

# 수중 무선센서네트워크에서 수중채널의 특성을 활용한 DTN 라우팅 프로토콜

박성진\*, 김성렬\*, 유영환<sup>o</sup>

## DTN Routing Protocol Utilizing Underwater Channel Properties in Underwater Wireless Sensor Networks

Seongjin Park\*, Sungryul Kim\*, Younghwan Yoo<sup>o</sup>

### 요 약

최근 해양 플랜트, 해저 탐사, 수중 모니터링 시스템 등에 대한 관심이 급증하고 있으며, 그에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 하지만, 수중 무선 통신은 물속이라는 특수한 환경적 요소로 인해 지상에 비해 매우 열악한 통신 환경을 가진다. 이로 인해 기존에 사용하던 지상 통신의 방법을 수중에 그대로 적용하는 것은 성능적인 면에서 적합하지 않다. 이에 본 논문은 수중 무선 센서네트워크에서 통신 신뢰성을 향상시키기 위하여 수중 환경의 특성을 직접적으로 고려한 라우팅 알고리즘을 제시한다. 특히, 수중 무선 통신을 어렵게 만드는 두 가지 문제, 즉, 다중경로 문제와 신호의 감쇠현상을 해결함으로써 수중에서 보다 나은 신뢰성을 보장하고자 한다. 또한, 실험을 통하여 제시하는 알고리즘이 보다 나은 성능을 보임을 증명하였다.

**Key Words** : Signal attenuation, Vertical channel, DTN routing, Underwater sensor network

### ABSTRACT

Recently, the ocean field researches such as offshore plant, ocean survey and underwater monitoring systems are garnering the attention from both academy and industry. However, the communication in underwater environment is very difficult because of the unique irregular features in water. This is the reason that the application of terrestrial protocols to the water environment is not proper. This paper proposes a routing algorithm that can enhance communication reliability by utilizing channel properties in underwater environment. We address two problems that lead to the poor communication performance, signal attenuation and multi-path problem in water. Overcoming these problems, the proposed algorithm ensures high packet delivery ratio and low transmission delay. Also, this paper evaluates the performance through simulation.

### I. 서 론

수중 무선통신은 지상과는 달리 매우 열악한 통신

환경이다. 기본적으로 수중에서는 고주파인 전자기파를 사용할 수 없고, 저주파인 음파를 사용해야 한다. 따라서 수중 통신은 매우 높은 전송 지연시간을 갖는

※ 본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

♦ First Author : Pusan National University Department of Computer science & Engineering xkqpekd100@pusan.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Pusan National University Department of Computer science & Engineering ymomo@pusan.ac.kr, 중신회원

\* Pusan National University Department of Computer science & Engineering xmfhxm12@pusan.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2014-05-193, Received May 26, 2014; Revised August 1, 2014; Accepted September 18, 2014

다. 또한, 거리에 따른 신호의 감쇠현상이나 해수면과 바닥으로 인한 신호 간 다중 경로 현상이 지상보다 극심하므로 통신의 신뢰성이 매우 낮다<sup>11</sup>.

이런 면에서 수중 무선통신은 DTN(Delay/Disruption Tolerant Network)의 범주에 포함시킬 수 있다. DTN은 높은 전송지연 시간이나 빈번한 통신 단절을 용납하는 네트워크를 의미한다. DTN이 적용되는 분야는 물체의 움직임이 많아 네트워크 토폴로지가 유지될 수 없는 경우, 혹은 지하 통신과 같이 채널 환경이 고르지 못한 경우 등을 포함한다.

DTN은 번들 프로토콜(Bundle Protocol)을 기본으로 하는데, 이는 네트워크가 항상 연결되어 있는 것이 아니기 때문에 기존의 store & forward 방식이 아닌 운반이 포함된, store & carry & forward 방식을 사용한다는 것이다<sup>12</sup>. 수중 통신도 마찬가지다. 수중에서 노드들은 닻에 고정되어 있다는 가정을 하더라도 해류에 의해 움직이게 되고 동일한 네트워크 토폴로지를 유지할 수 없게 된다. 또한 수중채널의 특성 상 매우 낮은 통신 신뢰성을 가지므로 메시지를 저장하고 있다가 기회가 생겼을 때 전송하는 라우팅 기법을 사용하는 것이 효과적이다. 따라서 본 논문은 열악한 통신환경을 전제하고 있는 수중 무선네트워크를 DTN으로 정의하고 수중에서 보다 신뢰성 있는 전송 방법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 선행된 연구들의 특징과 한계점을 조사하고, III장에서는 수중 채널의 특성을 분석하고, IV장에서는 분석한 문제점을 극복하기 위해 본 논문이 제안하는 알고리즘을 설명할 것이다. 이어서 V장에서 실험 결과를 통해 제안하는 알고리즘이 비교대상보다 나은 결과를 보인다는 것을 증명한 후에 VI장에서 결론을 맺을 것이다.

## II. 관련연구

수중 무선네트워크에서 DTN 라우팅 기법들을 제시한 기존 연구들이 있다. 기존 연구에 따르면 DTN 라우팅은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 포워딩 기반과 복제 기반의 라우팅이다<sup>13</sup>.

