

## 광대역 네트워크에서의 신뢰성 있는 통신 방법

正會員 林孝澤\*, 宋周錫\*\*

### A Reliable Communication Method in Broadband Networks

Hyo Taek Lim\*, Joo Seok Song\*\* Regular Members

#### 要 約

광대역 ISDN과 같은 초고속 네트워크에서 전송에러의 주요원인은 과잉밀집 상태에 있어서의 버퍼 오버플로우이며 이로 인해 셀손실을 야기한다. 기존의 통신 프로토콜은 손실된 패킷이나 전송에러들을 다루기 위해 에러탐지와 재전송 방법을 사용하고 있으나 이러한 ARQ 방법들은 재전송으로 인한 전송 지연시간이 매우 크기 때문에 초고속 네트워크에서 는 적합하지 않다. 따라서, 본 논문은 이러한 문제를 줄이기 위하여 FEC를 사용한 연속적인 셀손실을 회복할 수 있는 방법을 제안한다. 이 방법은 34개의 연속적인 셀손실까지 회복할 수 있으며 수치적인 분석결과도 상당히 낮은 셀손실율을 나타내고 있다.

#### ABSTRACT

The major source of errors in high-speed networks such as Broadband ISDN(B-ISDN) is buffer overflow during congested conditions. These congestion errors are the dominant sources of errors in high-speed networks and result in cell losses. Conventional communication protocols use error detection and retransmission to deal with lost packets and transmission errors. However, these conventional ARQ(Automatic Repeat Request) methods are not suitable for the high-speed networks since the transmission delay due to retransmissions becomes significantly large. We present a method to recover consecutive cell losses using forward error correction(FEC) in ATM(Asynchronous Transfer Mode) networks to reduce the problem. Our method recovers up to 34 consecutive cell losses. Performance estimation shows an outstanding reduction in cell loss rate.

---

\*동서공과대학교 컴퓨터공학과 전임강사

\*\*연세대학교 컴퓨터공학과 부교수

論文番號 : 95169-0506

接受日字 : 1995年 5月 6日

### I. 서론

B-ISDN의 관심과 요구가 증가함에 따라 많은 연구들이 B-ISDN의 개발과 표준화에 대하여 이루어져 왔다. 특히 스위칭 노드에서 버퍼 오버플로우로 인한 셀 손실들을 회복하기 위한 방법들이 연구되어져 왔다. 이전에는 패킷 재전송 방법이 패킷의 품질을 유지하기 위해 LAN과 같은 패킷 네트워크에서 사용되었으나 이런 방법은 음성, 비디오와 같은 시간에 제약을 받는 신호를 다루는 ATM 네트워크에서는 적합하지 않다.

따라서, ATM 환경에서 셀 손실을 회복하기 위한 방법으로 FEC 방법이 등장하게 되었는데 FEC(Forward Error Correction)는 패킷 손실로 QOS가 저하되는 것을 줄일 수 있으며 종단간 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 이 방법은 패킷을 재전송할 필요없이 송신측에서 데이터 정보 이외의 부수적인 정보를 함께 보냄으로써 수신측이 이러한 정보를 가지고 손실된 셀들을 회복하는 방법이다. 본 논문은 낮은 셀 손실율을 유지하기 위하여 새로운 FEC 기법을 제안한다. FEC를 이용한 몇가지 셀 손실 회복방법들이 ATM환경에서 제안되었다. [4]에서는 패리티 패킷 코딩을 사용함으로써 인한 패킷손실 확률의 저하를 분석하고 있으며 중간 노드에서의 버퍼 관리기법(Buffer Management Techniques)을 제안하고 있다. [1]은 ATM 네트워크의 VP상에서 CLD(Cell Loss Detection)셀을 이용하여

