

# 인접 노드간의 오류 제어를 위한 양 계층 ARQ 방식

정회원 최 천 원\*

## Double-layered ARQ Scheme for Node-to-node Error Control

Cheon Won Choi\* *Regular Member*

### 요 약

본 논문에서는 재전송을 기반으로 오류 제어가 이루어지는 통신망에서 인접 노드간 오류 제어의 정확성을 향상시키는 방안으로 양 계층 ARQ 방식을 제안한다. 기존의 단 계층 ARQ와 달리 양 계층 ARQ 방식에서는 송신 및 수신 노드의 인접한 두 (부)계층에서 순차적인 부호화, 오류 검출, 그리고 재전송이 수행되어 오류 검출의 정확성이 향상된다. 그러나 양 계층 ARQ 방식은 메시지의 재전송 빈도를 증가시켜 메시지 지연 성능의 열화를 불러온다. 따라서 이러한 상반된 성능의 계량적 분석이 요구되며 이를 위해 본 논문에서는 오류 잔류 확률과 메시지 지연 시간의 정상 상태 분포를 근사적으로 계산하는 해석적 방법을 제시한다. 이어서 해석적 근사 방법과 모의 실험 방법으로 양 계층 ARQ 방식의 성능을 평가하여 유사한 평균 지연 수준에서 양 계층 ARQ 방식이 단 계층 ARQ 방식에 비해 보다 낮은 오류 잔류 확률을 가질 수 있음을 관찰한다. 이로부터 지연 성능에 대한 제약 하에서 오류 제어의 정확성을 향상시킬 수 있는 양 계층 ARQ 방식의 유용성을 검증한다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose an ARQ scheme for node-to-node error control, identified as double-layered ARQ. In this scheme, messages are encoded in each of two adjacent (sub)layers of transmitting node, and sequential error detection functions in corresponding layers of receiving node. Compared with conventional single-layered ARQ, the double-layered ARQ enhances the accuracy of error control in an identical environment. However, the message delay performance is degraded by additional retransmissions resulting from error detection in upper layer. For a quantitative evaluation of such performance trade-off, we develop an analytical method to approximately calculate the probability of error remains and the steady-state distribution of the sequence of message delay times. Using the analytical method as well as simulation method, we investigate the performance of double-layered ARQ scheme and observe that the double-layered ARQ exhibits a higher accuracy of error detection than a single-layered ARQ at a same level of average delay. From numerical examples, we confirm that the double-layered ARQ can be employed to effectively improve the accuracy of error control under a constraint on average delay performance.

*Keywords* : double-layered ARQ, CRC, probability of error remains, message delay time, queueing system

### 1. 서론

Automatic repeat request(ARQ)는 재전송을 기반으로 하는 오류 제어(error control) 방식이다<sup>[1-9]</sup>. 인접 노드(adjacent node)간의 ARQ 방식에서 수신

노드(receiving node)는 단위 데이터(data unit)를 송신 노드(transmitting node)로부터 받은 후 수신한 단위 데이터에 대해 오류 검출(error detection)을 수행하고 그 결과를 확인(acknowledgement: ACK) 메시지를 통해 송신 노드에게 알린다. 송신 노드는

\* 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 (cchoi@dku.edu)

논문번호 : 020255-0603, 접수일자 : 2002년 6월 3일

※ 본 연구는 2000학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

단위 데이터를 전송한 후 사전 설정된 시한 내에 긍정적 확인(positive acknowledgement: PACK) 메시지를 받지 못하거나 부정적 확인(negative acknowledgement: NACK) 메시지를 받으면 기 전송한 단위 데이터를 재전송한다. 이와 같이 ARQ 방식의 오류 제어에는 반드시 오류 검출 기능이 수반되어야 하고, 이러한 오류 검출 기능은 일반적으로 cyclic redundancy check(CRC) 부호에 의해 구현된다<sup>[5][6][8][10]</sup>. 그러나 어느 CRC 부호도 모든 유형의 오류를 확률 1로 검출하지는 못한다. 따라서 단위 데이터에서 오류가 검출되지 않았어도 (즉, 송신 노드가 PACK 메시지를 받았거나 NACK 메시지를 받지 않았어도) 이러한 단위 데이터에 오류가 잔류해 있을 가능성이 있으며, 이는 결국 종단 노드(end node)간의 데이터 재전송을 불러온다.

종단 노드간 데이터 재전송에 높은 비용이 추가되는 응용 서비스(예를 들어, 데이터의 재전송을 위한 통신 경로가 단말 시스템의 이동성(mobility)으로 인해 재설정되어야 하는 무선 패킷 망에서의 파일 전송)를 위해 보다 정확한 인접 노드간의 오류 제어가 필요하다<sup>[11]</sup>. 오류 제어의 정확성을 향상시키는 기본적인 방안은 오류 검출 능력이 보다 우월한 CRC 부호를 사용하여 pure ARQ를 수행하는 것이다<sup>[10][12]</sup>. 이러한 CRC 부호를 사용하는 경우 오류 제어의 정확성은 향상되나 오류 검출의 빈도가 또한 높아져 단위 데이터의 재전송 빈도가 증가하고 결국 지연 성능의 열화가 야기된다. 한편 pure ARQ 대신 hybrid ARQ를 사용하는 방안을 고려할 수 있다<sup>[10]</sup>. Hybrid ARQ를 사용할 경우 오류 검출에 오류 정정(error correction)의 기능이 추가되어 오류 제어의 정확성이 향상되고 아울러 단위 데이터의 재전송 빈도가 감소할 가능성이 있다. 그러나 pure ARQ와 hybrid ARQ의 비교는 복호화의 복잡성, 단위 데이터의 길이와 부호의 선택 등 여러 성능 분석 척도를 필요로 한다. (이러한 이유로 본 논문에서는 hybrid ARQ에 관련된 논의를 배제한다.)

본 논문에서는 인접 노드간의 오류 제어에서 정확성을 향상시키는 방안의 하나로 양 계층 ARQ 방식(double-layered ARQ scheme)을 제안한다. 기존의 ARQ 방식에서는 수신 노드의 단일 계층에서 오류 검출이 수행되는 반면, 양 계층 ARQ 방식에서는 수신 노드의 두 계층 혹은 두 부계층(sublayer)에서 계층별 단위 데이터에 대해 순차적으로 오류 검출이 수행된다. 이를 위해 송신 노드는 대응되는 두 계층 중 상위 계층에서 정의되는 단위 데이터를

부호화하고, 이러한 부호화된 상위 계층 단위 데이터를 하위 계층 단위 데이터로 분해(segment)하며, 이어서 각 하위 계층 단위 데이터를 부호화한다. 이와 같이 양 계층 ARQ 방식에서는 두 계층에서 오류 검출이 수행되므로 동일한 환경에서 같은 CRC 부호를 사용하는 단 계층 ARQ 방식에 비해 오류 검출의 정확성이 향상된다. 그러나 상위 계층에서의 오류 검출로 인한 재전송이 추가되므로 지연(delay) 성능은 상대적으로 열악해 진다. 따라서 양 계층 ARQ 방식의 성능은 오류 검출의 정확성과 지연 성능이라는 두 가지 상충적 측면에서 오류 검출 능력이 상이한 여러 CRC 부호를 각각 채택한 단 계층 ARQ 방식과의 비교를 통해 평가되어야 한다.

