

수중 무인기의 최적 궤도 이동을 활용하는 계층적 수중 음향 센서 네트워크 구조

웬 티 탐*, 윤 석 훈°

A Hierarchical Underwater Acoustic Sensor Network Architecture Utilizing AUVs' Optimal Trajectory Movements

Nguyen Thi Tham*, Seokhoon Yoon°

요 약

수중 음향통신 환경에서는 지상 RF 통신에 비하여 제한된 대역폭, 높은 페이딩효과, 높은 수중음파 전달지연과 같은 제약이 있다. 본 논문에서는 이러한 수중 음향통신의 제약을 극복하여 효과적인 대규모 수중감시시스템의 구축을 가능케 하는 계층적 네트워크 구조를 제안한다. 제안하는 네트워크구조는 수중센서, 클러스터헤드, 수중/해상 싱크 및 수중무인기를 포함하며, 패킷의 전송성공률을 최대화하고 센서노드의 전력소모를 최소화시키기 위하여 복수의 수중무인기를 이용한 하이브리드 형태의 데이터라우팅을 제공한다. 즉, 클러스터 내부에서 클러스터멤버들은 Tree구조기반 라우팅을 사용하여 클러스터헤드에게 데이터를 전송하며, 궤도 이동을 하는 수중무인기는 클러스터헤드로부터 병합된 센싱데이터를 수집하고 Store-carry-forward 방식으로 싱크노드에게 데이터를 전달한다. 수중무인기의 최장 궤도이동 시간을 최소화하기 위하여 Integer Linear Programming 기반의 알고리즘이 사용된다. 시뮬레이션 결과를 통한 성능분석을 통하여 제안하는 수중센서네트워크 구조가 기존의 Gradient 기반 라우팅과 Geographical Forwarding 방식에 비해 높은 전송성공률과 낮은 전력소모를 획득할 수 있음을 보인다.

Key Words : Underwater Acoustic Sensor Network, AUV, Delay Tolerant Network

ABSTRACT

Compared to terrestrial RF communications, underwater acoustic communications have several limitations such as limited bandwidth, high level of fading effects, and a large underwater propagation delay. In this paper, in order to tackle those limitations of underwater communications and to make it possible to form a large underwater monitoring systems, we propose a hierarchical underwater network architecture, which consists of underwater sensors, clusterheads, underwater/surface sink nodes, autonomous underwater vehicles (AUVs). In the proposed architecture, for the maximization of packet delivery ratio and the minimization of underwater sensor's energy consumption, a hybrid routing protocol is used. More specifically, cluster members use Tree based routing to transmit sensing data to clusterheads. AUVs on optimal trajectory movements collect the aggregated data from clusterhead and finally forward the data to the sink node. Also, in order to minimize the maximum travel distance of AUVs, an Integer Linear Programming based algorithm is employed. Performance analysis through simulations shows that the proposed architecture can achieve a higher data delivery ratio and lower energy consumption than existing routing schemes such as gradient based routing and geographical forwarding. Start after striking space key 2 times.

※ 이 논문은 현대중공업 지원에 의한 울산대학교 전기공학부 일류화 연구비에 의하여 연구되었음.

◆ 주저자 : 울산대학교 전기컴퓨터공학과 석사과정, nttham0611@gmail.com, 준회원

° 교신저자 : 울산대학교 전기공학부 컴퓨터정보통신전공, seokhoonyoon@ulsan.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2012-09-457, 접수일자 : 2012년 9월 24일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 28일

I. 서 론

수중음향센서네트워크 (Underwater Acoustic Sensor Network)는 해저지진 활동감시^[1], 수중전술 수색^[2], 수중환경감시^[3] 분야에서 많은 관심을 받고 있다. 수중음향센서네트워크는 기존의 기반시설기반의 수중감시시스템 방식^[4]에 비해서 구축비용이 적다는 장점이 있지만 수중음향통신의 여러 제약을 극복해야만 효과적인 시스템을 구축할 수 있다. 즉, 수중에서는 제한된 대역폭, 높은 멀티패쓰와 페이딩 효과, 높은 수중 음파지연과 비트에러율로 인하여 데이터통신을 위한 전송속도가 지상에서의 통신에 비해 현저하게 낮다. 예를 들어 지상에서의 RF 기반 통신은 60km 거리에서 70Mbps 이상의 전송속도 획득이 가능하지만^[5], 수중통신채널의 예에서는 23KHz의 대역폭을 이용하여 2Km 범위에서 약 48Kbps 정도의 데이터전송 속도를 얻을 수 있다^[6]. 일반적으로 사용되는 상용제품도 1Km 범위에서 약 38Kbps의 전송 속도를 얻을 수 있을 뿐이다^[7].

이러한 수중통신제약으로 인하여 대규모 수중센서네트워크 구성 시 망 성능이 크게 저하된다^[1,8,9]. 특히, 멀티홉 통신 방식으로 수중센서노드들이 싱크노드에게 데이터를 전송하는 경우 중계홉수의 증가에 따라 높은 패킷에러율과 네트워크 혼잡도를 갖게 되고 결과적으로 매우 낮은 데이터 전송성공률을 얻게 된다. 즉, 패킷의 멀티홉 중계로 인하여 가용한 네트워크 용량을 급속히 감소하게 된다. 결과적으로, 최근에 대두되고 있는 복합 센싱데이터나 멀티미디어 정보 등과 같은 상대적으로 대용량 데이터 전송을 요하는 애플리케이션을 지원할 수 없게 된다.

