
생존 가능한 선박 백본 네트워크 설계에 관한 연구

탁성우* · 김혜진** · 김희겸** · 김태훈*** · 박준희**** · 이광일****

A Study on the Design of a Survivable Ship Backbone Network

Sungwoo Tak* · Hyejin Kim** · Heekyum Kim** · Taehoon Kim*** · Junhee Park**** · Kwangil Lee****

본 연구는 지식경제부의 지원을 받는 정보통신 표준화 및 인증지원사업의 연구결과로 수행되었음

요 약

본 논문에서는 생존 가능한 선박 백본 네트워크의 설계 기법을 제안하였다. 제안한 설계 기법에서 선박 백본 네트워크의 토폴로지를 근사 최적으로 구성하기 위하여 먼저 선박 장치의 통신 인터페이스와 링크가 이중화로 구성된 선박 백본 네트워크의 효율적인 구조를 분석 및 제안하였다. 그리고 제안한 선박 백본 네트워크의 구조를 고려한 정수선형계획법 기반 물리 토폴로지의 구성 방안을 제안하였다. 마지막으로 메타 휴리스틱 기법을 적용하여 물리 토폴로지 계층 위에서 형성되는 논리 토폴로지의 구성 방안을 제안하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a design technique of a survivable ship backbone network, which describes a near optimal configuration scheme of physical and logical topologies of which the survivable ship backbone network consists. We first analyze and present an efficient architecture of a survivable ship backbone network consisting of redundant links and ship devices with dual communication interfaces. Then, we present an integer linear programming-based configuration scheme of a physical topology with regard to the proposed ship backbone network architecture. Finally, we present a metaheuristic-based configuration scheme of a logical topology, underlying the physical topology.

키워드

선박 백본 네트워크, 생존성, 근사 최적화, 물리 토폴로지, 논리 토폴로지

Key word

Ship backbone network, Survivability, Near optimality, Physical topology, Logical topology

* 종신회원 : 부산대학교 컴퓨터공학과 (교신저자, swtak@pusan.ac.kr)

접수일자 : 2012. 03. 07

** 준회원 : 부산대학교 컴퓨터공학과

심사완료일자 : 2012. 03. 30

*** 정회원 : 부산대학교 컴퓨터공학과

**** 정회원: 한국전자통신연구원

I. 서 론

현재 국내 조선 기술과 IT 기술은 각각의 해당 분야에서 세계 최상위의 위상을 유지하고 있다. 또한 IT와 조선 기술 간의 융합을 통해 새로운 산업 및 기술 분야를 창출할 수 있는 연구 개발이 다양하게 진행되고 있다. 일반적으로 중대형급 선박에 탑재되는 총 기자재 수는 통상 400 종류 이상이며, 선박 건조 단가의 60% 이상을 차지하고 있다. 그 중 IT관련 기자재가 15% 정도를 차지하고 있으며, 점점 더 증가하고 있는 추세이다[1].

현재 선박업계에서는 선박 기술과 IT 기술이 융합된 스마트 선박 플랫폼 개발을 목표로 여러 단계의 추진 전략을 기획하고 있으며, 그 중 첫 번째 단계에 포함되고 있는 것이 선박 백본 네트워크이다. 최근 들어 선박 운용의 편의성과 정밀성을 향상시킬 수 있는 선박 정보화 장비들이 증가하고 있는 추세이다. 이에 최대 50개의 장비와 250Kbps 대역폭을 제공하는 CAN (Controller Area Networks) 기반 기존 선박 백본 네트워크를 대체할 수 있는 차세대 선박 백본 네트워크의 필요성이 대두되고 있다 [2]. 차세대 선박용 백본 네트워크는 자동화 및 무인화 특징을 가지는 스마트 선박 플랫폼에 구축되기에 고수준의 생존성을 요구한다. 충돌, 침수 등과 같은 선박 사고에 의하여 선박용 백본 네트워크에서 발생하는 통신망의 결손은 운항 장애를 유발할 뿐만 아니라 최악의 경우 인명 재해의 원인이 되기 때문이다.

현재 선박 네트워크의 표준은 IEC (International Electrotechnical Commission)와 NMEA (National Marine Electronics Association)를 중심으로 진행되고 있다. 네트워크 생존성을 다루고 있는 IEC 61162-410 표준은 이중화 통신 인터페이스 장치 및 링크로 구성된 선박 네트워크가 존재한다는 가정 하에 중복 메시지 전송 방식을 명세하고 있다 [3]. IEC 61162-450 표준은 이더넷 기반의 선박 백본 네트워크에서 선박 장치들 간의 안전한 메시지 전송 방식을 명세한다 [4]. IEC61162-450 표준은 IEC61162-410 표준과 다르게 중복 메시지 전송 방식을 사용하지 않으며, 멀티캐스트 기반 메시지 전송 방식을 사용한다. 그리고 IEC61162-450 표준은 IEC61162-410 표준과 유사하게 선박 백본 네트워크의 구조 및 생존성에 대한 명세는 고려하지 않았다. NMEA OneNet 표준은

기존 NMEA2000 기반 선박 백본 네트워크와 연동할 수 있는 이더넷 기반의 선박 백본 네트워크 플랫폼을 명세한다 [5]. 따라서 NMEA OneNet 표준은 NMEA 2000 표준과의 호환성을 제공할 수 있는 네트워크 연동 기술에 초점을 두고 있다.

지금까지 살펴본 바와 같이, 생존 가능한 선박 백본 네트워크와 관련된 표준화 작업 및 기존의 연구는 매우 미비한 실정이다. 이에 선박 백본 네트워크의 설계 기법을 제안하였다. 기존 관련연구를 살펴보면 다음과 같다. 참고 문헌 [6]에서는 단일 노드 혹은 단일 링크 장애 발생시 생존 가능한 백본 네트워크의 물리 토폴로지를 제안하였다. 참고 문헌 [7]에서는 복수 최단 경로 알고리즘을 이용하여 새로운 가입자 네트워크와 기존 통신망간의 연결 비용을 최소화하는 물리 토폴로지 구성 기법을 제안하였다. 그러나 참고 문헌 [6]과 [7]에서 제안한 기법은 백본 네트워크에 유입되는 트래픽을 전달하는 포워딩 경로들로 구성되는 논리 토폴로지를 고려하지 않고 단순히 물리 토폴로지의 생존성과 비용만을 고려하였다.

