
선박 백본 네트워크의 논리 토폴로지 재구성 기법

탁성우*

A Reconfiguration Technique of Logical Topology in a Ship Backbone Network

Sungwoo Tak*

요 약

본 논문에서는 연속적인 트래픽 요구 변화에 대처할 수 있는 선박 백본 네트워크의 논리 토폴로지 재구성 방안을 연구하였다. 제안한 기법은 트래픽 포워딩 경로의 변경을 최소화하며, 동시에 트래픽 포워딩 경로의 평균 홉 수를 최소화하여 선박 백본 네트워크의 성능을 향상시킨다. 제안한 재구성 기법의 성능 분석을 수행한 결과, 연속적인 재구성 처리 과정에서 우수한 성능을 보여 주었다.

ABSTRACT

This paper studies a series of logical topology reconfiguration processes corresponding to a series of traffic demand changes in a ship backbone network. The proposed reconfiguration technique is to minimize costly changes of traffic forwarding paths and minimize the average hop distance of traffic forwarding paths in terms of ship backbone network performance simultaneously. Performance evaluation is conducted to illustrate the efficiency of the proposed reconfiguration technique. It shows that the proposed reconfiguration technique yields efficient performance in the entire series of reconfiguration processes.

키워드

재구성, 선박 백본 네트워크, 논리 토폴로지, 최적화

Key word

Reconfiguration, Ship Backbone Networks, Logical Topology, Optimization

* 종신회원: 부산대학교 정보컴퓨터공학부 (교신저자, swtak@pnu.edu)

접수일자 : 2012. 01. 18

심사완료일자 : 2012. 02. 29

I. 서 론

국제 무역의 약 90%가 해상 운송으로 이루어지고 있으며, 유럽 해외 무역의 90%와 유럽 내 산업의 약 40%는 해상 운송으로 이루어지고 있다 [1]. 그리고 비벌크 (Non-bulk) 국제 운송의 약 90%가 최대 20피트 표준 컨테이너 15,000개를 실을 수 있는 컨테이너 선박으로 이루어지고 있다. 현재 IT 융합 기술을 적용한 지능형 컨테이너는 센서 네트워크 및 유무선 네트워킹 기술을 사용하여 컨테이너 내부 상황 및 컨테이너의 현재 위치 등을 실시간으로 제공할 수 있으며, 선박 백본 네트워크는 15,000개의 지능형 컨테이너와 연동하여 대용량 센서 데이터를 처리 및 관리할 수 있어야 한다. TRITON 프로젝트에서는 선박과 선박 그리고 선박과 근거리 항만 지역 간 고속 통신망을 제공하는 고속 해양 메쉬 네트워크 (High Speed Maritime Mesh Networks)의 개발 및 선박 백본 네트워크와의 연동을 연구한다 [2]. 한편, "Cruise Market Watch" 뉴스 기사에 의하면, 크루즈선은 현재 관광 산업의 중요한 부분을 차지하면서, 2010년에는 294억 달러 및 1,900만 명의 승객을 수용하였고, 앞으로 계속해서 증가하고 있는 추세이다. 인터넷 사용량의 증가와 함께 승객들의 스마트폰과 같은 모바일 IT 장비의 증가와 Skype와 같은 멀티미디어 서비스의 증가로 인하여 선박 산업에서 선박 백본 네트워크 분야는 매우 중요한 신성장 기술 및 시장을 차지할 것으로 기대된다. 이에 기존 고정 선박 장치들의 트래픽 패턴만을 고려한 선박 백본 네트워크는 향후 동적으로 변화 가능한 트래픽 패턴을 수용할 수 있어야 한다.

또한, 선박 백본 네트워크의 표준과 관련된 IEC 61162-450 [3]과 NMEA OneNet [4]에서는 물리 통신망 환경으로 기가비트 이더넷과 광통신망을 사용하며, 멀티캐스트 트래픽을 허용하기에 선박 백본 네트워크에서 처리해야 하는 트래픽의 양이 급격히 증가될 수 있다. 특히 NMEA OneNet은 선박 장치들이 선박 백본 네트워크에 동적으로 참여하거나 임의로 탈퇴하는 것을 허용한다. 따라서 선박 백본 네트워크의 구성이 임의로 변경될 수 있으며, 네트워크에 유입되는 트래픽 패턴이 동적으로 변화될 수 있다. 선박 백본 네트워크는 물리 토폴로지와 논리 토폴로지의 구성으로 이루어진다. 논리 토폴로지는 소스 노드와 목적지 노드간의 트래픽을 전달하는 포워딩 경로로 구성된다. 그리고 새로운 트래픽 요구

량이 요구되는 경우 논리 토폴로지의 형상을 재구성하는 과정이 필요하다. 논리 토폴로지를 재구성하는 과정에서 차후에 연속적으로 계속 발생하는 트래픽 변화량을 고려하지 않고 현재 시점의 트래픽 요구량만을 고려하는 경우, 이전에 설정된 트래픽 포워딩 경로에 대한 변화가 계속적으로 빈번하게 발생되어 네트워크 비용이 계속해서 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 연속적으로 변하는 트래픽 변화를 고려하여 논리 토폴로지의 재구성 변화를 최소화하고 동시에 네트워크 비용 및 성능을 향상시키는 방안을 고려하였다. 논리 토폴로지 재구성의 실행 시점과 실행 방법을 결정하는 논리 토폴로지 재구성 정책을 제안하여 연속적인 트래픽 변화에 따라 계속적으로 최적의 논리 토폴로지를 생성할 수 있도록 하였다.