이러한 평가를 위해 본 논문에서는 첫째, 오류 검출의 정확성에 관한 척도로 오류가 검출되지 않은 상위 계층 단위 데이터에 오류가 남아 있을 확률인 오류 잔류 확률(probability of error remains) 그리고 지연 성능의 척도로 상위 계층 단위 데이터가 송신 노드에 도착한 순간부터 이에 대한 PACK 메시지를 송신 노드가 받을 때까지 소요되는 총 시간인 상위 계층 단위 데이터의 지연 시간을 설정한다. 둘째, 오류 잔류 확률과 상위 계층 단위 데이터의 지연 시간이 갖는 분포(distribution)를 근사적으로 계산하는 해석적 방법을 개발한다. 셋째, 개발된 해석적 방법과 모의 실험(simulation) 방법을 이용하여 채널 특성, CRC 부호의 성질, 상위 및 하위 계층 단위 데이터의 구조 등이 오류 잔류 확률과 상위 계층 단위 데이터의 평균 지연 시간에 미치는 영향을 분석한다. 아울러 단 계층 ARQ와의 성능 비교를 통해 양 계층 ARQ 방식의 유용성을 검토한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 인접 노드간 오류 제어를 위한 양 계층 ARQ 방식을 설명하고, 3 장에서는 양 계층 ARQ 방식에 따른 오류 잔류 확률과 상위 계층 단위 데이터의 지연 시간이 갖는 분포를 근사적으로 계산하는 해석적 방법을 기술한다. 이어서 4 장에서는 해석적 방법과 모의 실험 방법을 이용하여 여러 망 관련 파라미터가 오류 잔류 확률과 평균 지연 시간에 미치는 영향을 검토한다.

## II. 양 계층 stop and wait ARQ 방식

통신망에서 종단 노드간에 여러 중간 노드(intermediate node)를 거치는 통신 경로가 설정되고, 이러한 경로를 따라 세션(session)이 진행된다고 가정

하자. 경로상의 각 노드는 오류 제어를 수행하는 두 인접한 계층을 갖고 있다. 이러한 두 계층 중 상위 계층의 단위 데이터를 UHLM(uncoded high layer message), 그리고 하위 계층의 단위 데이터를 ULLM(uncoded low layer message)이라고 부른다. 이 때 인접 노드간 양 계층 stop and wait ARQ는 다음과 같이 수행된다.

- ① 송신 노드의 상위 계층에서 UHLM은 상위 계층에서의 오류 검출을 위해 상위 계층용 CRC 부호를 이용하여 EHLM(encoded high layer message)으로 부호화된다.
- ② EHLM은 ULLM으로 분해된다. (하나의 EHLM은  $m$  개의 ULLM으로 분해된다고 가정하자.)
- ③ 송신 노드의 하위 계층에서 각 ULLM은 하위 계층에서의 오류 검출을 위해 하위 계층용 CRC 부호를 이용하여 ELLM(encoded low layer message)으로 부호화된다.
- ④ 하나의 EHLM으로부터 만들어진  $m$  개의 ELLM은 순차적으로 채널을 통해 수신 노드로 전송된다. 수신 노드의 하위 계층은 수신한 ELLM에 대해 오류 검출을 수행하여 만약 오류가 검출되지 않으면 송신 노드에게 PACK 메시지를 전달한다. 그렇지 않으면 PACK 메시지를 보내지 않는다. (NACK 메시지는 사용하지 않는다.)
- ⑤ 모든  $i \in \{1, \dots, m-1\}$ 에 대해 송신 노드에서  $(i+1)$  번째 ELLM의 전송은  $i$  번째 ELLM에 대해 수신 노드로부터 PACK 메시지를 받은 후 시작된다. 각 ELLM은 전송 후 사전 결정된 시한 내에 PACK 메시지를 받지 못하면 재전송된다.
- ⑥ 수신 노드의 하위 계층은 ELLM에 대해 오류 검출을 수행하여 만약 오류가 검출되지 않으면 ELLM을 복호화하여 ULLM을 복원하고 이를 일시적으로 저장한다.
- ⑦ 수신 노드의 하위 계층은 하나의 EHLM으로부터 만들어진  $m$  개의 ELLM 중 마지막 ELLM( $m$  번째 ELLM)에 대해 오류 검출을 수행하여 오류가 검출되지 않으면, PACK 메시지를 송신 노드에 전달하고 ELLM을 복호화하여 ULLM을 복원한다. 이어서 기 저장된  $m-1$  개의 복원된 ULLM과  $m$  번째 복원된 ULLM으로부터 EHLM을 재조립(reassemble)한다.
- ⑧ 수신 노드의 상위 계층은 재조립된 EHLM에 대해 오류 검출을 수행하고 그 결과를 하위 계층에게 통보한다. 수신 노드의 하위 계층은 상위 계층으로부터 EHLM에 대한 오류 검출 결과를 받고 만약

EHLM에서 오류가 검출되지 않았으면 송신 노드에게 EHLM에 대한 PACK 메시지를 보낸다.

⑨ 송신 노드는 마지막 ELLM( $m$  번째 ELLM)에 대한 PACK 메시지를 받은 후 사전 결정된 시한까지 EHLM에 대한 PACK 메시지를 기다린다. 만약 시한 내에 EHLM에 대한 PACK 메시지를 받으면 EHLM의 전송이 마무리되었다고 판단한다. 그렇지 않으면, EHLM으로부터 이미 만들어진  $m$  개의 ELLM의 전송을 첫 번째 ELLM부터 순차적으로 재개한다. (즉, ④ 항부터 반복된다.)

⑩ 수신 노드는 재조립된 EHLM에서 오류를 검출하면 저장하고 있는  $m$  개의 복원된 ULLM을 모두 파기한다. (따라서 본 논문의 양 계층 ARQ에서 메시지 combining 등은 고려하지 않는다<sup>[4][10]</sup>.)

