

# 수중 음향 네트워크를 위한 시간 동기화 기술 동향 분석에 대한 연구

조아라\*, 윤창호°, 임용곤\*

## A Survey of Time Synchronization Techniques in Underwater Acoustic Networks

A-ra Cho\*, Changho Yun°, Yong-kon Lim\*

### 요약

수중음향 네트워크를 이용한 다양한 수중 어플리케이션에서 노드들은 서로 통신을 통하여 협업 또는 자율·독립적으로 동작하기 때문에 노드들 간 시간 동기화 문제는 중요한 이슈가 되고 있다. 또한, 수중 음향네트워크에서는 육상 네트워크에서와 달리 GPS 사용불가, 긴 전파지연, 해류에 의한 노드의 이동, 제한적 전력소비, 낮은 전송속도 등의 고유의 제약 사항이 있어 수중 노드들의 시간 동기화를 위해서는 이러한 제약 들이 반드시 고려된다. 본 논문에서는 수중음향 네트워크를 위해 보다 효율적인 시간 동기화 프로토콜 개발을 위해, 현재까지 개발되었던 수중 동기화 프로토콜의 특징을 비교 분석하여 현재 (state-of-the-art) 수중 음향 네트워크 동기화 연구 동향의 흐름을 정리한다.

**Key Words** : Underwater acoustic networks, Time synchronization, Clock offset, Clock skew, Propagation delay

### ABSTRACT

Time synchronization becomes a critical issue in underwater acoustic networks (UANets) because nodes cooperate together or individually work by communicating each other in diverse underwater applications. Compared with the time synchronization approaches in terrestrial networks, several intrinsic limitations of UANets (e.g., the unavailability of GPS, long propagation delay, mobility due to currents, limited energy consumption, or low data rate) need to be considered in synchronizing the timing among underwater nodes. For the purpose of developing more efficient time synchronization protocols for UANets, we review the existing approaches, which estimate both the clock offset and the clock skew of underwater nodes. Finally, we outline the state-of-the-art time synchronization protocols for UANets by comparing and summarizing them according to their synchronization characteristics.

\* 본 연구는 국가 연구개발 사업인 국토해양부 수중 광역 이동통신 시스템개발 (과제번호: 1615005528) 지원 및 한국해양과학기술원 관리로 수행되었습니다.

• First Author : 한국해양과학기술원 선박플랜트연구소 해양시스템연구부, zoazoa@kriso.re.kr, 정회원

° Corresponding Author : 한국해양과학기술원 선박플랜트연구소 해양시스템연구부, sgn0178@kriso.re.kr, 정회원

\* 한국해양과학기술원 선박플랜트연구소 해양시스템연구부, 정회원

논문번호 : KICS2013-12-539, Received December 17, 2013; Reviewed January 19, 2014; Accepted February 28, 2014

## I. 서 론

수중음향 네트워크는 해저지형 탐사, 지진 및 쓰나미 경고, 해양 환경 감시, 해양 방어체제 등 다양한 어플리케이션에 적용되고 있다. 그림 1과 같이, 수중음향 네트워크에 구성된 노드들은 자율·독립적으로 동작할 뿐 아니라 네트워크 프로토콜 규약에 따라 노드들 간의 협의를 통해 동작하게 된다. 이 때, 노드들은 노드 내부의 로컬 클럭을 통해 이벤트 발생 시간을 정하고 동작하게 된다. 각 노드의 이벤트 발생 시간은 노드 내부의 로컬 클럭에 따라 결정되므로, 노드 간 정확한 송·수신을 위해서 모든 노드들의 로컬 클럭 정보를 공통화(globalize) 하여 시간을 맞추는 동기화 과정이 반드시 필요하다.

쓰나미 경고 시스템과 같이 광대역 해양환경 모니터링 시스템에서는 수중 센서들 간의 분포된 위치에 따라 쓰나미가 발생된 시간과 감지된 센서의 위치 정보를 다른 노드들에게 전송하게 된다. 이 때, 송신 노드는 내부 로컬 클럭에 따라 시간 및 위치 정보를 전송하게 되므로 노드 간 동기화가 되어 있지 않으면, 송신 노드의 위치와 시간 정보를 잘못 인식할 수 있다. 또한, 수중 노드의 위치 추정을 할 때 노드 간 거리에 따른 패킷의 수신 시간 차이를 이용하여 노드의 상대적 위치를 추정하게 된다. 더욱이, 매체접속제어(Medium access control; MAC)에서 시간슬롯을 이용한 프로토콜<sup>[17,18]</sup>인 TDMA(Time division multiple access)의 경우 정해진 시간에 노드 간 충돌 없이 정확한 전송 스케줄을 따르기 위해서는 시간 동기화가 필수적이다. 임의의 접속 매체접속제어 방식에서도 backoff 시간이나 IFS(Inter Frame Slot) 개념을 적용하기 위해서는 노드 간 시간 동기화가 전제되어야 한다. 또한, 전력 소비를 줄이기 위한 절전 모드에서 노드 간 시간 동기화가 이루어질 때, 노드가 제 시간에 동작하여 이벤트를 발생·감지할 수 있다.

현재 육상 센서네트워크에서는 시간 동기화 연구가 활발히 진행되고 있으며, 어플리케이션이나 네트워크 토폴로지에 따라 특성에 맞는 동기화 프로토콜이 연구 개발되고 있다. 육상 센서네트워크 동기화 프로토콜은 단일 홉 vs 다중 홉 동기화, 고정 노드 vs 이동 노드 동기화, MAC 계층 기반 vs 표준 방식 동기화 등으로 분류되어 어플리케이션에 특화된 프로토콜들이 고도화되어 제안되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 육상 센서네트워크의 대표적인 동기화 프로토콜로는 RBS(reference broadcast synchronization)<sup>[4]</sup>, TPSN(timing-sync protocol for sensor networks)<sup>[5]</sup>, FTSP(flooding time

synchronization protocol)<sup>[6]</sup>, 트리 기반 동기화 알고리즘<sup>[7]</sup> 등이 있다.

