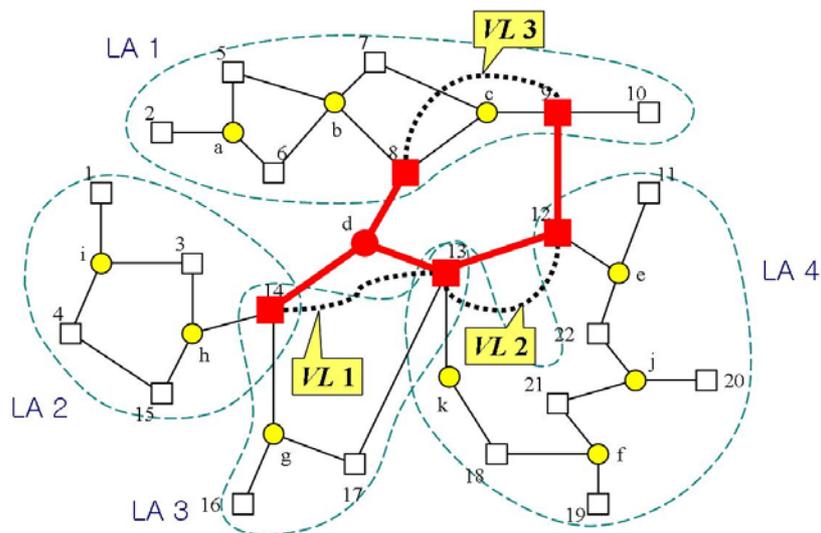


그림 1. 계층화된 LS AS와 BA에서의 VL 이용.

VL 1은 실제로는 라우터 13과 14를 연결하는 경로(13-17-g-14)이며, VL 2는 라우터 12와 13을 연결하는 경로(12-e-22-j-21-f-18-k-13)이다. 여기서 영문 알파벳 소문자는 라우터 사이에 존재하는 LAN과 같은 서브네트워크(subnetwork)를 표현한다. 자세한 설명은 다음의 2.2절 내용을 참조하라.

질 경우에, 그 두 라우터 사이에서 설정될 수 있다. 구체적으로 그 구현은 네트워크 관리자가 직접 두 라우터의 TDB를 조율(tuning)함으로써 완성된다. 결과적으로 두 라우터의 BA에 대한 TDB에서 하나의 링크가 추가된 형태로 구현된다. 그런데 이 링크는 가상적으로만 존재할 뿐이고, 실제로는 해당 LA에 속하는 라우터들을 거쳐가는 경로(path)를 지시하는 것이다 (<그림 1> 참조). 이러한 이유에서 가상링크(virtual link)라는 이름을 가지게 되었다.

실제로 VL는 두 라우터 간의 IP 터널링(IP tunnelling)을 제공하는 것이므로, 하나의 VL를 유지/보수하는 것은 그 경로상에 존재하는 모든 라우터들을 관리하는 것과 동일하다. 이러한 맥락에서 하나의 VL를 구현하고 유지/보수하는 노력과 같은 비금전적 비용이 VL의 실제 경로의 길이(실제 경로상에 있는 라우터의 수)에 비례하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 VL이 구성될 수 있는 모든 경우에 대해서 구현한다면 오히려 네트워크가 비효율적으로 운용될 가능성이 높아진다. 결론적으로, VL 구현 및 유지/보수와 관련된 편익과 비용을 동시에 고려하여 양자간 상충관계(trade-off)를 평가한 최적의 구성형태를 찾아야 한다.

3. 가상 링크의 최적 운용을 위한 의사결정 모형

비록 VL의 최적 구성이 BA 네트워크 토폴로지의 연결성을 증가시키는 것을 목적으로 하지만, 이는 네트워크 생존도(network survivability) 차원에서의 네트워크 설계(network design, 예컨대 Grottschel *et al.*(1995) 등을 참조)와는 다른 의사결정 문제를 제기한다. 특히 생존도 차원에서의 최적 네트워크 설계에서는 네트워크 노드별로 연결성 수준(connectivity requirements)이 사전

에 주어지는 것을 전제로 하여 이러한 수준을 달성하는 최소 비용 네트워크 설계를 목적으로 하지만, VL 구성과 관련된 의사결정 문제에서는 이러한 가정이 성립하지 않는다. 즉, 본 논문의 의사결정 모형은 VL 구성을 통하여 구조개선된(augmented) BA 토폴로지를 결정하는 것으로, VL 구현/유지/보수에 따른 편익과 비용이라는 두 가지 목적을 가지는 다기준 의사결정 문제(multi-criteria decision making)로 규정된다.