연속적인 셀 손실을 회복할 수 있는 방법을 제안하고 있다. [3,9]는 FEC 기법을 사용함으로써 광대역 네트워크의 성능이 상당히 향상됨을 보여주고 있으며 [2]는 SAR(Segmentation And Reassembly) 계층의 4-비트 순서번호(sequence number)가 셀들의 오류순서를 탐지하는데 큰 기능을 제공한다는 것을 보여주고 있다. 본 논문에서는 메시지 크기에 근거한 FEC 기법을 사용하는 새로운 셀 손실 회복 방법을 제안하며 [1]에서 설명한 바와 같은 패리티 비트로 구성된 패리티 셀을 이용한다. 논문의 구성은 아래와 같다. II장에서 ATM의 셀 형식과 AAL(ATM Adaptation Layer) 계층에 대하여 검토한다. III장에서 기존의 셀 손실 회복을 위한 코딩 방법에 대하여 조사해보고 IV장에서는 셀 손실회복 방법을 위한 기존방법의 문제점과 새로운 연속적인 셀 손실 회복방법에 대한 절차 및 코딩 방법을 제시하고 셀 손실 회복의 몇가지 예를 보인다. V장에서는 제안된 방법의 수치적인 성능을 분석하며 VI장에서 결론을 맺는다.

### II. ATM 개요

#### 2.1. ATM 셀 형식(Cell Format)

ATM 셀은 48 옥텟(octet)의 정보저장부분(payload)과 5 옥텟의 헤더(header)로 구성된다. UNI(User Network Interface)에서의 ATM 셀의 헤더 필드는 [그림 1]에 보여진다. GFC(Generic

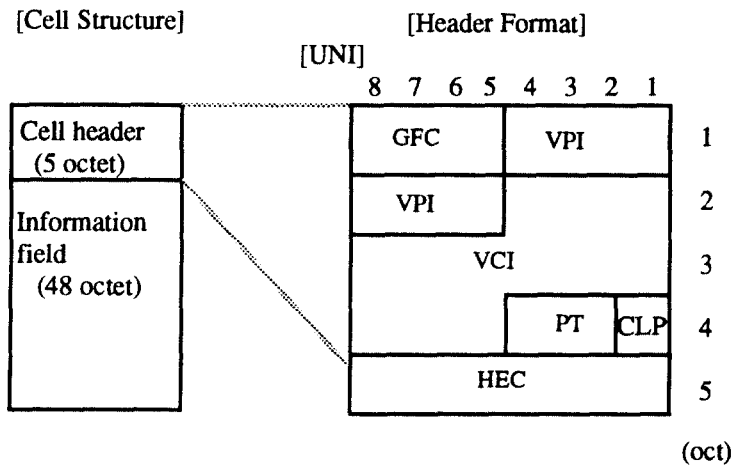


그림 1. ATM 셀 구조  
Fig. 1. ATM Cell Structure



하나의 패리티 셀로 보호되는 블록이 두개 이상의 손실된 셀이 발생할때는 손실된 셀을 회복할 수 없게된다. 따라서 하나의 블록에 두개의 손실된 셀을 회복하기 위하여 하나의 패리티 셀 이외에도 diagonal 패리티 셀을 추가 시켜서 회복하는 방법으로 이 diagonal 패리티 셀의 각 bit은 다음과 같이 구하게 된다<sup>[3]</sup>.

$$c_{K+2,i} = \begin{cases} (\sum_{j=1}^i c_{j,i+1-j}) \bmod 2, & 1 \leq i \leq K+1 \\ (\sum_{j=1}^{K+1} c_{j,i+1-j}) \bmod 2, & K+2 \leq i \leq m \\ (\sum_{j=1}^{K+m-i+1} c_{i-m+j,m+1-j}) \bmod 2, & m+1 \leq i \leq m+K \end{cases}$$

예를 들어서 셀 1,2가 손실되었다고 가정하자. 셀 1의 첫번째 bit,  $c_{1,1}$ 은 diagonal 셀의 첫번째 bit인

$c_{K+2,1}$ 과 같기 때문에 회복할 수 있게 되고,  $c_{2,1} = c_{1,1} \oplus d_{K+1,1}$ 이기 때문에 셀 2의 첫번째 bit도 회복할 수 있게 된다. 이러한 방법으로  $1 < i \leq m$ 에 대해서,  $c_{1,i} = c_{2,i} - 1 \oplus d_{K+2,i}$  그리고  $c_{2,i} = c_{1,i} \oplus d_{K+1,i}$ 이기 때문에 셀 1,2는 회복할 수 있게 된다. 그러나, 손실된 두개의 셀이 패리티 셀이라면 이들 셀들을 회복할 수 없게 된다.