수중음향 네트워크에서 동기화는 수중 네트워크의 고유 특성으로 인해 많은 제약이 따른다<sup>[8,9]</sup>. GPS(global positioning system) 사용불가, 긴 전파지연(1500m/s), 낮은 전송 속도, 높은 비트 오류율, 해류의 영향으로 인한 노드의 이동성, 도플러 효과, 제한적 전력 소비, 성층화 효과(stratification effect) 등과 같은 수중 네트워크의 특성으로 인해 육상의 센서 네트워크용 동기화 프로토콜을 수중 네트워크에 그대로 적용하기 부적합하다. 이에 따라 수중 네트워크의 가장 큰 제약 중 하나인 긴 전파지연 시간을 고려한 동기화 프로토콜인 TSHL(time synchronization for high latency)<sup>[9]</sup>이 최초로 제안되었다. 수중 노드의 이동성을 고려하여 클러스터 기반의 동기화 프로토콜인 MU-Sync<sup>[10]</sup>가 제안되었고, 뒤이어 수중 노드 간 공간 상관관계를 이용하여 동기화하는 Mobi-Sync<sup>[11]</sup> 프로토콜이 제시되었다. 도플러 편이를 이용한 최초의 동기화 프로토콜로 D-sync<sup>[12]</sup>가 있으며, 뒤이어 DA-Sync<sup>[13]</sup>, TSMU<sup>[14]</sup> 프로토콜이 제안되었다. JSL(joint time synchronization and localization)<sup>[15]</sup>은 수중 매질의 비균일성으로 인한 성층화 효과를 보상한 최초의 동기화 프로토콜로 위치 인식(localization)과 시간 동기화를 조합하여 정확도를 높이고자 하였다.

본 논문에서는 현재까지 개발되었던 수중 음향 네트워크를 위한 동기화 프로토콜의 특징을 비교 분석하여 현재(state-of-the-art) 수중 음향 네트워크 동기화 연구 동향을 전반적으로 정리한다. 이를 위해 2절에서는 동기화를 위한 클럭 모델링을 소개하고, 시간 동기화에 영향을 미치는 파라미터와 수중음향 네트워크에서의 동기화 제약사항에 대해 논하도록 한다. 3절에서는 수중음향 네트워크를 위한 동기화 프로토콜을 소개하고 특징에 따라 분류 및 분석한다. 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

## II. 동기화를 위한 시스템 모델

### 2.1 클럭 모델

네트워크 내의 노드들의 로컬 클럭의 시간 동기를 맞추기 위해서는 로컬 클럭의 특성인 클럭 오프셋(clock offset)과 클럭 스큐(clock skew)를 동기화해야 한다. 클럭 오프셋은 노드 내 클럭 동작 시점이 각기 달라 발생하는 시간 차이로, 시간이 경과해도 클럭 오프셋은 일정하게 유지된다. 클럭 스큐는 컴퓨터 클럭 내부에 동작하는 오실레이터의 하드웨어 사양에 따른

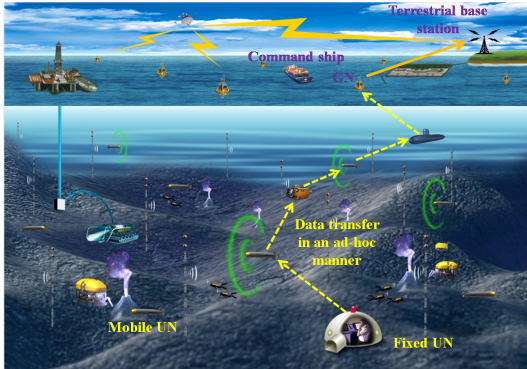


그림 1. UANet 구성도  
Fig. 1. Structure of UANets

차이로 인해 노드마다 상이한 클럭 속도 (clock rate) 가지게 되어 발생된다. 클럭의 속도를 결정하는 오실레이터의 주파수는 전압, 온도, 습도, 압력에 따라 미세하게 변화하게 되는데, 이로 인해 시간이 경과할수록 노드 간 시간 차이가 더욱 커지게 된다. 따라서, 동기화 알고리즘은 노드의 클럭 스큐와 클럭 오프셋을 추정하여 클럭의 시간을 공통화 시켜야 한다. 일반적으로 동기화 수행과정을 위해 네트워크 노드  $i$ 의 클럭 모델을 클럭 스큐와 클럭 오프셋 파라미터를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$T_i(t) = a_i(t) + b_i \quad (1)$$

여기서  $a_i$ 는 클럭 스큐이고,  $b_i$ 는 클럭 오프셋이고,  $t$ 는 이상적인 시간 또는 UTC (Universal Time Coordinated)이다. 노드  $i$ 의 클럭이 이상적이라면 클럭 스큐  $a_i = 1$ 이고 클럭 속도가 동일하게 동작하며, 클럭 오프셋  $b_i = 0$ 가 된다 [1-3].

### 2.2 동기화 오류 요소

노드 간 동기화를 위해 클럭 오프셋과 클럭 스큐를 추정하기 위해서는 UTC를 알고 있는 기준 노드와 임의의 노드가 다수개의 메시지를 서로 송·수신한다. 메시지를 송·수신하면서 알 수 있는 정보인 메시지 전송 지연시간을 이용하여 시간 동기화 파라미터를 계산하기 때문에 신뢰성 있는 전송지연시간 추정이 시간 동기화의 중요한 조건이다. 그러나 실제 환경에서는 비결정적 지연시간 요소로 인해 메시지 지연 시간 추정이 부정확해지고, 동기화 오류를 발생시킨다. 비결정적 지연시간 요소는 다음과 같다.

- **송신 시간**: 송신노드가 메시지를 구성하는데 소요되

는 시간과 구성된 메시지가 호스트에서 네트워크 인터페이스로 전송되는데 소요되는 시간이다. 송신 시간은 사용 중인 동작 시스템에 따라 달라질 수 있다.