### III. 양 계층 ARQ 방식의 성능 분석

본 장에서는 인접 노드간 오류 제어를 위해 양 계층 stop and wait ARQ가 적용될 때, 오류 검출의 정확성과 지연 성능을 평가하기 위하여 오류 잔류 확률과 상위 계층 메시지의 지연 시간이 갖는 분포를 근사적으로 계산하는 해석적 방법을 밝힌다. III.1 절에서는 CRC 부호의 오류 검출 능력을 검토하고 계산 용이성(computational simplicity)을 위해  $(n, k)$  CRC 부호의 오류 검출 능력에 대한 가정을 세운다. 이러한 가정을 바탕으로 III.2 절에서는 오류가 검출되지 않은 상위 계층 메시지에 오류가 남아 있을 확률인 오류 잔류 확률을 계산하는 해석적 방법을 밝히고, III.3 절에서는 송신 노드에서 상위 계층 메시지가 경험하는 지연 시간의 분포를 계산하는 방법을 서술한다. 본 장에서 송신 노드가 메시지를 전송하는 채널은 비트 오류율(bit error rate)이  $\epsilon$ 인 이진 대칭 채널(binary symmetric channel: BSC), 그리고 수신 노드가 PACK 메시지를 보내는 채널은 무 잡음 채널(noiseless channel)로 모형화한다.

#### 1. CRC 부호의 오류 검출 능력

CRC 부호의 오류 검출 능력은 많은 문헌을 통해 검토되었다<sup>[6][8][10][12]</sup>. 본 절에서는 CRC 부호의 오류 검출 능력과 관련하여, 부호화된 메시지가 BSC를 통해 전달될 때 오류 유형에 독립적으로 또한 확률 1로 검출할 수 있는 최대 오류의 수에 초점을 맞춘다.  $(n, k)$  CRC 부호는 오류 유형에 독립적으로 최대  $d_{min}-1$  개의 오류를 확률 1로 검출

할 수 있다고 알려져 있다<sup>[10][12]</sup>. (이 때  $d_{\min}$ 은 부호어(codeword)간의 최소 거리(minimum distance)이다.) CRC 부호는 길이가 가변인 메시지의 부호화에 적용될 수 있고, 일반적으로  $d_{\min}$ 을 정확히 구하는 것이 용이하지 않다. 한편  $(n, k)$  CRC 부호에 대해 최소 거리  $d_{\min}$ 의 상계(upper bound)와 하계(lower bound)가 문헌을 통해 알려져 있다. 대표적으로 Singleton의 상계인  $n-k+1$ 이 있으며, 그 외에  $d_{\min}$ 에 대한 상계와 하계에 대한 근사값으로 Hamming의 상계, Plotkin의 상계, Elias의 상계, 그리고 Gilbert와 Varsharmov의 하계 등이 알려져 있다<sup>[10][12]</sup>.

CRC 부호는 물론 오류 유형에 종속적이거나 검출 확률이 1보다 작은 오류 검출 능력을 갖고 있으나 이를 정확히 오류 잔류 확률과 지연 시간이 갖는 분포의 계산에 반영하기는 용이하지 않다. 따라서 계산 용이성을 위해 CRC 부호의 오류 검출 능력을 단순화하여 다음과 같은 가정을 세운다.

**가정**  $(n, k)$  CRC 부호는 최대  $\nu(n, k)$  개의 오류를 오류 유형에 독립적으로 또한 확률 1로 검출할 수 있다. 그러나  $(n, k)$  CRC 부호는 오류 유형에 관계없이  $\nu(n, k)+1$  개 이상의 오류를 검출할 확률은 0이다. (이 때,  $\nu$ 는  $n$ 과  $k$ 의 함수이다.)

예를 들어, 가정에서 Singleton의 상계를 이용하면  $\nu(n, k)=n-k$ 이다. 만약 가정에서  $\nu(n, k)$ 로  $d_{\min}$ 의 참값이 사용되면  $(n, k)$  CRC 부호의 오류 검출 능력을 과소 추정(underestimate)하게 된다.

2. 오류 잔류 확률

수신 노드의 상위 계층은 재조립된 EHLM에 대해 오류 검출을 수행하고 오류가 검출되지 않으면 이를 복호화하여 UHLM을 복원한다. 그러나 CRC 부호가 지닌 오류 검출 능력의 불완전성으로 인해 복원된 UHLM에 오류가 남아 있을 수 있다. 본 절에서는 오류가 검출되지 않은 EHLM으로부터 복원된 UHLM에 아직 오류가 남아 있을 확률인 오류 잔류 확률을 III.1 절의 가정에 기초하여 계산하는 해석적 방법을 제시한다.

UHLM의 길이는  $k_H$ 로 고정되어 있다고 가정한다. 이러한 UHLM은 송신 노드의 상위 계층에서 길이  $n_H$ 의 EHLM으로 부호화된다. (따라서 상위

계층용 CRC 부호는 차수가  $n_H-k_H$ 인 생성 다항식(generator polynomial)을 갖는다.) 한편 ULLM의 길이는  $k_L$ 로 고정되어 있다고 가정한다. 길이가  $n_H$ 인 EHLM은 길이  $k_L$ 의 ULLM으로 분해된다. 따라서 하나의 EHLM으로부터 만들어지는 ULLM의 개수  $m = \lceil \frac{n_H}{k_L} \rceil$ 이다. ( $\lceil x \rceil$ 는  $x$ 보다 크거나 같은 최소 정수이다.) EHLM의 길이  $n_H$ 가 항상 ULLM의 길이인  $k_L$ 의 정수 배는 아니므로 이러한 경우 zero stuffing이 사용된다. 즉, 마지막  $m$ 번째 ULLM의  $k_L$  비트 중 EHLM의 비트로 채워지 못한  $mk_L-n_H$  비트는 0으로 메워진다. EHLM의 분해에 있어서 각 ULLM은 송신 노드의 하위 계층에서 길이  $n_L$ 의 ELLM으로 부호화된다. (따라서 하위 계층용 CRC 부호는 차수가  $n_L-k_L$ 인 생성 다항식을 갖는다.)

길이  $n_L$ 의 ELLM을 비트 오류율이  $\epsilon$ 인 BSC를 통해 수신 노드가 받았을 때 ELLM에서 발생한 오류의 수를  $U$ 라고 하자. 그러면 확률 변수  $U$ 는 모든  $j=0, \dots, n_L$ 에 대해 다음의 mass를 갖는다.

$$h_U(j) \stackrel{\Delta}{=} P(U=j) = B(n_L, \epsilon, j) \cdot I_{(j=0, \dots, n_L)} \tag{1}$$

식 (1)에서  $B(n, \epsilon, j)$ 는 파라미터  $n$ 과  $\epsilon$ 으로 특정 지워지는 이진 분포(binary distribution)의 mass이다. 즉, 모든  $j=0, \dots, n$ 에 대해

$$B(n, \epsilon, j) \stackrel{\Delta}{=} \binom{n}{j} \epsilon^j (1-\epsilon)^{n-j} \tag{2}$$

또한 식 (1)에서  $I_A$ 는 indicator 함수로 조건  $A$ 가 참이면 1 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다.