본 논문에서는 제한적인 수중 통신환경 하에서 높은 데이터 전송성공률 제공과 대규모 수중감시시스템 구축을 가능케 하기위하여 계층적 수중센서네트워크 구조를 제안한다. 또한, 궤도를 따라 이동하는 수중무인기를 활용하여 패킷의 멀티홉 중계를 최소화하고 단거리고속 수중음향통신채널을 지원함으로써 높은 성능을 획득할 수 있다.

제안하는 수중센서네트워크 구조 하에서 수중 센서노드들은 클러스터헤드에 의해 관할되는 하나의 클러스터에 속해진다. 클러스터 내에서 수중센서는 Tree 기반의 프로액티브방식 라우팅을 이용하여 센싱데이터를 클러스터헤드에게 전달한다. 클러스터헤드의 집합은 분할되어 각 수중무인기에게 할당되며 수중무인기는 할당된 클러스터헤드를 경유하는 경로

로 이동한다. 클러스터헤드의 분할과 할당은 수중무인기들이 갖는 최장경로를 최소화하는 Min-Max 형태의 최적화 문제를 통하여 결정된다. 각 수중무인기는 이동 시 경로상의 클러스터헤드로부터 센싱데이터를 수집한다. 클러스터헤드로부터 수중무인기로의 데이터 전송은 수중무인기의 이동 중 둘 사이의 거리가 짧을 때 이루어지므로 단거리고속 음향채널을 활용한다.

수중무인기는 수집한 데이터를 Store-carry-forward 방식으로 싱크노드에게 최종 전달한다. 수중무인기를 이용한 하이브리드 형태의 라우팅 구조는 결과적으로 수중센서 네트워크 혼잡을 줄이고 패킷 에러를 최소화하여 높은 전송 성공률 획득을 가능하게 한다. 또한, 제안하는 수중네트워크구조는 클러스터 단위의 멀티채널 사용과 이 기종 수중 음향 통신 기술사용을 가능하게 하여 더욱 높은 데이터 전송 성공률을 제공할 수 있다.

제안하는 수중센서네트워크의 성능을 검증하기 위하여 Directed Diffusion [10]과 Geographical Greedy Forwarding^[11,12] 기반 라우팅 구조와 시뮬레이션을 통한 성능 비교를 수행한다. 시뮬레이션 결과는 제안하는 수중센서네트워크 구조가 기존 방식에 비해 높은 전송성공률과 낮은 전력소모를 획득할 수 있음을 보인다.

기존 수중무인기를 활용하여 수중센서네트워크를 구성한 연구에서는 수중무인기에 센서를 부착하여 수중탐사에 주로 이용되거나^[13,14], 개별적으로 통신링크의 보조 수단으로 주로 사용되었다^[15].의 연구에서는 수중무인기를 활용한 데이터 라우팅을 고려하였으나 기정의 되어 있는 수중무인기의 경로 상에 데이터 전달 노드가 배치되어 있다는 가정으로 인하여 실제 수중센서네트워크 구축에 적용이 어렵다. 반면에 본 논문에서 제안하는 구조에서는 수중노드들이 수중감시 목적에 의해 유연하게 배치되고 수중무인기가 노드 분포에 따라 최적의 경로를 선택하게 된다.

본 논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델 및 제안하는 수중센서네트워크 구조와 각 구성요소의 역할을 기술하고 하이브리드 형태의 라우팅방안을 논의한다. 또한, 다중 수중무인기의 최적 궤도 결정 알고리즘을 제안한다. 3장에서는 제안하는 네트워크 구조의 데이터 전송 측면에서의 성능을 분석한다. 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

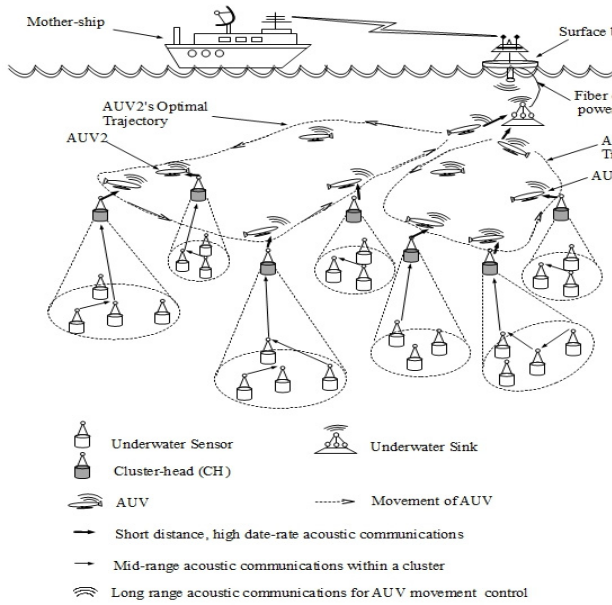


그림 1. 최적궤도 이동 수중무인기 기반의 계층적 수중 음향 센서 네트워크 구조
 Fig. 1. A hierarchical underwater acoustic sensor network that uses optimal trajectory movements of AUVs

II. 최적궤도 이동 수중무인기 기반의 계층적 수중음향센서네트워크 구조

본 장에서는 먼저 고려하는 수중센서네트워크를 위한 시스템 모델을 기술한다. 또한, 제안하는 네트워크 및 라우팅 구조를 논의한다. 마지막으로 수중무인기의 경로 설정 방법을 제안한다.