참조 논문 [5]는 네트워크에서 처리해야 하는 트래픽의 양에 변화가 발생되면 트래픽 과부하를 재조정하는 네트워크 재구성 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 네트워크 체증을 최소화함과 동시에 포워딩 경로의 재설정 횟수를 감소시키고자 하였다. 참조 논문 [6]은 네트워크 재구성에서 요구되는 포워딩 경로의 재설정 횟수 대비 트래픽 부하 분산 수준 비율에 대한 상충적인 (tradeoff) 관계를 분석하였다. 이 기법에서는 네트워크 부하가 최대인 노드 대신 네트워크 부하가 최소인 노드를 포함하도록 포워딩 경로를 재설정하여 네트워크 부하를 적절하게 분산하고자 하였다. 선박 백본 네트워크의 성능 인자로는 포워딩 경로의 평균 홉 수와 평균 전파 지연 시간, 그리고 최대 네트워크 이용률과 네트워크 트래픽 패턴 등을 고려할 수 있다. 참조 논문 [7]에서는 포워딩 경로의 평균 홉 수와 평균 전파 지연 시간의 최소화를 고려하였다. 참조 논문 [8]에서는 네트워크 자원의 이용률을 최대화하여 네트워크를 재구성하는 동안 발생할 수 있는 트래픽 전송 단절 시간을 최소화하도록 하였다. 참조 논문 [9]에서는 다음 트래픽의 패턴을 미리 예측하여 네트워크의 논리 토폴로지를 재구성하였다. 지금까지 살펴본 논리 토폴로지의 재구성 기법은 오랜 시간 동안 동적으로 계속 변하는 트래픽 요구량을 고려하지 않고 현재 시점의 트래픽 요구량만을 고려하여 네트워크 재구성을 수행하였다. 따라서 연속적인 트래픽 요구 변화에 대처할 수 있는 논리 토폴로지의 재구성에 적용하기는 적절하지 못하다.

II. 목적 함수의 설계

이 장에서는 선박 백본 네트워크의 논리 토폴로지 재구성 과정에서 사용되는 2개의 목적 함수인 트래픽의 평균 홉 수를 최소화하는 *MAHN (Minimize Average Hop Number)*와 트래픽을 전달하는 포워딩 경로의 변경 수를 최소화하는 *MFPC (Minimize Forwarding Path Change)*를 기술하였다. 평균 홉 수는 단위 트래픽 당 경유되는 평균 홉 수를 나타낸다. 먼저 2개의 목적 함수를 동시에 고려하는 논리 토폴로지 재구성 과정을 살펴보면 다음과 같다. 논리 토폴로지를 재구성하는 첫 번째 과정에서 목적 함수 *MAHN*의 최적 결과를 생성하는 동안 다른 목적 함수 *MFPC*는 제약 조건으로 설정된다. 두 번째 과정에서 목적 함수 *MFPC*의 최적 결과를 생성하는 동안 다른 목적 함수 *MAHN*은 제약 조건으로 설정된다. 이러한 논리 토폴로지 재구성 과정은 최적 해 혹은 종료 조건이 만족될 때까지 반복 수행된다.

목적 함수 *MAHN*은 트래픽을 목적지까지 전달하기 위해 거쳐 가는 경로 홉 거리를 최소화하여 노드를 포함한 네트워크의 비용과 지연 시간을 감소시켜 선박 백본 네트워크의 성능을 향상시킨다. 또한 트래픽을 전달하는 경로의 홉 수가 증가할수록 요구되는 링크의 용량이 증가할 수 있으며, 네트워크의 생존 가능성 측면에서도 경로 홉 수가 짧을수록 네트워크 장애가 발생할 확률이 작아진다. 선박 백본 네트워크에서 논리 토폴로지를 재구성하기 위해서는 논리 토폴로지의 구성 요소인 포워딩 경로의 변경이 요구되며, 이에 따른 부가적인 오버헤드와 비용이 요구된다. 그리고 포워딩 경로의 변경 요구가 증가할수록 포워딩 경로 변경 동안 네트워크 서비스의 단절이 증가하며, 스위치 내에 버퍼링된 데이터의 손실 혹은 지연이 발생할 수 있다. 이에 목적 함수 *MFPC*는 재설정되는 포워딩 경로의 변경 횟수를 최소화한다.

목적 함수 *MFPC*에서 포워딩 경로를 변경하는 순서는 트래픽의 평균 홉 수를 고려하는 목적 함수 *MAHN*의 성능에도 영향을 미치며, 이는 향후 연속적으로 발생될 수 있는 논리 토폴로지 재구성 시점의 중요성을 보여준다. 예를 들어 T 를 전체 트래픽 요구량이라고 표기하고, n 번째 논리 토폴로지의 재구성 후에 노드 s 와 노드 d 까지 2개의 포워딩 경로 FP_1 과 FP_2 가 있다고 가정한다. 포

워딩 경로 FP_1 과 FP_2 는 각각 1만큼의 트래픽 용량과 x 홉과 y 홉으로 구성되며, $x > y$ 조건을 가진다. $(n+1)$ 번째 논리 토폴로지 구성에서 노드 s 와 노드 d 까지 1홉으로 구성된 포워딩 경로 FP_3 이 있다고 가정한다. 첫 번째 논리 토폴로지 구성 방식은 먼저 포워딩 경로 FP_1 에서 전달되고 있는 1만큼의 트래픽 용량을 포워딩 경로 FP_3 에 할당한다.