III.1 절의 가정에 의해 길이가  $n_L$ 인 ELLM에서 발생한 오류의 수가  $\nu(n_L, k_L)+1$  이상이면 오류가 검출되지 않는다. 따라서 마지막으로 (재)전송된 ELLM은 오류가 없거나  $\nu(n_L, k_L)+1$  개 이상의 오류를 가지고 있다. 확률 변수  $V$ 를 마지막으로 (재)전송된 길이  $n_L$ 의 ELLM에서 발생한 오류의 수라고 하자. 그러면 확률 변수  $V$ 는 다음의 mass를 갖는다. 모든  $j=0, \nu(n_L, k_L)+1, \dots, n_L$ 에 대해

$$\begin{aligned}
 h_V(j) &\stackrel{\Delta}{=} P(V=j) \\
 &= \frac{B(n_L, \epsilon, j)}{n_L} \cdot \\
 &\quad B(n_L, \epsilon, 0) + \sum_{i=\nu_L+1} B(n_L, \epsilon, i)
 \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)에서  $\nu_L = \nu(n_L, k_L)$ 이다.

수신 노드의 하위 계층은 마지막으로 (재)전송된 길이  $n_L$ 의 ELLM을 복호화하여 길이  $k_L$ 의 ULLM을 복원한다. 복원된 ULLM에 남아 있는 오류의 수를  $W$ 라고 하자. 그러면 확률 변수  $W$ 는 ELLM에서 발생한  $V$  개의 오류 중 ELLM의 payload 부분에서 발생한 오류의 수이다. ELLM의 payload는 길이가  $k_L$ 이므로  $W$ 는 다음의 mass를 갖는다.

$$\begin{aligned}
 h_W(0) &\stackrel{\Delta}{=} P(W=0) \\
 &= H(n_L, k_L, 0, 0) h_V(0) \\
 &\quad + \sum_{i=\nu_L+1} H(n_L, k_L, i, 0) h_V(i)
 \end{aligned}$$

그리고 모든  $j=1, \dots, k_L$ 에 대해

$$\begin{aligned}
 h_W(j) &\stackrel{\Delta}{=} P(W=j) \\
 &= \sum_{i=\max\{j, \nu_L+1\}}^{n_L - k_L + j} H(n_L, k_L, i, j) h_V(i) .
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서  $H(n, k, i, j)$ 는 파라미터  $n, k, i$ 로 특징 지워지는 초기하 분포(hypergeometric distribution)의 mass이다. 즉,

$$H(n, k, i, j) = \frac{\binom{k}{j} \binom{n-k}{i-j}}{\binom{n}{i}} . \tag{5}$$

수신 노드는 하나의 EHLM이 분해되어 만들어진  $m$  개의 ULLM을 모두 복원하면, 이러한 ULLM으로부터 EHLM을 재조립된다. 재조립된 EHLM에 남아 있는 오류의 수를  $X$ 라고 하자. 모든  $i=1, \dots, m-1$ 에 대해  $i$  번째 복원된 ULLM에 남아 있는 오류의 수를 확률 변수  $W_i$ 로 나타내자. 한편  $m$  번째 ULLM에는 zero stuff된 부분이 있을 수 있다. 이러한 부분을 제외하고 원래 EHLM의 비트로 채워진 부분에 남아 있는 오류의 수를  $W_m$ 이

라고 하자. 그러면  $X$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$X = W_1 + \dots + W_{m-1} + W_m . \tag{6}$$

식 (6)에서  $W_1, \dots, W_m$ 은 서로 독립(mutually independent)이며  $W_1, \dots, W_{m-1}$ 은 모두 동일하게 식 (4)에 주어진 mass  $h_W$ 를 갖는다. 한편 확률 변수  $W_m$ 은 식 (4)의 mass에서  $k_L$ 이  $n_H - (m-1)k_L$ 로 대체된 mass를 갖는다. (이러한  $W_m$ 의 mass를  $h_W^*$ 라고 하자.) 따라서 확률 변수  $X$ 가 갖는 mass를  $h_X$ 라고 하면 모든  $j=0, \dots, n_H$ 에 대해

$$h_X(j) = \sum_{C_j} h_W(i_1) \dots h_{W_{m-1}}(i_{m-1}) h_W^*(i_m) . \tag{7}$$

식 (7)에서 집합  $C_j$ 는 모든  $j=0, \dots, n_H$ 에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$C_j = \{(i_1, \dots, i_m) \in Z_+^m : i_1 + \dots + i_m = j\} . \tag{8}$$

(식 (8)에서  $Z_+$ 는 0과 양의 정수의 집합이다.)

수신 노드의 상위 계층은 재조립된 EHLM에 대해 오류 검출을 수행한다. 이 때 III.1 절의 가정에 따라 재조립된 EHLM에 오류가 없거나 오류의 수가  $\nu(n_H, k_H) + 1$  이상이면 오류가 검출되지 않는다. 오류가 검출되지 않은 EHLM에 남아 있는 오류의 수를  $Y$ 라고 하자. 그러면 모든  $j=0, \nu(n_H, k_H) + 1, \dots, n_H$ 에 대해 확률 변수  $Y$ 가 갖는 mass는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 h_Y(j) &\stackrel{\Delta}{=} P(Y=j) \\
 &= \frac{h_X(j)}{h_X(0) + \sum_{i=\nu_H+1} h_X(i)} .
 \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)에서  $\nu_H = \nu(n_H, k_H)$ 이다.