2.1. 시스템 모델

고려하는 수중센서네트워크는 클러스터헤드 집합 N ($|N|=n$), 수중무인기 집합 M ($|M|=m$), 수중센서 집합 L 및 1개의 수중 싱크로 구성되어 있다. 수중 센서들은 해저 지표면에 직접 또는 줄로 연결되어 고정되거나 또한 수중센서들은 부유방식으로 이동성을 가질 수 있다. 수중 센서들은 부착된 센서로 주어어진 탐지 임무 (지진활동, 해수온도, 해류흐름, 군사 활동 감시 등)를 수행하고, 주기적으로 수집된 데이터를 클러스터헤드에게 전송한다. 클러스터헤드는 일반 수중센서보다 전력량 및 컴퓨팅능력, 데이터 저장공간 측면에서 우위를 갖는 노드로서 수중 센서로부터 수신한 데이터를 병합하여 보관한다. 또한 클러스터헤드는 2개 이상의 수중전송장치 (Acoustic Transceiver)를 장착하고 있어 수중무인기가 근거리 접근 시 단거리고속 채널 (short-range high-rate channel)를 이용하여 보관하고 있던 데이

터를 수중무인기에게 전달한다. 수중무인기들은 자율적으로 또는 모션의 제어에 따라 주어진 경로를 이동하며 주기적인 전력의 재충전 또는 대체가 가능하다. 수중무인기들은 이동 중에 감시 지역 내 클러스터헤드들로부터 데이터를 수신하여 수중싱크노드에게 store-and-forward 방식으로 전달한다. 수중싱크노드는 전력과 데이터통신을 위한 케이블이 수표상의 모션이나 Surface station (또는 해상 싱크)과 연결되어 있을 수 있다. 케이블이 연결되어 있는 경우 수중 싱크노드는 전력사용에 제한이 없으며 케이블을 이용하여 해표상의 해상 싱크 또는 모션으로 데이터를 전달한다.

2.2. 네트워크구조 및 데이터라우팅

본 논문에서 제안하는 센서 네트워크는 계층적 구조를 갖는다. 하위 계층에서는 해저에 고정된 다수의 수중센서들이 클러스터에 속해져 멤버노드로 동작한다. 수중감시시스템 구축 시 운용자가 직접 수동으로 센서들을 특정 클러스터에 속하도록 하거나 각 센서노드들이 분산알고리즘을 이용하여 자발적으로 소속될 클러스터를 선택할 수도 있다. 이러한 클러스터 구성 알고리즘은 많은 연구가 이미 수행된 분야로 본 논문의 논의 범위가 아니므로 생략되었다.

수중센서들은 직접 또는 멀티홉 방식의 음향통신을 이용하여 상위계층의 클러스터 헤드(CH: Clusterhead)에게 수집한 데이터를 전달한다. 클러스터 내에서 클러스터멤버로부터 클러스터헤드간 데이터 라우팅은 Tree 기반의 라우팅 프로토콜을 사용한다. 즉, 클러스터헤드는 t초의 주기로 일련번호를 포함한 Tree 형성 제어메시지를 클러스터 내에 멀티홉 Flooding 방식으로 전파한다. 클러스터내의 센서가 이 제어메시지를 수신할 때 일련번호를 확인하여 기존에 수신한 일련번호보다 큰 경우 메시지를 전송한 노드를 부모노드로 설정하고 제어메시지를 다시 브로드캐스트 방식으로 포워딩하여 클러스터 내 라우팅 Tree를 형성 및 유지 한다. 각 센서노드는 자신의 센싱데이터를 부모노드에게 전송하여 결국 클러스터헤드에게 전달되도록 한다. 즉, 목적지에 데이터를 전송하기위한 Next 홉 정보를 지속적으로 유지하는 프로액티브 방식의 라우팅 프로토콜이다 (예. DSDV,^[16] OLSR^[17]). 이러한 단순한 구조의 프로액티브 방식의 라우팅은 소규모 네트워크에서 낮은 오버헤드로 높은 성능을 얻을 수 있다.

클러스터헤드는 멤버노드로부터 센싱 데이터를

수신하여 자신의 큐에 저장하고 수중무인기로부터 비컨신호 (Beacon Signal) 수신을 대기한다. 수중무인기가 클러스터헤드에 충분히 근접 하였을 때 (또는 수중무인기로부터 수신한 비컨 신호의 강도가 특정 크기이상일 때) 클러스터헤드는 저장되어있던 센싱데이터를 수중무인기에게 전송한다. 각 수중무인기는 자신의 경로를 따라 이동하면서 주기적으로 비컨 신호를 전송하며 클러스터헤드로부터 병합된 데이터를 수신하여 싱크노드로 전달한다. 수중 무인기는 Store-carry-forward 방식으로 병합된 데이터를 싱크노드에게 전송한다. 즉, 하위계층 (클러스터 내부) 에서는 일반적인 Tree 형태의 센서네트워크 라우팅 프로토콜이 사용되고, 상위계층에서는 수중무인기를 활용한 DTN (Delay Tolerant Network) 또는 ICN (Intermittently Connected Network) 기반의 라우팅이 사용되는 하이브리드 형태가 된다.