앞으로는 상기한 의사결정 문제를 VL 최적 구성(Optimal VL Configuration, OVLC) 문제라고 부를 것이다. [OVLC]에서는 먼저 LS AS의 계층화 구성에 따른 BA 네트워크 $G=(V, E)$ 와 구현 가능한 VL 후보들의 집합 A 가 주어진다. G 는 단순 무방향 그래프(undirected simple graph)이며, 후보 VL $e(e \in A)$ 에는 실제 e 를 구성하는 경로의 길이 w_e 가 VL을 구현/유지/보수하는 데 필요한 비금전적 비용으로 부여된다. 이 경우 의사결정 대안은 선택된 A 의 부분집합 Q (즉, $Q \subseteq A$)에 의하여 구조개선된 그래프 $G_Q=(V, E \cup Q)$ 가 된다. 각 의사결정 대안 G_Q 는 편익과 비용이라는, 의사결정 대안의 평가를 위한 두 기준에 대응되는 속성값(attributes)을 가진다. 먼저 비용은 $|Q|$ 개의 VL를 구성하는데 필요한 제반 비용의 총합($\sum_{e \in Q} w_e$)으로 정의한다. 또한 편익은 G_Q 의 연결성(connectivity)의 정도로 측정할 수 있는데, 이번 연구에서는 G_Q 에서의 단절점(articulation points)의 개수에 반비례하는 것으로 정의된다. 무방향 그래프에서의 단절점은 한 번의 깊이우선탐색(Depth First Search, DFS)으로 모두 찾아지므로, G_Q 에서의 계산복잡도(computational complexity)는 $O(|E \cup Q|)$ 이다. 이와 같이 주어진 의사결정 대안 G_Q 의 각 속성값 계산과정이 낮은 계산복잡도를 가지는 것은 유전자 알고리즘의 효율적 실행에 필수적인 조건이다.

파레토 효율집합(Pareto efficiency set)은 개별 속성값들이 다른 의사결정 대안에 비하여 모두 나빠지는 않은 최적해 후보

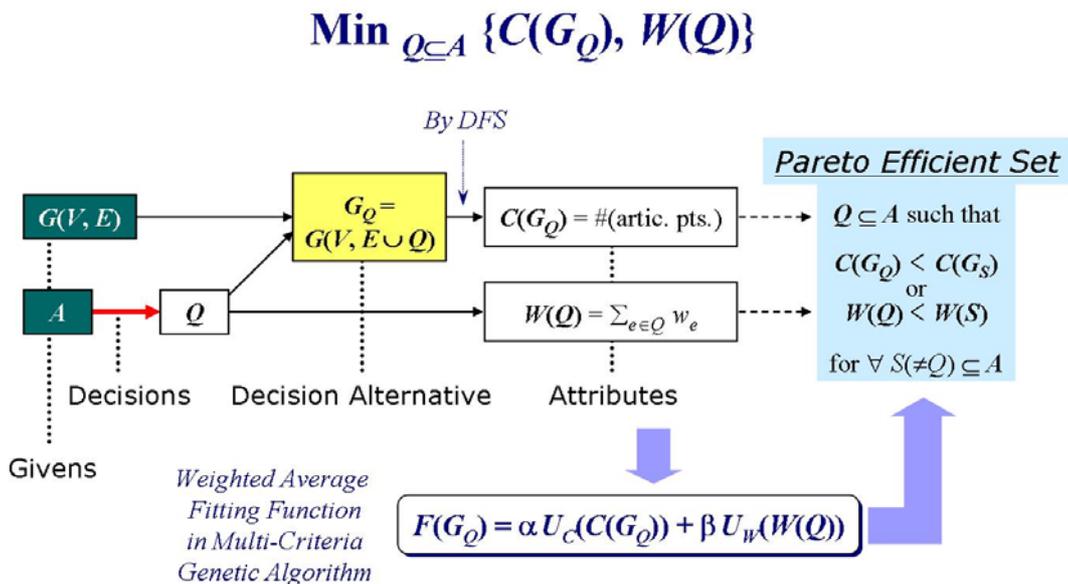


그림 2. 최적 VL 구성을 위한 다기준 의사결정 모형 [OVLC].