수신 노드의 상위 계층은 재조립된 EHLM에서 오류가 검출되지 않으면 이를 복호화하여 UHLM을 복원한다. 복원된 UHLM에 남아 있는 오류의 수를  $Z$ 라고 하자. 확률 변수  $Z$ 는 EHLM의 payload에 남아 있는 오류의 수이고 EHLM의 payload는 길이가  $k_H$ 이므로  $Z$ 는 다음의 mass를 갖는다.

$$\begin{aligned}
 h_Z(0) &\stackrel{\Delta}{=} P(Z=0) \\
 &= H(n_H, k_H, 0, 0) h_Y(0) \\
 &\quad + \sum_{i=\nu_H+1}^{n_H-k_H} H(n_H, k_H, i, 0) h_Y(i)
 \end{aligned}$$

그리고 모든  $j=1, \dots, k_H$ 에 대해

$$\begin{aligned}
 h_Z(j) &\stackrel{\Delta}{=} P(Z=j) \\
 &= \sum_{i=\max(j, \nu_H+1)}^{n_H-k_H+j} H(n_H, k_H, i, j) h_Y(i) .
 \end{aligned} \tag{10}$$

오류 잔류 확률을  $\theta$ 라고 하자. 오류 잔류 확률은 복원된 UHLM에 적어도 하나의 오류가 있을 확률 이므로, 식 (10)의 mass  $h_Z$ 로부터  $\theta$ 는 다음과 같 이 표현된다.

$$\theta = 1 - h_Z(0) . \tag{11}$$

### 3. 상위 계층 메시지의 지연 시간

EHLM의 지연 시간은 EHLM이 송신 노드에 도착한 시점에서 수신 노드로부터 해당하는 상위 계층 확인 메시지가 송신 노드에 도착 완료되는 시점 까지 소요되는 총 시간으로 정의된다. 본 절에서는 이러한 EHLM 지연 시간의 시퀀스가 정상 상태 (steady state)에 도달했을 때, EHLM의 지연 시간 이 갖는 분포를 계산하는 방법을 제시한다. 이를 위 해 우선 메시지의 전송이 시작되는 시점에서 해당 하는 상위 계층 확인 메시지가 송신 노드에 도착 완료되는 시점까지 소요되는 총 시간을 완료 시간 (completion time)이라고 정의하고, ELLM과 EHLM에 대해 각각 완료 시간이 갖는 확률적 성질 을 규명한 후 정상 상태에서 EHLM의 평균 지연 시간을 계산한다.

본 절에서 송신 노드와 수신 노드간의 전파 지연 시간(propagation delay time)은  $\phi$ 로 동일하고 송신 노드의 메시지 전송에서 데이터 전송률(data rate)은  $\xi$ 로 고정되어 있다고 가정한다. 또한 PACK의 전송에 소요되는 시간은 무시할 정도로 짧다고 가정 한다.

#### 1) 하위 계층 메시지의 완료 시간

PACK의 전송에 소요되는 시간은 무시할 정도로 짧으므로, 송신 노드의 하위 계층에서 ELLM을 전송한 후 PACK를 받기 위해 대기해야 하는 최소

시간은  $2\psi$ 이다. 본 절에서는 이러한 대기 시간을 최소화하여  $2\psi$ 로 정한다. 시간  $\beta$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\beta = \frac{n_L}{\xi} + 2\psi . \tag{12}$$

그러면 시간  $\beta$ 는 길이가  $n_L$ 인 ELLM의 전송이 시작되는 시점에서 PACK를 받기 위한 대기 시간 이 완료되는 시점까지 소요되는 총 시간이다.

수신 노드의 하위 계층이 길이  $n_L$ 의 ELLM에서 오류를 검출할 확률을  $\alpha_L$ 이라고 하자. 식 (1)의 mass  $h_U$ 를 갖는 확률 변수  $U$ 는 길이  $n_L$ 의 ELLM에서 발생한 오류의 수이며 수신 노드의 하 위 계층은 오류가 없거나 오류의 수가  $\nu(n_L, k_L)+1$  이상이면 ELLM에서 오류를 검출하 지 못하므로, 확률  $\alpha_L$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha_L = \sum_{j=1}^{\nu(n_L, k_L)} h_U(j) . \tag{13}$$

길이  $n_L$ 인 ELLM이 재전송되는 회수를  $G_L$ 이라고 하자. 그러면 확률 변수  $G_L$ 은 식 (13)에 주어진 파 라미터  $\alpha_L$ 의 기하 분포(geometric distribution)를 갖는다. 즉, 모든  $j=0, 1, \dots$ 에 대해

$$P(G_L=j) = [1-\alpha_L][\alpha_L]^j . \tag{14}$$

길이가  $n_L$ 인 ELLM의 완료 시간을  $C_L$ 이라고 하자. 그러면 식 (12)의 시간  $\beta$ 와 식 (14)의 재전 송 회수  $G_L$ 로부터 확률 변수  $C_L$ 은 다음의 관계 식을 만족한다.

$$C_L = [G_L+1] \cdot \beta . \tag{15}$$

#### 2) 상위 계층 메시지의 완료 시간

하나의 EHLM으로부터 만들어지는  $m$  개의 ELLM 중  $i$  번째 ELLM의 완료 시간을  $C_L(i)$ 로 나타내자. 그러면  $C_L(1), \dots, C_L(m)$ 은 서로 독립이 다. 또한  $C_L(1), \dots, C_L(m)$ 은 식 (15)에 정의된 확 률 변수  $C_L$ 과 동일한 분포를 갖는다. 확률 변수  $S$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$S = C_L(1) + \dots + C_L(m) . \tag{16}$$

그러면 확률 변수  $S$ 는 하나의 EHLM이 분해되어 만들어지는  $m$  개의 ELLM 중 첫 번째 ELLM의 전송이 시작되는 시점에서 마지막 ELLM에 대한 PACK 메시지를 송신 노드가 접수하는 시점까지 소요되는 총 시간을 의미한다.

수신 노드의 상위 계층이 재조립된 EHLM에서 오류를 검출할 확률을  $a_H$ 라고 하자. 식 (7)의  $h_X$ 를 갖는 확률 변수  $X$ 는 재조립된 EHLM에 남아 있는 오류의 수이며 수신 노드의 상위 계층은 EHLM에 오류가 없거나 남아 있는 오류의 수가  $\nu(n_H, k_H) + 1$  이상이면 오류를 검출하지 못하므로, 확률  $a_H$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$a_H = \sum_{j=1}^{\nu(n_H, k_H)} h_X(j) . \tag{17}$$

임의의 EHLM이 재전송되는 회수를  $G_H$ 라고 하자. 그러면 확률 변수  $G_H$ 는 식 (17)에 주어진 파라미터  $a_H$ 의 기하 분포를 갖는다. 즉, 모든  $j=0, 1, \dots$ 에 대해

$$P(G_H=j) = [1 - a_H][a_H]^j . \tag{18}$$

EHLM의 완료 시간을  $C_H$ 라고 하자. 그러면 확률 변수  $C_H$ 는 다음의 관계식을 만족한다.

$$C_H = \sum_{i=1}^d S_i . \tag{19}$$

식 (19)에서  $S_1, S_2, \dots$ 는 서로 독립이고 식 (16)에 정의된 확률 변수  $S$ 와 동일한 분포를 갖는다.