그림 1.는 제안하는 계층적 수중음향센서네트워크의 예를 보여준다. 그림 1.에서 보이는 바와 같이 각 클러스터헤드는 하나의 수중무인기에게 할당되고 수중무인기는 할당된 클러스터헤드를 경유하는 경로로 이동한다. 클러스터헤드의 할당과 수중무인기의 경로 설정은 2.3 절에서 자세히 논의된다.

제안하는 수중센서네트워크 구조에서는 클러스터와 수중무인기를 이용하여 멀티홉 전송을 최소화시킴으로써 네트워크에서 총 전송되는 패킷 개수를 줄이고 네트워크 혼잡을 감소시킨다. 또한, 클러스터 별로 다른 주파수대역을 사용하는 채널을 사용할 수 있게 함으로써 패킷충돌영역 (Packet Collision Domain)을 최소화할 수 있게 된다. 이러한 특성으로 인하여 기존의 수중네트워크보다 높은 데이터 전송률을 갖게 된다.

더불어 수중무인기의 최적 경로설정을 통하여 클러스터헤드에 근거리로 접근할 수 있으므로 클러스터헤드와 수중 무인기간 근거리 고속 음향 통신이 가능하게 된다. 즉, 클러스터헤드가 수중무인기와 통신하기 위한 별도의 음향통신 인터페이스를 이용할 경우 보다 높은 데이터 전송 속도를 얻게 된다. 이러한 특성은 기존의 수중센서네트워크에서는 적용이 어려웠던 멀티미디어 기반의 센싱 데이터 또는 대용량 센싱 데이터의 전송을 가능하게 한다.

2.3. 수중무인기의 최적 경로 설정

복수의 AUV가 싱크노드를 출발하여 데이터를 수집하기 위하여 여러 클러스터헤드(CH)를 경유하

여 다시 싱크노드로 돌아오는 경로를 결정하여야 한다. 이러한 AUV의 이동 경로 결정 문제는 NP-hard인 차량배차문제 (VRP: Vehicle Routing Problem)^[18,19] 또는 Traveling Salesman 문제^[20,21]와 유사하게 접근될 수 있다. 하지만 기존의 알고리즘들은 노드들의 총 이동거리 만을 고려한다. 반면에, 수중센서네트워크 구조에서는 총 이동거리와 더불어 각 수중무인기의 개별 이동거리가 주요한 고려사항이 된다. 즉, 수중무인기들이 갖는 이동거리 중 가장 긴 값을 갖는 것을 최소화시킴으로서 특정 센서 데이터가 장시간동안 Sink노드에게 전달되지 않는 것을 방지할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 수중무인기별 이동거리를 고려하기위하여^[19,21]에서 제안된 Flow 기반 알고리즘을 확장하여 수중무인기의 최적 경로를 결정한다.

수중무인기의 경로를 선택하기 위하여 먼저 Binary 변수 x_{ijk} 를 다음과 같이 정의한다.

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{수중무인기 } k \text{가 } CH_i \text{ 방문 후} \\ & \text{곧바로 } CH_j \text{를 경유하는 경우} \\ 0 & \text{그외의 경우} \end{cases} \quad (1)$$

또한, 비용계수 c_{ij} 는 CH_i 과 CH_j 의 거리로 정의된다. 정의된 x_{ij} 변수와 비용계수 c_{ij} 를 이용하여 다음과 같이 목적함수와 구속조건으로 최적화 문제를 구성한다.

$$\text{Minimize maximum } k \in M \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n c_{ij} x_{ijk} \right\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=2k=1}^n \sum_{i=1}^m x_{1jk} = m \quad (3)$$

$$\sum_{i=1k=1}^n \sum_{i=1}^m x_{i1k} = m \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i=1k=1 \\ i \neq j}}^n \sum_{i=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^n x_{isk} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s}}^n x_{sjk} = 0 \quad \forall k \in M, \forall s \in N \quad (6)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{1jk} = 1 \quad \forall k \in M \quad (7)$$

$$u_i - u_j + 1 + n \sum_k x_{ijk} \leq n \quad \forall i, j \in 2, \dots, n \quad i \neq j \quad (8)$$

식 (2)은 목적함수로서 k개의 수중무인기가 갖는 경로중에서 가장 긴 경로를 최소화하는 Min-Max 형태의 최적화를 목적으로 한다. 즉, 이 목적함수는 데이터 수집을 위해 소요되는 시간을 최소화 한다. 식 (3)은 CH1이 싱크노드라고 하였을 때 정확히 m개의 수중무인기가 싱크노드로부터 출발하게 한다. 식 (4)은 유사하게 정확히 m개의 수중무인기가 싱크노드로 돌아오도록 하게 한다. 식 (5)는 싱크노드를 제외한 각 클러스터헤드가 정확히 한번만 수중무인기에 의해 방문되도록 제한한다. 식 (6)은 흐름 보존을 위한 것으로서 하나의 수중무인기가 특정 클러스터헤드를 방문하였다면 반드시 해당 클러스터헤드로부터 나와 다른 곳으로 이동하게 하게 한다. 식 (7)은 각 수중무인기가 정확히 한 번씩 사용되도록 보장한다. 즉, 각 수중 무인기가 싱크노드로부터 출발하여 다시 싱크노드로 돌아오는 하나의 경로를 갖도록한다. 식 (8)은 싱크노드와 연결되지 않은 순환경로를 제거하기 위한 것으로 [20]에서 제안된 MTZ 모델을 사용한다.