대표적인 복제 기반의 라우팅은 epidemic routing<sup>14</sup>이다. epidemic routing의 동작 과정은 단순하다. 송신 노드는 전송 범위 내에서 마주치는 노드마다 전송할 메시지를 복제한다. 이러한 상황이 반복되면 메시지가 결국 최종 목적지까지 이르게 된다. 이러한 복제 기반의 라우팅은 네트워크 내에 중복되는 패킷을 허용하므로 높은 전송 성공률을 가지지만, 네트워크에 존재

하는 동일한 내용의 패킷으로 인한 오버헤드가 발생한다. 이를 해결하기 위해 복제되는 메시지의 개수나 노드의 개수를 조절하여 제한적으로 복제하는 방법, 혹은 다른 노드들과의 만남의 빈도가 높은 노드에게 더 많은 메시지를 복제하는 등의 유틸리티 기반의 복제 기반 라우팅도 연구되었다<sup>5,6</sup>. 그러나 에너지를 지속적으로 공급받기가 어렵기 때문에 적은 전력으로 통신해야 하는 수중 환경에서 복제 기반의 라우팅은 에너지 소모적인 측면에서 적합하지 않다.

포워딩 기반의 라우팅은 네트워크 내에 중복되는 패킷을 생성하지 않는다. 왜냐하면, 포워딩을 할 때 이웃 노드 중에서 하나의 노드만을 선정하기 때문이다. 따라서 포워딩 기반의 라우팅은 포워딩을 할 때 적절한 포워딩 결정 기준이 필요하다. 기존의 연구들은 이웃 노드들의 잔여 배터리, 움직임 정보, 위치 혹은 확률 값들 등 일반적인 정보를 이용하였다<sup>7</sup>. 하지만, 수중 통신의 채널 특성을 직접적으로 활용한 연구는 없었다. 본 논문은 수중채널의 특성을 직접적으로 활용한 라우팅 기법을 소개하고자 한다.

## III. 수중 채널 분석

지상에 비해 수중에서의 통신을 어렵게 만드는 대표적인 수중채널의 특성으로는 신호의 감쇠현상과 다중경로 현상을 들 수 있다.

### 3.1 path loss

수중환경에서 신호 감쇠를 수식으로 표현하면 수식 (1)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.  $l$ ,  $f$ 는 각각 거리와 주파수이고,  $a(f)$ 는 흡수계수를 뜻한다.  $k$  값은 확산 인자로서, 신호의 확산형태에 따라서 1~2 값이 결정된다.  $k$  값이 1일 경우 신호의 확산은 원통 모양이고,  $k$  값이 2일 때는 구 형태이다. 얇은 물에서는 원통 모양으로, 깊은 물에서는 구 형태로 확산된다. 일반적인 경우에는  $k$  값을 1.5로 둔다.

$$10\log A(l, f)/A_0 = k \cdot 10\log l + l \cdot 10\log a(f) \quad (1)$$

더불어, 수중 환경에서 전송에 큰 영향을 주는 것은 잡음이다. 수중에서 발생할 수 있는 잡음은 크게 네 가지로 나눌 수 있다. 각각 난류에 의한 잡음, 선박에 의한 소음, 파도, 전기적 잡음인 열잡음이 있다. 수식 (2)는 각각의 경우를 수식으로 표현한 것이다. 이 때,  $f$ 는 주파수이고  $s$ 는 선박 활동의 정도를 결정짓는 값,  $w$ 는 바람의 세기를 나타낸다. 그리고 네 가지의 경우

를 다 더하면 수중에서 발생하는 전체의 잡음이 된다.

$$\begin{aligned}
 10 \log N_r(f) &= 17 - 30 \log f \\
 10 \log N_s(f) &= 40 + 20(s - 0.5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0.03) \\
 10 \log N_w(f) &= 50 + 7.5 w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4) \\
 10 \log N_{th}(f) &= -15 + 20 \log f
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

수식 (1)과 수식 (2)를 이용하면 그림 1과 같이 주파수에 따른 신호 감쇠현상과 잡음의 크기 변화를 알아 볼 수 있다. 그림 1은 확산 인자  $k = 1.5$ ,  $s = 0.5$ ,  $w = 0$ 일 때의 결과 값  $1/AN$ 을 그래프로 표현했다.  $AN$ 은 신호 감쇠와 잡음 값을 곱한 값이고,  $1/AN$  값은 SNR(signal-to-noise ratio) 값과 비례 관계에 있다<sup>[8]</sup>. 그림 1에서 확인할 수 있듯이, 각 거리에 따라 가장 높은 SNR 값을 갖게 하는 주파수가 존재함을 알 수 있다.