### 3) 상위 계층 메시지의 지연 시간

송신 노드의 상위 계층에  $n$  번째 EHLM이 도착하는 시간을  $A_n$ 이라고 하자. 이러한 도착 시간의 시퀀스  $\{A_n, n=0, 1, \dots\}$ 을 파라미터  $\lambda$ 의 Poisson point process로 모형화하자. 즉,  $A_1 - A_0, A_2 - A_1, \dots$ 은 서로 독립이고 동일하게 파라미터  $\lambda$ 의 지수 분포(exponential distribution)를 갖는다. 한편  $n$  번째 EHLM의 완료 시간을

$C_H(n)$ 이라고 하자. 그러면  $C_H(1), C_H(2), \dots$ 은 서로 독립이고 식 (19)에 주어진 확률 변수  $C_H$ 와 동일한 분포를 갖는다. 따라서 EHLM의 전송에서 송신 노드를 도착률(arrival rate)이  $\lambda$ 이고 서비스 시간(service time)이 식 (19)에 정의된  $C_H$ 와 동일한 분포를 갖는 M/G/1 큐잉(queueing) 시스템으로 모형화할 수 있다<sup>[11][13][14][15][16]</sup>. 송신 노드로부터  $n$  번째 EHLM이 떠나는 시간(departure time)을  $R_n$ 이라고 하자. (즉  $R_n$ 은  $n$  번째 EHLM에 대한 확인 메시지를 송신 노드가 접수하는 시점이다.) 그러면 모든  $n=1, 2, \dots$ 에 대해  $n$  번째 EHLM의 지연 시간  $D_n$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$D_n = R_n - A_n . \tag{20}$$

식 (20)에 정의된 지연 시간의 시퀀스  $\{D_n, n=1, 2, \dots\}$ 에 대해, 만약  $\lambda E(C_H) < 1$ 이면  $n \rightarrow \infty$ 에 따라  $D_n \rightarrow D$ 인 확률 변수  $D$ 가 존재한다<sup>[13][15]</sup>. (확률 변수  $D$ 는 시퀀스  $\{D_n, n=1, 2, \dots\}$ 의 정상 상태 분포(steady state distribution)를 갖는다.) 확률 변수  $D$ 가 갖는 분포 함수를  $F_D$ 라고 하고  $F_D$ 의 Laplace-Stieltjes 변환을  $\Phi_D$ 라고 하자. 그러면  $\Phi_D$ 는  $\text{Re}(s) \geq 0$ 에 대해 다음과 같이 구해진다<sup>[13][14][15]</sup>.

$$\begin{aligned} \Phi_D(s) &= \int_0^\infty e^{-sx} dF_D(x) \\ &= \frac{[1 - \lambda E(C_H)] s \Phi_{C_H}(s)}{s - \lambda [1 - \Phi_{C_H}(s)]} . \end{aligned} \tag{21}$$

식 (21)에서  $\Phi_{C_H}$ 는 확률 변수  $C_H$ 가 갖는 분포 함수의 Laplace-Stieltjes 변환이다. 식 (21)의 양변을 미분하여 확률 변수  $D$ 의 모든 차수의 moment를 구할 수 있다. 예를 들어 확률 변수  $D$ 의 1 차 moment, 즉  $D$ 의 평균은 다음과 같이 구해진다.

$$E(D) = E(C_H) + \frac{\lambda E(C_H^2)}{2[1 - \lambda E(C_H)]} . \tag{22}$$

식 (22)에서 확률 변수  $C_H$ 의 moment  $E(C_H)$ 와  $E(C_H^2)$ 는 식 (19)로부터 구해진다.

#### IV. 양 계층 ARQ 방식의 계량적 분석

본 장에서는 III 장에 기술된 해석적 방법과 모의 실험 방법을 이용하여 비트 오류율로 대표되는 채널의 특성, 생성 다항식의 최대 차수를 포함한 CRC 부호의 성질 등이 양 계층 및 단 계층 ARQ 방식 하에서 오류 잔류 확률과 평균 지연 시간에 미치는 영향을 계량적으로 분석한다. 본 장에서 사용하는 파라미터의 값을 GPRS 시스템에서 부분적으로 차용하여 다음과 같이 설정한다<sup>[17]</sup>. ULLM의 길이는 400 bits로 고정한다. 또한 송신 노드와 수신 노드간의 전파 지연 시간은 1  $\mu$ sec로 동일하게 설정하고 송신 노드의 메시지 전송에서 데이터 전송률(data rate)은 20 kbps로 정한다. 또한 PACK 메시지의 전송 시간은 무시할 정도로 짧고 PACK 메시지의 전송에서 오류는 발생하지 않는다고 가정한다. 한편 III.1 절의 가정에 도입되어 있는 함수  $\nu$ 는 Singleton의 상계를 이용하여  $(n, k)$  CRC 부호에 대해  $\nu(n, k) = n - k$ 라고 정한다. 모의 실험에서는 3 가지의 CRC 부호가 사용된다. 이 들 CRC 부호의 생성 다항식은 표 1에 정리되어 있다<sup>[6][10]</sup>.

표 1. 모의 실험에 사용되는 CRC 부호와 generator polynomial

CRC 부호	generator polynomial $g(z)$
code 10	$1 + z + z^4 + z^5 + z^9 + z^{10}$
code 12	$1 + z + z^2 + z^3 + z^{11} + z^{12}$
code 16	$1 + z^2 + z^{15} + z^{16}$

그림 1은 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 사용될 경우 채널의 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률을 보여 준다. 이 그림에서 UHLM의 길이는 2000 bits로 설정되었다. 한편 그림 2는 그림 1에서와 동일한 CRC 부호가 사용될 때 송신 노드에 가해지는 트래픽 부하에 따른 EHLM의 평균 지연 시간을 나타낸다. (이 그림에서 비트 오류율  $\epsilon \in \{0.006, 0.007, 0.008, 0.009, 0.01\}$  이다.) 그림 1에서 해석적 근사 방법으로 구한 오류 잔류 확률은 모의 실험 방법으로 구한 결과와 비교하여 비트 오류율이 높은 경우 상대적으로 높으나 그렇지 않은 경우에는 더 낮음을 관찰할 수 있다. 비트 오류율이

높은 경우 이러한 결과는 CRC 부호의 오류 검출 능력을 과소 추정하는 가정을 기초로 해석적 근사 방법이 개발되었음에 기인한다. 그러나 채널의 비트 오류율이 상대적으로 낮은 경우 발생하는 오류의 수는 오류 유형에 독립적으로 검출할 수 있는 오류의 수, 즉  $d_{min} - 1$  이하일 확률이 높다. 한편 본 절에서  $d_{min}$ 으로 Singleton의 상계가 사용되고 있으므로 CRC 부호의 오류 검출 능력을 오히려 과대 추정(overestimate)하게 되어 상대적으로 낮은 오류 잔류 확률이 계산된다.