G_Q 들로 구성된다. 즉, 다른 대안에 비하여 비용이 적거나 단절점의 수가 적은 의사결정 대안들이 [OVLC]에서 우선 찾고자하는 대안들이다. 파레토 효율집합이 구해지면 추가적인 판단기준을 도입하여 이들 중 최적의 VL 구성안을 선택할 수 있다. 추가적 판단기준은 네트워크 관리자(network administrator)가 처한 상황에 따라 다르며, 본 연구의 범위를 벗어나므로 [OVLC] 모형에서는 생략되었다. 그러나 [OVLC] 모형의 산출물로 제시되는 파레토 효율집합은 네트워크관리자의 의사결정을 충분히 지원할 것이다. <그림 2>는 [OVLC]의 개요를 정리한 것이다.

4. 다기준 유전자 알고리즘(MCGA)을 이용한 해법과 실험결과

Kim(2002)는 [OVLC]가 의사결정 변수인 VL들을 하나씩 개별적으로 비교(pair-wise comparison)하는 것만으로는 최적해에 도달할 수 없는 반례(counter example)를 제공하고 있다. 이러한 반례에 비추어 볼 때, [OVLC]를 계산복잡도 관점에서 효율적으로 해결할 수 있는 알고리즘(exact algorithm)이 존재하기는 어려울 것으로 판단된다. 즉, 최악의 경우에는 집합 A의 가능한 $2^{|A|}$ 개의 부분집합을 모두 시도해 보아야 최적해를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 맥락에서 본 논문은 최적해에 근사한 답을 비교적 빠른 시간 내에 제공하여 주는 다기준 유전자 알고리즘(MCGA)을 해법으로 제안한다.

4.1 MCGA의 개요

MCGA는, 단일 목적함수를 최적화하는 메타휴리스틱(meta heuristic)인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 다기준 목적함수의 경우로 확장한 것이다. 알고리즘 구성요소 및 작용원리는 비슷하나, 다기준을 평가하기 위하여 단일 목적함수의 GA에서 보다는 다양한 평가함수(evaluation function or fitting function)를 도입할 수 있다. 예컨대, 개체의 기준별 속성값(개별 목적함수의 값)들을 가중평균(weighted average)한 값이나, 각 기준별 순위(ranking)에 기초한 다양한 평가함수를 구성할 수 있다. 전자의 경우 효용함수(utility function)에 의한 평가방법으로 일반화될 수도 있다. 또한 파레토 효율집합을 제공하기 위하여, 평가함수를 바탕으로 상위 특정 비율에 속하는 개체들의 상호지배관계(dominance relation)를 검토하면서 파레토 최적해의 후보군(candidate pool)을 지속적으로 갱신하여야 한다.

4.1.1 개체 표현

[OVLC]에 적합한 MCGA에서의 개체 표현(chromosome representation)은 단순이진표현법(simple binary representation)에 따른다. 즉, 크기 |A|의 개체에서 이진값을 취하는 각 비트(bit, 여기서는 유전자에 해당함)가 해당 위치의 VL의 선택여부를 표시

한다. 이와 같이 단순한 개체 표현은 전체 GA 속도를 향상시키는 주요 요인이다(Bingul *et al.*, 2000; Meunier *et al.*, 2000). 따라서 해당 개체는 VL 집합 A로부터 선택된 부분집합인 Q와 직접 대응된다.

