

# 단일-홉과 다중-홉 수중 음향 센서 네트워크에서의 효율적인 협력 재전송 기법

정회원 이 재 원\*, 종신회원 조 호 신\*\*

## A Cooperative ARQ Scheme for Single-hop and Multi-hop Underwater Acoustic Sensor Networks

Jae Won Lee\* *Regular Member*, Ho-Shin Cho\*\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문은 협력통신 기법을 이용하여 단일-홉과 다중-홉 수중환경에서 효율적인 재전송 (ARQ : Automatic Repeat reQuest) 기법을 제안한다. 소스 (source) 노드가 전송한 패킷을 수신한 이웃 노드들 중, 제안한 기법에서 정의한 협력 영역에 속한 노드들은 협력 노드 집합을 형성한다. 협력 노드는 특정 소스-목적 링크 (link)에 대하여 또 다른 대체 경로를 제공한다. 이러한 대체 경로는 소스-목적 경로보다 높은 채널 품질을 제공한다. 따라서 수중 음향 채널의 특성인 긴 전파지연을 줄일 수 있고, 성공적인 재전송 확률을 높임으로써 높은 비트 오류율도 극복할 수 있다. 또한 다중-홉 네트워크에서는 다중-홉에 의한 릴레이 시 별도의 ACK 없이 자신이 전송한 패킷이 되 돌아오는 것을 응답신호로 활용함으로써 시스템 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안하는 협력 재전송 기법을 전송 효율 (throughput efficiency) 측면에서 기존의 S&W (Stop and Wait) ARQ 기법과 비교, 분석한다.

**Key Words** : ARQ(Automatic Repeat reQuest), Underwater, Sensor Networks, Cooperation

### ABSTRACT

We propose an efficient cooperative ARQ (Automatic Repeat reQuest) scheme for single-hop and multi-hop underwater acoustic communications, in which cooperative nodes are used to provide more reliable alternative paths for a specific source-to-destination connection. This alternative path has higher channel quality than that of the direct source-destination path. In addition, during a packet-relay through multiple hops, the typical acknowledgement (ACK) signal is replaced with overhearing data packet returned back from the next hop. The usage of overhearing as an ACK improves the system performance. In this paper, we evaluate the proposed scheme by comparing it with a conventional S&W ARQ in terms of throughput efficiency. Computer simulation results show that the proposed cooperative retransmission scheme can significantly improve the throughput by increasing the probability of successful retransmission.

### I. 서 론

수중 센서 네트워크를 이용한 지진 모니터링, 자원

탐사, 재난 방지 등의 응용 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 응용분야에서의 효율적 기능 수행을 위해서는 수중채널이 갖는 특성을 이해하고 이에

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD100002KD)

\* 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부(jwlee@ee.knu.ac.kr)

\*\* 경북대학교 IT대학 전자공학부(hscho@ee.knu.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-02-088, 접수일자 : 2011년 2월 7일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 2일

적합한 센서들 간의 통신 방식을 설계하는 것이 매우 중요하다. 수중채널의 가장 큰 특징은 경로손실이 매우 크다는 것이다. 따라서 지상에서와 같은 라디오 주파수 (Radio Frequency : RF) 신호를 사용하는 경우, 센서 노드가 갖는 최대 전송전력으로도 1m 이상 전파하기 어렵다. 또한 RF 신호는 바닷물이라는 매질을 전파하기 위해 낮은 주파수 대역 (30Hz ~ 300Hz)으로 전송된다. 이는 매우 큰 크기의 안테나와 높은 전송 전력을 요구한다. 이러한 이유로 수중에서는 일반적으로 음파모뎀을 이용한 음파통신을 하게 된다<sup>1)</sup>.

수중 음향채널은 해수의 온도, 염분, 수심 등의 다양한 환경요소에 따라 음향 신호의 전달이 제한되고, 지상 통신에 비해 상대적으로 저주파 대역을 사용하기 때문에 대역폭이 줄어든다. 다중 경로는 전송 신호 사이의 상호 중첩에 의한 간섭 (ISI : Inter Symbol Interference)을 야기한다. 이러한 시변적인 다중 경로 전파, 도플러 효과, 시역전 현상 등과 같은 요인으로 인하여 높은 비트 오류율과 신호의 왜곡, 큰 전파지연의 변동을 유발한다<sup>2)</sup>. 이러한 열악한 환경에서 신뢰성 높은 통신을 구현하기 위해서는 오류 패킷의 재전송 기법인 ARQ (Automatic Repeat reQuest) 방식이 반드시 필요하다.

여러 재전송 기법 중, 패킷 전송 후 그에 대한 응답 신호 (ACK : Acknowledgement)를 받고 다음 패킷을 전송하는 Stop and Wait (S&W) ARQ 기법이 수중환경에 적합한 것으로 알려져 왔다<sup>3)</sup>. 이는 현재까지 개발된 수중환경에서의 음향모뎀은 반양방향 통신 (half-duplex) 모드만을 지원하기 때문이다. S&W ARQ 기법과 관련하여 이의 효율성을 개선하기 위해 패킷을 묶음 (block) 형태로 일괄 전송함으로써 응답 신호를 기다리는 시간을 효율적으로 줄이는 방식이 제안되었다<sup>4)~7)</sup>. 또한 링크 (link)의 채널 품질에 따라 패킷의 길이를 조절함으로써 전송효율을 높이는 방식이 연구되기도 하였다<sup>8)~10)</sup>. 하지만 긴 전파지연과 높은 비트 오류율과 같은 수중 환경의 특성 때문에 S&W ARQ 기법은 그 효율성이 제한된다. 따라서 수중채널이 갖는 열악한 제약 조건들을 효율적으로 극복할 수 있는 새로운 재전송 방식이 요구된다.