참고문헌 [8]에서는 노드 유사도 (node similarity)와 연결 계수 (connectivity)를 물리 토폴로지의 생존성 관점에서 분석하여 이러한 두 요소가 네트워크 생존성을 향상시키는 중요한 구성 요소임을 보여 주었다. 참고 문헌 [8]의 연구 결과를 통해 여러 물리 토폴로지 구조 중에서 풀 메쉬 구조가 가장 높은 노드 유사도 및 연결 계수를 제공할 수 있음을 유추할 수 있다. 참고 문헌 [9]에서는 전체 네트워크의 비용을 최소화하는 범위 내에서 네트워크에 유입되는 트래픽을 분산시켜 네트워크의 생존성을 높이고자 하였다. 그러나 전체 네트워크의 최소 비용만을 고려하기 때문에 특정 링크에 트래픽이 집중화되는 현상을 완전히 막을 수는 없다. 따라서 이러한 링크에 장애가 발생하는 경우, 장애에 영향을 받는 트래픽이 증가하게 된다. 이와는 다르게 참고 문헌 [10]에서는 풀 메쉬 네트워크에서 모든 링크에 트래픽을 균등하게 전송하여 특정 링크에 트래픽이 집중화되는 현상을 막고자 하였다. 이러한 균등 트래픽 할당 기법은 특정 링크에 트래픽이 집중화되는 현상을 막기 때문에 링크 장애에 영향을 받는 트래픽을 감소시킬 수 있다. 그러나 균등 트래픽 할당 기법이 여러 다른 네트워크 성능 인자에 미치는 영향에 대해서는 분석을 하지 않았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 선박 장치가 이중화 경로를 통해 서로 연결되는 선박 백본 네트워크의 물리 토폴로지 구조를 분석 및 제안하였다. III 장에서는 제안한 선박 백본 네트워크의 구조에서 비용 효율적인 선박 백본 네트워크의 물리 토폴로지 구성 기법을 기술하였다. 그리고 물리 토폴로지 계층 위에 형성되어 선박 장치 간의 메시지 전달을 담당하는 포워딩 경로들로 구성되는 논리 토폴로지의 설계 방안을 제안하였다. IV 장에서는 제안한 기법의 성능을 분석하였으며, 마지막으로 V 장에서는 결론을 기술하였다.

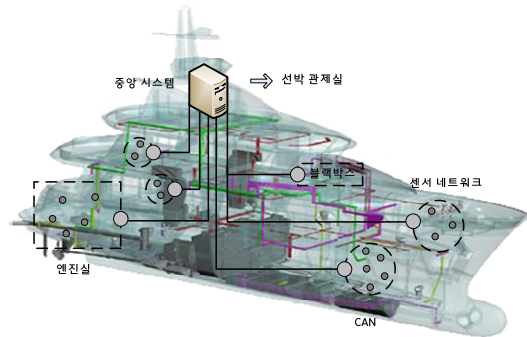


그림 1. 선박 백본 네트워크의 구성
Fig. 1 Configuration of a ship backbone network

II. 이중화 선박 백본 네트워크의 구조 분석

선박 장치 간의 통신 방식을 다룬 IEC 61162-410 표준은 선박 백본 네트워크에서 운용되는 전송 계층 프로토콜의 기능을 명세한다. IEC 61162-410 표준은 응용 계층에 ATP (Additional Transport-profile Protocol) 기반 전송 프로파일 계층을 정의하여 선박 장치가 이중화된 네트워크 인터페이스 카드를 통해 동일한 메시지를 중복 전송하는 기능을 담당한다. 이를 통해 선박 백본 네트워크의 부분 결손에 의해 선박 장치 간의 통신이 단절되는 위험을 감소시킬 수 있다. IEC 61162-410 표준은 이중화 선박 백본 네트워크의 토폴로지 환경을 가정한 것으로, 선박 백본 네트워크의 구체적인 토폴로지 명세는 포함하지 않고 있다. 그러나 선박 백본 네트워크의 생존성은 토폴로지 특성과 밀접한 관련이 있다. 이에 이중화 선박 백본 네트워크의 토폴로지 생존성을 먼저 분석하였다. 그림 1은 지역적으로 인접하거나 유사한 목적을 수행하는 선박 장치들을 묶어 소규모 서브 네트워크로 구성하는 기존 선박 백본 네트워크를 보여준다. 모든 서브 네트워크는 선박 관제실과 단일 링크로 직접 연결되어 중앙 선박 관제실에 위치한 브릿지를 통해 통합된다. 이러한 기존 선박 네트워크의 구성은 그림 2의 트리형 토폴로지로 구체화된다.

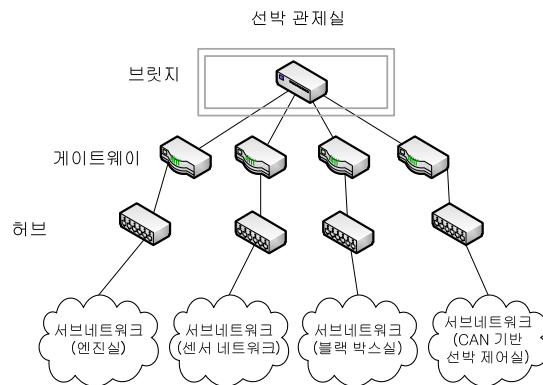


그림 2. 선박 백본 네트워크의 트리형 토폴로지
Fig. 2 Tree topology-based ship backbone network

트리형 토폴로지의 계층 구조는 네트워크 장애를 일정 영역으로 제한하여 일부 네트워크 장애가 전체 네트워크에 끼치는 영향을 최소화시킬 수 있다. 네트워크의 트리형 토폴로지에서도 가장 중요한 고려사항은 부모 노드와 자식 노드 간의 점대점 (Point to Point) 링크 구축이다. 일반적으로 200~ 400m의 길이를 가지는 선박의 규모를 감안하면 선박 백본 네트워크에서 점대점 링크들은 큰 제약사항이 되지 않으며, 링크 대역폭의 절반을 네트워크 장애 보호에 할당하는 환형 (Ring) 토폴로지보다 선박 백본 네트워크에 더욱 적합한 구조이다. 그러나 트리형 토폴로지에서는 네트워크 장애 발생 시 우회 경로가 존재하지 않기 때문에 네트워크 생존

성에 취약한 구조를 가진다. 그림 3은 이러한 문제점을 보완하며 IEC61162-410 표준에서 명시한 선박 장치의 이중화 인터페이스를 적용한 트리형 토폴로지를 보여 준다.