4.1.2 MCGA 평가함수 및 개체 선택

해당 개체로부터 직접 의사결정 대안인 구조개선된 BA 토폴로지 G_Q 를 구성할 수 있으며(<그림 2> 참조, 개체에 대한 평가는 G_Q 의 평가함수로부터 구해진다. 본 연구에서는 속성값들을 가중평균하는 방법을 일반화하여 평가함수로 활용한다. 즉, 다음과 같은 효용함수를 정의함으로써 편익과 비용을 동일한 척도로 측정할 수 있게 된다. 먼저 $U_C(C(G_Q))$ 는 네트워크 관리자가 평가하는 G_Q 에서의 연결성 정도에 대한 정규화된 효용치(normalized utility value)를 표시한다. 또한 $U_W(W(Q))$ 는 집합 Q에 속하는 VL들을 구성하기 위해 소요되는 총비용에 관한 정규화된 효용치를 나타낸다. 두 속성값 C와 W는 3절에서 설명한 바와 같이 결정된다. 이러한 계산에 소요되는 시간은 각각 $O(|EUA|)$ 와 $O(|A|)$ 이므로, 조합최적화 문제에 GA를 적용할 때 발생하는 개체 평가에서의 계산복잡도 폭증은 [OVLC] 모형에서는 발생하지 않는다. 또한 $U_C(-)$ 와 $U_W(-)$ 는 각각 C와 W에 대한 감소함수로서, Clemen(1996) 등이 제안하는 다양한 함수 형태를 도입할 수 있다. 이 경우 의사결정 대안(즉, 개체 G_Q)의 평가함수 $F(G_Q)$ 는 순이익(net gain = 편익-비용)을 나타내는 총 효용치(total utility value) $U(G_Q)$ 로 해석되며, 구체적으로 식 (1)과 같이 정의된다. 여기서 α 와 β 는 각각 의사결정 대안 G_Q 의 속성별 가중치로, 네트워크 관리자가 상황에 따라 적절히 조정할 수 있으며, Kim and Gen(1999)에서와 같이 MCGA 진행과정중에 이전 세대의 가중치 기록으로부터 자동적으로 갱신될 수도 있다.

$$F(G_Q) = U(G_Q) = \alpha \times U_C(C(G_Q)) + \beta \times U_W(W(Q)) \quad (1)$$

다음 세대로의 전이를 위한 개체 선택은 확률바퀴(roulette wheel) 방식에 따른다. 즉, 한 개체가 다음 세대에까지 존속할 확률은 해당 개체의 평가함수의 값에 비례한다.

4.1.3 기타 MCGA 연산(operators)과 파라미터(parameters)

[OVLC] 모형을 위해서는 일점 교차(one-point crossover)를 이용하는 것으로 충분하다. 일점 교차는 간단하고 빠르게 다양한 의사결정 대안들을 제공한다. 또한 간단하게 구현되면서도 효과적인 임의적 유전자 변경방식(random exchange)을 돌연변이(mutation) 생성을 위한 목적으로 활용한다. 교차와 돌연변이를 통하여 현재 탐색중인 해공간(solution space)으로부터 보다 다양한 탐색후보들을 얻을 수 있으며, 결과적으로 파레토 최적해(Pareto optimal solution, 즉 파레토 효율집합) 등 특징지역으로만 조기에 수렴하는 위험을 낮추게 된다. 현 세대의 후보개체 집합 중에서 비교적 낮은 평가치를 보이는 하위 50%와 20%가 각각 교차와 돌연변이를 통하여 새로운 개체로 대체된다.

위 비율들은 기존의 MCGA 문헌과 본 연구의 사전실험(pilot test)을 통하여 결정되었다(4.2절의 사전실험 설계양식을 참조). 단, 돌연변이율이 일반적인 GA에서 보다 10% 정도 다소 높은 이유는, 탐색의 범위를 강제적으로 넓혀서 다양한 파레토 효율집합을 찾기 위함이다. [OVLC]와 같은 다기준 조합최적화 문제는 예측하기 어려운 다양한 파레토 최적해를 갖는 특징이 존재하므로, 돌연변이율을 상향조정하는 것은 타당한 조치이다.