그림 2는 거리에 따라 SNR 값을 최대로 하는 이상적 주파수 값을 그래프로 나타낸 것이다<sup>[8]</sup>. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 거리가 가까울수록 높은 주파수를 사용하여 통신하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있

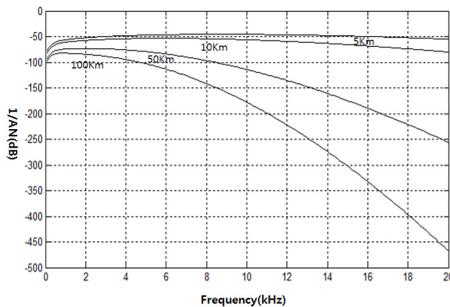


그림 1. 주파수에 따른  $1/AN$  값  
Fig. 1. Frequency dependent part of SNR,  $1/AN$

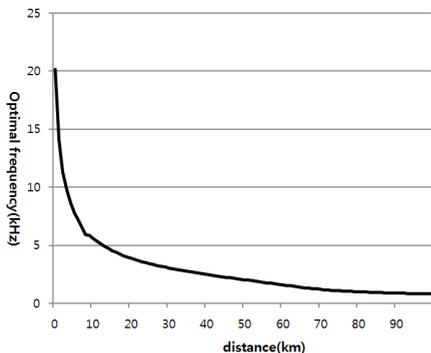


그림 2. 거리에 따른 이상적 주파수 값  
Fig. 2. Optimal frequency against distance

다. 높은 주파수를 사용하면 대역폭이 증가하여 많은 양의 데이터를 보내 것 또한 가능하다.

수식 (3)는 전송과위를 수식으로 표현한 것이다.  $l$ 은 거리,  $B(l)$ 은 주파수 대역폭,  $SNR_0$ 는 미리 정의된 최소 SNR 값을 나타낸다.

$$P(l) = SNR_0 B(l) \frac{\int_{B(l)} N(f) df}{\int_{B(l)} A^{-1}(l, f) df}
 \tag{3}$$

위 수식을 이용하면 그림 3과 같이 거리에 따른 전송 세기를 그래프로 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>. 그림 3에서 확인할 수 있듯이 거리가 가까워질수록 전송 세기는 급격히 감소한다.

신호감쇠 현상을 근거해서 수중채널을 분석해보면, 근거리 통신이 에너지 소모를 줄일 뿐만 아니라 높은 주파수를 사용함으로써 많은 양의 데이터를 보낼 수 있음을 알 수 있다. 전송률은 다음과 같이 수식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$T(n) = \frac{L}{\Delta path(n)}, \Delta path(n) = \frac{nL}{\alpha B \left(\frac{D}{n}\right)} + \frac{D}{c}
 \tag{4}$$

이 때,  $L$ 은 전송량,  $\Delta path(n)$ 은 목적지까지의 전송 지연 시간이다.  $n$ 은 홉의 개수,  $D$ 는 목적지까지의 거리,  $B(l)$ 은 거리에 따라 사용가능한 대역폭,  $c$ 는 음속,  $\alpha$ 는 대역폭 효율 값을 뜻한다.  $\Delta path(n)$ 은 전송시간 (transmission time)과 전파시간(propagation time)으로 나눌 수 있는데 전파시간은 홉의 개수에 영향을 받지 않는다. 전송시간은 홉의 개수에 영향을 받게 되는데 지상에서는 홉이 늘어날수록 전송 시간이 커져서 종단 간 전송률이 낮아지지만, 수중에서는 수식과 같이 홉의 증가로 늘어난 전송시간을 높은 대역폭을 사

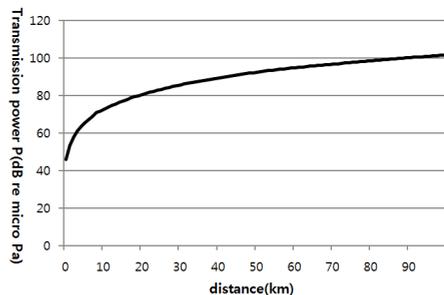


그림 3. 거리에 따른 전송 세기  
Fig. 3. Transmission power against distance

용함으로써 줄일 수 있다<sup>9)</sup>. 이때 대역폭  $B(l)$ 은 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>.

$$B(l) = bl^{-\beta} \quad (5)$$

$B(l)$  값은 지수 형태로 거리가 가까워질수록 급격히 증가한다. 따라서 수중에서는 에너지 절약 및 데이터 전송률 측면에서 장거리 통신보다 멀티 홉 (multi-hop) 통신이 유리하다. 멀티 홉 통신의 단점은 목적지까지 여러 노드를 거쳐 가야 하기 때문에 지연 시간이 증가한다는 것이다.

### 3.2 다중경로 문제

수중에서는 그림 4와 같이 수표면과 바닥에서 반사되는 신호로 인해 다중경로 현상이 지상에서 보다 빈번하게 발생한다. 경로 (a)는 직접 경로로서 송신 노드와 수신 노드까지 아무런 방해받지 않고 신호가 도착하지만, 수표면에 반사되는 신호인 경로 (b)와 바닥에 반사된 신호인 경로 (c)로 인해 신호 간 간섭 현상이 발생하게 된다.

일반적으로 다중 경로 현상은 수직 방향의 채널보다 수평 방향의 채널이 더욱 심각한 것으로 알려져 있다. 직관적으로 생각했을 때, 수직한 채널은 수표면이나 바닥에서 반사되는 신호가 거의 발생하지 않기 때문에 다중 경로로 인한 신호 간 간섭현상이 거의 일어나지 않기 때문이다.