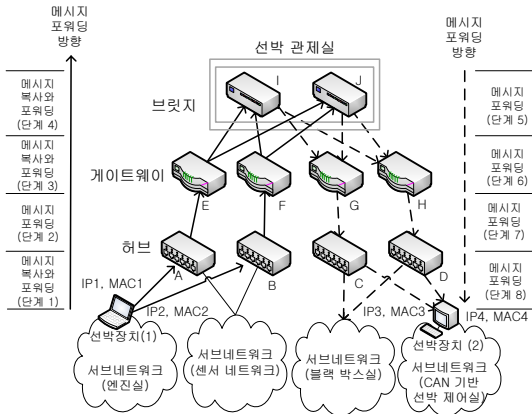


그림 3. 생존성을 고려한 트리형 토폴로지
Fig. 3 Survivable tree topology

그림 3은 그림 2에서 제시한 선박 백본 네트워크의 생존성을 개선시킨다. 그리고 선박 장치와 게이트웨이 및 브릿지 간의 이중화 연결을 통해 전체 네트워크가 2개의 독립적인 선박 백본 네트워크로 구성된다. 이러한 이중화 토폴로지 구조에서는 중복 메시지 전송이 가능하여 네트워크 장애가 발생하더라도 메시지가 안전하게 목적지 선박 장치까지 도달할 수 있다. 그림 3의 토폴로지에서 허브와 게이트웨이 간에 링크를 추가로 연결하여 부가적인 이중화 경로를 구성할 수 있다. 그러나 이러한 구성은 토폴로지 연결계수가 2를 증가시키지 못하며, Menger's Theorem [10]에서 언급한 분리 경로 개수 값도 그림 3에서 제시한 토폴로지의 분리 경로 개수 값인 2와 동일하다. 그리고 허브 간에 루프가 형성되어 링크 대역폭이 포화상태가 되는 브로드캐스트 스톰 (Broadcast Storm) 현상이 발생할 수 있다. 현재 국내외를 중심으로 활발히 연구되고 있는 자율 운항 제어 시스템 (INS : Intelligent Navigation System) [11]을 접목시켜 그림 3의 토폴로지보다 더 효율적인 고생존 선박 백본 토폴로지를 그림 4와 같이 제안하였다. 자율 운항 제어 시스템의 목표는 지능형 선박에서 운용되는 1인 제어 시스템 (One-man Bridge System)을 구축하는 것

이다. 이 시스템에서는 선박 관제와 관련된 의사 결정을 지원하며, 관제 정보를 취합하기 위해 다양한 선박 IT 장비가 필요하다. 그 중 선박 상태의 모니터링과 경보 발생을 담당하는 ICMS (Integrated Control and Monitoring System) [12]는 1인 제어 시스템의 핵심 요소이다.

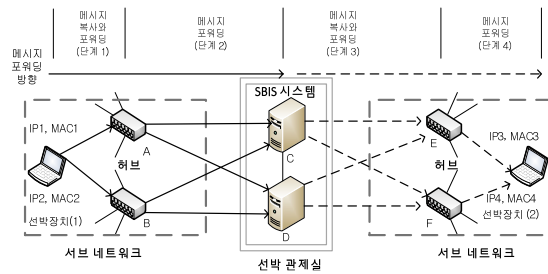


그림 4. SBIS 시스템 기반의 토폴로지
Fig. 4 SBIS system-based topology

그림 4에서 제시한 선박 백본 네트워크 토폴로지는 게이트웨이와 브릿지를 통합한 SBIS (Ship Backbone Internetworking System) 내에 ICMS의 하드웨어 모듈로 구현된다. 또한 통합 스위치는 그림 3에서 기술한 브릿지의 경로 배정 (Forwarding) 기능과 게이트웨이의 필터링 (Filtering) 기능을 통합하여 서브네트워크 사이의 연동을 지원한다. 네트워크 장애에 대한 생존성과 중복 전송 프로토콜의 효율성 관점에서 그림 3과 그림 4에서 제시한 토폴로지를 다음과 같이 비교 분석하였다.

먼저 확률 이론의 신뢰율을 통해 토폴로지의 생존성을 이론적으로 평가한다. 신뢰율은 다수의 네트워크 구성 요소에 장애가 발생한 상황에서 단말간의 전송 경로를 확보할 수 있는 가능성을 나타낸다. 포워딩 경로에 속해 있는 선박 장치 i 의 고장율이 P_i 이며, 최대 N 개의 직렬로 연결되어 있는 경우, 신뢰율은 $\prod_{i=1}^N (1 - P_i)$ 가 된다.

이는 직렬로 연결된 선박 장치의 수가 증가할수록 선박 백본 네트워크의 생존성이 저하됨을 보여 주고 있다. 따라서 그림 4에서 제시한 선박 백본 네트워크의 간단한 구조적 특징은 그림 3의 토폴로지보다 우수한 생존성을 보여준다. 또한 선박 백본 네트워크의 생존성은 독립적으로 분리된 주 경로와 백업 경로로 구성되는 선박 장치 간의 이중 세션 설정을 통해 향상될 수 있다. 이중 세션

을 통해 전송되는 중복 메시지는 장애 보호 (Fault Protection) 기반의 고생존성을 제공한다.

그림 3과 그림 4의 토폴로지에서 선박 장치 (1)와 선박 장치 (2)간의 메시지를 안전하게 전송하기 위해 중복 세션을 설정하였다. 먼저, 그림 3의 토폴로지에서 선박 장치 (1)이 이더넷 하드웨어 주소 MAC1을 가지는 통신 인터페이스를 통해 전송한 메시지 #1은 브릿지 I와 J로 전송된다. 그리고 브릿지 I는 이더넷 하드웨어 주소 MAC2를 가지는 선박 장치 (1)의 통신 인터페이스를 통해 전송된 동일한 메시지 #1도 수신한다. 최종적으로 선박 장치 (2)는 단계 1부터 단계 8까지를 통해 메시지 #1을 중복 수신한다. 이러한 과정을 통해 네트워크 장애가 발생한 경우에도 메시지를 안전하게 송수신할 수 있다.

그림 4의 토폴로지에서 중복 메시지를 전송하는 방법은 다음과 같다. 선박 장치 (1)에서 이더넷 하드웨어 주소 MAC1을 가지는 통신 인터페이스의 중복 전송 방식과 허브 A의 멀티캐스트 기능을 통한 중복 전송 방식을 고려할 수 있다. 통신 인터페이스의 중복 전송 방식에서는 선박 장치 (1)이 이더넷 하드웨어 주소 MAC1을 가지는 통신 인터페이스를 통해 메시지 #1을 SBIS 시스템 C와 D에 각각 전송한다. 서로 다른 MAC 주소를 가지는 2개의 SBIS 시스템에 메시지 #1이 도달하기 위해서는 선박 장치 (1)은 하나의 인터페이스를 통해 SBIS 시스템 C의 MAC 주소를 목적지로 메시지 #1을 전송하고, SBIS 시스템 D의 MAC 주소를 목적지로 메시지 #1을 전송한다.

이 방식 외에 단순한 하드웨어 멀티캐스트 기능을 사용하는 허브의 중복 전송 방식은 다음과 같이 동작한다. 선박 장치 (1)은 메시지 #1을 전송하면 허브 A는 멀티캐스트 기능을 사용하여 메시지 #1을 SBIS 시스템 C와 D에게 보내어 중복 전송하도록 한다.