또한 총세대수(total number of generation)와 개체집단의 크기(population size)와 같은 MCGA 파라미터들도 기존의 MCGA 문헌과 사전실험을 참고하여 각각 100세대와 50 개체로 결정하였다. 여기서의 GA 탐색과정은 100세대에 도달하기 이전에도 연속 10세대 동안 평가함수 관점에서 최상인 개체의 평가치가 0.1% 이상 개선되지 않으면 강제로 종료된다. 아래의 모든 실험결과에서 100세대 이전에 실험이 종료된 것으로 볼 때(일반적으로 12~17세대에 종료되었음), 위 수치들은 적절하다고 판단된다.

4.2 실험 및 결과

앞 절에서 제시된 MCGA는, BA 네트워크 노드의 개수를 10 개로 한 사전실험들 모두에서 파레토 최적해의 대부분을 성공적으로 찾아냈다. 또한 사전실험은 교차비율과 돌연변이 비율과는 무관하게 모두 동일한 결과를 제공하였다. 따라서 상기한 MCGA 파라미터들은 적절한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 문제 및 모형과 동일한 기존의 연구가 전무하기 때문에, 여기서의 실험결과를 비교할 만한 참조 사례가 존재하지 않는다. 이러한 이유로 본 실험에서는 임의로 생성된 가상의 BA 네트워크 $G=(V, E)$ 와 VL 후보집합 A 를 대상

으로 [OVLC] 모형과 MCGA 해법을 적용하였다. 단, 임의로 생성된 네트워크가 현실에서의 그것과 최대한 유사하도록 Zegura *et al.*(1996) 등의 연구결과를 참조하였다. 즉, 네트워크 규모에 따른 한 라우터에 인접한 라우터들의 평균 개수, 두 라우터 간 최단경로상에 존재하는 평균적인 라우터의 개수 등에 대하여 Zegura *et al.*(1996)의 지침에 따르는 실험대상 네트워크를 임의로 생성하였다. VL e의 비용 w_e 도 특정 범위에서 임의로 추출된다(표 1의 주석 참조). <표 1>은 실험설계에 사용된 각종 파라미터들과 실험결과의 일부를 요약한 것이다.

의사결정 대안 G_Q 에 대한 각 속성별 효용함수는 Clemen (1996) 등을 참조하여 결정하였다. 그러나 효용함수의 형태에 따라서 방법론 자체가 변경되어야 하는 것은 아니다. 평가함수(총효용함수)에서 속성별 중요도를 결정하는 α 와 β 계수의 변화가 실험결과에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 양 계수의 상대적 크기를 다음 세 가지로 구별하여 실험한 뒤, 그 결과를 비교하였다: $\alpha/\beta = 0.5, 1, 2$. 계수비율에 따른 파레토 최적해 간 상이성 척도(dissimilarity metric)를 정의하기 위하여 먼저, 속성값의 특정한 조합 (x, y) 가 주어진 파레토 최적해 집합의 원소들과 (x, y) 사이의 유클리디안 거리(Euclidean distance)의 합을 최소로 할 때, 이를 파레토 최적해 집합의 중심(center)이라고 하자. 이러한 중심을 찾는 문제는 흔히 centroid 문제로 불리며, Weiszfeld 알고리즘에 의해 쉽게 계산된다(Francis, McGinnis Jr., & White(1992)). 또한, 주어진 최적해 집합의 범위(range)는 유클리디안 거리의 관점에서 가장 멀리 떨어진 두 파레토 최적해 사이의 거리를 의미한다. 이 경우, 두 파레토 최적해 집합의 상이성은 두 집합의 중심 간 거리와 평균적인 파레토 최적해 범위의 비율로 정의된다. 평가함수의 계수비율 변화에 따른 파레토 최적해 집합의 상이성 정도는, 특이성(outlier)을 제외했을

표 1. 실험 설계 및 결과

GA Parameters	초기 개체수	개체수	최대 세대수	교차 비율	돌연변이율
	100	50	100 (10)	50%	10%
Network Parameters	Topology Types	노드의 수	E의 밀집도* (Density of E)	VL 밀집도** (Density of A)	VL 비용*** (Cost Range)
		50	10%	20, 40, 60, 80%	1 to 10
Fitting Function	계수 (Coefficients)	α	1/3	1/2	2/3
		β	2/3	1/2	1/3
		α / β	0.5	1	2
	상이성 척도† (Average Dissimilarity, %)		38.2	5.2	10.4