그림 5는 송수신 노드간의 거리가 수평 방향으로 50미터 떨어져 있을 때, 관측된 신호 세기의 누적확률 분포를 그래프로 그린 결과이다. 관측된 값은 Rayleigh 페이딩과 유사한 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 노드 간 거리가 1020미터 일 때의 결과이다. 그림 6에서 관측된 페이딩 값은 Rayleigh 페이딩보다는 2-path Rayleigh 페이딩에 더욱 가까운 것을

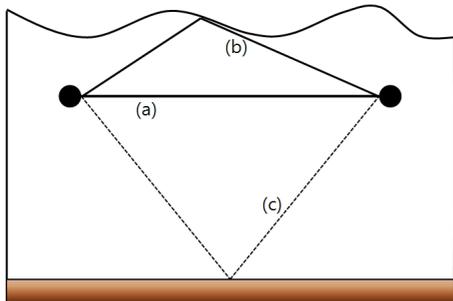


그림 4. 수중 환경에서 다중경로 현상  
Fig. 4. Multi-path problem in underwater environment

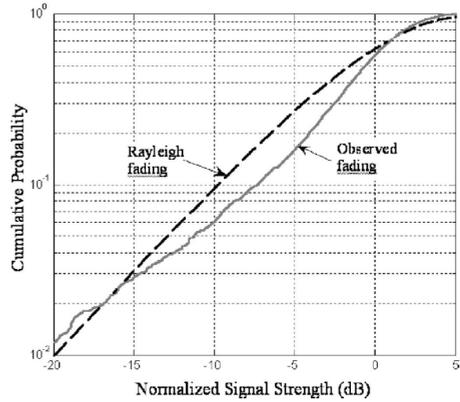


그림 5. 50미터 거리에서 관측된 페이딩 현상<sup>10)</sup>  
Fig. 5. Observed fading of arrival at 50m<sup>10)</sup>

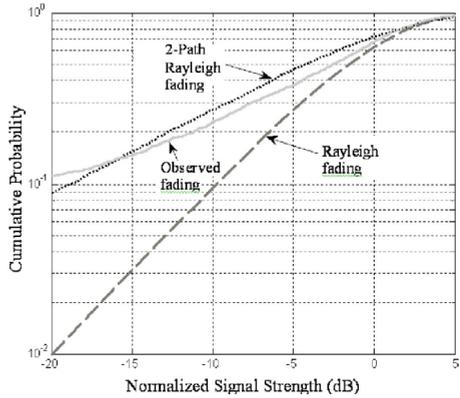


그림 6. 1020미터 거리에서 관측된 페이딩 현상<sup>10)</sup>  
Fig. 6. Observed fading of arrival at 1020m<sup>10)</sup>

확인할 수 있다. 그 이유는 수평 방향의 거리가 멀어질수록 다중 경로 현상으로 인한 신호 간 간섭현상이 극심해지기 때문이다.

## IV. 제안 알고리즘

앞서 살펴본 수직채널의 특성을 활용하여 수중환경에 적합한 DTN 라우팅 방법을 제시한다. 먼저 응용의 환경을 설명하고 라우팅의 동작과정을 자세하게 설명한다.

### 4.1 네트워크 환경

본 논문에서 고려하는 네트워크 환경은 그림 7과 같다. 네트워크는 크게 수중 통신과 수표면 통신으로 나눌 수 있다. 수표면에는 부표에 부착된 노드들이 싱크 노드의 역할을 하며, 본 논문에서는 이를 부표 노드라고 부른다. 수중에는 일반 노드들이 배치되어 있

으며, 해류에 의해 떠내려가는 것을 방지하기 닻에 의해 바닥에 고정되어 있다고 가정한다. 또한 수중노드들은 압력센서를 통해 자신의 깊이 정보를 알 수 있다. 수표면 통신은 부표 노드들 간의 통신으로서 전자기파를 이용한 통신을 할 수 있다. 즉, 수표면 통신은 수중 통신보다 매우 높은 통신 신뢰성과 낮은 전송 지연 시간을 보장할 수 있다. 반면 수중 통신은 수중에 위치한 노드들 간의 통신으로 낮은 통신 신뢰성과 높은 전송 지연시간을 갖는다. 수중 노드들은 자신이 수집한 정보를 부표 노드로 전송하는 역할을 하고, 부표 노드는 전송받은 메시지를 기지국까지 전달하는 역할을 한다.

#### 4.2 제안 알고리즘

본 논문이 제시하는 알고리즘은 III장에서 분석한 수중 채널의 두 가지 특성을 활용한다. 첫 번째는 신호 감쇠현상으로 송수신 노드 간 거리가 짧을수록 많은 양의 데이터를 적은 에너지로 보낼 수 있다는 점이다. 두 번째로는 다중 경로 현상으로서, 수평 방향의 채널 보다는 수직 방향의 채널을 선택하는 것이 신호 간 간섭현상을 줄일 수 있다는 것이다.