이때 포워딩 경로의 변경 횟수는 1이 되고, 평균 홉 수는 $(y+1)/T$ 가 된다. 그리고 포워딩 경로 FP_2 에서 전달되고 있는 1만큼의 트래픽 용량을 포워딩 경로 FP_3 에 할당하면, 포워딩 경로의 변경 횟수는 2가 되고, 평균 홉 수는 $(1+1)/T$ 가 된다. 이와는 다른 두 번째 논리 토폴로지 구성 방식은 다음과 같다. $(n+1)$ 번째 논리 토폴로지 구성에서 포워딩 경로 FP_2 에서 전달되고 있는 1만큼의 트래픽 용량을 포워딩 경로 FP_3 에 할당한다. 이때 포워딩 경로의 변경 횟수는 1이 되고, 평균 홉 수는 $(x+1)/T$ 가 된다. 그리고 포워딩 경로 FP_1 에서 전달되고 있는 1만큼의 트래픽 용량을 포워딩 경로 FP_3 에 할당하면, 포워딩 경로의 변경 횟수는 2가 되고, 평균 홉 수는 $(1+1)/T$ 가 된다. 첫 번째 논리 토폴로지 구성 방식과 두 번째 논리 토폴로지 구성 방식의 결과는 동일하다. 그러나 포워딩 경로 FP_1 이 FP_3 으로 바뀌는 경우와 FP_2 가 FP_3 으로 바뀌는 경우를 비교하여 보면, $(y+1)/T < (x+1)/T$ 이므로 목적 함수 *MAHN* 관점에서 첫 번째 경우가 더 좋은 성능을 보여준다.

$$\text{Min}(1/\sum_{sd} T_{sd}) \cdot \sum_{m,n} \sum_{s,d} \lambda_{sd,mn} \quad (1)$$

목적 함수 *MAHN*을 기술한 수식 (1)에서 T_{sd} 는 소스 노드 s 와 목적지 노드 d 간의 트래픽 용량을 나타낸다. $\lambda_{sd,mn}$ 는 소스 노드 s 와 목적지 노드 d 간의 포워딩 경로에 포함되는 홉 구간 $m-n$ 을 나타낸다. 수식 (1)은 T_{sd} 대비 $\lambda_{sd,mn}$ 비율을 최소화하여 소스 노드 s 와 목적지 노드 d 간의 트래픽이 거쳐 가는 평균 홉 수를 감소시킨다. 수식 (2)는 목적 함수 *MFPC*를 기술하였다.

$$\text{Min} \sum_{s,d} \sum_{m,n} |FP(n+1)_{sd,mn} - FP(n)_{sd,mn}| \quad (2)$$

수식 (2)는 n 번째 논리 토폴로지 재구성에서 소스 노

드 s 와 목적지 노드 d 간의 포워딩 경로 $FP(n)_{sd,mm}$ 이 거쳐 가는 홉 구간 $m-n$ 과, $n+1$ 번째 논리 토폴로지 재구성에서 포워딩 경로 $FP(n+1)_{sd,mm}$ 이 거쳐 가는 홉 구간 $m-n$ 간의 차이를 최소화한다. 지금까지 살펴 본 2개의 목적함수인 $MAHN$ 과 $MFPC$ 는 서로 상충적인 관계이다. 예를 들어, 트래픽의 평균 홉 수를 최소화하기 위해 이전 논리 토폴로지를 구성하고 있는 포워딩 경로의 많은 변경이 요구될 수 있다. 또한 포워딩 경로 변화를 최소화하기 위해서는 홉 수가 많은 기존의 포워딩 경로를 계속 유지할 수도 있다. 이러한 상반된 2개의 목적 함수들은 상호 비지배적 (Non-dominated) 집합 (Pareto Front) 해를 생성하기 때문에 이들 중에서 최적 결과를 생성할 수 있는 해를 선출하고 재구성 실행 시점을 결정할 수 있는 논리 토폴로지 재구성 기법이 필요하다.

III. 논리 토폴로지 재구성 기법

본 논문에서 제안한 논리 토폴로지 재구성 기법의 동작 과정은 다음과 같다. 먼저 2개의 목적 함수, $MAHN$ 과 $MFPC$ 로부터 비지배적 집합 해를 생성하기 위해 유전자 알고리즘을 사용한다 [10]. 그리고 비지배적 집합에서 최적 해를 선출하고, 논리 토폴로지 재구성의 시점 및 실행을 결정하는 논리 토폴로지 재구성 정책 과정은 제안한 MDA (Markov Decision Action) 모델을 통해 수행된다. 먼저 비지배적 집합 해를 생성하기 위하여 본 논문에서 구현한 유전자 알고리즘의 구성을 살펴보면 다음과 같다. 첫 번째 단계에서 트래픽 요구량에 의해 구성되는 논리 토폴로지를 염색체 (Chromosome)로 표현하였다. 염색체는 $N \times (N-1)$ 스트링으로 표현되며, N 은 선박 백본 네트워크의 전체 노드 수를 나타낸다. 염색체 내의 각 셀들은 노드 s 부터 노드 d 간의 포워딩 경로를 전달하는 노드 s 의 스위치 입출력 포트를 나타낸다. 그리고 각 셀의 값은 논리 토폴로지를 구성하는 전체 포워딩 경로 집합 중에서 해당 포트를 통해 전달되는 포워딩 경로의 인덱스 리스트를 나타낸다. 주어진 트래픽 요구에 대한 초기 전체 포워딩 경로 집합은 최단 경로 알고리즘에서 각 링크의 거리를 1로 설정하여 구현한 최단 홉 경로 알고리즘을 사용하여 생성하였다.

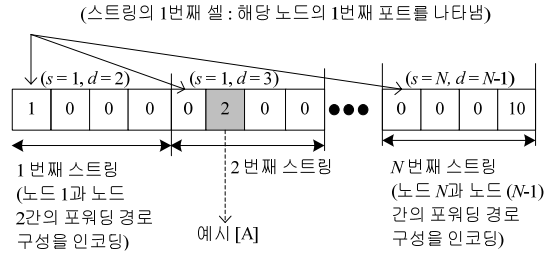


그림 1. 염색체 구성
Fig. 1 Chromosome structure

그림 1은 각 노드의 입출력 포트가 4개인 상황에서 논리 토폴로지를 염색체로 인코딩하였다. 그림 1의 예시 [A]에서 2 번째 스트링의 2 번째 셀은 전체 포워딩 경로 집합 중에서 2 번째 포워딩 경로가 노드 1과 노드 3간의 트래픽 전달을 담당하며, 노드 1의 2 번째 포트를 사용한다. 해당 포트를 사용하지 않는 경우 셀의 값은 0으로 설정한다. 최단 홉 경로 알고리즘을 사용하여 초기 전체 포워딩 경로 집합을 생성한 후에 한 세대에서도 다음 세대로 전해지는 후보 해들을 선택한다. 후보 해의 선택 방법은 토너먼트 선택 방식을 사용하였다 [10]. 교차와 변이 과정을 거쳐서 만들어진 새로운 해를 해집단에 추가하고 기존 해 중 열등한 해를 가려내서 제외시키는 토너먼트 선택 과정을 수행하여 상호 비지배적 해집합을 생성한다.