- **접속 시간**: 메시지 전송을 위해 채널에 접속하는 데 소요되는 시간을 의미한다. 이는 어떤 매체접속제어 프로토콜을 사용하는가에 따라 달라진다. 임의 매체접속제어 방식에서는 전송 전에 채널이 유희(idle)할 때까지 기다리는 시간이며, TDMA의 경우 전송을 위해 할당된 시간슬롯을 기다리는 시간이 된다.

- **전파지연 시간**: 송신 단에서 수신 단까지 메시지가 전파되는데 소요되는 시간이다. 육상 네트워크에서는 빛의 속도로 ( $3 \times 10^8 m/sec$ ) 메시지가 전달되므로 무시될 만큼 매우 작으나, 수중 네트워크에서는 가장 불확실한 지연시간 요소가 된다.

- **수신 시간**: 메시지를 수신하기 위해 네트워크 인터페이스에서 수신노드가 받아들이는 데 소요되는 시간과 호스트의 응용계층까지 전달하는데 소요되는 시간이다. 이는 송신 시간과 유사하다.

### 2.3 수중음향 네트워크에서 동기화 제약 사항

육상 네트워크를 위한 동기화 프로토콜은 수중 네트워크의 고유 특성으로 인해 수중에서는 직접적으로 사용하기 어렵다. 따라서, 수중 네트워크에 적합한 동기화 프로토콜을 설계를 위해서 다음과 같은 제약 사항들을 고려해야 한다.

- **GPS 미사용**: 일반적으로 GPS는 고주파수 (1.5GHz) 대역을 사용하므로 수중에서는 잘 전파되지 않는다. 따라서 GPS 사용은 해수면에 위치한 노드에 한정적으로 적용된다.

- **긴 전파지연**: 수중에서 전파지연 시간은 1500m/s로 육상에 비해서  $2 \times 10^5$ 배 소요된다. 이는 노드 간 시간 지연차를 추정할 때, 비결정 시간 요소로 작용하기 때문에 수중에서 노드 간 동기화의 정확성을 낮출 수 있다.

- **높은 비트 오류율**: 수중 채널은 잡음에 의한 신호 손상과 음파가 해수면과 해저의 반사하여 발생하는 다중경로의 영향으로 비트 오류율이 높다. 또한, 수중에는 일시적으로 통신이 끊기는 음영지역이 존재하므로 통신 불능 시 대처할 수 있는 동기화 프로토콜이 필요하다.

- **낮은 전송속도**: 통신 거리에 따른 통신 주파수 사용의 제약으로 인해 육상에 비해 낮은 데이터 전송속도를 갖는다. 이는 동기화를 위한 노드 간 메시지 교환 시 직접적인 영향을 끼치는 요인으로 메시지 크기를 줄이거나 메시지 교환을 최소로 하는 동기화 알고리

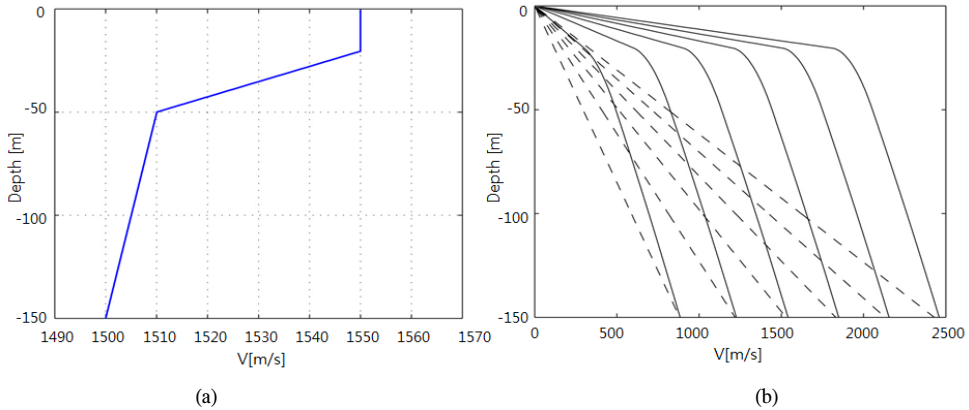


그림 2. (a) 수심에 따른 음속의 수직 분포; (b) 비균질한 수중에서의 음파의 전파 (실선이 실제 음파 경로)  
 Fig. 2. (a) Example of a sound velocity profile in shallow water; (b) propagation of sound waves in an inhomogeneous medium; solid lines are the actual paths.

즘이 요구된다. 또한, 메시지 전달에 걸리는 시간이 증가되어 긴 전파지연과 더불어 시간 동기화에 제한 요소가 된다.

- **해류 영향으로 인한 이동성:** 수중 네트워크를 구성하는 노드들은 해류에 의한 영향으로 노드의 위치가 시간에 따라 달라질 수 있다. 이는 동기화를 위한 노드 간 전파지연 시간 추정 값과 실제 전파지연 시간 값이 다르게 되어 동기화 정밀도를 낮춘다.
- **성층화 효과:** 음파는 수중의 불균일한 매질과 온도, 압력, 염도에 의한 영향으로 수심에 따라 속도가 달라지며, 그 결과 그림 2<sup>[16]</sup>에서 보는 바와 같이 음파는 직선 형태로 전송되지 않게 된다. 이러한 성층화 효과는 노드 간 거리에 따른 패킷의 수신 시각 차이를 이용하여 노드의 상대적 위치를 추정하는데 있어 오류를 발생시킨다. 따라서 이 같은 성층화 효과를 보상하기 위해 음파 경로기반의 거리추정 기법<sup>[15,16]</sup>을 적용하여 최단 시간의 실제 음파경로 거리를 추정

하여 음파지연 시간을 계산한다. 따라서 직선 형태의 음파 경로를 통한 음파지연시간 추정에 의한 시간 오류를 줄일 수 있다.

- **제한적 전력소비:** 대부분의 수중 노드들은 배터리로 전력을 공급받아 동작하고, 배터리를 충전하거나 교환하는데 육상에 비해 많은 제약이 따른다. 따라서, 에너지 효율성을 고려하여 동기화 프로토콜을 설계해야 한다.