그림 7에서 경로 A는 기지국까지의 최단 경로처럼 보이지만, 통신 환경이 열악한 수중 통신을 오래 거쳐야 하므로 통신 신뢰성 측면과 전송 지연시간 측면에서 좋지 않은 성능을 보인다. 하지만, 경로 B의 경우가 가장 가까운 부표 노드로 수직한 방향으로 메시지를 전달함으로써 열악한 수중 환경을 일찍 벗어날 수 있다. 따라서 경로 B가 경로 A보다 통신 신뢰성도 높고 전송 지연시간도 줄일 수 있다.

본 논문이 제안하는 라우팅의 동작과정은 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 송신 노드가 메시지를 전송하기

전에 자신의 이웃노드의 정보를 수집하기 위한 정보 수집 단계, 그리고 이웃노드들 중 메시지를 포워딩할 노드를 선정하기 위한 포워딩 노드 선정 단계, 마지막으로 각 노드의 유한한 버퍼를 관리하는 단계가 있다.

##### 4.2.1 정보 수집

수중노드는 센싱한 정보를 전송하기 전에 먼저 포워딩 할 이웃 노드가 존재하는지를 확인하기 위해 신호를 주기적으로 발생시킨다. 만약, 전송범위 내에 포워딩이 가능한 이웃 노드가 신호를 듣게 되면 자신의 깊이 정보를 포함한 메시지를 다시 전달한다.

이때, 송신 노드는 낮은 주파수를 이용하여 이웃노드 정보를 수집하게 되는데, 그 이유는 낮은 주파수는 많은 양의 데이터를 전송할 수는 없지만 장거리 통신이 가능하기 때문이다. 정보 수집단계에서는 많은 양의 데이터를 전달할 필요가 없기 때문에 낮은 주파수를 사용하는 것이 효율적이다.

정보 수집단계는 포워딩할 이웃 노드들의 후보 그룹을 정하는 단계이므로 전송 범위를 정하는 것이 중요하다. 전송 범위를 정하기 위해서는 두 가지를 고려해야 하는데, 첫 번째는 신호 감쇠현상을 극복하기 위해 근거리 통신을 사용하는 것이 에너지 소비 및 데이터 전송률 측면에서 효율적이라는 것이다. 두 번째는 근거리 통신만을 고집하면 목적 노드까지의 전체 전송 지연시간이 늘어난다는 점이다. 따라서 전송 범위를 결정할 때는 응용에 따라 이 두 가지 상황을 충족시키는 적절한 값을 정해야 한다.

구하고자 하는 적절한 전송범위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{opt} = \frac{D_b}{H_{mc}} \tag{6}$$

이때,  $D_b$ 는 센서노드에서 부표노드까지의 거리이고,  $H_{mc}$ 는 응용레벨에서 설정하는 값으로 최대로 허용하는 부표노드까지의 홉 수로서 응용의 요구에 따라 결정된다. 예를 들면, 침입자 감지와 같이 신속한 전달이 중요한 응용에서는  $H_{mc}$ 의 값을 최소화하여 전송지연 시간을 줄여야한다. 반대로 본 논문에서 가정하는 수중 모니터링 시스템에서는 전달되는 지연 시간은 비교적 중요하지 않기 때문에  $H_{mc}$  값을 크게 설정하여 전송량 측면에서 이득을 볼 수 있다. 하지만, 홉의 개수가 일정 개수를 넘어서면 오히려 수신하는 에너지 소비의 증가로 인해 전체 에너지 소모가 늘어날수도 있다<sup>9)</sup>.

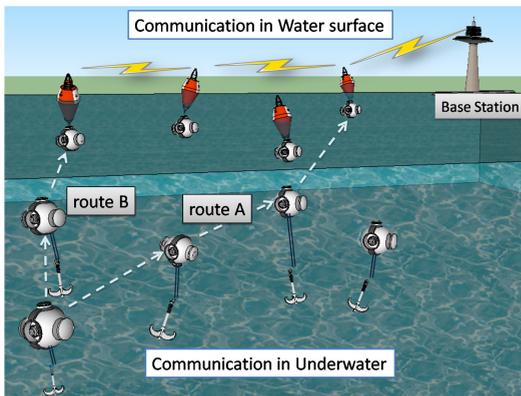


그림 7. 수중 통신과 수표면 통신  
Fig. 7. Underwater and surface communication

전송 지연시간은 송신 노드로부터 부표 노드까지 전체 홉 수에 비례한다. 따라서 허용되는 최대 홉 수가 결정되면 그에 따른 전송범위를 결정한다. 최대 홉 수가 클수록 전송 범위는 줄어들고 근거리 통신이 가능하게 된다. 본 논문에서 가정하는 응용은 수중 모니터링 시스템이기 때문에 전송 지연시간에 있어서 어느 정도 허용된 값을 정할 수 있다. 응용에 맞는 전송 범위가 정해지면 그에 따라 전송 모뎀 제작 시에 주파수를 결정할 수 있고, 전송 범위가 작으면 높은 주파수를 사용할 수 있다.

4.2.2 포워딩 노드 선정

포워딩할 이웃 노드들의 정보 수집이 끝난 후에는 포워딩할 이웃 노드를 선택해야 한다. 선정 기준은 수중 통신의 문제점인 다중경로 현상을 극복하기 위해 최대한 수표면과 수직한 채널을 사용하는 것이다.