해집합을 생성하는 첫 번째 과정에서 목적 함수 $MAHN$ 의 최적 결과를 생성하는 동안 목적 함수 $MFPC$ 는 제약 조건으로 설정된다. 두 번째 과정에서 목적 함수 $MFPC$ 의 최적 결과를 생성하는 동안 목적 함수 $MAHN$ 은 제약 조건으로 설정된다. 이러한 과정은 이전 해집합보다 나은 해집합을 생성할 수 없거나 설정된 반복 횟수가 만족될 때까지 반복 수행된다.

유전자 알고리즘을 통해 생성된 비지배적 집합 해로부터 적합한 해결책을 선택하여 재구성 정책 과정을 수행하는 MDA 모델은 (1) 논리 토폴로지 상태의 집합, (2) 재구성 실행을 수행할 수 있는 행동의 집합, (3) 트래픽 변화와 행동에 따라 다음 상태의 논리 토폴로지 구성되는 전이 확률 (Transition Probability), 그리고 (4) 재구성 행동을 수행하였을 때 받는 보상과 비용으로 구성된다. 보상은 논리 토폴로지 재구성 과정에서 수행한 행동으로부터 얻을 수 있는 이익을 의미한다. 제안한 MDA 모

텔에서 사용되는 논리 토폴로지의 상태는 $(AvgHop, Util)$ 로 표현된다. $AvgHop$ 은 목적 함수 $MAHN$ 을 통해 생성된 결과를 나타내며, $Util$ 은 선박 백본 네트워크에 대한 논리 토폴로지의 이용률 (Utilization)을 나타낸다. 논리 토폴로지의 이용률은 수식 (3)과 같다.

$$\sum_{sd, Pareto\ Value} (Pareto\ Value \times T_{sd}) / (SW \times P \times FPC) \quad (3)$$

수식 (3)은 선박 백본 네트워크에서 포워딩될 수 있는 전체 트래픽 양 대비 생성된 논리 토폴로지에서 포워딩되는 트래픽 용량에 대한 비율을 의미한다. 수식 (3)에서 SW (Switch) 는 전체 스위치 노드의 수를 나타낸다. P (Port)는 스위치 포트의 수를 나타낸다. FPC (Forwarding Path Capacity)는 포워딩 경로가 전송할 수 있는 최대 트래픽 용량을 나타낸다. 목적 함수 $MAHN$ 을 기술한 수식 (1)에서 설명한 바와 같이, T_{sd} 는 소스 노드 s 와 목적지 노드 d 간의 트래픽 용량을 나타낸다. 그리고 선박 백본 네트워크의 용량이 모두 소진되지 않는 한, SW 와 P 및 FPC 값은 거의 변하지 않는다. 따라서 논리 토폴로지의 이용률은 $Pareto\ Value$ 와 T_{sd} 값에 의존적이다. $Pareto\ Value$ 는 비지배적 집합해 중에서 MDA 의 행동에 의해 선출되는 특정 해를 나타낸다. 논리 토폴로지의 재구성 동안 논리 토폴로지의 이용률을 최대화하기 위해서는 더 많은 포워딩 경로에 대한 변화가 요구될 수 있기 때문에 포워딩 경로 변화를 최소화하는 목적 함수와 서로 상충적인 관계가 형성된다. 이러한 상충된 관계로 인하여 상호 비지배적 집합해가 생성된다.

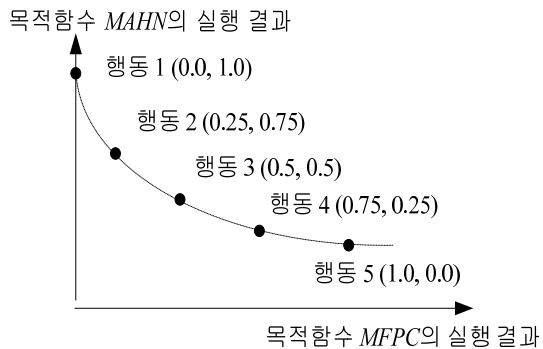


그림 2. 5개의 행동 집합으로 구성된 비지배적 집합해
Fig. 2 Pareto front with five actions

그림 2는 비지배적 집합해에서 특정 해 $Pareto\ Value$ 를 선택하여 논리 토폴로지 재구성 실행을 수행할 수 있는 5개의 행동 집합을 보여준다. 5개의 행동 집합에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

$$w_i = \frac{\left(\frac{\max(OBJ_i) - OBJ_i(Pareto\ Value)}{\max(OBJ_i) - \min(OBJ_i)} \right)}{\sum_{j=1}^2 \left(\frac{\max(OBJ_j) - OBJ_j(Pareto\ Value)}{\max(OBJ_j) - \min(OBJ_j)} \right)} \quad (4)$$

for $i, j = 1, 2$ and $OBJ_1 = MAHN, OBJ_2 = MFPC$

먼저 수식 (4)는 2개의 목적함수 $MAHN$ 과 $MFPC$ 로부터 생성된 비지배적 집합해의 가중치를 나타낸다. 그림 2에서 기술한 행동 집합을 구성하는 요소는 (w_1, w_2) 이다. w_1 는 목적함수 $MAHN$ 의 의사 가중치를 나타내며, w_2 는 목적함수 $MFPC$ 의 의사 가중치를 나타낸다. 행동 1은 (0.0, 1.0)에 가까운 파레토 해를 선택하며, 목적 함수 $MAHN$ 에 의해서 생성된 결과만을 고려한다. 행동 2는 (0.25, 0.75)에 가까운 파레토 해를 선택하며, 목적 함수 $MFPC$ 에 가중치 0.25를 부여하고 목적 함수 $MAHN$ 에 가중치 0.75를 부여한다. 행동 집합 위치에 해가 존재하지 않는 경우 해당 해에 가장 근접한 행동을 선택한다.