### III. 수중음향 네트워크를 위한 동기화 프로토콜

본 절에서는 수중음향 네트워크를 위한 동기화 프로토콜을 소개하고 특징을 나열한다. 그림 3에서와 같이, 현재까지 개발된 수중 동기화 프로토콜들은 시간이 흐름에 따라 보다 다양한 수중 환경을 고려하여 개발되고 있다. 즉 고정 노드에서 이동 노드로 대칭적 전파지연시간에서 비대칭적 전파지연시간으로, 도플러 편이

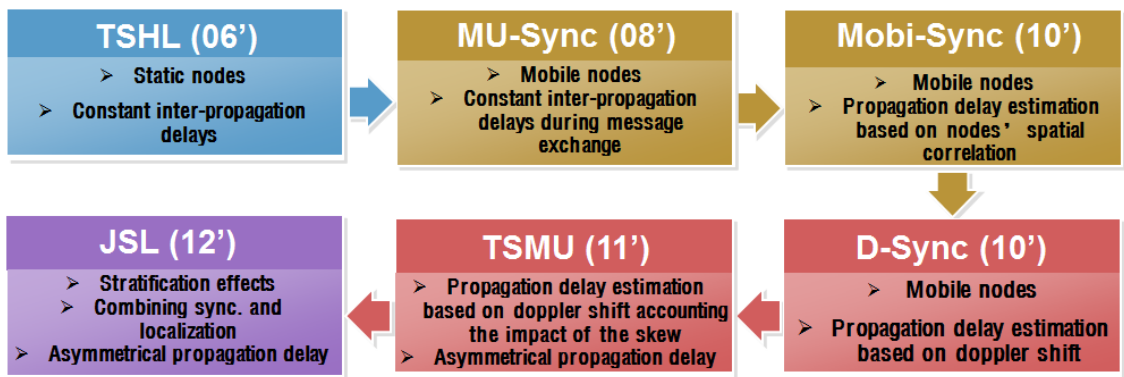


그림 3. 수중 음향네트워크를 위한 시간 동기화 프로토콜  
 Fig. 3. Time synchronization protocols for UANet

고려하지 않음에서 도플러 편이를 고려하여 개발되고 있음을 그림 3에서 알 수 있다.

### 3.1 TSHL (Time Synchronization for High Latency)

TSHL<sup>[9]</sup>은 수중음향 네트워크의 긴 전파지연 시간을 고려한 최초 동기화 프로토콜로서 모두 2단계에 걸쳐 동기화가 수행된다. 그림 4에서와 같이, 1단계에서는 표준 시간이 되는 참조노드가 시간정보를 포함한 여러 개의 비콘 메시지를 브로드캐스팅하면 수신노드는 선형회귀를 방식을 통해 자신의 클럭 스큐를 보정한다. 2단계에서는 클럭 스큐를 보정한 노드들은 참조노드와 메시지 교환을 통해 클럭 오프셋을 보정한다.

TSHL의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 긴 전파지연 시간을 고려한 최초의 수중 동기화 프로토콜
- 노드가 고정적이고 전파지연시간 일정하다 가정
- 다중 홉 동기화 적용

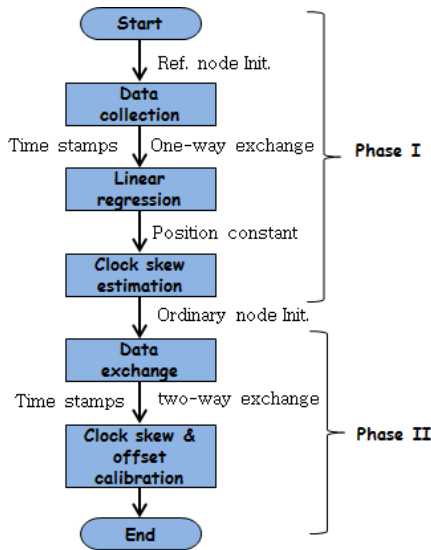


그림 4. TSHL 동기화 과정  
Fig. 4. Synchronization procedure of TSHL

### 3.2 MU-Sync

MU-Sync<sup>[10]</sup>는 해류로 인한 노드의 위치 변화를 고려한 동기화 방식으로 2번의 선형회귀를 수행하여 클럭의 스큐를 계산한다. TSHL은 편도통신방식을 통해 로컬 노드가 자신의 클럭 스큐를 계산하는 방식인 데 비해, MU-Sync는 클러스터 기반 네트워크 구조 아래 클러스터 헤더가 클러스터 내 노드들과 다수 개의 메시지를 교환하여 그 노드들의 클럭 스큐를 계산한다.

MU-Sync 동기화 알고리즘은 그림 5와 같이 2단계에 걸쳐 수행이 된다. 1단계에서 클러스터 헤더가 클러스터 내 노드들의 클럭스큐와 클럭 오프셋을 계산한다. 2단계에서는 클러스터 헤더가 클러스터 노드들에게 클럭 스큐와 오프셋 값을 알려주고 그 노드들은 로컬 클럭을 보정한다.