지금까지 설명한 방식의 공통된 특징을 살펴보면, 각각의 선박 장치들은 1-Hop 너머에서 불확실하게 발생할 수 있는 네트워크 장애를 대처하기 위해 이웃 노드에게 메시지를 중복 전송한다. 이러한 불확실성은 메시지의 목적지로부터 송신지까지 후위 전파되는 특성을 가지므로, 네트워크에는 모두 최대 8개의 중복된 메시지가 흐르게 된다. 이러한 메시지 중복 전송 기능은 동시 다발적인 네트워크 장애 상황에서 송신지와 목적지 간에 하나의 전송 경로만 확보하면 안전한 메시지 전송을 보장

할 수 있다.

그러나 그림 3과 그림 4의 토폴로지에서 장애 보호만을 고려하여 메시지를 중복으로 전송하는 경우, 안정화된 네트워크에서는 중복 메시지로 인한 네트워크의 성능이 감소된다. 또한 중복 전송에 의해 동일한 정보를 담은 복수개의 메시지가 선박 백본 네트워크를 통해서 목적지 선박 장치의 프로토콜 스택에서 폐기되어 응용 계층까지 도달하지 않는다. 이러한 중복 메시지 전송은 선박 백본 네트워크의 생존성을 향상시키지 않으며, 네트워크의 처리량만을 감소시킨다. 따라서 동일한 네트워크 생존성을 나타내면서 중복 메시지의 개수를 줄일 수 있는 개선 방안이 요구된다. 선박 백본 네트워크에서 중복 전송 기능의 효율성을 개선하기 위해 본 논문에서 제안한 방식은 다음과 같다.

일반적으로 선박 백본 네트워크는 한 번 구축되면 선박 장치를 포함한 네트워크의 구성이 거의 변경되지 않는다. 따라서 선박 백본 네트워크는 네트워크 운용 전에 미리 설정된, 정적인 경로 배정 테이블을 유지한다. 그리고 그림 3과 그림 4에서 게이트웨이와 SBIS 시스템은 중복 수신한 메시지 중에 폐기될 것을 포위당하기 전에 미리 판단할 수 있다. 마지막으로 선박 통신 시스템에 장애가 발생하는 경우, 보호 기법 대신 복구 기법을 적용하여 네트워크 생존성을 제공하고, 중복 메시지의 개수를 감소시킬 수 있다.

그림 3의 토폴로지에서 선박 장치 (1)과 선박 장치 (2)는 2개의 중복 세션으로 연결된다. 1개의 세션은 선박 장치 (1)의 IP1, 허브 A, 게이트웨이 E, 브릿지 I, 게이트웨이 G, 허브 C, 그리고 선박 장치(2)의 IP3으로 설정된다. 다른 1개의 세션은 선박 장치 (1)의 IP2, 허브 B, 게이트웨이 F, 브릿지 J, 게이트웨이 H, 허브 D, 그리고 선박 장치(2)의 IP4로 설정된다. 브릿지 I와 게이트웨이 G를 연결하는 링크에 장애가 발생하고, 게이트웨이 F에 장애가 발생하는 경우에 브릿지 I는 선박 장치 (1)이 보낸 메시지를 선박 장치 (2)까지 전달할 수 없다. 이러한 메시지 전달의 불확실성은 후위로 전파되어 게이트웨이 E는 중복된 메시지를 전송해야 한다. 그리고 게이트웨이 E로부터 수신한 브릿지 I와 J는 각각 2개의 중복 메시지를 전송하여 총 4개의 중복 메시지가 전송된다.

그림 4의 토폴로지에서 선박 장치 (1)과 선박 장치

(2)는 2개의 중복 세션으로 연결된다. 1개의 세션은 선박 장치 (1)의 IP1, 허브 A, SBIS 시스템 C, 허브 E, 그리고 선박 장치(2)의 IP3으로 설정된다. 다른 1개의 세션은 선박 장치 (1)의 IP2, 허브 B, SBIS 시스템 D, 허브 F, 그리고 선박 장치(2)의 IP4로 설정된다. SBIS 시스템 C와 D는 허브 A와 B로부터 수신한 각각의 2개 중복 메시지 중에서 하나는 SBIS 시스템을 통해 필터링되어 버려진다. SBIS 시스템 C와 허브 E를 연결하는 링크에 장애가 발생하는 경우에, SBIS 시스템 C는 이웃 SBIS 시스템 D에 통지하여 경로 복원을 요청하여 허브 A로부터 수신한 메시지를 허브 E로 포워딩한다. 따라서 SBIS 시스템은 선박 장치 간의 두 세션에 각각 하나씩 대응하는 메시지만을 허브 E와 허브 F로 전송하여 2개의 중복 메시지로 선박 백본 네트워크의 생존성을 제공할 수 있다.

III. 물리 및 논리 토폴로지의 설계

이 장에서는 SBIS 시스템 기반의 선박 백본 네트워크를 고려한 물리 및 논리 토폴로지의 설계 기법을 기술하였다.

선박 백본 네트워크는 물리 토폴로지와 논리 토폴로지 로 세분화할 수 있다. 물리 토폴로지는 이중 선로로 구성된 물리 링크와 스위치 장비, 그리고 다양한 선박 장치로 구성된다. 논리 토폴로지는 송신 선박 장치와 목적지 선박 장치 간의 메시지를 전달하는 포워딩 경로들로 구성되는 오버레이 네트워크이다. 먼저 최소 비용 기반의 물리 토폴로지는 정수선형계획법 (Integer Linear Programming)을 사용하여 설계하였다. 설계하고자 하는 물리 토폴로지는 그림 4에서 보는 바와 같이 SBIS 시스템 및 SBIS 시스템에 연결되는 각 서브 네트워크의 액세스 장치인 허브로 구성되는 2계층 구조이다. 그리고 중단 선박 장치들은 허브에 최소 비용으로 연결하는 기법을 수행한다. 선박에서 SBIS 시스템과 허브를 설치할 수 있는 후보 지역은 N 개로 가정하였다. 물리 토폴로지의 설계에 사용되는 변수들은 표 1과 같다.