행동 k 를 선택하여 논리 토폴로지가 상태 i 에서 상태 j 로 전이되면서 생성되는 결과 $O_{ij}(k)$ 는 상태 전이에 따른 보상 $R_{ij}(k)$ 와 비용 $C_{ij}(k)$ 의 차로 계산된다. 논리 토폴로지의 재구성 과정동안 생성 결과 $O_{ij}(k)$ 를 최대화하기 위해 어떤 행동을 선택하는 것이 좋은지를 계속해서 결정한다. 보상 $R_{ij}(k)$ 는 행동 k 를 선택하여 논리 토폴로지의 상태 i 에서 상태 j 로 전이되는 과정동안 발생한 보상 값을 나타내며, $R_{ij}(k) = RW \times AHN_{ij}(k) + CF$ 로 정의하였다. RW 는 보상 가중치 (Reward Weight)를 나타내며, $AHN_{ij}(k)$ 는 행동 k 를 선택하여 논리 토폴로지가 상태 i 에서 상태 j 로 전이된 후에 사용되는 포워딩 경로의 평균 홉 수를 나타낸다. CF 는 제어 인자 (Control Factor)를 나타낸다. 비용 $C_{ij}(k)$ 는 행동 k 를 선택하여 논리 토폴로지의 상태 i 에서 상태 j 로 전이되는 과정동안 발생한 비용 값을 나타내며, $C_{ij}(k) = CW \times FPC_{ij}(k)$ 로 정의하였다. CW 는 비용 가중치 (Cost Weight)를 나타내며, FPC 는 포워딩 경로의 변경 수 (Forwarding Path Change)를 나타

낸다. $FPC_{ij}(k)$ 는 행동 k 를 선택하여 논리 토폴로지가 상태 i 에서 상태 j 로 전이되는 과정 동안 요구되는 포워딩 경로의 변경 횟수를 나타낸다.

$$Q_i(k) = \sum_{j=1}^n P_{ij}(k) O_{ij}(k) \quad (5)$$

수식 (5)는 상태 i 에서 행동 k 를 선택하여 생성 가능한 결과 $Q_i(k)$ 를 나타낸다. $P_{ij}(k)$ 는 행동 k 를 선택하여 논리 토폴로지의 상태 i 가 상태 j 로 전이될 확률을 나타낸다. $S_i(t)$ 는 상태 i 에서 시작하여 t 번째 전이에서 생성 가능한 기대 결과 값을 나타낸다. $S_i(t)$ 에서 다음 전이 상태 $S_i(t+1)$ 의 기대 결과 값은 수식 (6)에서 보는 바와 같이, $P_{ij}(k)$ 와 $O_{ij}(k)$ 에 의해 유도된다.

$$S_i(t+1) = \max_k \sum_{j=1}^n P_{ij}(k) [O_{ij}(k) + S_j(t)] \quad (6)$$

수식 (7)은 수식 (5)와 수식 (6)으로부터 유도된다.

$$S_i(t+1) = \max_k \left(Q_i(k) + \sum_{j=1}^n P_{ij}(k) \cdot S_j(t) \right) \quad (7)$$

지금까지 설명한 수식 (5)부터 수식 (7) 기반에서 최적 결정 해를 찾기 위하여 하워드 반복 순환 기법 [11]을 사용하였다. 이 기법은 가치 결정 연산 (Value Determination Operation)과 정책 개선 연산 (Policy Improvement Operation)으로 구성된다.

$$y = \left[Q_i(k) + \sum_{j=1}^n P_{ij}(k) \cdot S_j(t) \right] - S_i(t) \quad (8)$$

이득 값 y 를 생성하는 수식 (8)은 가치 결정 연산을 나타내며, $P_{ij}(k)$ 와 $Q_i(k)$ 에 의해 유도된다. 가치 결정 연산 기법은 재구성되는 논리 토폴로지의 가치를 계산하며 논리 토폴로지 재구성에 따른 이득 값을 구한다. 수식 (8)에서 보는 바와 같이 논리 토폴로지의 재구성은 행동 k 에 의존적이다. 따라서 최적 논리 토폴로지를 생성할 수 있는 행동 k 를 구하기 위해 정책 개선 연산을 수행한다.

$$\max_k \left(Q_i(k) + \sum_{j=1}^n P_{ij}(k) \cdot S_j(t) \right) \quad (9)$$

수식 (9)는 최적 행동 k 를 찾는 정책 개선 연산 수식을 보여준다. 가치 결정 연산과 정책 개선 연산은 현재 이득 값 y 보다 더 나은 이득 값 y' 이 생성되지 않을 때까지 반복 실행된다.

IV. 실험 및 성능 분석

성능 평가에서 사용되는 선박 백본 네트워크의 구성은 다음과 같다. 14개의 노드와 각 노드당 입출력 포트는 6개, 그리고 각 링크의 용량은 8로 구성하였다. 개별 노드끼리 교환되는 트래픽은 0과 8사이의 랜덤 분포로 생성하였으며, 30번의 논리 토폴로지 재구성 과정동안 계속해서 0과 8사이의 랜덤 분포로 새로운 트래픽 요구량을 생성하도록 하였다.