그림 8에서 노드 A가 수집한 정보를 수표면에 있는 부표노드로 메시지를 전송하고자 하는 경우를 생각해 보자. 이웃 노드 간 정보 수집단계에서 노드 A는 전송범위 내에 위치한 노드들의 깊이 정보를 얻을 수 있다. 확보한 이웃 노드들의 깊이 정보를 이용하여 이웃노드들을 단계별로 나눈다. 이 중에서 가장 높은 레벨에 위치한 노드 즉, 수표면과 가장 가까운 노드를 선정하도록 한다.

만약, 가장 높은 레벨에 위치한 노드가 2개 이상이라면 이웃 노드들이 보낸 신호 중에서 가장 신호가 강한 노드를 최종 포워딩 노드로 선정한다. 그 이유는 같은 깊이 레벨에 있는 노드 중에서 RSSI가 강한 노드가 노드 A로부터 가장 수직한 방향에 위치해 있을 것이기 때문이다. 수중 통신의 특성상 RSSI의 값은

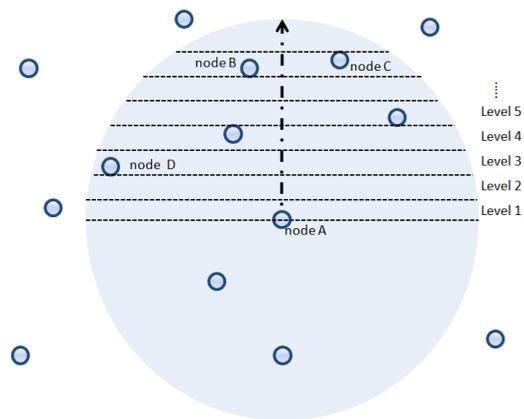


그림 8. 포워딩 노드 선정  
Fig. 8. Selecting forwarding node

부정확하겠지만, 제안하는 알고리즘에서는 RSSI의 정확한 값이 필요한 게 아니라 각 노드 RSSI들 사이의 상대적 크기만 알면 된다. 또한, 추가로 다른 오버헤드가 들지 않기 때문에 합리적인 선택이다. 그림에서는 노드 B가 최종 포워딩 노드로 선택된다.

4.2.3. 노드의 버퍼 관리

DTN 라우팅에서 포워딩 노드를 선정하는 것도 중요하지만, 저장 공간을 관리하는 것 역시 중요하다. 각 노드가 메시지를 저장할 수 있는 공간은 제한적이므로, 메시지 포워딩 시에 어떤 패킷을 전송할 것인지 혹은 더 이상 저장할 공간이 없을 때 어떤 패킷을 버릴 것인지를 결정해야 한다.

본 논문은 이를 위해, 적절한 결정기준을 제안하고자 한다. 먼저, 노드가 저장할 수 있는 용량을 초과했을 경우, 오래된 정보를 우선적으로 제거한다. 그 이유는 수중 환경 모니터링 시스템에서 예전 정보는 최신 정보에 비해 중요도가 낮기 때문이다. 하지만, 포워딩 시에 전송할 패킷을 결정할 때는 노드의 상태를 고려한다.

그림 9와 같이 전송범위 내에 포워딩 가능한 노드들이 충분한 경우, 이전 패킷에 높은 우선순위를 부여한다. 반대로, 포워딩 가능한 노드가 적은 경우, 즉 이웃 노드들로부터 고립된 노드는 최신 패킷에 높은 우선순위를 부여한다. 왜냐하면, 고립된 노드는 패킷을 전송할 수 있는 기회가 적기 때문에 이전 패킷의 정보는 이미 다른 경로를 통해서 전달되었을 가능성이 높고, 오랜 시간 후에 도착한다 하더라도 오래된 정보는

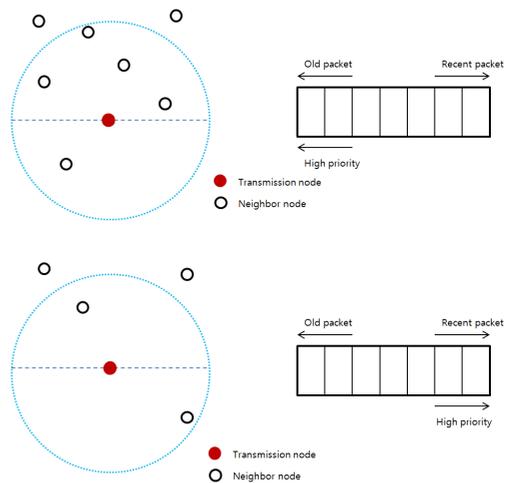


그림 9. 노드의 상태에 따른 패킷 우선순위  
Fig. 9. Packet priority by node deployment

큰 가치가 없기 때문이다.

### V. 실험

수중의 채널 환경을 고려한 실험을 하기 위하여 matlab으로 작성된 수중 채널 시뮬레이터<sup>11)</sup>를 이용했다.