최근 협력통신 기법은 무선 통신 시스템에서 효율적으로 다이버시티 (diversity) 효과를 획득하는 방법으로 관심을 받고 있다. 협력통신에서, 각 노드는 자신의 통신을 위해 데이터를 주고받는 동시에 다른 노드 사이의 통신을 위해 대체 경로를 제공하여 공간적인 다이버시티 효과를 제공한다.

본 논문에서는 이러한 협력 통신기법을 응용하여

단일-홉과 다중-홉 수중 환경에서 효율적인 협력 재전송 기법을 제안한다. 제안하는 협력 재전송 기법에서는, 주어진 소스-목적 노드에 대하여 이웃 노드들은 소스-목적 링크의 거리보다 가까운 거리의 협력 노드 집합을 형성한다. 협력 노드들 중 목적지 노드에 가까운 노드부터 순서대로 재전송 과정에 참여한다. 이러한 협력 재전송 과정은 성공적인 재전송 확률을 높이므로, 기존의 S&W ARQ 기법보다 전송 효율을 높일 수 있다.

## II. 제안한 협력 재전송 기법

수중환경에서 음향채널은 긴 전파지연과 큰 비트 오류율 등의 특성을 가진다. 본 논문에서는 이러한 열악한 환경에서 신뢰성 높은 통신을 구현하기 위해, 협력통신 기법을 응용하여 수중환경에서 효율적인 재전송 기법을 제안한다. 제안하는 협력 재전송 기법은 주어진 소스-목적(릴레이) 경로 상에 있는 협력 노드를 이용함으로써 수중 음향 채널의 특성인 긴 전파지연을 줄일 수 있고, 또한 성공적인 재전송 확률을 높임으로써 높은 비트 오류율도 극복할 수 있다. 본 논문에서는 단일-홉 음향채널에서의 협력 재전송 기법을 제안하고, 이를 응용하여 다중-홉 음향채널에서의 협력 재전송 기법도 모색한다.

### 2.1 단일-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법

그림 1은 본 논문에서 고려하고 있는 단일-홉 네트워크의 구조를 나타낸다. 각 노드는 자신의 이웃 노드들을 알고 있고, 또한 이웃 노드와의 거리 정보도 알고 있다고 가정한다. 주어진 소스-목적 노드에 대하여, 그림 1에서 볼 수 있듯이, 협력 영역은 각 노드를 중심으로 전송 범위 (transmission range)가 겹치는 부분이다. 정해진 협력 영역에 속한 노드들은 협력 노드가

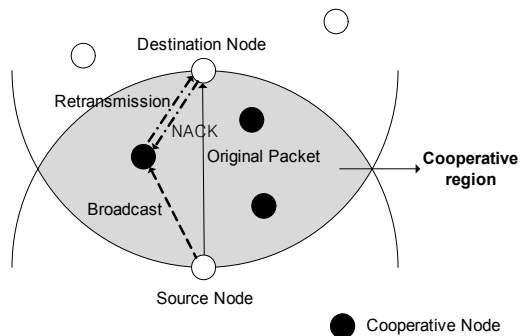


그림 1. 단일-홉 네트워크의 구조

되어 재전송 과정에 참여한다. 목적지 노드가 오류가 있는 패킷을 수신할 경우, 목적지 노드는 자신에게 가까운 협력 노드부터 재전송을 요구하며 이러한 재전송 과정은 성공적인 패킷을 수신할 때까지 이루어진다.

그림 2에서 4는 각각 소스 노드, 협력 노드, 목적지 노드에서의 재전송 절차에 대한 순서도를 도시한 것이다. 먼저 소스 노드는 자신의 목적지 노드로 데이터 패킷을 전송한다. 그리고 이에 대한 응답으로 목적지 노드로부터 응답신호 ACK 또는 부정 응답신호 (NACK : negative acknowledgement)를 수신한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 수신된 응답 신호가 ACK 신호이면 소스 노드는 자신이 전송한 패킷이 오류 없이 목적지 노드로 전송되었다고 판단하고 다음 데이터 패킷을 전송하는 단계로 이동한다. 하지만 수신된 응답 신호가 NACK 신호인 경우, 자신이 전송한 패킷이 오류가 발생하였다고 판단하고 데이터 패킷을 재전송한다. 또한 소스 노드에서 목적지 노드로 전송된 데이터 패킷은, 그림 1에서 볼 수 있듯이, 브로드캐스트 (broadcast) 특성상 협력 영역에 속한 협력 노드들에게도 전송된다. 이때, 그림 3에서 볼 수 있듯이, 오류 없이 패킷을 수신한 협력 노드들은 소스 노드로부터 엿들은 데이터 패킷 (overhearing packet)을 자신의 버퍼 (buffer)에 일시 저장한다. 소스 노드로부터 수신한 패킷이 오류가 없을 경우, 목적지 노드는 소스 노드로 응답신호 ACK를 전송한다. 이때 협력 노드는 소스 노드로 향하는 ACK 신호를 엿듣고 목적지 노드의 전송이 오류 없이 성공한 것을 인지하고 자신의 버퍼에 저장한 패킷을 삭제한다. 반면, 그림 4에서 볼