### 3.3. 연속된 셀손실 회복 방법

연속된 셀손실 회복은 데이터 셀들을 matrix( $K * M$ ) 형태로 만들어서 각 셀의 열(column)과 행(row)

마다 패리티 셀을 만들어서 전송하게 되면 연속된 셀손실을 회복할 수 있게 된다.  $c_{i,j,k}$ 을 matrix에서 (i,j) 위치에 있는 셀의 k 번째 비트라면 패리티 셀들은 다음과 같이 계산된다.

$$c_{i,M+1,k} = (\sum_{j=1}^M c_{i,j,k}) \bmod 2, \quad 1 \leq k \leq m, \quad 1 \leq i \leq K$$

$$c_{K+1,j,k} = (\sum_{i=1}^K c_{i,j,k}) \bmod 2, \quad 1 \leq k \leq m, \quad 1 \leq i \leq M$$

이러한 방법은 최대 M개의 연속적인 셀들을 회복할 수 있게 된다.

## IV. 새로운 셀손실 회복방법

### 4.1 기존의 문제점 및 코딩 구조

현재까지 나온 코딩 방법중에서는 최대 16개의 연속적인 셀을 회복할 수 있었다. 이는 SN 필드가 4 비트로 구성되어 있으므로 최대 행 길이가 16으로 제한되어 있기 때문이다.

예를 들어 [그림 3 (a)]와 같이 열(column) 1,2에서 2개의 셀이 손실된 경우는 이들 셀을 회복할 수 없게 된다. 그러나 [그림 3 (b)]와 같이 코딩행렬의 행길이를 증가 시킬수 있다면 더 많은 연속적인 셀을 회복할 수 있다. 아울러 [그림 3]은 셀 코딩행렬( $M * N$ )을 보여주고 있다. 즉 행렬에 데이터 셀과 패리티 셀들을 배

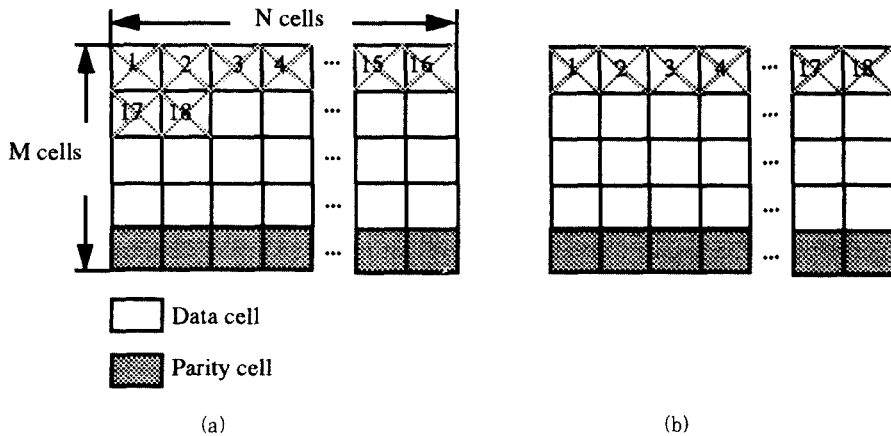


그림 3. (a) 코딩 행렬(행길이 : 16) (b) 코딩 행렬(행길이 : 18)  
Fig. 3. (a) Coding Matrix(row length : 16) (b) Coding Matrix(row length : 18)

열하여 연속적인 셀손실을 회복하게 된다. 패리티 셀의  $i$ 번째 비트는 데이터 셀들의  $i$ 번째 비트들의 exclusive-OR이다. 즉, 코딩 행렬의 배열에서  $(i, j)$ 에 위치하는 셀의  $k$ 번째 비트를  $c_{i,j,k}$ 라 하고  $m$ 비트 셀크기를 고려할때 패리티 셀은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_{M+1,j,k} = \left( \sum_{i=1}^M c_{i,j,k} \right) \text{ mod } 2, \quad 1 \leq k \leq m, \quad 1 \leq j \leq N.$$

패리티 셀들은 데이터 셀과 구분이 될 수 있도록 OAM(Operation and Maintenance) 속성을 갖고 있으며 우선순위가 데이터 셀보다 높다. 또한 인코딩 동작의 additive, multiplicative 특성은 데이터 셀이 전송하는 도중에도 패리티 셀을 만들 수 있으므로 인코딩 지연시간은 거의 없게 된다.