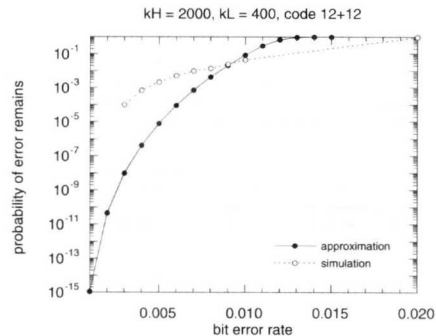


그림 1. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM과 UHLM의 부호화에 공통으로 사용될 때 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률 (UHLM의 길이 : 2000 bits)

그림 2와 3에서 해석적 근사 방법으로 구한 평균 지연 시간은 모의 실험 방법으로 추정된 값과 유사함을 볼 수 있다. 오류가 발생하였으나 검출되지 않을 확률은 오류를 검출할 확률에 비해 상당히 낮으므로 평균 지연 시간에 영향을 미치는 주요 요소는 재전송 회수이고 따라서 해석적 근사 방법과 모의 실험 방법으로 구한 재전송 확률은 유의할 수준의 차이가 없음을 알 수 있다. 이 그림을 보다 자세히 관찰하면 비트 오류율이 0.006인 경우 해석적 근사 방법으로 구한 평균 지연 시간이 모의 실험 방법으로 구한 추정값에 비해 길지만, 비트 오류율이 0.01인 경우 더 짧음을 볼 수 있다. 이는 그림 1에서 나타난 오류 잔류 확률의 대소 관계와 반대인 재전송 확률의 대소 관계가 평균 지연 시간에 반영된 결과이다.

그림 4는 양 계층 ARQ 방식과 단 계층 ARQ 방식이 적용되었을 때 야기되는 오류 잔류 확률을 채널의 비트 오류율에 따라 보여 준다. 이 그림에서 EHLM의 길이는 1960 bits로 고정되어 있다. 또한 양 계층 ARQ에서는 code 12가 ULLM 및 UHLM



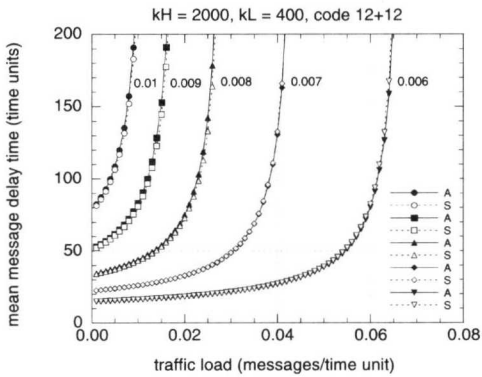


그림 2. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 사용될 때 트래픽 부하에 따른 EHLM의 평균 지연 시간 (비트 오류율 : 0.006, 0.007, 0.008, 0.009, 0.01, UHLM의 길이 : 2000 bits)

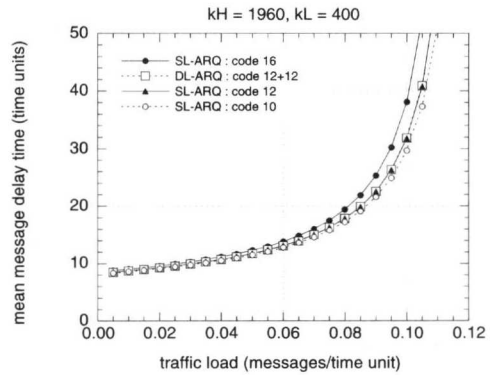


그림 5. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 적용된 경우와 단 계층 ARQ 방식에서 code 10, code 12, code 16이 ULLM의 부호화에 사용된 경우 트래픽 부하에 따른 EHLM의 평균 지연 시간 (비트 오류율 : 0.005, UHLM의 길이 : 1960 bits)

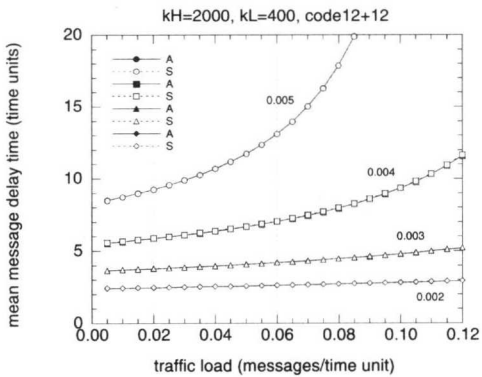


그림 3. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 사용될 때 트래픽 부하에 따른 EHLM의 평균 지연 시간 (비트 오류율 : 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, UHLM의 길이 : 2000 bits)

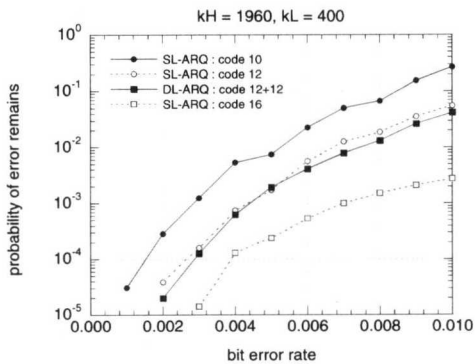


그림 4. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 적용된 경우와 단 계층 ARQ 방식에서 code 10, code 12, code 16이 ULLM의 부호화에 사용된 경우 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률 (UHLM의 길이 : 1960 bits)

의 부호화에 사용되고 단 계층 ARQ 방식에서는 code 10, code 12 그리고 code 16이 ULLM의 부호화에 각각 사용된다. 그림 4에서 code 12를 사용하는 양 계층 ARQ는 code 10이나 code 12를 사용하는 단 계층 ARQ에 비해 우수한 오류 잔류 확률을 보이나 code 16을 사용하는 단 계층 ARQ에 비해서는 열등함을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4와 같은 환경에서 평균 지연 시간을 보여 준다. 이 그림에서 비트 오류율은 0.005이다. 이 그림에서 code 12를 사용하는 양 계층 ARQ는 code 16을 사용하는 단 계층 ARQ에 비해 우수한 평균 지연 시간을 보이고 code 10을 사용하는 단 계층 ARQ에 비해서는 열등한 평균 지연 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 code 12를 사용하는 단 계층 ARQ와는 유사한 성능을 나타내고 있다. 따라서 양 계층 ARQ 방식은 유사한 지연 성능 수준에서 오류 검출의 정확성을 향상시킬 수 있는 단 계층 ARQ 방식의 개선 안이 될 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 6과 7은 UHLM의 길이가 2000 bits인 경우 그림 4 및 5와 동일한 환경에서 모든 실험 방법으로 구한 오류 잔류 확률과 EHLM의 평균 지연 시간을 보여 준다. 그림 6과 그림 4를 비교하여 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률은 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 그림 7에서 code 12를 사용하는 양 계층 ARQ에서 code 16을 사용하는 단 계층 ARQ에 비해 평균 지연 시간이 더 길어짐을 볼 수 있다. UHLM의 길이가 1960 bits인 경우