표 1은 이웃 노드간의 전파 지연 시간을 보여준다. 논리 토폴로지의 재구성 과정 동안 비지배적 해집합을 생성하기 위하여 실행되는 유전자 알고리즘에서 염색체간의 교차 확률은 0.6으로 설정하였고, 돌연변이 확률은 0.01로 설정하였으며, 비지배적 해집합의 크기는 50으로 설정하였다. III장에서 기술한 논리 토폴로지 재구성 기법에서 논리 토폴로지의 상태는 *AvgHop*과 *Util*로 구성된다.

본 논문에서는 2차원으로 구성된 논리 토폴로지 상태 집합을 1차원으로 구성된 상태 집합으로 감소시켜 논리 토폴로지 재구성 문제를 간소화시켰다. 일반적으로 포워딩 경로의 평균 홉 수가 증가할수록 논리 토폴로지의 이용률이 증가한다. 그리고 유전자 알고리즘의 모집단 크기가 증가할수록 포워딩 경로의 평균 홉 수를 감소시킬 수 있는 해를 생성할 가능성은 증가한다. 이에 본 논문에서는 모집단의 크기에 따라 포워딩 경로의 평균 홉 수를 측정 후, 평균 홉 수의 감소가 더 이상 감소되지 않는 모집단의 크기에서 최소 논리 토폴로지의 이용률 *Util* 값을 구한다. 그리고 연속적으로 변화하는 트래픽 요구량에 대하여 앞서 구한 최소 *Util*의 값을 적용시켜 논리토폴로지의 상태 (*AvgHop*, *Util*)에서 *AvgHop*만을 고려하도록 하였다.

표 1. 전파지연시간 (밀리초)
Table. 1 Propagation Delay (Milliseconds)

노드	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0.004	0.002	0.003	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
2	0.004	0	0.006	∞	∞	∞	∞	0.009	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	0.002	0.006	0	∞	∞	0.007	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
4	0.003	∞	∞	0	0.002	∞	∞	∞	∞	0.008	∞	∞	∞	∞
5	∞	∞	∞	0.002	0	0.005	0.002	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
6	∞	∞	0.007	∞	0.005	0	∞	∞	∞	∞	0.004	∞	0.007	∞
7	∞	∞	∞	∞	0.002	∞	0	0.002	∞	∞	∞	∞	∞	∞
8	∞	0.009	∞	∞	∞	∞	0.002	0	0.002	∞	∞	∞	∞	∞
9	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.002	0	∞	0.003	0.001	∞	0.001
10	∞	∞	∞	0.008	∞	∞	∞	∞	∞	0	∞	0.002	∞	0.001
11	∞	∞	∞	∞	∞	0.004	∞	∞	0.003	∞	0	∞	∞	∞
12	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.001	0.002	∞	0	0.001	∞
13	∞	∞	∞	∞	∞	0.007	∞	∞	∞	∞	∞	0.001	0	0.001
14	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.001	0.001	∞	∞	0.001	0

AvgHop은 연속적인 실수 값을 가질 수 있기 때문에 특정 구간으로 표현되는 이산적인 상태 구간으로 변환시킨 후 AvgHop을 구간의 중앙값으로 표현된다. 제한한 논리 토폴로지 재구성 기법의 실험 및 성능 분석 과정을 살펴보면 다음과 같다.

를 보여준다. 검색체 모집단의 크기가 클수록 평균 홉 수를 감소시킬 수 있는 해집단의 수가 증가하여 평균 홉 수의 성능이 향상되지만 모집단의 크기가 1300 이상부터는 성능 향상이 미비한 포화 상태가 되었다.

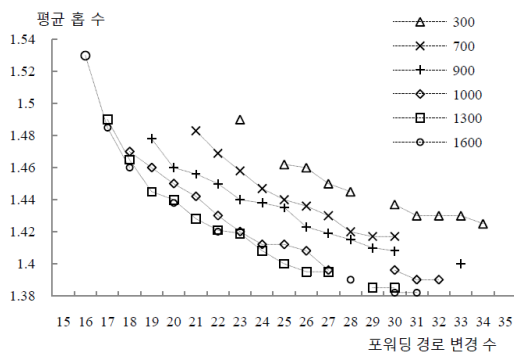


그림 3. 검색체 모집단 크기별 비지배적 해집합
Fig. 3 Pareto front according to chromosome population size

그림 3은 유전자 알고리즘에서 사용되는 검색체 모집단의 크기와 논리 토폴로지를 구성하는 포워딩 경로의 변경 수에 따라 생성되는 비지배적 해집합의 평균 홉 수

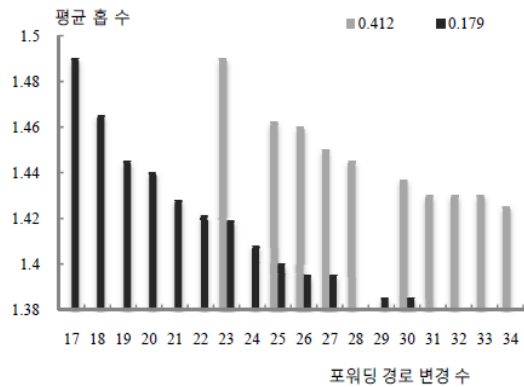


그림 4. 이용률에 따른 평균 홉 수
Fig. 4 Average hop number according to utilization

그림 4는 검색체 모집단별 비지배적 해집합의 평균 홉 수를 보여주는 그림 3의 실험 결과를 이용률에 따른 평균 홉 수로 재분석하여 보여준다. 그림 4에서는 트래픽의 평균 홉과 논리 토폴로지의 이용률로 구성된 상태

(*AvgHop*, *Util*)에서 *Util*을 고려한 비지배적 해집합의 평균 홉 수를 비교하였다. 모집단의 크기가 300일 때 *Util* 값은 0.412였고, 모집단의 크기가 1300일 때 0.179였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 *Util*값이 0.412인 경우 0.179인 경우보다 포워딩 경로의 평균 홉 수가 많음을 확인하였다.