4.2 셀손실 회복 절차

1) FEC 인코더

송신측 FEC 인코더는 먼저 메시지내의 셀 수를 먼저 계산한다. 여기서, 메시지는 SAR-PDU를 의미한다. 셀의 수가 18셀보다 작거나 같은 경우에 손실되는 셀들이 SN(Sequence Number)와 ST(Segment Type) 필드에 의해 식별될 수 있으므로 인코더는 셀 내부의 어떤값도 변경하지 않고 데이터 셀과 패리티 셀을 합친 블록 메시지를 네트워크로 전송한다. 만일 메시지 크기가 18셀보다 크면 그 인코더는 18번째 셀부터 33번째 셀까지 ST 필드에 [그림 4]와 같이 정의된 ST의 SSM 비트를 삽입한다. 18번째 셀부터 SSM 비트로 변경하는 이유는 메시지를 구성하고 있는 34개의 각 셀들을 SN과 ST를 이용하여 유일하게 식별할 수 있도록 하기 위한 것이며 이로서 수신측 FEC 디코더는 SN과 ST값을

Segment Type	Encoding	
	MSB	LSB
BOM	1	0
COM	0	0
EOM	0	1
SSM	1	1

그림 4. ST 필드 코딩  
Fig. 4. ST Field Coding

조치하여 손실된 셀을 식별할 수 있게 된다. 수정된 ST 필드의 SSM 값은 수신측 디코더에서 원상태로 갱신된다.

[그림 5]은 FEC 인코더가 수행하는 동작에 대하여 설명하고 있다.

2) FEC 디코더

수신측 FEC 디코더는 도착하는 메시지의 크기를 계산한다. 만일 메시지 크기가 18보다 작거나 같은 경우 셀손실이 발생하면 단순히 패리티 셀을 이용하여 셀손실을 회복한다. 메시지 크기가 18보다 크고 35셀보다 작은 경우에는 두가지 경우를 고려한다. 먼저 각 셀에 대하여 ST=SSM 이고 SN=0인 경우를 고려한다. 셀의 MID값이 인접셀과 다른 경우가 발생한 경우, 즉 유일한 경우는 해당셀이 Single Segment Message(하나의 셀로 구성된 메시지)를 의미하므로 디코더는 그 셀에 대해 어떤 값도 변경하지 않는다. 만일 MID값이 인접셀과 같은 경우 ST를 COM비트로 변경하는데 이는 송신측 FEC 인코더에서 바꾸어 주었던 값을 원상태로 복귀시키는 것이다. 두번째로, ST=SSM이고 SN≠0인 셀에 대하여 고려하는데 이 경우는 원래 SSM이 아니고