MU-Sync의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 노드의 이동성 고려
- 클러스터 기반 방식으로 클러스터 헤더가 클러스터 내 노드들의 클럭 스큐와 오프셋 계산
- 왕복 통신을 통한 여러 번의 메시지 교환으로 인해 에너지 효율성이 TSHL에 비해 떨어짐
- 에러율은 TSHL에 비해 좋음
- 메시지 교환 과정동안 전파지연 시간 일정하다고 가정함
- 2번의 선형회귀 수행

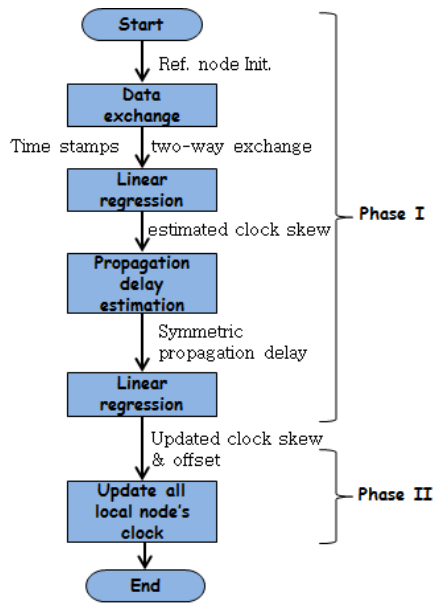


그림 5. MU-Sync 동기화 과정  
Fig. 5. Synchronization procedure of MU-Sync

### 3.3 Mobi-Sync

Mobi-Sync<sup>[11]</sup>는 노드의 공간상관관계를 이용하여 노드 간 전파지연 시간을 추정하고 이를 동기화 기법에 적용한다. 그림 6에서와 같이 동기화 과정은 크게 3 단계로 이루어지며, 1단계에서 노드의 공간상관관계를 이용하여 지연시간을 추정하고, 2단계에서 선형회귀를 통해 클럭스큐와 오프셋을 계산한다. 마지막 3단계는 동기화의 정확성을 높이기 위한 교정 단계로 지연시간



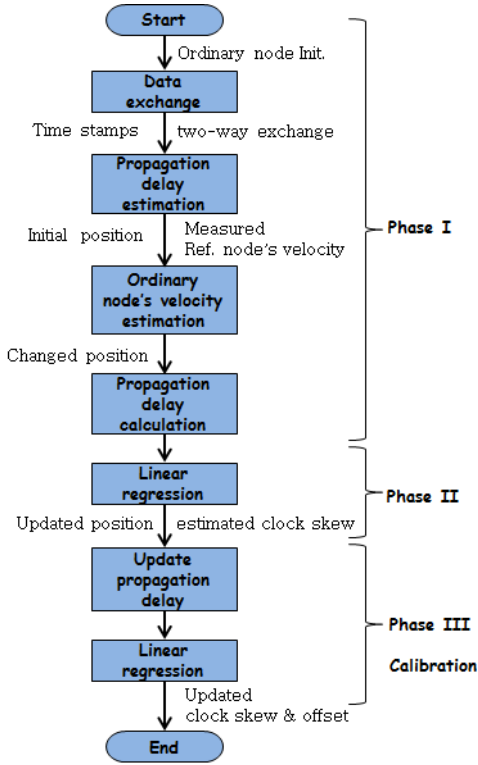


그림 6. Mobi-Sync 동기화 과정  
Fig. 6. Synchronization procedure of Mobi-Sync

을 재계산하고 선형회귀를 다시 수행하여 최종 클럭 스큐와 오프셋을 획득한다.

Mobi-Sync의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 노드의 이동성 고려
- 센서 노드는 여러 참조 노드와 메시지 교환을 통해 동기화
- 노드 간 공간상관관계 이용하여 센서노드의 속도 추정
- 정확한 공간상관관계 모델 필요
- 추진력을 가진 노드 간 상관관계 적용이 어려움
- 2번의 선형회귀 수행

### 3.4 D-Sync

D-Sync<sup>[12]</sup>는 송수신기의 상대속도에 따라 전송 신호의 주파수가 천이되는 도플러 편이를 이용한 최초의 수중 동기화 프로토콜이다. MU-Sync와 달리 D-Sync는 노드 간 시간 정보를 획득하기 위한 메시지 교환 과정에서 노드의 전파지연 시간이 변하는 것을 고려한 클러스터 기반 동기화 방식이다. 그림 7은 D-Sync 동기화 과정을 나타낸다. 클러스터 노드는 전파지연 시간의 변화량을 추정하기 위해 도플러 편이를 이용하여 노드 간 상대 속도를 계산한다. 변화된 전파지연시간을

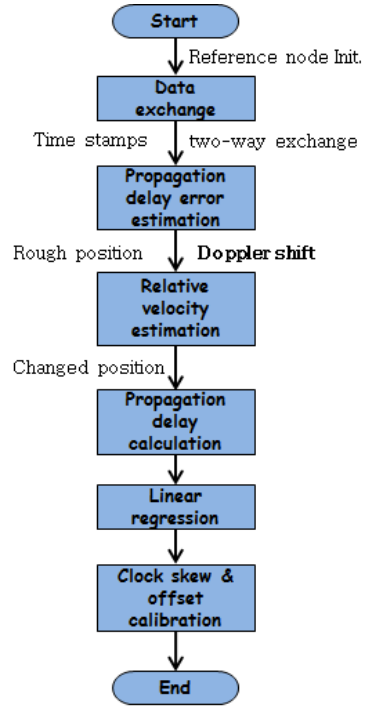


그림 7. D-Sync 동기화 과정  
Fig. 7. Synchronization procedure of D-Sync

토대로 클러스터 노드는 선형회귀를 수행하여 클럭의 오프셋과 스큐를 계산한다.

D-Sync의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 노드의 이동성 고려
- 클러스터 기반 방식으로 클러스터 헤더가 클러스터 내 노드들의 클럭 스큐와 오프셋 계산
- 도플러 편이를 이용한 전파지연 계산
- 메시지 교환 과정 시, 노드의 위치변화 고려
- 전파지연 시간동안 노드의 위치변화 무시
- 정확한 도플러 편이 정보 필요
- 물리계층 정보 이용 (도플러 편이)

### 3.5 TSMU (Time Synchronization Scheme for Mobile Underwater Sensor Networks)

TSMU<sup>[14]</sup>는 D-Sync와 마찬가지로 도플러 편이를 이용하였으며, 도플러 보정계수 (scaling factor)를 추정하는 과정동안 클럭 스큐에 미치는 영향을 고려한 동기화 프로토콜이다. 즉, 노드의 이동성과 클럭 스큐에 의한 영향력을 조합한 도플러 계수를 찾아 노드의 상대 속도를 추정하여 전파지연 시간을 계산한다. 그림 8에서와 같이 TSMU 동기화 과정은 크게 5단계로 데이터 수집, 속도 추정 개선, 전파지연 추정, 선형회귀,

교정과 같이 이루어진다.