* BA 링크의 밀집도는 완전 그래프(complete graph)에서의 링크수($|V||C_2$)에 대한 |E|의 상대적 비율을 의미함.
 ** VL의 밀집도는 |E|에 대한 |A|의 상대적 비율임.
 *** VL의 비용범위는 두 BA 라우터 간의 우회경로상에 일반적으로 존재하는 라우터 개수를 기준으로 결정된 범위임. 즉, 일반적으로 최대 10개 이상의 라우터를 경유하지는 않기에 10을 상한으로 설정하고, 최빈값(mode)을 6으로 하여(Zegura *et al.*, 1996 참조) 삼각분포(triangular distribution)를 정의하였음. VL 비용은 이 삼각분포로부터 생성됨.
 † 상이성 척도는 계수비율(α/β)별로 10번의 반복된 실험에서의 상이성 척도들의 평균값임.

때, 평균 0.3 이하이다. 이는 두 파레토 최적해 집합이 자신이 퍼진 정도에 비하여 상당 부분 중첩되고 있음을 말한다. 단, 특이성은 파레토 최적해 집합 자체가 1~3개의 소수로 구성되면서 이들이 밀집되어 있는 경우에 해당된다(<그림 3>을 참조). 이러한 경우에도 상이성 정도는 평균 1 이하로, 다른 파레토 최적해 집합과 역시 중첩되어 있다. 이상을 종합하면, 평가함수의 계수비율 변화는 적절한 수준에서 다양한 파레토 최적해를 찾는 긍정적인 역할을 하면서도, MCGA 자체를 불안정하게 하는 부정적인 기능은 미약하다고 결론지을 수 있다.

<그림 3>은, MCGA에서 임의로 선택한 초기 개체집단에서의 속성값 분포와 MCGA가 종료되었을 때의 개체집단에서의 속성값 분포를 비교하여 보여준다. 이 그림으로부터 본 연구에서 구현된 MCGA가 생성하는 개체집단이 세대를 거듭하면서 빠르고 효과적으로 파레토 효율집단으로 수렴해가고 있음을 알 수 있다. 또한 본 실험에서는 동일 네트워크에서 하나의 계수비율에 대하여 10회의 실험을 반복하였다. 이는 MCGA가 확률적 탐색(stochastic search)에 근거하고 있기 때문에, 동일 실험대상에 대한 반복된 실험결과가 일관되어야 제안된 모형과 MCGA가 높은 신뢰성을 가진다고 인정될 수 있기 때문이다. 그 결과 모든 네트워크 형태와 계수비율에 대하여 많은 파레토 최적해가 일치하였으며, 최적해 집합의 상당 부분이 서로 중첩되었다. 즉, <표 1>에서 보는 바와 같이, 위에서 사용한 파레토 상이성 척도에 따를 때, 10회 반복에서 파레토 최적해 간의 상이성의 평균은 각각 $0.382(\alpha/\beta=0.5)$, $0.052(\alpha/\beta=1)$, $0.104(\alpha/\beta=2)$ 에 불과하였다. 마지막으로 MCGA 실행시간은 20초에서 50초 이내였다. 상기의 자료들은 여기서 제안된 MCGA가

매우 안정적이며 효과적으로 파레토 최적해를 찾는다라는 강력한 증거로 보인다.

<그림 4>는 가용한 자원을 점차 확대함에 따라서(즉, VL의 밀도(density), $|A|$ 를 증가시킴에 따라서) 파레토 최적해에서 평균적으로 이용되는 VL의 개수를 보여준다. 예상했던 바와 같이, 사용될 수 있는 VL의 증가는 보다 많은 수의 VL이 최적해에서 사용되도록 한다. 이러한 관찰은 BA 네트워크의 연결성을 증가시킴으로써 얻는 편익이 보다 많은 VL을 구성하는 데 필요한 비금전적 비용의 증가를 충분히 상쇄할 수는 있음을 의미한다. 그러나 파레토 최적해에서 사용되는 평균적인 VL의 개수는 선형적(linearly)으로만 증가하므로, 편익의 크기가 다른 기준을 압도하는 지배적인 위치에 있는 것은 아니라는 사실을 확인할 수 있다. 이는 네트워크라는 구조의 특성상, 구조개선된 그래프에서 사용되는 링크가 추가될수록 단절점 제거에 미치는 효과가 비선형적으로(non-linearly) 배가됨을 고려하면, 자연스럽게 도출되는 결론이다. 즉, 최적해에서의 VL의 활용빈도는 이러한 기대에 미치지 못하게 되는데, 이는 VL 구성과 관련에 필요한 제반비용 때문이다. 따라서 편익과 비용이라는 두 가지 기준과 이들 사이의 상충관계를 반영하는 의사결정이 중요함을 시사한다.