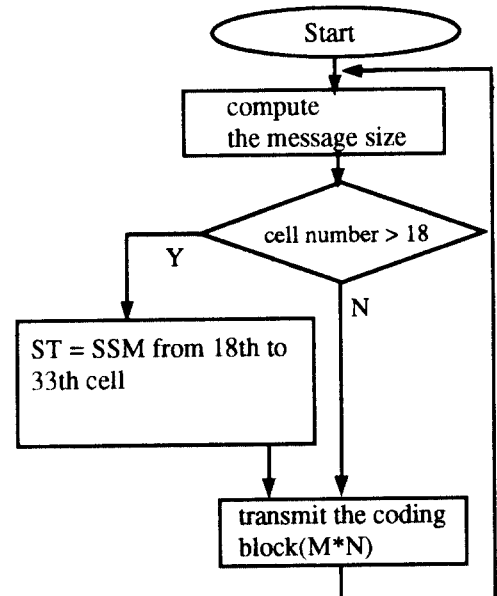


그림 5. FEC 인코더의 알고리즘  
Fig. 5. Algorithm of FEC Encoder

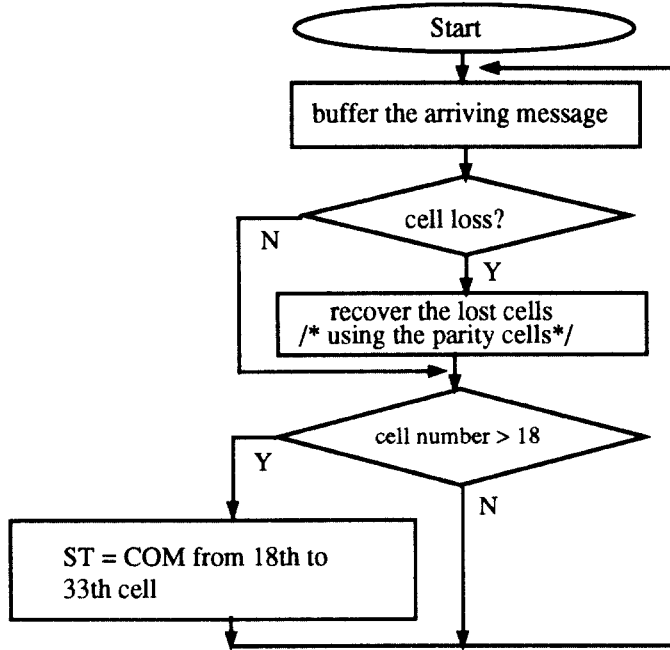


그림 6. FEC 디코더의 알고리즘  
Fig. 6. Algorithm of FEC decoder

FEC 인코더에서 변경하였으므로 해당셀의 ST값을 COM비트로 변경한다. 위에서 고려된 두가지 경우에 대하여 셀내부의 값을 변경하기 전에 디코더는 셀손실 발생한 경우 패리티 셀을 이용하여 손실된 셀을 회복한다. [그림 6]은 FEC 디코더가 수행하는 동작에 대하여 설명하고 있다.

4.3 셀손실 회복의 예

1) 메시지의 크기 ≤ 18

먼저 다음과 같이 FEC 인코더가 구성한 메시지의 크기가 16개의 셀로 구성된 경우에는 SN 필드만으로 메시지의 완전한 회복을 할 수 있다. 이 경우에는 ST 필드가 없어도 셀 손실을 식별할 수 있다.

(B: BOM, C:COM, E:EOM, S:SSM, PC:Parity Cell)

```

SN : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
ST : B C C C C C C C C C C C C C E
PC : + + + + + + + + + + + + + +
  
```

그러나 다음과 같이 메시지의 크기가 17 또는 18개의 셀로 구성된 경우에는 SN 필드만으로는 이 메시지의 완전한 회복을 할 수 없는데 SN과 ST를 이용하게 되면 이들 셀들을 모두 식별할 수 있게 된다.

```

SN : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 0 1
ST : B C C C C C C C C C C C C C C C E
PC : + + + + + + + + + + + + + + + +
  
```

즉, SN=0인 두개의 셀과, SN=1인 두개의 셀은 모두 ST 값으로 유일하게 식별이 가능하고 그외의 셀들은 모두 SN 값만으로 모든 셀들을 유일하게 식별할 수 있으므로 패리티 셀을 이용하여 손실된 셀들을 회복할 수 있다.

2) 메시지의 크기 > 18

메시지의 크기가 19셀로 구성된 경우를 고려해 보자.

메시지가 아래와 같이 구성된 경우 SN,ST 값으로 모든 셀들을 유일하게 식별할 수 없는데 이는 첫번째 SN,ST 값(1.C)과 두번째 SN,ST 값(1.C)가 동일하기 때문에 가령 SN 값이 1인 셀(\*)이 손실된 경우에는 이를 구분할 수 없게 된다.

```
SN : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 0 1 2
ST : B C C C C C C C C C C C C C C C C C S S
PC : + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
      *
```

따라서 동일한 SN,ST값은 셀을 구분하기 위하여 아래와 같이 ST의 SSM 비트를 사용한다.

```
SN : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 0 1 2
ST : B C C C C C C C C C C C C C C C C C S E
PC : + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
```

여기서 유의할 점은 셀손실 회복을 위해 SSM 비트를 사용하는 셀이 단일 세그먼트 메시지(single segment message)를 위한 것인지 아니면 셀손실을 회복하기 위한 방법으로 임시적으로 SSM bit를 사용한 경우인지를 구별할 수 있는 방법이 필요한데 이는 앞에서 언급한 것처럼 셀이 단일 세그먼트 메시지만인 경우는 MID 필드값이 유일하며 셀손실을 위해 SSM 비트를 사용하는 셀은 인접셀의 MID 값과 동일하다.

이와 같은 방법으로 손실된 셀들을 회복할 수 있는 셀의 최대값은 34개 이다. 그러나, 아래와 같이 메시지의 크기가 35셀인 경우를 고려해 보자.

```
SN : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 0 1 2
ST : B C C C C C C C C C C C C C C C C C S S
PC : + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
      *

SN : 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 0 1 2
ST : S S S S S S S S S S S S S S S S S S E
PC : + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
      *
```

이 경우 SN = 1인 셀이 두번째와 세번째 나타나는 셀(\*)은 서로 식별할 수 없다.