1단계에서, 참조 노드와 로컬 노드 간 동기화를 위한 타임 스탬프 정보와 이동속도 정보가 포함된 메시지 교환을 수행한다. 2단계에서는 칼만필터를 사용하여 도플러 편이를 통해 1단계에서 측정한 속도를 수정한다. 3단계에서는 로컬노드가 단계 1, 2에서 수집한 정보를 토대로 전파지연 속도를 계산한다. 4단계에서는 로컬노드가 OLSE (ordinary lest square estimation) 기법을 통한 선형회귀 방식으로 자신의 클럭 스큐와 오프셋을 추정한다. 마지막 5단계에서는 교정을 위한 과정으로 초기 스큐와 수집한 속도 값을 갱신하여 동기화를 다시 수행하여 최종 클럭 스큐와 오프셋을 도출한다.

TSMU의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 노드의 이동성 고려
- 도플러 편이를 이용한 전파지연 계산
- 전파지연 시간동안 노드의 위치변화 고려
- 노드 간 속도 추정 시, 선형 운동 모델 적용
- 2번의 선형회귀 수행

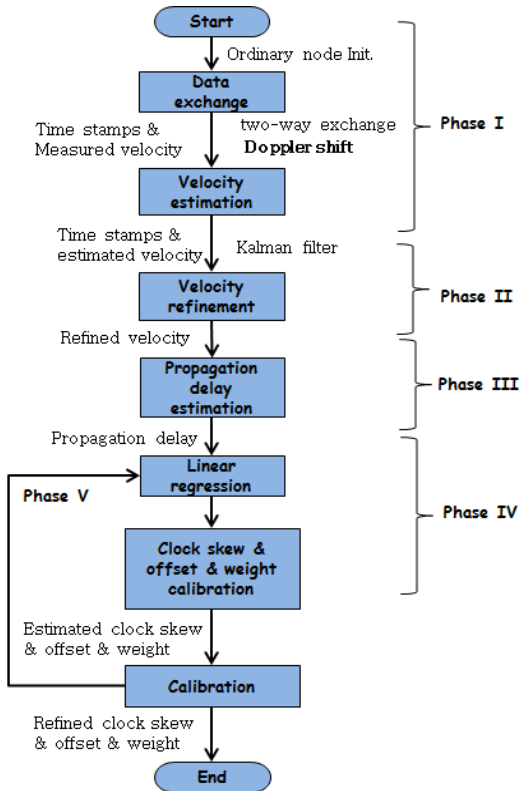


그림 8. TSMU 동기화 과정  
Fig. 8. Synchronization procedure of TSMU

### 3.6 JSL (Joint Time Synchronization and Localization)

JSL<sup>[15]</sup>은 노드 간 거리 추정 시, 수중 매질의 비균일성으로 인한 성층화 효과 때문에 TOA (Time of arrival) 측정만으로는 노드 간 거리 추정이 부정확한 점에 착안하여 고안되었다. JSL은 Berger의 논문<sup>[16]</sup>에서 페르마의 원리(Fermat's Principle)를 이용하여 최단 시간의 실제 음파경로 거리를 추정하여 음파지연시간 추정에 의한 시간 오류를 줄이는 방식을 이용한다. 또한 동기화의 정확도를 높이기 위해 위치인식 기법을 적용하여 추정된 전파지연시간을 갱신하여 클럭의 스큐와 오프셋을 재계산하는 과정을 순환 반복한다. JSL은 그림 9에서와 같이 4단계에 걸쳐 동작을 한다. 1단계에서는 데이터 교환을 통해 TDoA (Time difference of arrival) 방식(최소 참조 노드가 3개 이상 존재)에 의한 일반 노드의 대략적 위치를 추정 (least-squares method 적용)한다. 이후 2단계 동기화를 수행하고 3단계 위치인식 과정을 거쳐 노드의 위치를 갱신한다. 4단계는 갱신한 노드 위치를 토대로 2-3단계를 반복하여 동

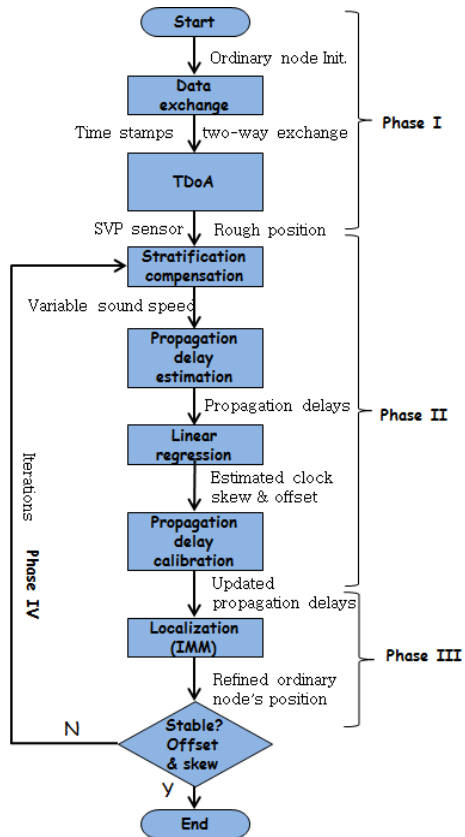


그림 9. JSL 동기화 과정  
Fig. 9. Synchronization procedure of JSL

기화의 정확도를 높인다. 2-4단계 과정은 다음과 같다.