표 1. 물리 토폴로지의 설계에서 사용되는 변수
Table. 1 Variables used in the design of a physical topology

| 변수 | 설명 |
|-------------|--|
| N | 선박에서 SBIS 시스템과 허브가 설치 가능한 후보 위치들의 총 개수 |
| S | 설치하고자 하는 SBIS 시스템의 총 개수 |
| H_j | 후보 위치 j 에 SBIS 시스템이 설치되는 경우, 해당 SBIS 시스템에 연결될 수 있는 최대 허브 수 |
| $L_{i,j,k}$ | k 번째 SBIS 시스템의 후보 위치 j 와 후보 위치 i 간의 연결 비용 |
| $C_{j,k}$ | 후보 위치 j 에 k 번째 SBIS 시스템을 설치하는데 요구되는 비용 |
| $v_{i,j,k}$ | 후보 위치 i 의 허브가 후보 위치 j 에 설치된 k 번째 SBIS 시스템에 연결되어 있으면 1, 연결되지 않으면 0으로 설정되는 결정 변수 |
| $w_{j,k}$ | 후보 위치 j 에 k 번째 SBIS 시스템이 설치되면 1, 설치되지 않으면 0으로 설정되는 결정 변수 |
| D | 후보 위치 m 에 설치해야 할 선박 장치의 수 |
| K_n | 후보 위치 n 에 허브가 설치되는 경우 해당 허브에 연결되는 최대 선박 장치의 수 |
| E_n | 후보 위치 n 에 허브를 설치하는데 요구되는 비용 |
| y_n | 후보 위치 n 에 허브가 설치되면 1, 설치되지 않으면 0으로 설정되는 결정 변수 |
| x_{mn} | 후보 위치 n 에 허브가 설치되고 후보 위치 m 에 선박 장치가 설치되면 1, 설치되지 않으면 0으로 설정되는 결정 변수 |
| $cost_{mn}$ | 후보 위치 n 에 허브를 설치하고, 후보 위치 m 에 선박 장치를 설치하는데 요구되는 비용 |

목적 함수를 기술한 수식 (1)은 SBIS 시스템과 허브로 구성되는 물리 토폴로지를 최소 비용으로 설계하는 목적 함수를 나타낸다.

$$\min \sum_{k=1}^S \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N L_{i,j,k} v_{i,j,k} + \sum_{j=1}^N C_{j,k} w_{j,k} \right\} \quad (1)$$

수식 (1)의 첫 번째 항목은 허브를 설치하고자 하는 후보 위치 i 와 k 번째 SBIS 시스템을 설치하는 후보 위치 j 간 연결하는 최소 비용 링크의 선정을 나타낸다. 수

식 (1)의 두 번째 항목은 최소 비용으로 k 번째 SBIS 시스템을 설치하고자 하는 후보 위치 j 의 선정을 나타낸다. 수식 (1)의 목적 함수에 대한 제약 조건들은 다음과 같다.

허브와 SBIS 시스템을 포함한 총 N 개의 장치 중에서 후보 위치 j 가 k 번째 SBIS 시스템의 설치 지역으로 선정되면, 나머지 후보 위치에 설치되는 허브는 후보 위치 j 에 설치되는 SBIS 시스템에 연결되도록 하여 허브와 SBIS 시스템 간의 생존성을 고려하였다. 수식 (2)는 이러한 제약 조건을 나타낸다. 그리고 수식 (3)은 허브와 k 번째 SBIS 시스템간의 링크 개수를 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^N v_{ij,k} - (N-1)w_{j,k} \leq 1, \forall_j \text{ and } \forall_k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N v_{ij,k} = N, \forall_k \quad (3)$$

수식 (4)에서는 k 번째 SBIS 시스템이 1개의 후보 위치 j 에 설치 지역으로 선정되며, 수식 (5)는 후보 위치 j 에 설치되는 SBIS 시스템이 1개임을 나타낸다.

$$\sum_{j=1}^N w_{j,k} = 1, \forall_k \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^S \sum_{j=1}^N w_{j,k} \leq 1 \quad (5)$$

수식 (6)부터 수식 (8)까지는 SBIS 시스템간의 높은 노드 유사도 및 연결 계수를 제공하는 풀 메쉬 구조를 형성하도록 하여 선박 백본 네트워크의 고생존성을 고려하였다.

$$\sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^N v_{ij,k} - (S-1)w_{j,k} \geq 1, \forall_j \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N v_{ij,k} = S((N-S) + (S-1)/2) \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^S \sum_{j=1}^N w_{j,k} = S \quad (8)$$

수식 (6)은 후보 위치 j 가 k 번째 SBIS 시스템의 설치 지역으로 선정되면, 적어도 허브 스위치의 후보 지역 j 가 후보 지역 j 와 연결되어야 하고 나머지 $(S - 1)$ 개의 스위치 후보 지역간 연결을 나타낸다. 수식 (7)은 설치된 SBIS 시스템과 허브간의 전체 링크 수를 나타낸다. 수식 (8)은 전체 후보 지역에 설치될 SBIS 시스템의 개수를 S 개임을 나타낸다.

SBIS 시스템과 허브간의 물리 토폴로지 구성이 완성된 후에 정수선형계획법 기반의 허브와 선박 장치 간의 물리 토폴로지 구성은 다음과 같다.

$$\min \sum_{n=1}^{N-S} E_n y_n + \sum_{m=1n=1}^D \sum_{m=1}^{N-S} \text{cost}_{mn} x_{mn} \quad (9)$$

목적 함수를 기술한 수식 (9)는 허브와 선박 장치 간의 물리 토폴로지를 최소 비용으로 설계하는 목적 함수를 나타낸다. 수식 (9)의 첫 번째 항목은 허브를 설치하고자 하는 후보 위치 n 의 설치 비용이 최소화되는 지역을 선정한다. 그리고 수식 (9)의 두 번째 항목 후보 위치 n 에 허브를 설치하고, 후보 위치 m 에 선박 장치를 설치하는데 요구되는 비용이 최소화되는 지역을 선정한다. 수식 (9)의 목적 함수에 대한 제약 조건들은 다음과 같다.

$$\sum_{n=1}^{N-S} x_{mn} = 2, m = 1, \dots, D \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^D x_{mn} \leq K_n y_n, n = 1, \dots, N-S \quad (11)$$

수식 (10)에서는 후보 위치 m 에 설치된 선박 장치는 2개의 다른 허브에 연결됨을 나타내며, 선박 장치와 허브간의 이중화 연결을 보장하여 네트워크의 생존성을 제공한다. 수식 (11)에서는 후보 위치 n 에 설치되는 허브에 연결 가능한 선박 장치의 수를 나타낸다. 지금까지 살펴본 바와 같이, 수식 (1)부터 수식 (8)까지 기술한 정수선형계획법은 최소 비용으로 SBIS 시스템과 허브간 물리 토폴로지의 구성을 제공한다. 그리고 수식 (9)부터 수식 (11)까지 기술한 정수선형계획법은 최소 비용으로 허브와 선박 장치간 물리 토폴로지의 구성을 제공한다.