최적 논리 토폴로지 재구성의 시점 및 실행을 선택하는 MDA 모델의 성능 평가 결과는 다음과 같다. *Util*값은 그림 3과 그림 4의 실험 결과에서 우수한 성능을 보여준 0.179로 설정하였으며, 행동 집합 해는 그림 2에서 제시한 5개의 행동으로 구성된다.

그림 3과 그림 4의 결과를 기반으로 하여 6개의 논리 토폴로지 상태를 설정하였다. 상태 1은 *AvgHop* 영역 1.35부터 1.40구간이며 중앙값이 1.375로 설정되고, 상태 2는 영역 1.41부터 1.45구간이며 중앙값이 1.425, 상태 3은 영역 1.46부터 1.50구간이며 중앙값이 1.475, 상태 4는 영역 1.51부터 1.55구간이며 중앙값이 1.525, 상태 5는 영역 1.56부터 1.60구간이며 중앙값이 1.575. 그리고 상태 6은 영역 1.61부터 1.65구간이며 중앙값이 1.625로 설정하였다.

보상 $R_{ij}(k)$ 와 비용 $C_{ij}(k)$ 에서 사용되는 변수 값의 설정은 다음과 같다. 실험을 통해 $R_{ij}(k)$ 에서 기술한 *AHN* 값은 비지배적 해집합 구간 1.35부터 1.65 내에서 존재하며, $C_{ij}(k)$ 에서 기술한 *FPC* 값은 20부터 50 내에 존재한다. 따라서 $FPC = 20$ 에서 $AHN = 1.65$ 로 설정하고, $FPC = 50$ 에서 $AHN = 1.35$ 로 설정한 후 가중치 *RW*를 다음과 같이 유도하였다. $RW = (50 - 20) / (1.35 - 1.65) = -100$, $CF = 185$, 그리고 $CW = 1$ 로 설정하였다. 여기에서 *AHN*이 1.65이고 *FPC*가 20이 되는 경계 부분과 *AHN*이 1.35이고 *FPC*가 50이 되는 경계 부분에서 논리 토폴로지의 상태가 *i*에서 *j*로 전이될 때 생성되는 결과 $O_{ij}(k)$ 값이 0이 되도록 *CF* 값을 185로 설정하였다.

표 2는 수식 (5)부터 수식 (9)까지 사용되는 전이 확률 $P_{ij}(k)$ 값을 기술하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 낮은 행동 번호 *k*를 가지고 논리 토폴로지의 재구성 과정을 수행하는 경우 높은 번호를 가진 상태 *j*로 전이될 가능성이 높도록 전이 확률 $P_{ij}(k)$ 값을 설정하였다. 그리고 높은 행동 번호 *k*를 가지고 논리 토폴로지의 재구성 과정을 수행하는 경우 낮은 번호를 가진 상태 *j*로 전이될 가능성이 높도록 전이 확률 $P_{ij}(k)$ 값을 설정하였다.

표 2. 전이 확률 $P_{ij}(k)$
Table. 2 Transition probability $P_{ij}(k)$

<i>i</i>	<i>k</i>	$P_{ij}(k)$						$Q_i(k)$
		<i>j</i> = 1	2	3	4	5	6	
1	1	0.02	0.08	0.3	0.6	0	0	15.10
	2	0.05	0.15	0.6	0.2	0	0	13.75
	3	0.08	0.2	0	0	0	0	18.5
	4	0.9	0.1	0	0	0	0	15
	5	1	0	0	0	0	0	11.5
2	1	0.05	0.15	0.65	0.08	0.06	0.01	17.6
	2	0.01	0.68	0.31	0	0	0	16
	3	0.2	0.8	0	0	0	0	13.5
	4	0.7	0.3	0	0	0	0	11
	5	0.9	0.1	0	0	0	0	7
3	1	0	0.1	0.7	0.1	0.08	0.02	12.4
	2	0.05	0.9	0.05	0	0	0	12.5
	3	0.35	0.55	0.08	0.02	0	0	8.65
	4	0.6	0.4	0	0	0	0	4.5
	5	0.8	0.2	0	0	0	0	0.5
4	1	0	0.05	0.1	0.5	0.2	0.15	6
	2	0.05	0.1	0.7	0.15	0	0	5.75
	3	0.3	0.6	0.1	0	0	0	5.5
	4	0.6	0.35	0.05	0	0	0	4.25
	5	0.9	0.08	0.02	0	0	0	2.9
5	1	0	0	0	0.02	0.18	0.8	-1.40
	2	0	0	0.1	0.7	0.2	0	-1
	3	0.05	0.1	0.7	0.15	0	0	-2.25
	4	0.3	0.6	0.1	0	0	0	-4.5
	5	0.6	0.3	0.1	0	0	0	-10
6	1	0	0	0	0	0.1	0.9	-7
	2	0	0	0	0.1	0.5	0.4	-12
	3	0	0.05	0.15	0.7	0.08	0.02	-11.85
	4	0.3	0.6	0.1	0	0	0	-9.5
	5	0.6	0.3	0.1	0	0	0	-15

이러한 $P_{ij}(k)$ 조건에서 높은 번호를 가진 상태 *i*에 비해 낮은 번호를 가진 상태 *i*가 더 높은 $Q_i(k)$ 값을 생성하도록 하였고, 임의의 상태 *i*에서 낮은 상태 *j*로 전이되는 경우에 더 나은 $O_{ij}(k)$ 결과를 생성한다. 앞서 설명한 바와 같이 상태 1에서는 *AvgHop*이 1.375이고, 상태 6에서는 1.625이다. 이러한 설정 값을 기반으로 하여 논리 토폴로지의 재구성 정책은 낮은 번호를 가진 상태 *j*로 전이시켜 네트워크의 평균 홉 수가 최소화되도록 하였으며,

최적 결정 해를 찾기 위하여 하위드 반복 순환 기법을 적용하였다.