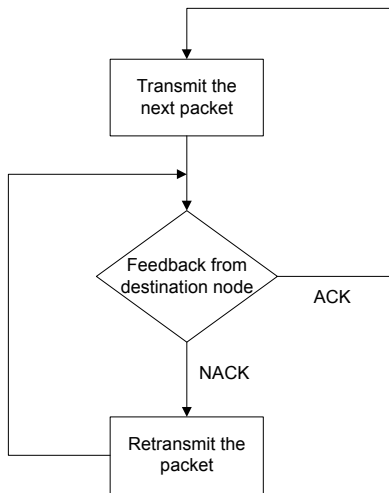


그림 2. 소스 노드의 재전송 절차

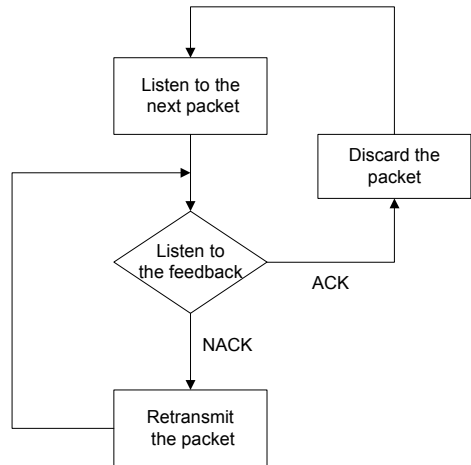


그림 3. 협력 노드의 재전송 절차

수 있듯이, 수신한 패킷이 오류가 발생한 경우, 목적지 노드는 NACK 신호를 가장 가까운 협력 노드에게 전송한다. 여기서 기존의 S&W ARQ 기법에서 이웃한 노드들은 재전송 과정에 참여하지 않지만, 제안한 협력 재전송 기법에서 NACK 신호를 수신한 협력 노드는 자신의 버퍼에 저장한 데이터 패킷을 목적지 노

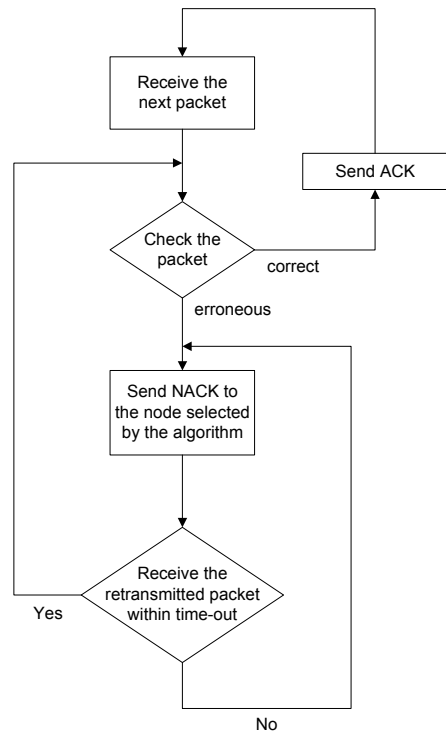


그림 4. 목적지 노드의 재전송 절차

드에게 재전송함으로써 재전송 과정에 참여한다. 만약 재전송이 다시 실패하면, 목적지 노드는 다음으로 가까운 협력 노드에게 NACK 신호를 전송하여 재전송을 요구한다. 이러한 재전송 과정은 성공적인 재전송이 이루어질 때까지 계속된다.

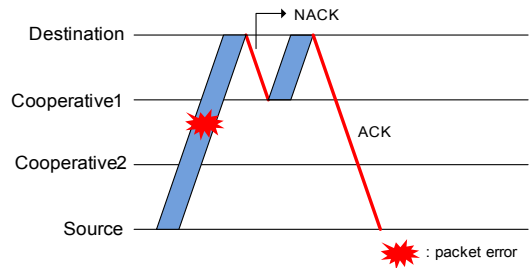
협력 노드가 소스 노드로부터 엿들은 데이터 패킷에 오류가 발생하면 협력 노드는 재전송을 요구하는 NACK 신호를 수신하더라도 응답하지 않는다. 동시에 목적지 노드는 시간초과 (time-out)라 불리는 정해진 시간동안, 지정된 협력 노드로부터의 재전송을 기다린다. 만약 시간초과 내에 재전송 패킷을 수신하지 못하면, 목적지 노드는 다음으로 가까운 협력 노드에게 NACK 신호를 전송함으로써 또다시 재전송을 요구한다. 제한한 협력 재전송 기법에서, 목적지 노드의 시간초과는 목적지 노드와 협력 노드 사이의 거리에 따라 각각 다르게 결정된다. 따라서 본 논문에서는 두 가지 종류의 시간초과가 있다. 첫 번째로, 소스 노드가 미리 정해진 시간초과 내에 ACK 또는 NACK 신호를 수신하지 못하면 재전송을 시도하는 소스 노드의 시간초과가 있다. 두 번째로, 목적지 노드가 협력 노드에게 NACK 신호 전송 후, 미리 정해진 시간초과 동안 재전송을 기다리는 목적지 노드의 시간초과가 있다. N개의 협력 노드가 있다면, 소스 노드의 시간초과 ( $\tau_{0S}$ )와 목적지 노드의 시간초과 ( $\tau_{0D}$ )는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{0S} = 2t_p + 2 \sum_{k=1}^N t_p(k) \quad (1)$$

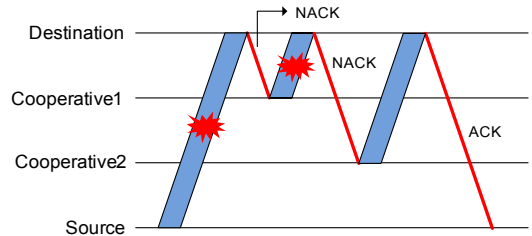
$$\tau_{0D}(n) = 2 \sum_{k=1}^n t_p(k) \quad (2)$$

여기서  $t_p$ 는 소스 노드와 목적지 노드 사이의 전파 지연 시간이며,  $t_p(n)$ 은 목적지 노드와 n-번째 가까운 협력 노드 사이의 전파 지연 시간이다.