수중 채널에서는 시간에 따라 변하는 다중 경로 현상을 고려하기 위해 전달 함수를 사용한다. 전달 함수는 아래 수식 (7)과 같다.

$$H(f, t) = \sum_p h_p(t_n) \gamma_p(f, t) e^{-j2\pi f \tau_p(t)}, t \in T_n \quad (7)$$

이 때,  $Y_p(f, t)$ 는 각 경로 p에 대한 산란 계수를,  $h_p(m)$ 은 경로 p의 경로 이득을,  $\tau_p(m)$ 는 도플러 인자에 의해 변하는 경로 p의 지연 시간을 나타낸다. 채널의 전달 함수는 채널의 이득값을 구하는 데 사용되고 수중 채널 시뮬레이터는 결국 채널 이득의 평균값을 결과값으로 도출해 낸다.

이 때 전송 성공여부를 결정짓기 위하여 채널시뮬레이터를 통해 계산된 채널 이득값을 사용하였다. 채널 이득값의 평균값을 미리 계산한 후에 해당 값을 한계값으로 설정하였다. 메시지를 전송할 때마다 각 노드의 위치정보를 입력 값으로 채널 이득값을 계산해 내면, 해당 값이 한계치보다 높거나 같을 경우 전송이 성공, 그렇지 않을 경우 실패로 처리하도록 하였다.

#### 5.1 실험 환경

제안 방법과 성능을 비교하기 위해 사용한 알고리즘은 간단하다. 포워딩 노드를 결정할 때 비교 대상은 전송 가능 범위 내에서 목적지 노드나 부표노드에 가장 가까운 노드를 포워딩 노드로 결정한다.

비교 대상의 경우, 목적지 노드까지의 거리를 알기 위해 포워딩 노드가 현재 자신의 위치 정보를 알고 있어야 한다는 제약이 따른다. 하지만, 수중은 GPS를 사용하기에 부적합한 환경이고, 위치 추정기법을 사용한다하더라도 정확한 위치를 구하기는 어렵다. 반면

에, 제안하는 프로토콜은 각 노드의 위치 정보를 필요로 하지 않고 깊이 정보만을 주고받는다. 수중에서 깊이 정보는 압력센서를 통해 쉽게 알 수 있다.

실험에 사용한 파라미터 값은 표 1과 같다. 각 노드는 3차원 공간에 임의로 배치되고, 수중에 배치된 노드가 수집한 정보를 부표 노드까지 전달한다.

#### 5.2 실험 결과 분석

그림 10과 그림 11은 전송 범위에 따른 패킷의 전송 성공 횟수와 전송 지연 시간을 각각 비교한 그래프이다. 그림 10에서 전송 성공 횟수는 실험 시간동안 목적지노드에 도착한 패킷의 개수를 계수한 결과 값이다. 제안한 프로토콜이 대부분 높은 전송 성공률을 보임을 알 수 있다. 전송 범위가 클수록 전송 성공률이 높아지는 이유는 포워딩 가능한 노드들의 개수가 증가하기 때문이다.

그림 11에서 전송 지연 시간은 패킷을 생성한 수중 노드에서 최종 목적지인 목적지 노드까지 도달하는 평균 지연 시간을 뜻한다. 제안한 알고리즘이 비교대

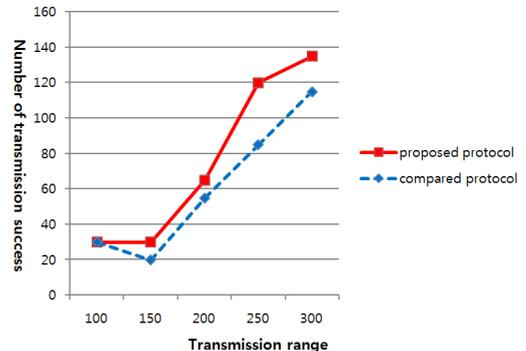


그림 10. 전송 성공 횟수 비교  
Fig. 10. Number of successful transmissions

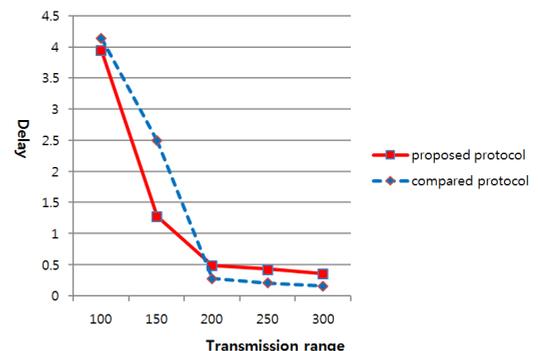


그림 11. 전송 지연 시간 비교  
Fig. 11. Transmission delay

표 1. 파라미터 값  
Table 1. Parameter value

Parameter	Value
Number of nodes	500
Network topology(m3)	1000x1000x1000
Trnasmission range(m)	100 ~ 300
Number of buoys	4

상과 비슷한 전송 지연시간을 보임을 확인할 수 있다. 전송 범위가 클수록 전송 지연시간이 줄어드는 이유는 전송범위가 늘어날수록 수중 노드에서 부표노드까지의 전체 홉 수가 줄어들기 때문이다. 전송범위가 큰 경우, 제안하는 방식의 지연시간이 더 큰 이유는 다음과 같다. 전송범위가 커짐에 따라 목적지 노드가 송신 노드의 전송반경 내에 들어올 확률이 높아지는데, 제안 방식은 이 경우에도 수직채널을 사용하여 물 밖으로 먼저 나간 후 목적지 노드로 전송되는 데 반해 비교대상의 경우 목적지 노드로 직접 전송되기 때문에 평균지연 시간이 줄어드는 것을 확인하였다. 하지만 비교대상의 경우 수평 성분이 큰 채널이고 거리가 길기 때문에 제안방식에서 사용하는 수직 채널에 비해 전송률이 낮아짐을 그림 10에서 확인할 수 있다.