목적함수의 Min-Max 구조를 없애고 Integer Linear Programming 형태로 만들기 위하여 식(2)는 다음의 식(9)와 식(10)으로 대체될 수 있다.

$$\text{Minimize } t$$

$$t - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} x_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in M \quad (9)$$

$$(10)$$

제시된 목적함수와 구속조건을 이용하여 수중무인기의 경로가 설정되고 각 수중 무인기는 자신의 경로를 이용하여 반복하여 이동한다.

III. 성능 분석 및 평가

제안하는 수중센서네트워크 구조를 검증하기 위하여 NS2를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 수심 2km에서 3km X 3km 크기의 영역이 수중센서네트워크가 배치되는 감시지역으로 가정된다. 네트워크에는 최대 120개의 수중센서가 배치되었으며 평균 이동속도 6m/s의 총 3대 수중무인기가 기본 값으로 배치된다. 수중센서들은 주기적으로 100Byte의 센싱 데이터를 생성하여 싱크노드에게 전송하며, 주기는 25초 에서 75초 사이의 값을 갖는다. 네트워크 내의 클러스터 개수의 범위는 (6, 9, 12, 15) 중의 하나의 값을 갖는다. 각 클러스터헤드는 자신

이 클러스터헤드임을 알고 있으며 네트워크 배치 시 클러스터 생성 제어메시지를 네트워크 전체에 Flooding 한다. 이 메시지가 중계될 때 메시지 헤더에 포함되어 있는 홉수가 증가하며 네트워크 내의 각 노드는 수신한 클러스터 생성 제어메시지의 홉수를 비교하여 자신과 가장 가까운 클러스터헤드 ID를 자신의 클러스터 번호로 설정한다.

센서노드와 센서노드, 센서노드와 클러스터헤드 간의 통신을 위한 수중음향채널은 상용 수중모뎀 (LinkQuest 사의 UWM2200)의 규격을 고려하여 500m의 거리 내에서 최대 14Kbps의 전송속도를 갖는 다고 가정한다. 수중통신을 위한 주파수는 50-90kHz를 사용한다. 시뮬레이션에서 네트워크내의 모든 클러스터는 동일한 채널을 사용하며 같은 충돌 영역에 속해져 있다. 수중음향채널모델은 Thorp'의 근사치^[22]를 기반으로 여러 수중 노이즈 (turbulence, shipping, wind, thermal)를 고려한^[23,24]의 모델이 이용된다.

클러스터헤드와 수중무인기 사이의 데이터전송은 수중무인기가 클러스터헤드에 근접 이동하였을 경우 수행되므로 근거리 수중통신채널을 이용할 수 있다. 수중에서의 근거리 통신은 장거리에 비해 높은 데이터 전송속도를 얻을 수 있다. 예를 들어^[25]의 표2는 PSK 변조 기법을 이용하여 60m 거리에서 500kbps의 전송속도를 획득할 수 있음을 보인다. 또한 근거리 통신에서는 음향기반이 아닌 대체기술을 사용할 수 있다. 예를 들어 Wireless Fibre Systems (WFS) Technologies 사는 수중무인기와 수중노드간의 통신을 위해 RF 기반으로 10m 거리 내에서 25-156kbps (최대 1Mbps)의 전송속도를 지원하는 수중 모뎀 seatooth S300을 개발 및 판매하고 있다^[26]. 또한, 광통신 기법도 활용되고 있으며 Ambalux 사는 40m 거리에서 10Mbps의 전송속도를 지원하는 광통신기반의 상용 수중모뎀을 개발하였다^[27]. 이러한 수중 근거리 통신기법을 고려하여 본 논문의 시뮬레이션에서는 클러스터헤드와 수중무인기간 데이터 통신 채널은 40m의 전송거리에서 300kbps의 전송속도를 갖는다고 가정한다.

Integer Linear Programming을 이용한 수중무인기의 최적 경로 설정을 위하여 IBM사의 ILOG CPLEX를 이용한다. MAC 프로토콜은 CSMA가 사용되며 패킷 충돌 시 최대 재전송 횟수는 5로 설정한다. 수중 센서 네트워크에서 데이터 전송 성능을 분석하기 위하여 기존의 Directed Diffusion 기반의 GBR과 Geographical Greedy Forwarding

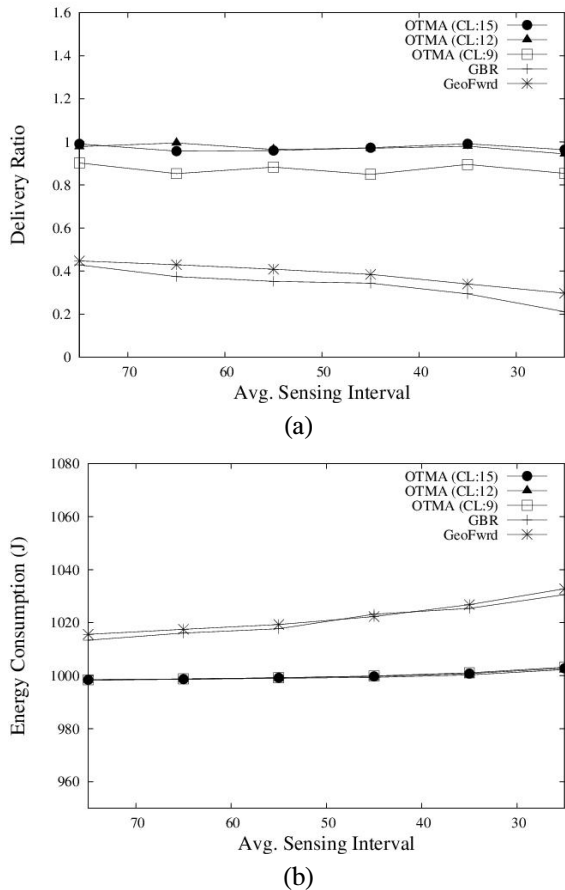


그림 2. 센싱주기(네트워크 부하)가 네트워크 성능에 미치는 영향 (a) 전송 성공률 (b) 전력 소모
 Fig. 2. Effects of sensing interval (network load) on network performance. (a) Delivery Ratio (b) Energy consumption