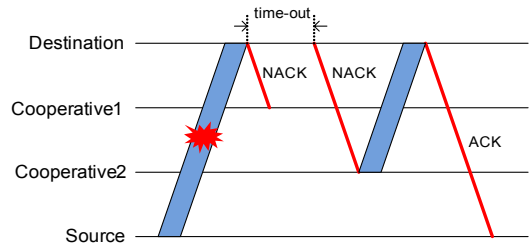
그림 5는 소스 노드와 목적지 노드 사이에 두 개의 협력 노드가 있을 경우, 세 가지 서로 다른 재전송의 경우에 대해서 보여준다. 첫 번째 경우, 목적지 노드가 소스 노드로부터 오류가 있는 패킷을 수신한 경우이다. 목적지 노드는 가장 가까운 협력 노드 1에게 NACK 신호를 전송한다. NACK 신호를 수신한 협력 노드 1은 자신의 버퍼에 저장한 패킷을 재전송한다. 만약 목적지 노드가 협력 노드 1로부터 오류 없이 패킷을 수신한 경우, 목적지 노드는 소스 노드에게 ACK



(a) 경우 1 : 오류가 있는 패킷을 수신한 경우



(b) 경우 2 : 협력 노드1로부터 수신한 패킷이 오류가 있는 경우



(c) 경우 3 : 협력 노드1로부터 시간초과 내에 데이터 패킷이 도착하지 않은 경우

그림 5. 단일-홉 네트워크에서 재전송의 경우들

신호를 전송한다. 이때 협력 영역에 속한 협력 노드들은 ACK 신호를 엿듣고 자신의 버퍼에 저장한 패킷을 삭제한다. 두 번째 경우, 목적지 노드가 협력 노드 1로부터 수신한 패킷에 오류가 발생한 경우이다. 그러면 목적지 노드는 다음으로 가까운 협력 노드 2에게 NACK 신호를 전송함으로써 재전송을 요구한다. 세 번째 경우, 목적지 노드는 협력 노드 1로부터 자신의 시간초과 내에 데이터 패킷을 수신하지 못한 경우이다. 이것은 협력 노드 1이 소스 노드로부터 엿들은 데이터 패킷에 오류가 발생하였기 때문이다. 따라서 협력 노드 1은 목적지 노드로부터 재전송을 요구하는 NACK 신호를 수신하였지만, 오류가 있는 엿들은 데이터 패킷을 전송하지 않는다. 이 경우 목적지 노드는 자신의 시간초과 후, 다음으로 가까운 협력 노드 2에게 재전송을 요구하는 NACK 신호를 전송한다.

### 2.2 다중-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법

그림 6은 본 논문에서 고려하고 있는 다중-홉 네트워크의 구조를 나타낸다. 본 논문에서는 다중-홉 채널에서 소스-목적 노드가 주어지면 라우팅 경로 (routing path) 즉, 릴레이 노드는 미리 정해진다고 가정한다. 그리고 소스-목적(릴레이) 노드 사이의 협력 영역은 단일-홉 네트워크의 경우와 마찬가지로, 그림 6에서 볼 수 있듯이, 각 노드를 중심으로 전송 범위가 겹치는 부분이다. 다중-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법은 소스 노드, 목적지 노드, 그리고 협력 노드의 오류 패킷 처리과정이 단일-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법과 같다. 하지만 다음 홉으로 패킷의 릴레이 역할을 담당하고 있는 릴레이 노드의 추가적인 기능이 구현 되었다. 다중-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법에서는, 그림 6에서 볼 수 있듯이, 다중-홉에 의한 릴레이 시 별도의 ACK 없이 자신이 전송한 패킷이 되돌아오는 것을 응답신호로 사용함으로써 오버헤드와 전송 지연을 줄일 수 있다.

그림 7은 다중-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법에서 릴레이 노드의 동작을 간략하게 나타내는 순서도이다. 먼저 소스 노드는 목적지 노드로 패킷을 전송하기 위해서 릴레이 노드에게 자신의 패킷을 전송한다. 릴레이 노드는 수신한 패킷의 오류 여부를 검증한 후, 오류가 없으면 곧바로 다음 노드로 중계한다. 이때 전방향 (omni-directional) 전송을 하므로, 그림 6에서 볼 수 있듯이, 이전 노드들, 즉 협력 노드들과 소스 노드에게도 패킷이 전송된다. 협력 노드들과 소스 노드는 별도의 ACK 신호 없이 각각 자신의 버퍼에 있는 또는 자신이 전송한 패킷이 되돌아오는 것을 응답신호로 여긴다. 이때 협력 노드들은 성공적인 전송 또는 재전송을 인지하고 자신의 버퍼에 저장한 패킷을 삭제한다. 반면 소스 노드로부터 수신한 데이터 패킷에 오류가 발생한 경우, 릴레이 노드는 NACK 신호

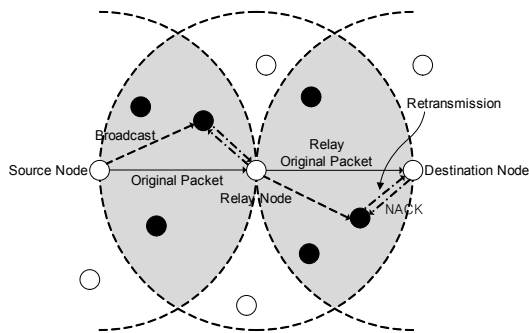


그림 6. 다중-홉 네트워크의 구조

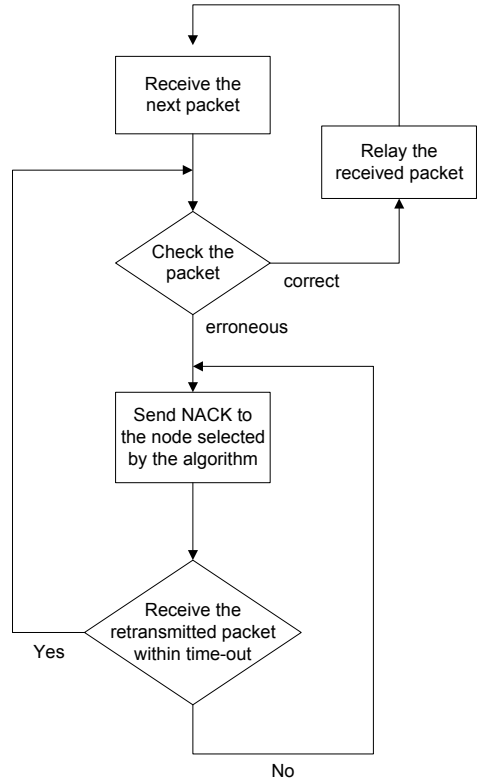


그림 7. 다중-홉에서 릴레이 노드의 재전송 절차

를 가장 가까운 협력 노드에게 전송한다. 그리고 재전송이 다시 실패하면, 릴레이 노드는 다음으로 가까운 협력 노드에게 NACK 신호를 전송하여 재전송을 요구한다. 이러한 재전송 과정은 성공적인 재전송이 이루어질 때까지 계속된다. 하지만 최종 목적지 노드는, 단일-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법과 마찬가지로, 수신한 패킷에 대한 응답으로 일반적인 ACK 또는 NACK 신호를 전송한다.