## VI. 결 론

본 연구에서는 열악한 통신환경을 전제하고 있는 수중에서 수중 채널의 특성을 분석하여 성능에 영향을 미치는 두 가지 문제점을 언급하였다. 또한 두 가지 문제점인 신호감쇠 현상과 다중 경로 현상을 극복하는 프로토콜을 제시하였고, 제안하는 프로토콜이 높은 전송성공률과 비슷한 전송 지연시간을 가짐을 실험으로 증명하였다. 실험 결과 제안하는 프로토콜이 비교 대상에 비해 전송 성공 횟수는 평균적으로 1.2배 높은 성능을 보이고, 전송 지연시간은 비교대상과 비슷한 값을 가짐을 확인하였다.

비교 대상은 포위당을 할 때 목적지 노드와 포위당 노드와의 거리를 측정하기 위해 노드의 현재 위치정보를 알고 있어야 한다는 가정이 필요하다. 하지만, 수중 네트워크에서 노드의 정확한 위치정보를 얻는 것에는 많은 제약사항이 따른다. 따라서 노드의 깊이 정보만 있으면 포위당이 가능한 제안 프로토콜이 구현에도 용이하고 성능도 뛰어남을 확인할 수 있다.

## References

[1] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, May 2005.

[2] A. McMahon and S. Farrell, "Delay- and disruption- tolerant networking," *IEEE Internet Computing*, vol. 13, no. 6, pp. 82-87, Dec. 2009.

[3] M. S. Rahim, P. Casari, F. Guerra, and M. Zorzi, "On the performance of delay-tolerant routing protocols in underwater networks," *IEEE OCEANS 2011*, pp. 1-7, Santander, Spain, Jun. 2011.

[4] A. Vahdat and D. Becker, *Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks*, Technical Report CS-200006, Apr. 2000.

[5] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," *SIGCOMM Workshops (ACM)*, Philadelphia, PA, USA, Aug. 2005.

[6] S. C. Nelson, M. Bakht, and R. Kravets, "Encounter-based routing in DTNs," *IEEE INFOCOM 2009*, pp. 846-854, Rio de Janeiro, Brasil, Apr. 2009.

[7] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Single-copy routing in intermittently connected mobile networks," *Sensor and Ad Hoc Commun. Netw.(IEEE SECON 2004)*, pp. 235-244, Oct. 2004.

[8] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel," *WUWNet 2006(ACM)*, Los Angeles, California, USA, Sept. 2006.

[9] M. Zorzi, P. Casari, N. Baldo, and A. F. Harris III, "Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 23, no. 9, pp. 1754-1766, Dec. 2008.

[10] M. Chitre, "A high-frequency warm shallow waqter acoustic communications channel model and measurements," *Acoustical Soc. America*, vol. 122, no. 5, pp. 2580-2586, Nov. 2007.

[11] P. Qarabaqi, M. Stojanovic, and A. C. Simulator, *Acoustic Channel Simulator*, Retrieved April., 30, 2014, from [http://oalib.hlsresearch.com/Rays/acoustic\\_channel\\_simulator\\_code/acoustic\\_channel\\_simulator\\_info.pdf](http://oalib.hlsresearch.com/Rays/acoustic_channel_simulator_code/acoustic_channel_simulator_info.pdf)

박 성 진 (Seongjin Park)



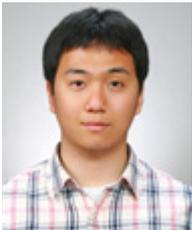
2012년 2월 : 부산대학교 컴퓨터공학과 학사  
2014년 8월 : 부산대학교 컴퓨터공학과 석사  
2014년 9월~현재 : 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정  
<관심분야> 센서 네트워크, 메시 네트워크, 수중 네트워크

유 영 환 (Younghwan Yoo)



1996년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사  
1998년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학과 석사  
2004년 2월 : 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 박사  
2004년 5월~2006년 12월 : 미국 신시내티 대학교 컴퓨터 과학과 연구원  
2007년 3월~현재 : 부산대학교 컴퓨터공학과 교수  
<관심분야> 무선/이동네트워크, IoT, 수중네트워크, 네트워크융합

김 성 렬 (Sungryul Kim)



2010년 2월 : 부산대학교 컴퓨터 공학과 학사  
2010년 3월~현재 : 부산대학교 컴퓨터공학과 석박통합과정  
<관심분야> 무선 애드혹/센서 네트워크, 메시 네트워크