한편, 3개의 네트워크 성능 인자를 사용하여 논리 토 폴로지를 설계하였다. 첫 번째 네트워크 성능 인자는 *MinMaxLinkCapacity (Minimization of Maximum Link Capacity)*이다. *MinMaxLink-Capacity*는 주경로와 백업 경로가 사용하는 링크 용량의 최대값을 최소화한다. 이를 통해 네트워크 장애에 가장 심각하게 영향을 받을 수 있는, 즉 사용 용량이 최대인 링크를 경유하는 경로의 수를 최소화하고자 한다. 두 번째 네트워크 성능 인자는 *ShortestPathFirst (Shortest Path First)*이다. *Shortest PathFirst*는 주 경로와 백업 경로의 거리를 최소화한다. 따라서 주 경로의 장애 복구를 담당하는 백업 경로의 복구 시간을 최소화할 수 있다. 세 번째 네트워크 성능 인자는 *BalancedTrafficFlow (Balanced Traffic Flow Distribution)*이다. *BalancedTrafficFlow*는 네트워크에 유입되는 트래픽 양을 주 경로 및 백업 경로에 균등하게 할당한다. 이를 통해 네트워크 장애에 영향을 받을 수 있는 트래픽 흐름의 편차를 최소화할 수 있다. 이외에도 3개의 네트워크 성능 인자를 조합한 *MinCombination (Minimizing Combination of Maximum Link Capacity subject to BalancedTrafficFlow and Shortest Path First)*를 사용하였다. *MinCombination*은 다음과 같은 우선순위로 경로를 선택한다. 가장 높은 우선순위는 링크 용량의 최대값을 최소화하는 경로이다. 다음 우선순위는 네트워크에 유입되는 트래픽 양을 주 경로 및 백업 경로에 균등하게 할당하는 경로이다. 그리고 가장 낮은 우선순위는 최단 경로이다. 이러한 우선순위는 IV장에서 수행한 개별 네트워크 성능 인자의 평가 결과를 기반으로 하여 다른 네트워크 성능 인자 관점에서도 비교적 우수한 결과를 생성한 성능 인자 순으로 정하였다.

생존 가능한 논리 토폴로지를 구성하기 위해서는 이중화된 물리 토폴로지에서 주어진 네트워크 성능인자를 고려하여 주 경로와 백업 경로 간의 분리 경로를 설정한다. 이를 통해 네트워크 장애가 발생하는 경우에도 안전하게 메시지를 전송한다. 그리고 주어진 네트워크 성능 인자를 고려하여 송신 선박 장치와 목적지 선박 장치 간의 경로 탐색 및 설정을 수행한 후 논리 토폴로지를 구성한다. 이를 위해 근접 전역 탐색 알고리즘을 잘 알려져 있는 랜덤 워크 (Random Walk), 시뮬레이티드 어닐링 (Simulated Annealing), 그리고 타부 탐색 (Tabu Search) 기법을 사용하였다.

IV. 실험 및 성능 분석

제안한 선박 백본 네트워크의 설계 기법을 평가하기 위한 실험 환경은 다음과 같다. 먼저 허브와 SBIS 시스템의 후보 지역은 10개로 가정한다. SBIS 시스템간의 연결은 풀 매쉬 형태로 구성된다. 선박 장치의 개수는 50개부터 100개까지 10개 단위로 증가한다. 각각의 선박 장치는 자신을 제외한 임의의 선박 장치에게 1개의 균등 트래픽 흐름을 전송한다. 허브와 SBIS 시스템은 2개의 허브와 8개의 SBIS 시스템, 그리고 8개의 허브와 2개의 SBIS 시스템 사이에서 구성된다. 선박의 크기는 50m (폭) × 300m (길이) × 40m (높이)로 가정하였다. 허브 및 SBIS 시스템이 설치될 후보 지역 간의 링크 연결 비용은 거리 비용과 같고, 통합 스위치의 설치 비용은 통합 스위치가 선박 영역의 중심을 기준으로 하여 떨어진 거리만큼 비례하여 증가하도록 설정하였다. 표 2는 허브와 SBIS 시스템의 후보 지역 위치와 해당 위치에 시스템을 설치하는데 요구되는 비용을 보여준다.

표 2. 허브와 SBIS 시스템의 후보 지역 위치 및 비용
Table. 2 Costs and candidate sites of hubs and SBIS systems

| 후보 지역 | x 좌표 (폭) | y 좌표 (길이) | z 좌표 (높이) | 설치 비용 |
|-------|----------|-----------|-----------|--------|
| 1 | 42 | 254 | 6 | 10.631 |
| 2 | 24 | 114 | 23 | 3.614 |
| 3 | 15 | 226 | 17 | 7.671 |
| 4 | 13 | 169 | 32 | 2.548 |
| 5 | 25 | 79 | 11 | 7.157 |
| 6 | 33 | 153 | 10 | 1.315 |
| 7 | 36 | 147 | 1 | 2.216 |
| 8 | 15 | 19 | 19 | 13.138 |
| 9 | 42 | 30 | 13 | 12.140 |
| 10 | 20 | 4 | 7 | 14.666 |

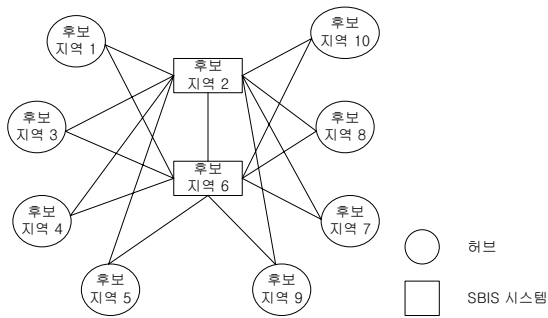


그림 5. 2개의 SBIS 시스템과 8개의 허브로 구성되는 물리 토폴로지
 Fig. 5 Physical topology configuration consisting of two SBIS systems and eight hubs

그림 5는 2개의 SBIS 시스템과 8개의 허브로 구성되는 물리 토폴로지를 보여준다. III장에서 기술한 정수선형계획법을 사용하였으며, 비용은 1477.153이다. 이 결과는 랜덤 워크와 타부 탐색 기법으로 생성된 물리 토폴로지의 구성 결과와 비교하여 최소 비용 값을 확인하였다.

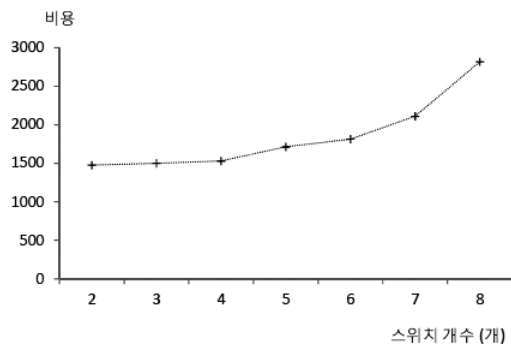


그림 6. SBIS 시스템 및 허브 개수에 따른 네트워크 비용
 Fig. 6 Network costs over varying the number of SBIS systems and hubs

그림 6은 SBIS 시스템 및 허브 개수의 변화에 따른 비용을 보여준다. 그림 6에서 SBIS 시스템의 개수가 증가하는 경우, SBIS 시스템 간의 풀 메쉬 구조로 인하여 연결 링크의 개수가 증가하며 비용도 증가한다. 이러한 이유로 SBIS 시스템의 개수가 허브의 개수를 초과하는 구간에서는 비용이 급격하게 증가하였다. 또한 물리 토폴

로지의 연결계수를 2로 계속 유지하면서 SBIS 시스템의 이중화 속성을 향상시키기 위해 SBIS 시스템의 개수를 증가시키더라도 Menger's Theorem에 의해 전체 네트워크의 생존성은 증가하지 않는다. 따라서 그림 6은 선박 백본 네트워크의 물리적 토폴로지에 대한 최적 구성이 필요함을 보여준다.