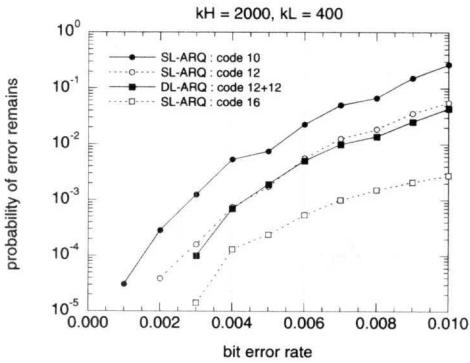


그림 6. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 적용된 경우와 단 계층 ARQ 방식에서 code 10, code 12, code 16이 ULLM의 부호화에 사용된 경우 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률 (UHLM의 길이 : 2000 bits)

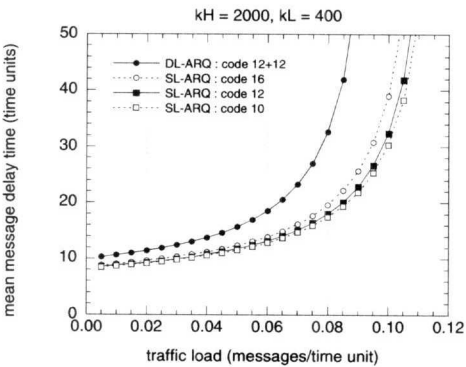


그림 7. 양 계층 ARQ 방식에서 code 12가 ULLM 및 UHLM의 부호화에 적용된 경우와 단 계층 ARQ 방식에서 code 10, code 12, code 16이 ULLM의 부호화에 사용된 경우 트래픽 부하에 따른 EHLM의 평균 지연 시간 (비트 오류율 : 0.005, UHLM의 길이 : 2000 bits)

양 계층 ARQ와 단 계층 ARQ 방식에서 공통으로 하나의 EHLM은 5 개의 ULLM으로 분해된다. 그러나 UHLM의 길이가 2000 bits인 경우 양 계층 ARQ에서는 하나의 EHLM은 6 개의 ULLM으로 분해되나 단 계층 ARQ에서는 여전히 5 개의 ULLM으로 분해된다. 그림 7에 나타난 code 12를 사용하는 양 계층 ARQ에서 평균 지연 시간의 증가는 이러한 하위 계층 메시지의 수적 증가에 기인한다.

### V. 결론

본 논문에서 재전송을 기반으로 오류 제어가 이루어지는 통신망에서 인접 노트간 오류 제어의 정

확성을 향상시키는 방안으로 송신 및 수신 노트의 인접한 두 (부)계층에서 순차적으로 ARQ가 수행되는 양 계층 ARQ 방식을 제안하였다. 또한 양 계층 ARQ 방식의 적용에 따라 야기되는 오류 제어의 정확성과 메시지 지연 시간의 상반된 성능을 평가하기 위해, 오류 잔류 확률과 정상 상태에서 메시지 지연 시간의 분포를 근사적으로 계산하는 해석적 방법을 개발하였다. 이어서 양 계층 ARQ 방식에 대해 해석적 근사 방법 및 모의 실험 방법으로 채널의 특성, CRC 부호의 성질, 메시지의 구조 등이 오류 잔류 확률과 평균 지연 시간에 미치는 영향을 계량적으로 분석하였다. 분석 결과로부터 유사한 평균 지연 수준에서 양 계층 ARQ 방식이 단 계층 ARQ 방식에 비해 보다 정확히 오류를 검출할 수 있음을 관찰하였다. 이러한 관찰로부터 지연 성능에 대한 제약 하에서 오류 제어의 정확성을 향상시킬 수 있는 양 계층 ARQ 방식의 유용성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] A. Annamalai and V. Phargava, "Analysis and optimization of adaptive multicopy transmission ARQ protocols for time-varying channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 10, pp. 1356-1368, October 1998.
- [2] H. Bruneel and M. Moeneclaey, "On the throughput performance of some continuous ARQ strategies with repeated transmissions," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 244-249, March 1986.
- [3] Y. Hayashida, A. Maeda, N. Sugimachi, and S. Fujii, "Performance analysis of Go-Back-N ARQ scheme with selective repeat in intra-block," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 3, pp. 391-395, March 2002.
- [4] S. Kallel, "Analysis of memory and incremental redundancy ARQ scheme over a nonstationary channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no. 9, pp. 1474-1480, September, 1992.
- [2] R. Bates, *GPRS - General Packet Radio Service*. McGraw-Hill, 2002.
- [5] S. Lin and D. Costello, "Automatic-repeat request error control schemes," *IEEE*

*Communications Magazine*, vol. 22, no. 12, pp. 5-16, December 1985.

- [6] J. Spragins, J. Hammond and K. Pawlikowski, *Telecommunications Protocols and Design*. Addison-Wesley, 1991.
- [7] E. Weldon, "An improved selective-repeat ARQ strategy," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 480-486, March 1982.
- [8] R. Ziemer and R. Peterson, *Introduction to Digital Communication*. 2nd edition, Prentice-Hall, 2001.
- [9] M. Zorzi and R. Rao, "Latency probability of a retransmission scheme for error control on a two-state Markov channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 10, pp. 1537-1548, October 1999.
- [10] S. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*. Prentice-Hall, 1995.
- [11] C. Choi, "Double-layered ARQ with CRC," *Proceedings of KICS Coding and Information Theory Workshop*, pp. 18-24, 2001.
- [12] J. Proakis, *Digital Communications*. 3rd edition, McGraw-Hill, 1995.
- [13] J. Cohen, *The Single Server Queue*. North-Holland, 1982.
- [14] D. Gross and C. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*. 3rd edition, John Wiley & Sons, 1998.
- [15] H. Takagi, *Queueing Analysis - A Foundation of Performance Evaluation*. North-Holland, 1991.
- [16] D. Towsley and J. Wolf, "On the statistical analysis of queue lengths and waiting times for statistical multiplexers with ARQ retransmission schemes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 27, no. 4, pp. 693-702, April 1979.
- [17] R. Bates, *GPRS - General Packet Radio Service*. McGraw-Hill, 2002.

최 천 원(Cheon Won Choi)

정회원



1986년 : 서울대학교

전자공학과 학사

1988년 : 서울대학교

전자공학과 석사

1986년 : UCLA

전기공학과 박사

1996년~1997년 : Engineer, IRI Computer Communications, Inc.

1997년~현재 : 단국대학교 교수

<주관심 분야> MAC 설계 및 분석, 통신망 시스템의 모형화와 성능 분석