협력 노드가 소스 노드로부터 엿들은 패킷에 오류가 발생하면 협력 노드는 재전송을 요구하는 NACK 신호를 수신하더라도 응답하지 않는다. 동시에 목적(릴레이) 노드는 시간초과 동안 지정된 협력 노드로부터의 재전송을 기다린다. 만약 시간초과 내에 재전송 패킷을 수신하지 못하면, 목적(릴레이) 노드는 다음으로 가까운 협력 노드에게 NACK 신호를 전송함으로써 또다시 재전송을 요구한다. 단일-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법과 마찬가지로 다중-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법에서도 소스 노드의 시간초과, 그리고 목적(릴레이) 노드의 시간초과가 존재한다. 두 가지 시간초과는 각각 식 (1)과 식 (2)로 정의된다.

### III. 성능 분석

본 논문에서의 컴퓨터 시뮬레이션에서는 하나의 소스-목적지 노드를 가지는 단일-홉 네트워크와 다수의 릴레이 노드를 가지는 다중-홉 네트워크를 고려한다. 표 1은 부록의 수중 음향채널 특성을 반영한 시스템 파라미터 값들을 정리한 표이다. 부록에서는 수중환경에서 최적의 주파수와 대역폭을 구하기 위해 수중 음향 신호의 감쇠와 소음에 대해 정리하였고, 이를 이용하여 노드 간 거리에 따른 평균 비트 오류율을 구하였다. 본 논문에서는 성능 분석을 위하여, 전송 효율 측면에서 기존의 S&W ARQ 기법과 비교, 분석하였다. 전송 효율은 전체 성공적인 전송과 재전송에 소모된 시간과 성공적인 전송에 소모된 시간의 비로 정의된다. 제안한 협력 재전송 기법의 전송 효율을 최대화 시키는 최적의 패킷 크기와 협력 노드의 개수를 도출하고, 정해진 협력 노드의 개수에 따른 성능을 분석한다.

#### 3.1 단일-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법

단일-홉 네트워크에서의 시뮬레이션에서는 노드 사이의 거리가 1 km 인 소스-목적지 노드를 가정한다. 주어진 소스-목적지 노드 사이에 협력 영역이 존재하며, 협력 영역에 속한 노드들은 협력 노드가 된다. 먼저 협력 노드의 개수를 변화시키으로써, 협력 노드의 개수가 전송 효율에 미치는 영향을 살펴본다. 여기서 데이터 패킷의 크기는 500 bits로 가정한다. 그림 8에서 볼 수 있듯이, 협력 노드의 개수가 증가하면서 제안한 기법의 전송 효율은 수렴한다. 표 1에 주어진 시스템 파라미터를 기준으로, 1개 또는 2개의 협력 노드 만으로도 시스템 성능을 현저히 증가시킬 수 있다. 하지만 그림 8에서 볼 수 있듯이, 협력 노드의 개수가 많아짐에 따라 전송 효율이 조금 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 협력 노드가 소스 노드로부터 엿들은 데이터 패킷에 오류가 발생하여 재전송에 참여하지 못하는 협력 노드가 증가하기 때문이다. 즉, 목적지 노드가 협력 노드에게 재전송을 요구하는 NACK 신호를

표 1. 시스템 파라미터

파라미터 (Parameter)	값 (Value)
대역폭	25 kHz
중심 주파수	20 kHz
소스-목적(릴레이) 거리	1 km
전송 전력 수준	94 dB
음향 속도	1500 m/s

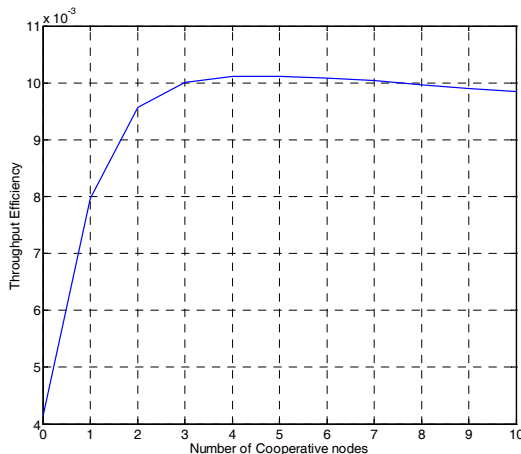


그림 8. 협력 노드 개수에 따른 전송 효율

전송하더라도 엿들은 데이터 패킷에 오류가 발생한 협력 노드는 응답하지 않기 때문에 목적지 노드의 시간초과동안 아무런 동작도 하지 않는다. 따라서 협력 노드의 개수가 증가하더라도 시스템 성능은 계속 증가하지 않고 수렴 또는 조금 낮아진다. 이를 바탕으로 제안한 협력 재전송 기법의 전송 효율을 최대화하기 위해서 무조건 다수의 협력 노드가 필요한 것이 아니라 일정 수의 협력 노드만 있으면 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 전송 효율을 최대화하는 최소의 협력 노드 개수를 도출할 수 있다.