V. 성능 분석

성능 분석<sup>[1],[8]</sup>에서 보여진 셀손실 프로세스 방법을 토대로 하였으며 이 셀손실 프로세스 모델은 [그림 7]에서처럼 데이터 전송채널에서 생기는 오류 시퀀스를 특징지우기 위해 Gilbert가 처음 사용한 two-state Markov 모델이며 이 모델의 상태 전이는 아래와 같이 전이 확률 행렬로 표현할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$P = \begin{bmatrix} 1-\beta & 1-\beta \\ \alpha & \alpha \end{bmatrix}$$

G 상태에서 셀손실이 확률  $P_G = 0$ 으로 발생되며 반면에 B 상태에서 셀손실은 확률  $P_B = 1$ 로 발생된다. 상태 G,B에서의 안전한 상태 확률(steady state prob.)은 각각  $\pi_G = \frac{1-\alpha}{1-\alpha+1-\beta}$ ,  $\pi_B = \frac{1-\beta}{1-\alpha+1-\beta}$ 이며 이 모델의 평균 셀손실율은

$$P_{loss} = P_G \pi_G + P_B \pi_B = \frac{P_G(1-\alpha) + P_B(1-\beta)}{1-\alpha+1-\beta}$$

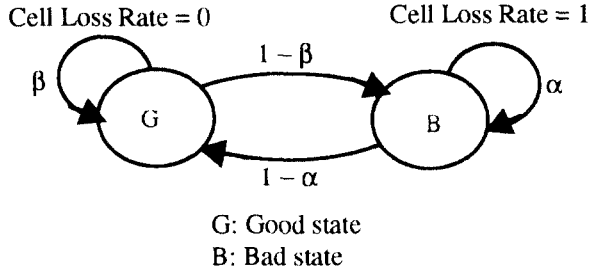


그림 7. 셀손실 프로세스 모델  
Fig 7. Cell Discard Process Model

이다.

위식의 간단한 표현으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{loss} = \frac{1-\beta}{1-\alpha+1-\beta}$$

편의를 위해 상태전이 행렬의  $N$ -th 곱을 아래와 같이 표현하자.

$$\begin{bmatrix} \beta & 1-\beta \\ 1-\alpha & \alpha \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} \beta_N & \beta_N \\ \alpha_N & \alpha_N \end{bmatrix}$$

$\alpha, \beta$ 는 상태전이 확률이며  $N$ 은 셀 행렬의 행길이이다. 이때 셀 행렬의 한 열(column)에서 하나의 셀이 손실되는 확률,  $L_1$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$L_1 = P_{loss} \alpha_N \beta_N^{M-2} + (1-P_{loss}) \beta_N \alpha_N \beta_N^{M-3} *$$

$$(M-2) + (1-P_{loss}) \beta_N \beta_N^{M-2}$$

$M$ 은 셀 행렬에서의 행의 수를 의미한다. 이는 한 열에서 회복되는 셀의 평균수도 또한  $L_1$ 임을 의미한다. 따라서 제안된 셀손실 회복방법을 사용해서 개선된 셀손실율,  $P$ 는

$$P = P_{loss} - \frac{L_1}{M}$$

이다. [그림 8]은 소 행렬( $M=5, N=18$ )일때의 성능을 보여주고 있으며 [그림 9]는 큰 행렬( $M=20, N=34$ )일때의 개선된 성능을 보여주고 있다. 즉, 셀손실 프로세스 모델의  $\alpha$  파라미터를 0.7로 하여도 소 행렬인 경우의 개선된 셀손실율은  $10^{-11}$ 보다 작고 큰행렬인 경우의 개선된 셀손실율은  $10^{-17}$ 정도로 평균 셀손실율 보다 상당히 감소된 결과를 보여주고 있다.