(GeoFwrd) 라우팅 구조와 데이터 전송성공률 (Delivery Ratio)과 전력소모 측면에서 비교한다. 데이터 전송성공률은 Sink 노드에서 수신된 총 데이터 패킷 수를 전체 센서노드에서 생성된 패킷 수로 나눈 값이다. 또한 통신에 필요한 전력소모를 측정하기 위하여 수중모뎀의 idle, transmit, receive 상태에서의 전력소모량은 각각 1.0W, 6.0W, 1.0W으로 설정되었다. 수중무인기는 재충전 및 대체가 가능하여 네트워크 수명에 영향을 끼치지 않으며 또한 대부분의 전력을 이동에 사용하므로 전력소모량 측정에서 제외되었다.

그림 2는 수중센서의 센싱 주기, 즉 네트워크 부하가 패킷 전송 성공률과 전력소모에 미치는 영향을 보여준다. 논의의 편의를 위하여 본 논문에서 제안하는 방안을 OTMA(OTMA: Optimal Trajectory Movement based Architecture)로 지칭한다. OTMA의 성능은 클러스터 크기를 (9,12,15)의 경우로 변화시키면서 측정되었다. 그림 2(a)에서 보여지는 바와 같이, 모든 네트워크 부하의 경우에 OTMA가

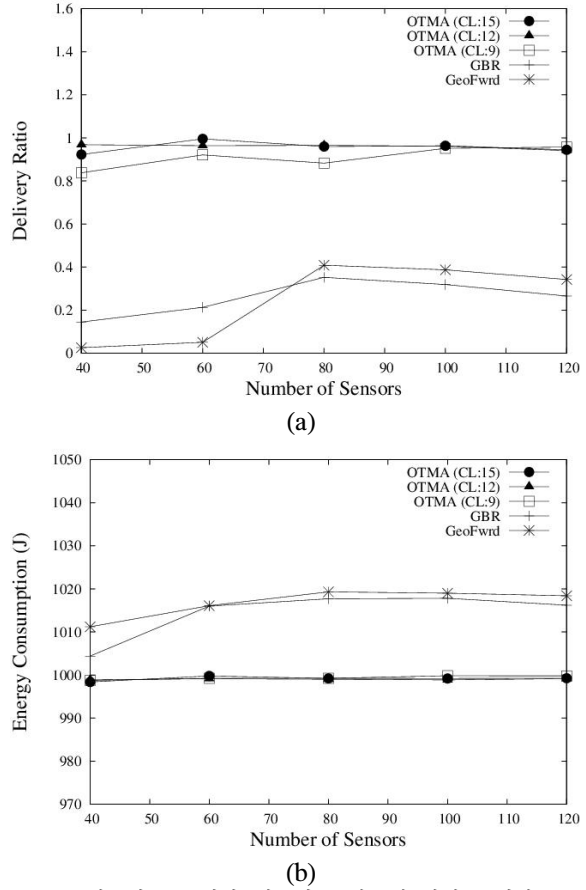


그림 3. 네트워크 크기가 네트워크 성능에 미치는 영향 (a) 전송 성공률 (b) 전력 소모
 Fig. 3. Effects of network size on network performance (a) Delivery Ratio (b) Energy consumption

높은 성능을 보였다. 특히, 네트워크 부하가 증가함에 따라 GBR과 GeoFwrd 프로토콜은 성능이 크게 감소하는 반면 OTMA는 지속적으로 높은 성능을 보였다. OTMA가 기존 프로토콜에 비해 현저히 높은 성능을 보이는 이유는 네트워크 내의 패킷 전송 횟수를 줄임으로써 간섭 및 패킷 충돌을 크게 감소시켰기 때문이다. 또한, 기존의 프로토콜이 멀티홉 전송 과정에서 높은 BER로 인한 패킷 에러가 발생하는데 반해 OTMA는 이러한 패킷에러가 발생할 가능성이 낮다. 마지막으로 OTMA에서는 네트워크에 걸쳐 클러스터헤드가 분포되고 수중무인기가 직접 이동하여 클러스터헤드로부터 데이터를 수집함으로써 네트워크 파티션이 발생할 가능성이 매우 낮아지게 된다. 그림 2(b)는 수중센서들의 전력소모량을 보여준다. OTMA는 적은 패킷전송 횟수를 갖으므로 상대적으로 적은 전력소모를 보여준다. 하지만, 전력소모의 차이가 기존 프로토콜과 현저히 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 기존 프로토콜들의 매우 낮은 전송성공률과 관련이 있다. 즉, 네트

표 1. 수중무인기 수가 데이터 전달율과 종단간 패킷 지연에 미치는 영향 (seconds)
 Table 1. Effects of number of AUVs on data delivery ratio and end-to-end packet delay (seconds)