그림 9에서는 제안한 협력 재전송 기법과 기존의 S&W ARQ 기법의 전송 효율을 다양한 패킷 크기에 따라 비교하였다. 시뮬레이션의 복잡도를 줄이기 위해, 협력 노드의 개수가 1개인 경우와 2개인 경우를 기존의 S&W ARQ 기법과 비교하였다. 그리고 S&W ARQ 기법은 소스 노드에서 목적지 노드로 직접 통신하는 경우 (1-홉)와, 또한 협력 노드의 개수가 1개인 경우와 비교하기 위해서 소스 노드와 목적지 노드 사이에 릴레이 노드가 있는 경우 (2-홉)를 시뮬레이션 하였다. 그림 9에서 볼 수 있듯이, 기존의 S&W ARQ 기법보다 제안한 협력 재전송 기법이 전송 효율 측면에서 우수한 성능을 보이는 것을 볼 수 있다. 그림 8의 시뮬레이션에서 예상할 수 있듯이, 협력 노드가 1개일 때 보다 2개일 때 전송 효율이 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 협력 노드가 소스-목적 경로보다 짧은 대체 경로를 제공하기 때문이다. 이러한 대체 경로는 소스-목적 경로보다 좋은 채널 품질을 가진다. 또한 패킷의 크기가 커짐에 따라 전송 효율은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 패킷 오류 확률이 패킷의 크기에 비례하기 때문이다. 따라서 제안한 협력 재전송 기법

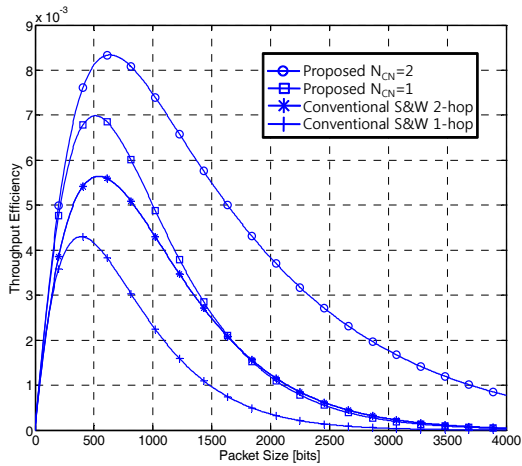


그림 9. 단일-홉 네트워크에서 패킷 크기에 따른 전송 효율

의 전송 효율을 최대화 시키는 최적의 패킷 크기를 도출할 수 있다. 예를 들어, 표 1에 주어진 환경에서, 제안한 협력 재전송 기법의 협력 노드가 1개일 때, 최적의 패킷 크기는 500 bits 이다.

### 3.2 다중-홉 네트워크에서의 협력 재전송 기법

다중-홉 네트워크에서의 시뮬레이션에서는 하나의 소스-목적지 노드와, 이 사이에 4개의 릴레이 노드를 가지는 다중-홉 구조를 고려한다. 각 소스-릴레이-목적지 노드 사이의 간격은 1 km로 가정한다. 즉, 5-홉의 구조이고 홉 사이의 거리는 각각 1 km인 구조이다.

그림 10은 다중-홉 네트워크에서, 제안한 협력 재전송 기법과 기존의 S&W ARQ 기법의 전송 효율을 패킷 크기에 따라 비교한 것을 나타낸다. 단일-홉 네트워크에서의 시뮬레이션과 마찬가지로 복잡도를 줄

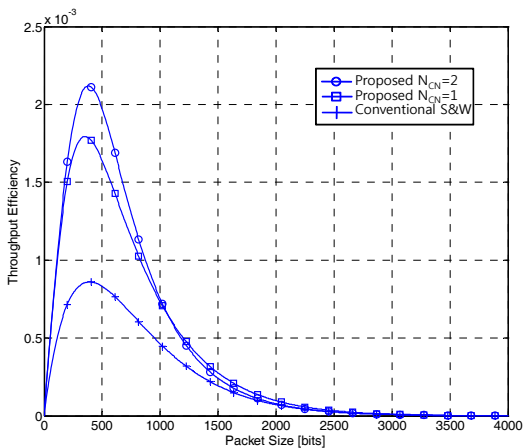


그림 10. 다중-홉 네트워크에서 패킷 크기에 따른 전송 효율

이기 위해, 최대 협력 노드의 개수는 2개로 제한한다. 다중-홉 네트워크에서 제안한 협력 재전송 기법은 높은 채널 품질을 제공하는 협력 노드를 이용함으로써 재전송 확률과 지연시간을 낮추었다. 또한 별도의 ACK 신호 없이 전송한 패킷에 대한 응답을 수신할 수 있기 때문에 전송 효율 측면에서 기존의 S&W ARQ 기법보다 우수한 성능을 보이는 것을 볼 수 있다. 하지만, 그림 10에서 볼 수 있듯이, 패킷의 크기가 커짐에 따라 제안한 협력 재전송 기법의 성능이 급격히 줄어든다. 이는 다중-홉에 의한 릴레이 시 별도의 ACK 없이 자신이 전송한 패킷이 되돌아오는 것을 응답신호로 사용함에 따라 얻는 이득도 있지만, 응답신호의 역할을 수행하는 릴레이 패킷의 오류 확률이 커지기 때문이다. 패킷의 크기가 3000 bits 이상이면 S&W ARQ 기법과 비슷한 성능을 보이는 것을 볼 수 있다. 따라서 단일-홉에서의 협력 재전송 기법과 같이, 다중-홉에서 제안한 협력 재전송 기법의 전송 효율을 최대화 시키는 최적의 패킷 크기를 도출할 수 있다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 협력 통신 기법을 이용하여 단일-홉 수중환경에서 효율적인 협력 재전송 기법을 제안하였고, 이를 응용하여 다중-홉 수중환경에서의 협력 재전송 기법도 제안하였다. 제안한 기법은 주어진 소스-목적 경로 상에 있는 대체 경로를 제공하는 협력 노드를 이용한다. 이러한 대체 경로는 소스-목적 경로보다 높은 채널 품질을 제공한다. 또한 다중-홉 네트워크에서는 다중-홉에 의한 릴레이 시 별도의 ACK 없이 자신이 전송한 패킷이 되돌아오는 것을 응답신호로 사용함으로써 시스템 성능을 향상시킬 수 있었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 제안한 협력 재전송 기법과 기존의 S&W ARQ 기법을 전송 효율 측면에서 성능 분석을 하였다. 그 결과, 기존의 S&W ARQ 기법에 비해 제안한 기법이 우수한 성능을 보이는 것을 검증하였다. 이것은 성공적인 재전송의 확률을 높일 수 있는 대체 경로를 협력 노드가 제공하기 때문이다.