논리 토폴로지는 소스 노드와 목적지 노드간의 트래픽을 전달하는 포워딩 경로로 구성된다. 포워딩 경로는 송신 단말에서 목적지 단말까지 주 경로와 백업 경로로 구성되며 주 경로로 전달되는 트래픽의 양은 백업 경로로 동일하게 할당하였다. 논리 토폴로지를 구성하기 위해 사용된 랜덤 워크 (Random Walk), 시뮬레이티드 어닐링 (Simulated Annealing), 그리고 타부 탐색 (Tabu Search) 기법들이 생성된 결과 중에서 가장 좋은 결과 값을 선택하였다. 이 3개 기법 간의 성능 차이는 미묘하였다.

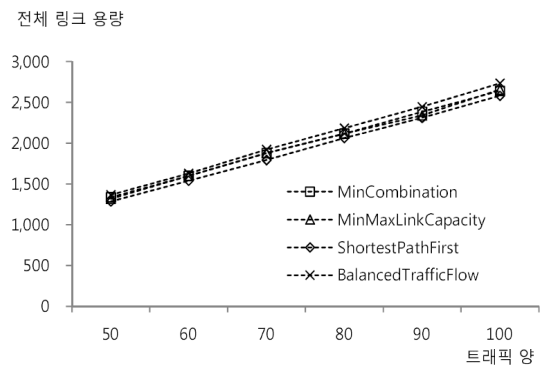


그림 7. 전체 링크 용량
 Fig. 7 Total link capacity

그림 7부터 그림 10까지는 III장에서 기술한 3개의 네트워크 성능 인자를 각각 고려하여 생성된 논리 토폴로지의 결과를 보여준다. 그리고 그림 6에서 스위치 개수가 5개 이상일 때부터 비용이 급격히 증가하기 시작하였다. 이에 논리 토폴로지의 성능 평가에 사용한 물리 토폴로지는 물리 토폴로지의 비용이 급격하게 증가하기 전의 물리 네트워크 환경인 6개의 허브와 4개의 SBIS 시스템으로 구성하였다. 또한 다른 물리 토폴로지 구성도 이러한 시스템 구성에서 생성된 결과와 유사하였다. 그림 7은 논리 토폴로지 구성에 사용된 전

체 링크 용량을 보여 준다. 그림 7에서 보는 바와 같이 각 네트워크 성능 인자에 대한 전체 링크 용량의 차이는 크지 않다. *ShortestPathFirst* 성능 인자는 최단 경로를 포워딩 경로로 선정하기 때문에 포워딩 경로가 사용하는 링크의 개수가 작아지는 경향이 있어 전체 링크 용량이 낮게 생성되었다. 그리고 링크 용량의 최대값에 대한 최소화를 고려하는 *MinMaxLinkCapacity*와 *MinCombination* 성능 인자에서도 낮은 전체 링크 용량이 생성되었다. *BalancedTrafficFlow* 성능인자인 경우, 유입되는 트래픽을 전체 네트워크에 균등하게 할당하기 때문에 최단 경로보다 더 많은 링크 개수를 포함하는 다른 우회 링크들을 탐색 및 설정하는 경향이 발생한다. 따라서 전체 링크 용량이 다른 성능 인자보다 증가하였다.

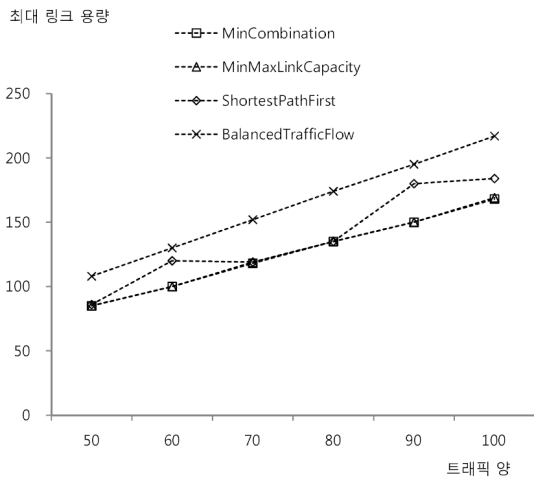


그림 8. 최대 링크 용량
Fig. 8 Maximum link capacity

그림 8은 논리 토폴로지를 구성하는 개별 링크들의 링크 용량 중에서 최대 링크 이용률을 보여 준다. 이를 고려하는 *MinMaxLinkCapacity*의 성능이 가장 우수함을 보여 주었으며, *MinCombination*의 성능도 *MinMaxLinkCapacity*의 성능에 매우 근접한 결과를 보여주었다. 앞서 기술한 바와 같이 *BalancedTrafficFlow* 성능인자는 유입되는 트래픽을 전체 네트워크에 균등하게 할당하는 것에 목적을 두기 때문에 좋은 성능을 보여주지 못하였다. 그리고 *ShortestPathFirst* 성능 인자는 최단 경로를 포

워딩 경로로 선정하기 때문에 최단 경로에 트래픽이 많이 집중화될 경향이 있어 우수한 성능을 보여주지 못하였다.

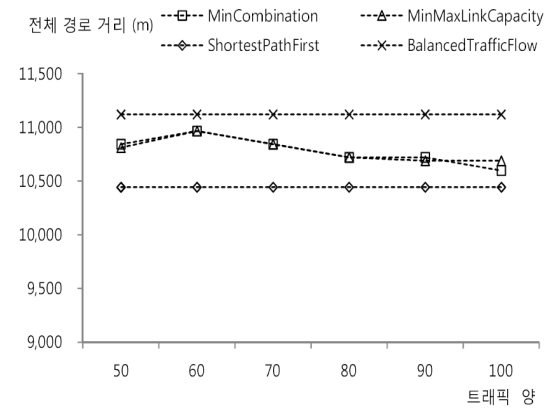


그림 9. 전체 경로 거리
Fig. 9 Total forwarding path distance

그림 9는 논리 토폴로지의 전체 경로 거리를 보여 준다. 경로 거리의 최소화를 고려하는 *ShortestPathFirst* 인자가 가장 좋은 성능을 보여 주었다. 트래픽 균등 분할을 고려하는 *Balanced-TrafficFlow*인 경우, 균등 분할을 수행하기 위하여 최소 경로보다 거리가 긴 우회 경로를 탐색해야 하는 경우가 빈번하게 발생하기 때문에 좋은 성능을 보여 주지 못하였다. 그리고 *MinCombination* 성능 인자인 경우, 링크 용량의 최대값을 최소화하는 경로를 먼저 고려하며, 이러한 경로가 여러 개 존재하는 경우 트래픽 양을 균등하게 배분할 수 있는 경로를 선택한다. 따라서 트래픽 양이 50과 90에서 *MinMaxLinkCapacity* 성능 인자보다 경로 거리가 다소 길어지는 경우가 발생하였다.