Algorithms No. of AUVs	OTMA (CL:15)		OTMA (CL:12)		OTMA (CL:9)		GBR		GeoFrwd	
	Delivery Ratio	Packet Delay	Delivery Ratio	Packet Delay	Delivery Ratio	Packet Delay	Delivery Ratio	Packet Delay	Delivery Ratio	Packet Delay
1	0.965	1337.1	0.972	1338.1	0.938	1259	0.411	8.53	0.504	4.49
2	0.971	1037.9	0.970	879.22	0.953	946.92	0.411	8.53	0.504	4.49
3	0.959	827.18	0.964	810.96	0.882	793.57	0.411	8.53	0.504	4.49

워크내의 총 패킷 전송회수는 OTMA와 기존 프로토콜과 큰 차이가 없으나 OTMA에서는 패킷 전송이 대부분 유효하게 싱크노드까지 수신된다. 반면에, 기존 프로토콜에서는 대부분의 패킷전송이 멀티홉 중계도중 패킷충돌이나 패킷에러에 의해 유실 되는 것을 알 수 있다.

그림 3(a)는 네트워크 내의 수중센서노드 수의 변화 즉 네트워크 크기에 따른 패킷성공률의 변화를 비교한다. 이 경우에서도 OTMA는 95%이상의 높은 패킷 전송 성공률을 보인다. 반면에 GBR과 GeoFrwd는 40%이하의 낮은 성공률을 갖는다. 특히, GBR과 GeoFrwd 모두 수중센서의 수가 80이 될 때까지는 전송성공률이 급격히 증가하다가 이후로 완만하게 감소한다. 그 이유는 수중센서의 수가 80보다 적을 때는 네트워크의 부분적이 파티션이 발생하여 일부 수중센서노드는 싱크노드로의 경로를 찾을 수 없었기 때문이다. 수중센서의 수가 80보다 클 때에는 파티션을 발생하지 않지만 많은 수중센서의 패킷전송으로 인하여 전체 트래픽이 네트워크 Capacity에 근접하여 많은 간섭과 패킷 충돌로 인하여 전송성공률이 감소하게 된다. 그림 3(b)에서 보여지는 것처럼 수중센서의 수가 증가할수록 GBR과 GeoFrwd의 전력소모는 상대적으로 크게 증가한다.

표 1.은 수중무인기의 수가 네트워크 내의 종단간 패킷 지연에 미치는 영향을 보여준다. 표 1.에서 보이는 바와 같이 OTMA에서 수중무인기의 수가 증가할수록 패킷 지연시간은 감소한다. 이는 수중무인기 1대 당 경유해야할 클러스터헤드의 수가 작아짐에 따라 해당 수중무인기의 이동거리와 이동시간이 짧아지기 때문이다. 또한 클러스터의 수가 적을수록 낮은 패킷 지연을 가짐을 알 수 있다. 이또한 작은 수의 클러스터헤드를 경유하는 경우 AUV의 이동거리가 짧아지기 때문이다. 클러스터헤드의 수 (즉, 클러스터의 수)가 작은 경우에 센서노드들로부터 클러스터헤드까지의 멀티홉 중계를 통한 패킷지연이 높아지는데 이는 AUV가 보다 단거리 이동을

함으로써 감소되는 패킷 지연에 비해 영향이 적다. 즉, OTMA에서 패킷지연의 주요한 요인은 AUV가 Store-carry-forward 방식으로 데이터를 전달하기 위한 지리적 이동 시간임을 알 수 있다. 이러한 AUV의 이동시간 영향으로 OTMA는 GBR과 GeoFrwd 프로토콜에 비해 매우 높은 패킷 지연을 갖는 것을 볼 수 있다. 즉, OTMA에서의 패킷지연은 수중무인기의 속도, 감시지역크기, 그리고 클러스터헤드의 분포에 의해 영향 받는다. 표 1.의 결과에 따르면 OTMA는 기존의 프로토콜에 비해 높은 전송 성공률과 수중센서의 낮은 전력소모를 획득할 수 있지만 반면에 높은 패킷 지연을 가짐을 알 수 있다. 즉, OTMA는 패킷 지연이 특정시간 허용되거나 높은 전송 성공률을 보장해야 하는 애플리케이션이나 시스템에서 유용하다고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 제약적인 수중 통신환경에서 높은 패킷전송성공률을 제공하는 대규모 계층적 수중센서 네트워크 (Underwater Acoustic Sensor Network) 구조를 제안하였다. 제안된 수중 네트워크에서는 수중 무인기의 최적 경로 이동과 수중센서노드들의 계층적 구조를 이용한 하이브리드 형태의 데이터 라우팅을 통하여 네트워크의 혼잡을 줄이고 멀티홉 전송으로 인한 패킷 에러를 최소화하여 높은 전송 성공률을 제공한다. 제안하는 네트워크 구조는 수중센서노드들로 이루어진 클러스터와 수중무인기의 이동으로 근거리 고속 음향 통신을 가능하게 한다. 수중무인기의 최적 경로를 얻기 위한 Integer Linear Programming 형태의 최적화 문제를 구성하였으며, 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 통해 제안하는 네트워크구조가 기존 방안보다 종단간 패킷지연은 길어지지만 월등히 높은 전송성공률을 획득할 수 있음을 보였다.