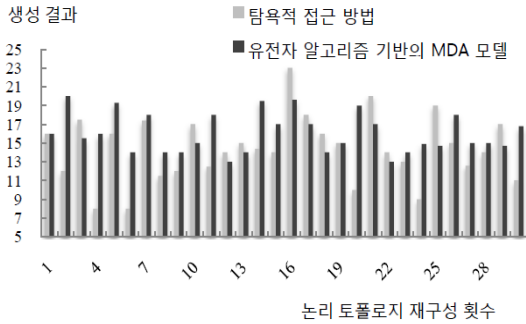


그림 5. 논리 토폴로지 재구성의 개별 생성 결과
Fig. 5 Individual outcome of logical topology reconfiguration

유전자 알고리즘을 통해 생성된 비지배적 집합 해로부터 연속적인 트래픽 요구 변화에 대처할 수 있는 최적 해를 선택하여 논리 토폴로지 재구성을 수행하는 MDA 모델은, 연속적인 트래픽 요구 변화를 고려하지 않고 현재 시점에서 즉각적으로 (immediate) 좋은 해를 생성하는 탐욕적 접근 방법 (Greedy Method)과 비교하였다. 그림 5는 논리 토폴로지의 재구성이 연속적으로 실행되는 동안 생성된 개별 결과 값을 보여준다. 그리고 그림 6은 1회부터 30회까지 실행되는 개별 생성 값을 계속해서 누적한 결과를 보여준다.

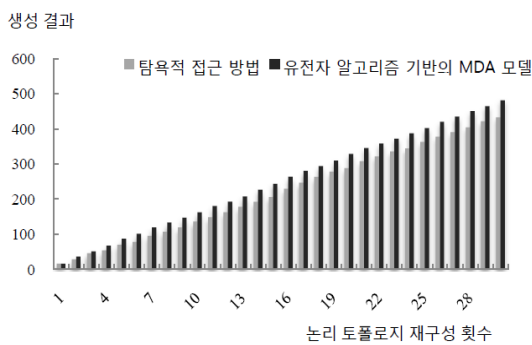


그림 6. 논리 토폴로지 재구성 동안 축적된 생성 결과
Fig. 6 Accumulated outcomes of logical topology reconfiguration

그림 5에서 보는 바와 같이, 논리 토폴로지 재구성의 일부 구간에서는 탐욕적 접근 방법의 생성 결과가 우수함을 보여 주었다. 그러나 1회부터 30회까지 실행되는 논리 토폴로지 재구성에서 생성되는 개별 생성 값을 계속해서 누적한 결과를 보여주는 그림 6에서는 연속적인 트래픽 요구 변화에 대처할 수 있는 유전자 알고리즘 기반 MDA 모델의 성능이 우수함을 보여 주었다.

V. 결론

본 논문에서는 연속적인 트래픽 요구 변화에 대처할 수 있는 선박 백본 네트워크의 논리 토폴로지 재구성 기법을 제안하였다. 논리 토폴로지 재구성 과정에서 트래픽의 평균 홉 수를 최소화하는 목적 함수 MAHN과 포워딩 경로의 변경 수를 최소화하는 목적 함수 MFPC를 사용하였다. 그리고 2개의 목적 함수로부터 비지배적 집합 해를 생성하기 위하여 유전자 알고리즘을 사용하였다. 마지막으로, 비지배적 집합에서 최적 해를 선출하고 논리 토폴로지 재구성의 시점 및 실행을 결정하는 MDA 모델을 제안하였다. 제안한 기법의 실험을 수행한 결과, 연속적인 트래픽 요구 변화에 대처하는 논리 토폴로지 재구성의 우수한 성능을 보여 주었다.

참고문헌

- [1] ICS/ISF (International Chamber of Shipping and International Shipping Federation), available at http://www.marisec.org/shipping_facts/worldtrade, Shipping and World Trade Report, 2011.
- [2] J.S. Pathmasuntharam, J. Jurianto, P.Y. Kong, Y. Ge, M. Zhou, and R. Miura, "High speed maritime ship-to-ship/shore mesh networks," Proc. of International Conference on ITS Telecommunications, pp. 1-6, 2007.
- [3] IEC61162-450, "Multiple talkers and multiple listeners - ethernet interconnection," 2011.
- [4] NMEA OneNet Draft, "Standard for serial-data networking of marine electronic devices," 2011.

- [5] N. Tam and E. Modiano, "Dynamic load balancing for WDM-based packet networks," Proc. of IEEE INFOCOM, pp. 1010-1019, 2000.
- [6] K. Lee and K. Siu, "On the reconfigurability of single-hub WDM ring networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 11, no. 2, pp. 273-284, 2003.
- [7] J. Zheng, B. Zhou, and H. T. Mouftah, "Design and reconfiguration of logical private networks (VPNs) over all-optical WDM networks," Proc. of International Conference on Computer Communications and Networks, pp. 599-602, 2002.
- [8] H. Takagi, Y. Zhang, and X. Jia, "Reconfiguration heuristics for logical topologies in wide-area WDM networks," Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 2701-2705, 2002.
- [9] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiomoto, and M. Murata, "Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 18, no.14, pp.177-189, 2010.
- [10] M. Gen and R. Cheng, Genetic algorithms and engineering optimization, Wiley-Interscience, 2000.
- [11] R. Howard, Dynamic programming and Markov process, M.I.T. Press, Cambridge, 1960.

저자소개



탁성우(Sungwoo Tak)

2003년 2월 미주리주립대학교
Computer Science 박사
2004년~현재 부산대학교
정보컴퓨터공학부 부교수

※관심분야: 유무선 네트워크, 위치인식