① 1단계에서 구한 일반노드의 대략적인 위치와 참조노드 위치를 토대로 성층화 효과를 보상하여 전파지연시간을 추정

② 선형계산(OLSE)을 통해 클럭의 초기 스큐와 오프셋을 추정함

③ 앞서 추정한 초기 클럭스큐와 클럭 오프셋을 토대로 전파지연시간 갱신함 (①과정의 전파지연 시간보다 더 정확함)

④ ③에서 추정한 전파지연 시간을 토대로 IMM (Interactive multiple model) 위치 추적 알고리즘을 적용하여 노드의 위치를 추정하고, 두 개의 칼만필터를 이용하여 최종 노드의 위치 계산

⑤ ④의 결과를 토대로 다시 ①~④ 과정을 반복 수행하여 안정된 클럭 스큐와 오프셋 값 도출

JSL의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 노드의 이동성 고려
- 동기화 기법과 위치 인식 기법 조합
- 성층화 효과를 보정한 음파지연시간 추정
- 센서 노드는 여러 참조 노드와 메시지 교환을 통해 동기화

### 3.7 DA-Sync (Doppler Assisted Time Synchronization)

DA-Sync<sup>[13]</sup>는 TSMU 프로토콜의 확장된 개념으로

동기화 방식이 거의 유사하다. 특징으로 물리계층의 프리앰블과 도플러 보정계수를 이용하여 노드의 상대 속도를 측정하고 MAC 계층의 타임스탬프를 이용하여 전파지연 시간을 추정하는 교차 계층 (cross layer) 동기화 프로토콜이다. 물리계층에서 수신된 프리앰블 데이터간 자가 상관관계를 이용하여 도플러 보정 계수를 추정하는 것 외에는 TSMU와 동기화 과정이 동일하다. 따라서, 본 소절에서는 DA-Sync의 동기화 절차 과정은 생략하도록 한다.

DA-Sync의 특징은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 노드의 이동성 고려
- TSMU 프로토콜과 유사
- 물리계층 정보 이용 (도플러 편이)
- 다중홉 동기화 적용

## IV. 결 론

수중음향 네트워크는 다양한 분야의 어플리케이션에 적용되고 있다. 노드가 자율·독립적으로 동작하면서 서로 노드 간 통신을 통한 협업이 가능한 네트워크를 구성하기 위해서는 동기화가 전제되어야 한다. 육상과 달리 수중 음향네트워크 고유 특성으로 인해 동기화 방식은 수중네트워크에 특화된 프로토콜이 요구된다. 그 중에서 수중의 긴 전파지연과 해류에 의한 노드의 이동성은 수중 동기화를 더욱 어렵게 만드는 요인이다.

표 1. 수중 음향네트워크를 위한 시간 동기화 프로토콜 성능 비교  
Table 1. Performance comparison of time synchronization protocols for UANets

Sync. protocol	Factors for performance comparison					
	Sync. accuracy	Energy efficiency based on Sync. error	Energy efficiency based on signaling scheme	Signaling scheme	Network size	# of exchanged messages
TSHL	Poor	Very low	1	one-way	10-500m	25 after 5s
MU-Sync	Poor	Low	0.5	two-way	1000*1000m	20 after 10s
Mobi-Sync	Average	Average	0.75	broadcasting - multiple responses	50*50*50m	27, 36
D-Sync	Average	Average	0.5	two-way	1000*1000m 2-11 Nodes	20 after 10s
TSMU	Good	High	0.5	two-way	1000*1000*1000m, 30 Nodes	Unknown
JSL	Average	Average	0.75	broadcasting - multiple responses	200*200*1000m, 20 Nodes	30 after 100s
DA-Sync	Good	High	0.5	two-way	1000*1000*1000, 30 Nodes	20 after 10s



표 2. 수중 음향네트워크를 위한 시간 동기화 프로토콜 비교  
Table 2. Comparisons of time synchronization protocols for UANets

Synchronizati on protocol	Sync. initiating node	Mobility	Doppler shit	Velocity correlation	Propagation delay symmetry vs. asymmetry	Multi-hop	Linear regression	Sound speed	Stratification effect
TSHL	Reference	X	X	X	Symmetry	O	Once	Constant	X
MU-Sync	Reference	O	X	X	Symmetry	X	Twice	Constant	X
Mobi-Sync	Ordinary	O	X	O	Symmetry	X	Twice	Constant	X
D-Sync	Reference	O	O	X	Symmetry	X	Once	Constant	X
TSMU	Ordinary	O	O	X	Asymmetry	X	Twice	Constant	X
JSL	Ordinary	O	O	X	Asymmetry	X	Twice	Variable	O
DA-Sync	Ordinary	O	O	O	Asymmetry	O	Twice	Constant	X

이러한 제약 조건을 고려하여, 수중음향 네트워크를 위한 동기화 프로토콜에서는 해류에 의해 이동되는 노드 간 긴 전파지연을 얼마나 정확하게 추정하는가가 가장 큰 관건이다. 현재까지 개발된 수중 동기화 프로토콜은 이러한 긴 전파 지연 시간 추정을 통해 로컬 클럭의 스큐와 오프셋을 보상하여 시간 동기화를 보정하도록 하였다.

표 1은 수중 동기화 프로토콜의 성능 지표에 따라 비교 분석한 결과이다. 동기화 프로토콜마다 성능평가 조건 및 환경이 달라 정성적 평가와 객관적 조건을 만족하는 성능지표는 정량적 평가를 수행하였다. 성능 지표로는 동기화의 정확도(동기화 이후 증가하는 시간 오류), 시간 오류로 인해 소비되는 에너지 효율, 데이터 취득방식에 따른 에너지 효율, 데이터 취득 방식, 네트워크 사이즈(네트워크 통신범위, 구성 노드 수), 메시지 교환 수 등이다. 네트워크 사이즈 측면에서 동기화 성능은 노드간 거리가 늘어나거나, 노드의 수가 증가할수록 시간오류 및 에너지 소비가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 메시지 교환 수가 늘어날수록 동기화 성능은 좋아지는 반면 에너지 효율은 낮아진다. 대부분의 동기화 프로토콜은 메시지 교환 수가 일정 값 이상 되었을 때 시간 오류가 크게 낮아짐을 볼 수 있었고, 대략적인 메시지 교환 최적 값을 표에서 정리하였다.