References

- [1] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking", in *Proc. IEEE Wireless Commun. and Network. Conf. (WCNC'06)*, pp. 228 - 235, Apr. 2006.
- [2] H. Lee and H. Choi, "The R&D trends of underwater sensor network for network-based underwater surveillance", in *Proc. Symposium of KICS*, pp. 311-312, Pyung-chang, South Korea, Feb. 2011.
- [3] M. Grasmueck, G. P. Eberli, D. A. Viggiano, T. Correa, G. Rathwell, and J. Luo, "Autonomous Underwater Vehicle (AUV) mapping reveals coral mound distribution, morphology, and oceanography in deep water of the Straits of Florida", *Geogr. Res. Lett.*, vol. 33, no. L23616, Dec. 2006
- [4] E.O. Connell, W.B. Lyons, C. Sheridan, and E. Lewis, "Development of a fibre optic sensor for the detection of harmful algae bloom and in particular domoic acid", in *Proc. IEEE Instrum. and Meas. Technol. Conf. (IMTC'07)*, pp. 1 - 4, Warsaw, Poland, May. 2007.
- [5] A. Kavas, "Comparative analysis of WLAN, WiMAX and UMTS technologies", in *Proc. PIER*, pp. 150-157, Aug. 2007.
- [6] S. Roy, T. M. Duman, V. McDonald, and J. G. Proakis, "High-rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space time coding: Receiver structures and experimental results", *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 32, no. 03, pp. 663 - 688. Jul. 2007
- [7] LinkQuest Inc, *Underwater Modem Specifications*, Jan. 2012. from <http://www.link-quest.com/html/models1.htm>
- [8] J. Heidemann, M. Stojanovic, and M. Zorzi, "High bandwidth underwater optical communication", *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 02, pp. 277 - 283, Jan. 2008
- [9] D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, "A Distributed CDMA Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks," *In Proc. of Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, Corfu, Greece, Jun. 2007.
- [10] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking," *IEEE/ACM Trans. Network.*, vol. 11, no. 01, pp. 2 - 16, Feb. 2003.
- [11] G. G. Finn, "Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetwork," *Tech. rep. ISVRR-87-180, Info. Sci. Inst. (ISI)*, Mar. 1987.
- [12] H. Frey, "Scalable Geographic Routing Algorithms for Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Network Mag.*; vol. 18, no. 4, pp. 18-22, Jul.-Aug. 2004.
- [13] D. R. Yoerger, M. Jakuba, A. M. Bradley, and B. Bingham, "Techniques for deep sea near bottom survey using an autonomous underwater vehicle," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 26, no. 01, pp. 41 - 54, Jan. 2007.
- [14] D. A. Paley, F. Zhang, and N. E. Leonard, "Cooperative control for ocean sampling: The glider coordinated control system," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 04, pp. 735 - 744, Jul. 2008.
- [15] S. Yoon, K. A. Azad, H. Oh, and S. Kim, "AURP: an AUV-Aided Underwater Routing Protocol for underwater acoustic sensor networks," *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 1827-1845, Feb. 2012.
- [16] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 234-244, London, U.K., Sep. 1994.
- [17] P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol," *draft-ietf-manetolsr-05.txt, Internet Draft, IETF MANET Working Group*, Nov. 2000.
- [18] Imdat Kara and T. Bektas, "Integer linear programming formulation of the generalized

vehicle routing problem,” presented at the 5th EURO/INFORMS Joint International Meeting, Turkey Jul. 2003.

- [19] N. Christofides, A. Mingozzi, and P. Toth, “Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations,” *Mathematical Programming*, vol. 20, no. 01, pp. 255-282, Dec. 1981.
- [20] C. E. Miller, A. W. Tucker, and R. A. Zemlin, “Integer programming formulation of traveling salesman problems,” *J. ACM*, vol. 7, no. 04, pp. 326-329, Oct. 1960.
- [21] T. Bektas, “The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures,” *Omega: Int. J. Manage. Sci.*, vol. 34, no 03, pp. 209-219, Jun. 2006.
- [22] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamental of Ocean Acoustics*, Springer: Berlin, Heidelberg, 1982.
- [23] A.F. Harris and M. Zorzi, “Modeling the underwater acoustic channel in ns2,” in *Proc. NSTools*, Nantes, France, Oct. 2007.
- [24] R. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 1983.
- [25] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “Underwater acoustic sensor networks: research challenges,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, vol. 3, no. 03, pp. 257-279, May. 2005.
- [26] *Underwater Modem Datasheet*, WFS Technologies, Oct. 2012, from : <http://www.wfs-tech.com/index.php/products/seatooth/>
- [27] *Underwater Modem Product Brochure*, Ambalux Corporation, Oct. 2012, from: http://ambalux.com/gdresources/media/AMB_1013_Brochure.pdf

웬 티 탐 (Nguyen Thi Tham)



2011년 2월 Military Technical Academy, 전기 전자공학 학사
2012년 3월~현재 울산대학교 전기컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 모바일네트워크, 수중 통신망, 전술통신망

윤 석 훈 (Seokhoon Yoon)



2000년 2월 인하대학교 자동화공학과 학사
2005년 6월 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 컴퓨터공학 석사
2009년 9월 뉴욕주립대 (SUNY at Buffalo) 컴퓨터공학 박사
2009~2011 LIG 넥스원 책임연구원
2011~현재 울산대학교 전기공학부 조교수
<관심분야> 애드혹네트워크, 협력형로봇통신, 수중 통신망, 전술통신망