## V. 부 록

### 5.1 수중 음향 신호의 감쇠와 소음

본 논문에서는 레일레이 페이딩 채널(Rayleigh fading channel)을 고려한다. 따라서 레일레이 페이딩 채널에서 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 변조를 사용할 경우, 평균 비트 오류율 (average bit error

rate)은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$BER(SNR) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{SNR}{1+SNR}} \right) \quad (3)$$

여기서  $SNR$ 은 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio)이고,  $\overline{SNR} = 10^{SNR/10}$ 이다.

수중환경에서 방사된 음향 신호의 신호 대 잡음비는 전송 전력 수준 ( $SL$  : Source power Level), 전송 손실 ( $TL$  : Transmission Loss), 소음 전력 수준 ( $NL$  : Noise power Level), 그리고 지향성 지수 ( $DI$  : Directivity Index)에 의하여 다음과 같이 표현 가능하다<sup>[12]</sup>.

$$SNR = SL - TL - NL + DI \quad (4)$$

여기서  $SNR$ ,  $SL$ ,  $TL$ ,  $NL$ ,  $DI$ 의 단위는 데시벨 (dB : decibel)이다. 그리고 본 논문에서 수신기는 무지향성 수중청음기 (non-directional hydrophone)라 가정을 하기 때문에, 지향성 지수  $DI$ 는 무시한다.

수중환경에서 음향 신호의 감쇠 (attenuation)는 두 노드 사이의 전송거리뿐만 아니라 통신에 사용되는 신호의 주파수에도 크게 영향을 받는다. 두 노드 사이의 전송거리가  $l$  [m], 음향 신호의 주파수가  $f$  [kHz]일 때, 수중환경에서 음향 신호의 감쇠  $A(l, f)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A(l, f) = A_0 l^k a(f)^l \quad (5)$$

여기서  $A_0$ 는 단위 정규화 상수 (unit normalizing constant)이고,  $k$ 는 음향 신호의 확산 계수 (spreading factor)로서 1과 2 사이의 값을 가지며 1은 원통형 확산 (cylindrical spreading), 2는 구형 확산 (spherical spreading)을 의미한다. 본 논문에서  $k$ 는 1.5로 가정한다. 음향 신호의 감쇠를 데시벨 단위로 표현하면 다음과 같다.

$$10 \log A(l, f) / A_0 = k \cdot 10 \log l + l \cdot 10 \log a(f) \quad (6)$$

식 (6)에서 첫 번째 항은 확산 손실을 나타내며, 두 번째 항은 감쇠 손실을 나타낸다. 그리고  $a(f)$ 는 감쇠 계수를 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$10 \log a(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (7)$$

여기서 감쇠 계수의 단위는 dB/km이며, 주파수  $f$ 의 단위는 kHz이다.

수중환경에서 소음은 난류 (turbulence)  $N_t(f)$ , 선박의 소음 (shipping)  $N_s(f)$ , 파도 (wave)  $N_w(f)$ , 그리고 열 소음 (thermal noise)  $N_{th}(f)$ 에 의해서 발생하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

· 난류  $N_t(f)$  :

$$10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log f \quad (8)$$

· 선박의 소음  $N_s(f)$  :

$$10 \log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 25 \log f - 50 \log(f + 0.03) \quad (9)$$

· 파도  $N_w(f)$  :

$$10 \log N_w(f) = 50 + 7.5w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4) \quad (10)$$

· 열 소음  $N_{th}(f)$  :

$$10 \log N_{th}(f) = -15 + 20 \log f \quad (11)$$

여기서 주파수  $f$ 의 단위는 kHz이며,  $s$ 는 선박의 움직임의 나타내며 0과 1사이의 값을 가진다. 그리고  $w$ 는 바람의 속도를 나타낸다. 따라서 수중환경에서 전체 주변 소음에 대한 전력 스펙트럼 밀도  $N(f)$ 는 소음 성분을 모두 더한 값으로 다음과 같다.

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (12)$$

또한 특정 주파수 대역에서  $N(f)$ 는, 표현의 간편성을 위해서, 다음과 같이 근사화 할 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$10 \log N(f) \approx N_1 - \eta \log f \quad (13)$$

여기서  $N_1 = 50 \text{ dB re } \mu \text{ Pa}$ 이고  $\eta = 18 \text{ dB/decade}$ 이다.