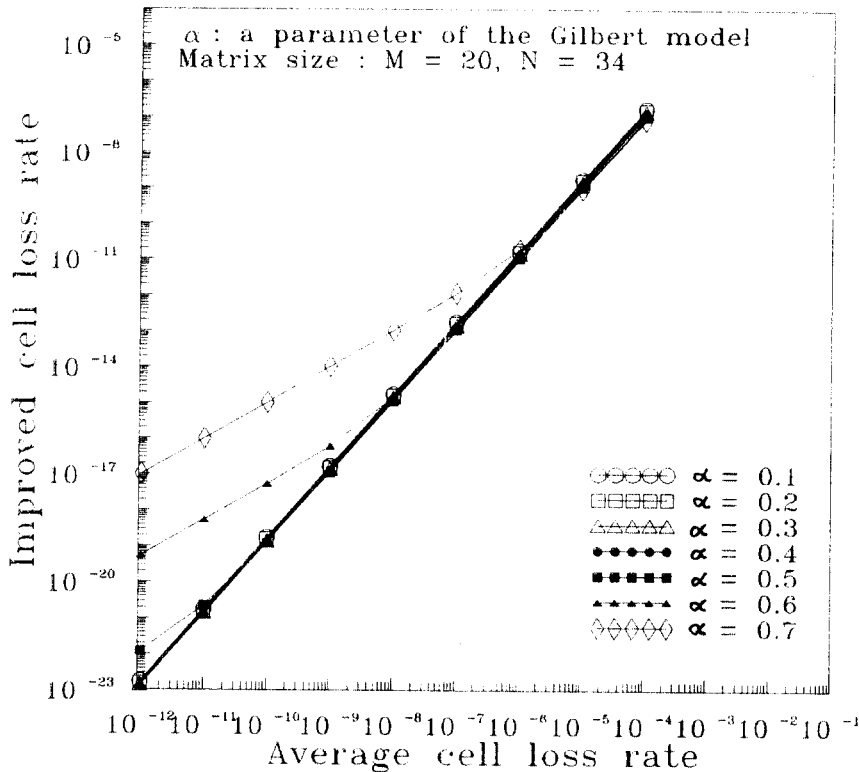


그림 8. 개선된 셀손실율( $M=5, N=18$ )  
 Fig. 8. Improved Cell Loss Rate( $M=5, N=18$ )



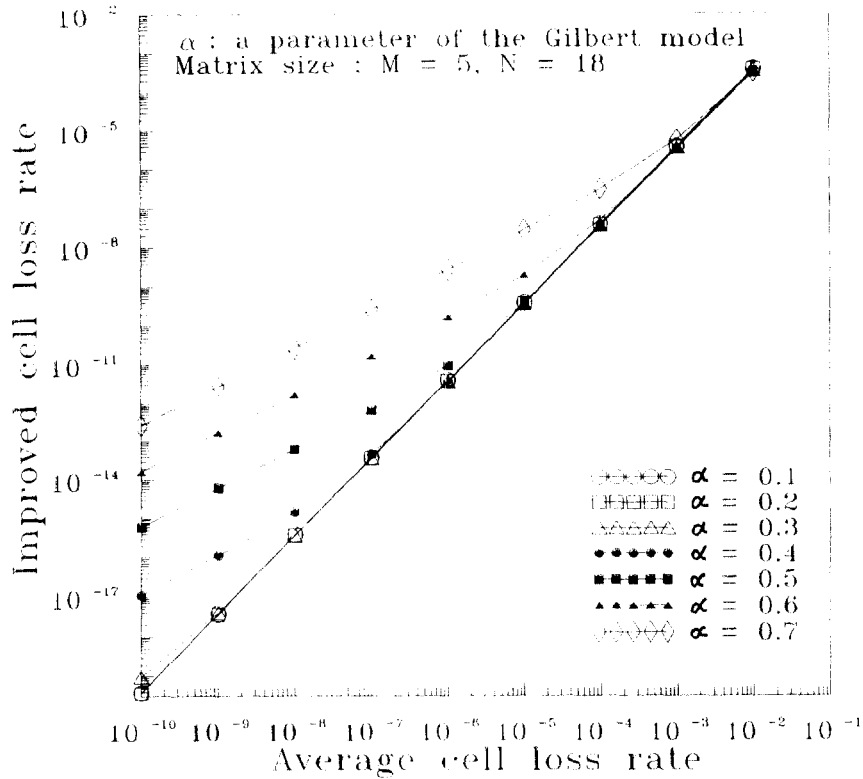


그림 9. 개선된 셀손실율(M=20, N=34)  
Fig. 9 Improved Cell Loss Rate(M=20, N=34)