<그림 4>는 또한 평가함수의 계수비율(α/β)에 따른 민감도 분석결과도 알려주는데, 모든 계수비율에서 동일한 증가형태를 보인다. 결국, 효용함수를 도입한 다기준 의사결정에서는

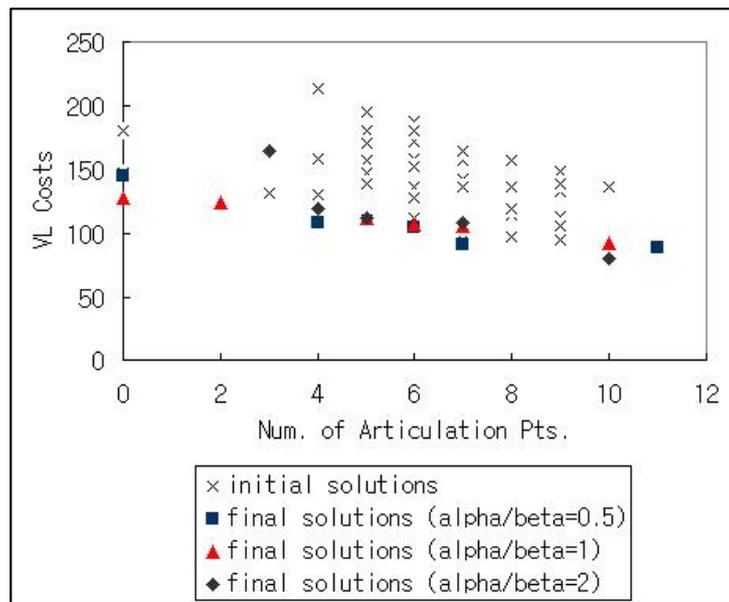


그림 3. MCGA에서 초기 개체집단과 종료시 개체집단(파레토 효율집합)의 비교($|A|$ 의 밀도(VL density)가 $|E|$ 의 80%에 해당하는 경우의 실험결과임).

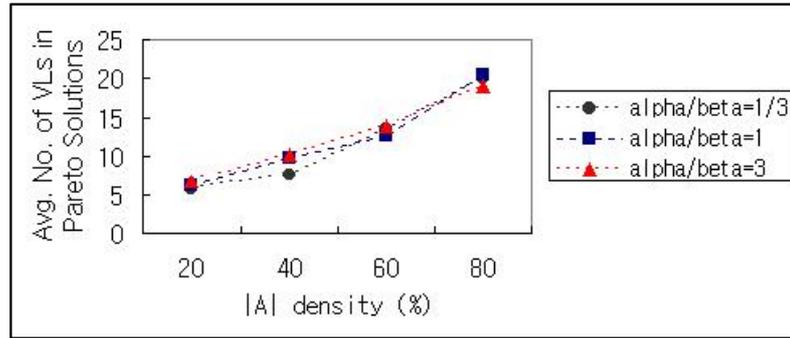


그림 4. 가용한 VL 수(|A|)의 증가에 따른 파레토 최적해에서의 평균적인 VL 개수의 변화(서로 다른 3가지 선은 각각 평가함수에서의 가중치 비율 ($\alpha/\beta = 0.5, 1.0, 2$)에 해당됨).