그림 10은 논리 토폴로지에 유입되는 트래픽의 흐름 편차를 보여준다. 트래픽 흐름을 균등하게 할당하는 *BalancedTrafficFlow* 인자가 가장 좋은 성능을 보여 주었다. 최단 경로만을 최우선적으로 고려하는 *ShortestPathFirst* 인자는 좋은 성능을 보여 주지 못하였다. *MinCombination* 인자는 *BalancedTrafficFlow*의 성능에 매우 근접한 결과를 보여주었다.

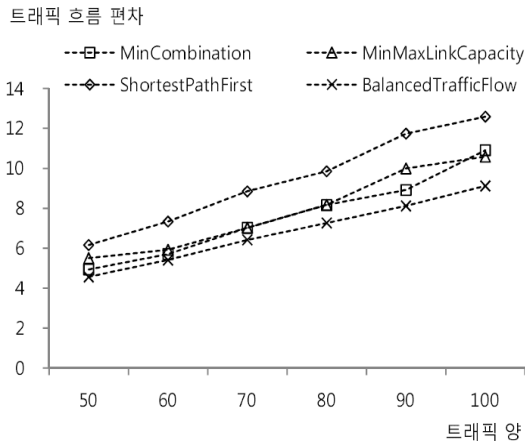


그림 10. 트래픽 흐름 편차
Fig. 10 Traffic flow deviation

그림 7부터 그림 10까지에서 보는 바와 같이 개별 네트워크 성능 인자들은 주어진 목적에 따라 좋은 성능을 생성하였다. *ShortestPathFirst* 인자와 *BalancedTrafficFlow* 인자인 경우 개별 성능에 대해서는 우수한 성능을 보여 주었지만, 다른 성능 인자 측면에서는 우수한 성능을 보여 주지 못하였다. 또한 3개의 네트워크 성능 인자를 동시에 고려하는 *MinCombination* 인자를 고려하여 생성된 논리 토폴로지의 성능을 시험한 결과, 여러 네트워크 성능 인자에 대하여 비교적 우수한 성능을 보여 주었다.

V. 결론

본 논문에서는 생존 가능한 선박 백본 네트워크를 구성하는 물리 토폴로지와 논리 토폴로지의 근사 최적 설계 기법을 제안하였다. 물리 토폴로지의 설계 기법에서는 효율적인 선박 백본 네트워크의 이중화 구조를 분석 및 제안하였다. 제안한 구조에서 선박 장치와 통신 시스템간의 최적 구성을 생성하는 정수선형계획법 기반 물리 토폴로지의 구성 방안을 제안하였다. 그리고 최대 링크 용량과 경로 거리, 그리고 트래픽 흐름 편차를 각각 최소화하는 논리 토폴로지의 구성 방안을 제안하였다. 제안한 설계 기법에 대한 성능 평가는 물리 토폴로지의 구성비용과 전체 링크 용량 및 개별 링크의 최대 용량,

그리고 경로 거리와 트래픽 흐름 편차와 같은 논리 토폴로지의 구성비용 관점에서 수행되었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원을 받는 정보통신 표준화 및 인증지원사업의 연구결과로 수행되었음

참고문헌

- [1] 박정호, 진광자, 김재명, 유대승, 오문균, 임동선, “조선 IT 현황과 전망,” 전자통신동향분석, 25권 45호, pp. 19-26, 8월, 2010.
- [2] NMEA 2000, “Standards for serial-data networking of marine electronic devices,” Main Document, version 1.2, 2004.
- [3] IEC61162-410, “Multiple Talkers and Multiple Listeners - Ship System Interconnection - Transport Profile Requirements and Basic Transport Profile,” 2001.
- [4] IEC61162-450, “Multiple talkers and multiple listeners - ethernet interconnection,” 2011.
- [5] NMEA OneNet Draft, “Standard for serial-data networking of marine electronic devices,” 2011.
- [6] S. Mandal, D. Saha, R. Mukherjee, and A. Roy, “An efficient algorithm for designing optimal backbone topology for a communication networks,” *Proc. International Conference on Communication Technology*, vol. 1, pp. 103-106, 2003.
- [7] H. Cancela, F. Robledo, and G. Rubino, “Designing low-cost access network topologies,” *Proc. International Network Optimization Conference*, pp. 825-832, 2005.
- [8] A. Dekker and B. Colbert, “Network robustness and graph topology,” *Proc. Australasian Conference on Computer Science*, vol. 26, pp. 359-368, 2004.

- [9] A. Tizghadam and A. Leon-Garcia, "Survival value of communication networks," *Proc. IEEE International Conference on Computer Communications Workshops*, pp. 290-295, 2009.
- [10] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*. Prentice Hall, 2000.
- [11] 임용근, 박종원, "지능형 디지털 선박의 구현 방안," *대한조선학회논문집*, 45권, 5호, pp. 455-461. 9월, 2008.
- [12] V. Tomas, J. Kitarovic, and R. Antonic, "The trends in integrated control and monitoring systems for ships," *Proc. International Symposium ELMAR*, pp. 373-376, 2005.

저자소개



탁성우(Sungwoo Tak)

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

※ 관심분야: 유무선 네트워크, 위치인식



김혜진(Hyejin Kim)

2010년 2월 부경대학교
컴퓨터멀티미디어 공학사
2012년 2월 부산대학교
컴퓨터공학과 공학석사

2012년 3월~현재 Nifco Korea Poland IT Manager
※ 관심분야: 유무선 네트워크, 선박 및 자동차네트워크



김희경(Heekyum Kim)

2011년 2월 부산대학교
정보컴퓨터공학부 공학사
2012년 3월~현재 부산대학교
컴퓨터공학과 과정

※ 관심분야: 위치인식, 선박 네트워크, 저전력 실시간 스케줄링



김태훈(Taehoon Kim)

2006년 2월 부산대학교
정보컴퓨터공학부 공학사
2008년 2월 부산대학교
컴퓨터공학과 공학석사

2008년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정
※ 관심분야: 유무선 네트워크, P2P, 위치인식



박준희(Junhee Park)

2005년 2월 충남대학교
컴퓨터과학박사
1997년 3월~현재 한국전자통신
연구원 책임연구원

※ 관심분야: 홈네트워크, 미들웨어, IT조선융합



이광일(Kwnagil Lee)

2001년 2월 충남대학교
컴퓨터과학박사
2001년~2006년 미국 국립표준기술
연구소, 메릴랜드대학교,
텍사스주립대학교 연구원

2006년 6월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
※ 관심분야: 홈네트워크, 스위칭/라우팅, 미들웨어, IT조선융합