### 5.2 중심 주파수와 대역폭

본 논문에서는 최적의 중심 주파수와 그에 따른 3-dB 대역폭을 선택할 때, M. Stojanovic가 제안한 방



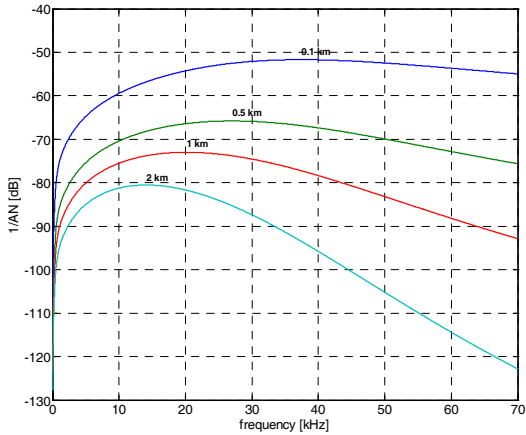


그림 11. 주파수에 따른 1/AN

법<sup>[13]</sup>을 채택하여 사용한다. 특정 노드 사이의 거리  $l$ 에서, 식 (5)의 수중 음향 신호의 감쇠와 식 (12)의 소음에 대한 전력 스펙트럼 밀도를 이용하여, 주파수  $f$ 에 따른 신호 대 잡음비를 구할 수 있다. 그림 11은 주파수에 따른  $1/A(l,f)N(f)$ 를 나타내며, 각 전송 거리  $l$ 에 따라 신호 대 잡음비가 최대가 되는 최적의 주파수  $f$ 가 존재한다는 것을 보여준다. 그림 12는 그림 11에 표시된 최적의 주파수를 거리에 따라 표시하였으며, 그에 따른 3-dB 대역폭을 나타낸다.

예를 들어 소스-목적(릴레이) 노드 사이의 거리가 1 km일 때, 그림 12에서 볼 수 있듯이, 최적의 주파수와 그에 따른 3-dB 대역폭은 각각 20 kHz와 25 kHz가 된다. 여기서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 노드 사이의 거리에 따른 평균 비트 오류율을 구할 수 있다. 그림 13은 중심 주파수가 20 kHz이고 3-dB 대역폭이 25

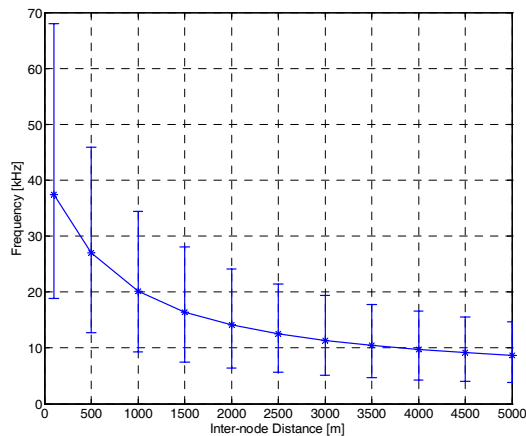


그림 12. 최적의 주파수와 그에 따른 3-dB 대역폭

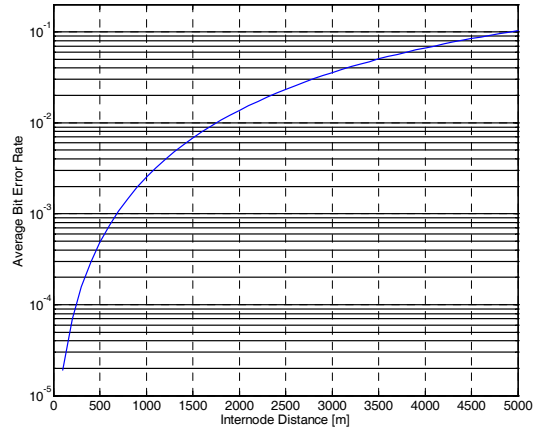


그림 13. 노드 간 거리에 따른 평균 비트 오류율

kHz 일 때, 노드 간 거리에 따른 평균 비트 오류율을 나타낸다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. Zhang, G. S. Sukhatme, and A. A. G. Requicha, "Adaptive sampling for marine microorganism monitoring," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol.2, pp.1115-1122, 2004.
- [2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, Vol.3(3), pp.257-279, May, 2005.
- [3] M. Stojanovic, "Optimization of a data link protocol for an underwater acoustic channel," in *Proc. IEEE Oceans Europe*, Vol.1, pp.68-73, June, 2005.
- [4] A. Sastry, "Improving automatic repeat-request (ARQ) performance on satellite channels under high error rate conditions," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.23, pp.436-439, Apr., 1975.
- [5] M. Moeneclaey, H. Bruneel, I. Bruylant and D. Y. Chung, "Throughput optimization for a generalized Stop-and-Wait ARQ Scheme," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.34, pp.205-207, Feb., 1979.
- [6] J. M. Morris, "Optimal blocklengths for ARQ error control schemes," *IEEE Trans. Commun.*,

Vol.27, pp.488-493, Feb., 1979.

- [7] P. F. Turney, "An improved Stop-and-Wait ARQ logic for data transmission in mobile radio systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.29, pp.68-71, Jan., 1981.
- [8] J. A. Martins, J. C. Alves, "ARQ protocols with adaptive block size perform better over a wide range of bit error rates," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.38, pp.737-739, June, 1990.
- [9] S. Hara, A. Ogino, M. Okada and N. Morinaga, "Throughput performance of SAW-ARQ protocol with adaptive packet length in mobile packet data transmission," *IEEE Trans. Vehic. Technology*, Vol.45, pp.561-569, Aug., 1996.
- [10] A. Annamalai and V. Bhargava, "Efficient ARQ error control strategies with adaptive packet length for mobile radio networks," in *Proc. IEEE International Conference on Universal Personal Communications, ICUPC'98*, Vol.2, pp.1247-1251, Oct., 1998.
- [11] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed., McGraw-Hill, 2001.
- [12] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1983.
- [13] M. Stojanovic, "On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel," in *Proc. ACM WUWNet*, Los Angeles, CA, vol.11, pp.41-47, Sept., 2006.

이재원 (Jae Won Lee)

정회원



2006년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학사  
 2008년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학석사  
 2009년 2월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정  
 <관심분야> 이동통신시스템, 수중음향통신, 센서네트워크, MAC 프로토콜

조호신 (Ho-Shin Cho)

종신회원



1992년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사  
 1994년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사  
 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사  
 1999년 3월~2001년 2월 한국 전자통신연구원 선임연구원  
 2001년 3월~2003년 2월 한국항공대학교 전자정보통신컴퓨터공학부 전임강사  
 2003년 3월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수  
 <관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽 제어, 수중음향센서네트워크