각 속성에 부여되는 우선순위(여기서는 평가함수의 계수 α, β) 선정에 신중함이 요구되는데 불구하고, 본 모형과 MCGA에서의 계수비율은 다양한 파레토 최적해 발견에 도움을 주는 순기능만 부각되며, MCGA 성능에 질적인 변화를 야기하는 불안정성을 초래하지는 않음을 다시 확인할 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 계층화된 LS AS에서 VL 시스템을 이용하여 BA 네트워크 토폴로지를 개선하기 위한 의사결정 모형과 MCGA를 이용한 해법을 제안하였다. 규모성 문제로 인하여 계층화된 LS AS에서 BA 토폴로지 구조가 라우팅 성능에 미치는 영향이 크다는 점을 고려할 때, 본 연구의 현실적 중요성은 자명하다고 하겠다. Moy(1998), Thomas & Thomas(2003) 등이 VL의 이용방안에 대한 기초적인 논의를 하고 있으나 아직까지 구체적인 방법론이 제시되어 있지는 않았다. 본 논문에서 제시되는 VL 운용방안은 (저자가 행한 기존의 문헌연구 범위 내에서는) 의사결정론적 관점에서 최초로 체계적인 접근법을 제공한다는 점에서 우선 그 의미를 찾을 수 있다.

실험결과를 고려할 때, 본 연구에서 제안된 [OVLC] 의사결정 모형의 가장 큰 의의는 다음과 같다. 즉, VL을 구현/유지/보수하기 위한 공학적 측면뿐만 아니라, 체계적으로 정의된 VL의 구체적 목적과 편익을 동시에 고려하는 것이 LS 네트워크 운용에서 중요하다는 점을 밝힌 것이다. 또한 제안된 MCGA는 효과적이며 빠르게 파레토 최적해를 발견하였으며, 평가함수를 구성하는 기준별(속성별) 계수의 상대적 크기에 비교적 중립적이고 안정적인 결과를 제공하였다. 실험결과에서 살펴본 바와 같이, 어느 한 측면만을 지나치게 강조하는 것은 비효율적인 네트워크 운영으로 귀착될 가능성이 높으며, 상기한 두

가지 기준을 적절히 조화시킬 수 있는 VL 구성이 현실적으로 중요하다.

참고문헌

- Bingul, Z., Sekmen, A., and Zein-Sabatto, S.(2000), Evolutionary Approach to Multi-objective Problems Using Adaptive Genetic Algorithms, Proc. IEEE Int. Con. on Systems, Man, and Cybernetics, 3, 1923-1927.
- Clemen, R.T.(1996), Making Hard Decisions: an Introduction to Decision Analysis, Duxbury Press.
- Francis, R.L., McGinnis Jr., L.F., and White, J.A.(1992), Facility Layout and Location (2nd Ed.), Prentice-Hall.
- Grotschel, M., Monma, C.L., and Stoer, M.(1995), Design of Survivable Networks, In Network Models (Ed.: Ball M.O. et al.), North-Holland, 617-672.
- Kim, D.(2003), A Framework for Hierarchical Clustering of Link-state Routing Domain, Lecture Notes in Computer Science, 2662, 839-848.
- Kim, D.(2002), The Virtual Link Operating System in Hierarchical Link-State Routing, Working Draft.
- Kim, D. and Tcha, D.W.(2000), Scalable Domain Partitioning in Internet OSPF Routing, Telecommunication Systems, 15, 113-128.
- Kim, J.R. and Gen, M.(1999), Genetic Algorithm for Solving Bi-criteria Network Topology Design Problem, Proc. 1999 Congress on Evolutionary Computation, 3, 2272-2279.
- Meunier, H., Talbi, E., and Reininger, P.(2000), A Multi-objective Genetic Algorithm for Radio Network Optimization, Proc. 2000 Congress on Evolutionary Computation, 1, 317-324.
- Moy, J.T. (1998), OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol, Addison Wesley.
- Parkhurst, William R.(2002), Cisco OSPF Command and Configuration Handbook, Cisco Press.
- Thomas, T. and Thomas, M.II.T.(2003), OSPF Network Design Solutions, Cisco Press.
- Zegura, E.W., Calvert, K.L., and Bhattacharjee, S.(1996), How to Model an Internetwork, Proc. IEEE INFOCOM 96, 3, 594-602.