Ⅶ. 결 론

본 연구는 ATM 네트워크에서의 본질적인 문제인 연속적인 셀손실을 회복하기 위한 기존의 방법을 조사하였고 새로운 연속적인 셀손실 회복방법을 제시하였다. 기존의 방법은 최대 16개의 연속적인 셀손실까지 회복하였으나 셀내부의 SN,ST 필드값을 조회함으로써 최대 34개의 연속적인 셀손실을 회복할 수 있음을 보였으며 몇가지 셀손실 회복이 예를 보였다. 이 방법은 FEC 인 코더가 메시지를 구성하고 있는 셀의 수를 계산하여 셀의 수가 34개 이하인 경우는 완벽하게 손실된 셀들을 회복할 수 있으며 34개보다 큰경우는 기존의 SN값을 이용하여 16개의 연속적인 셀을 회복할 수 있다. FEC는 네트워크 상에서 버퍼 오버플로우가 발생할때 유용하며 ATM과 같은 고속 통신망에서의 패킷 손실을 회복

하기 위한 좋은 해결책을 제시해 준다.

참고문헌

1. Hiroshi Ohta, Tokuhiko Kitami, "A cell Loss Recovery Method Using FEC in ATM Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No.9, Dec. 1991, pp.1471-1483.
2. S. Dravida, R.Damodaram, "Error Detection and Correction Options for Data Services in B-ISDN," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, No.9, Dec. 1991, pp.1484-1495.
3. Ender Ayanoglu, Richard D. Gitlin, Nihat Cem

- Oguz, "Performance Improvement in Broadband Networks Using Forward Error Correction For Lost Packet Recovery," Journal of High Speed Networks 2, 1993, pp.287-303.
4. N. Shacham, "Packet Recovery in High-Speed Networks Using Coding and Buffer Management," Proc. INFOCOM '90, June, 1990, pp.124-131.
  5. James R. Yee, E. J. Weldon, Jr. . "Evaluation of the Performance of Error-Correcting Codes on a Gilbert Channel," Proc. IEEE ICC '94, May, 1994, pp.655-659.
  6. ITU-T, "Recommendation I.361, B-ISDN ATM Layer Specification" 1991.
  7. ITU-T, "Recommendation I.363, B-ISDN ATM Adaptation Layer(AAL) Specification" 1993.
  8. Hiroshi Ohta, Toduhiro Kitami, "Simulation Study of the Cell Discard Process and the Effect of Cell Loss Compensation in ATM Networks," IEICE Transaction on Communication, Vol. E, No. 10, Oc. 1990, pp.1704-1711.
  9. N. C. Oguz and E. Ayanoglu, "A Simulation Study of Two-Level Forward Error Correction for Lost Packet Recovery in B-ISDN/ATM," Proc. IEEE ICC '93, May, 1993, pp.1843-1846.



林 孝 澤(Hyo Tack Lim) 정희원

1962년 11월 22일생  
 1988년 2월 : 홍익대학교 컴퓨터공  
 학과 졸업(학사)  
 1992년 2월 : 포항공과 대학원 전자  
 계산학과 졸업(석사)

1994년 8월~현재 : 연세대학교 컴퓨터과학과 박사과정  
 1988년 2월~1990년 2월 : 한국전자통신 연구소 연구원  
 1992년 2월~1994년 2월 : 포항공과 대학원 학생 연구조교  
 1994년 2월~현재 : 동서공과 대학교 컴퓨터공학과 전임강사  
 ※주관심 분야 : ATM Network, Protocol Engineering,  
 Network Management



宋 周 鏞(Joo Seok Song) 정희원

1953년 3월 2일생  
 1976년 2월 : 서울대학교 전기공학  
 과 졸업(학사)  
 1979년 2월 : 한국과학기술원 전기  
 및 전자공학과 졸업(석  
 사)

1988년 8월 : Univ. of California at Berkeley 전산과학  
 과 졸업(박사)  
 1979년 2월~1982년 2월 : 한국전자통신 연구소 연구원  
 1988년 9월~1989년 2월 : Naval Postgraduate School  
 Information System  
 Department 조교수  
 1989년~현재 : 연세대학교 컴퓨터과학과 부교수  
 ※주관심 분야 : ATM Network, Protocol Engineering,  
 Network Security 등