표 2는 수중 동기화 프로토콜을 특징별로 비교 정리한 것이다. 표에서 보는 바와 같이, 수중 동기화 프로토콜은 비대칭적 전파지연시간, 도플러 편이, 노드의 이동성, 성층화 효과 등 보다 실제 수중 환경을 고려하여 개발 중이다. 효율적인 수중 동기화 프로토콜을 개발하기 위해서는 표 2에서 고려한 수중 환경 변수 외에도 우선적으로 고려해야 하는 것이 수중 어플리케이션이다. 따라서, 수중 동기화 프로토콜은 목표 어플리케이션에 따라 적합한 수중 노드의 특성 네트워크 구조를 도출하여 설계되어야 한다.

케이션에 따라 적합한 수중 노드의 특성 네트워크 구조를 도출하여 설계되어야 한다.

### References

- [1] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, "Clock synchronization for wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Netw.* vol. 3, pp. 281-323, May 2005.
- [2] I-K. Rhee, J. Lee, J. Kim, E. Serpedin, and Y.C. Wu, "Clock synchronization in wireless sensor networks: an overview," *Sensors*, vol. 9, pp. 56-85, Jan, 2009.
- [3] P. Ranganathan and K. Nygard, "Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: A survey," *Int. J. UbiComp*, vol. 1, no. 2, pp. 92-102, Apr. 2010.
- [4] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," in *5th symp. Operating systems design and implementation*, Digital Library, pp. 147-163, New York, 2002.
- [5] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. Srivastava, "Timing sync protocol for sensor networks," *ACM SenSys*, Los Angeles, Nov. 2003.
- [6] M. Maróoti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, "The flooding time synchronization protocol," *ACM SenSys*, pp. 39-49, Baltimore, Maryland, 2004,
- [7] J. V. Greunen and J. Rabaey, "Lightweight time synchronization for sensor networks," *ACM WSNA*, pp. 11-19, San Diego, CA, Sept.

2003.

[8] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li., "Research challenges and applications for underwater sensor networking," *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, pp. 228-235, Washington, 2006.

[9] A. Syed and J. Heidemann. "Time synchronization for high latency acoustic networks," in *Proc. IEEE Infocom*, Barcelona, Spain, Apr. 2006.

[10] N. Chirdchoo, W. S. Soh, K. C. Chua, "MU-Sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks," in *Proc. WUWNet'08*, pp. 35-42, 2008.

[11] J. Liu, Z. Zhou, Z. Peng, and J-H. Cui, "Mobi-Sync: Efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks," *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Syst.*, Vol. 24, no. 2, pp. 406-416, Feb. 2013.

[12] F. Lu, D. Mirza, and C. Schurger, "D-Sync: Doppler based time synchronization for mobile underwater sensor networks," *ACM WUWNET*, Woods Hole, MA, 2010.

[13] J. Liu, Z. Wang, M. Zuba, Z. Peng, J. Cui, and S. Zhou, "DA-SYNC: A doppler assisted time synchronization scheme for mobile underwater sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 13. no. 3, pp. 582-595, Mar. 2014.

[14] J. Liu, Z. Wang, Z. Peng, M. Zuba, J.-H. Cui, and S. Zhou, "TSMU: A time synchronization scheme for mobile underwater sensor networks," *IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Dec. 2011.

[15] J. Liu, Z. Wang, Z. Peng, M. Zuba, J.-H. Cui, and S. Zhou, "JSL: Joint time synchronization and localization design with stratification compensation in mobile underwater sensor networks," *IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor, Mesh and Ad Hoc Commun. Netw. (SECON)*, pp. 317-325, Jun. 2012.

[16] C. R. Berger, S. Zhou, P. Willett, and L. Liu, "Stratification effect compensation for improved underwater acoustic ranging," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 8, pp. 539-546, 2008.

[17] A. R. Cho, C. Y. Yun, J. W. Park, and Y. K. Lim, "Mobile nodes based adaptable TDMA for clustered underwater acoustic network," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2009 (KICS ICC 2009)*, pp. 282-283, Korea, Jun. 2009.

[18] C. Y. Yun, J. W. Park, Y. C. Choi, A. R. Cho, and Y. K. Lim, "Clustered TDMA (CTDMA) MAC protocol for underwater acoustic networks," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2009 (KICS ICC 2009)*, pp. 266-267, Korea, Jun. 2009.

[19] S. K. Kim, S. J. Park, and Y. H. Yoo, "Time Synchronization with Oceanic Movement Pattern in Underwater Wireless Networks," *The J. Korea Inf. and Comm. Society (KICS)*, vol. 38, no. 5, pp. 486-496, May 2013.

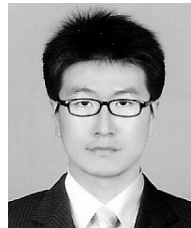
조 아 라 (A-ra Cho)



2002년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업  
 2012년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 (UST) 해양정보통신학과 박사  
 2012년 3월~현재 : 한국해양과학기술원 (KIOST) 해양시스템연구부 박사후 과정

<관심분야> 수중음향 네트워크, 해상통신 네트워크

윤 창 호 (Changho Yun)



1999년 2월 : 창원대학교 메카트로닉스학과 졸업  
 2004년 2월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과 석사  
 2007년 8월 : 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과 박사  
 2007년 11월~2008년 12월 :

North Carolina State Univ. 전산학과 박사후 과정  
 2008년 12월~현재 : 한국해양과학기술원 (KIOST) 해양시스템 연구부 선임연구원  
 <관심분야> 수중음향 네트워크, 해양 선박 네트워크

임 용 곤 (Yong-kon Lim)



1979년 2월 : 충남대학교 전기공학  
학과 졸업

1984년 2월 : 충남대학교 전력전자  
공학 석사

1994년 2월 : 아주대학교 전자공학  
박사

1980년 7월~현재 : 한국해양과학기술원 (KIOST) 해양시스템연구부

<관심분야> 수중음향 통신 시스템 및 네트워크, 네트워크  
프로토콜