

멀티미디어 응용을 위한 수송 계층에서의 유연한 오류 제어 모델

正會員 朴 東 星*, 李 相 憲*, 高 峯 洪*, 李 載 用**, 李 相 培***

A Flexible Error Control Model in Transport Layer for Multimedia Application

Dong-Seong Park*, Sang-Heon Lee*, Bong-Hong Ko*,
Jai-Yong Lee**, Sang-Bae Lee*** *Regular Members*

※본 논문은 국방 과학 연구소의 지원에 의하여 수행된 연구 결과임.

요 약

미래의 멀티미디어 응용 환경은 각 매체와 응용의 요구 사항들을 효율적으로 충족시킬 수 있는 유연한 오류 제어 모델을 필요로 하고 있으나, 지금까지의 오류 제어는 단일 매체를 처리하기 위한 제한된 유연성만이 제공되어 왔다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 매체의 신뢰도 기준인 오류 허용률(ETL: Error Tolerance Level)과 응용의 실 시간성 기준인 지연(Delay)을 고려하여 수송 계층에서 매체별로 유연하게 오류 제어 방법을 적용하는 모델을 제안한다. 이 모델에서는 매체별로 오류 제어 방법을 선정하기 위하여 오류 허용률과 동시성과 같은 매체의 속성, 응용의 속성인 지연, 그리고 망에서의 데이터 손실율, 망의 전송 형태, 응용의 연결 모드와 같은 환경 파라미터가 영향 인자로서 고려되었다.

ABSTRACT

Emerging service classes need an error control model which efficiently satisfies the requirements for each media and application. However limited flexibility in the error control has been provided. Therefore we propose a new error control model which applies error control scheme per media flexibly with respect to ETL(Error Tolerance

*연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정

**연세대학교 전자공학과 부교수

***연세대학교 전자공학과 교수

論文番號:95384-1108

接受日字:1995年 11月 8日

Level) and delay. In order to select the error control scheme in this model, the attributes of media(i.e., ETL, isochronism), the attributes of application(i.e., delay) and environment parameters(i.e., packet loss ration, network types, connection modes of the application) are considered as effect factors.

I. 서 론

많은 연구기관과 대학들은 고속 망에 적합한 다양한 멀티미디어 응용을 개발하였다. 그러나 이와 같은 멀티미디어 응용을 지원하기 위해서는 기본적으로 높은 처리율과 적은 지연과 같은 성능 요구 사항을 만족하여야 하며, 기능 본위(function based)의 구조를 통한 유연한 프로토콜이 요구된다. 그러나 무엇보다도 다양한 오류 감지와 회복 메카니즘이 제공되어야 한다.^[1]

전세계적으로 이용되는 TCP/IP^[2]는 전송된 모든 데이터에 대하여 오류 제어를 적용함으로써, 불필요한 처리 시간이 소모되어 실 시간성 데이터의 처리가 어렵다. 이를 보완하기 위한 수송 프로토콜로서, protocol engine사에서 개발한 XTP^[3]는 오류를 허용하는 응용에 대하여 오류 제어를 적용하지 않음으로써 실 시간성을 지원해 줄 수 있으며, IBM에서 개발한 HciTP^[4]는 사용자에 의해 선택될 수 있는 4가지의 오류 감지/수정 선택 사항(No checksum, Discard, Receive, Correct)을 제공하고 있다. 또한 TP++^[5]은 실 시간성 데이터 처리를 위한 FEC(Forward Error Correction)와 신뢰성 데이터를 위한 ARQ(Automatic Repeat Request) 방법을 제공한다. 또한 ISO의 TP 4 (Transport Protocol class 4)의 변형인 TP 5는 실시간 응용에 대하여 오류 회복을 적용하지 않는다. 즉, 전송 오류는 감지만 되고 오류 발생 횟수만 기록한 후 오류율이 성능을 악화 시킬 때 응용 계층의 판단에 의해 연결을 해제 시킬 수 있다.

그리고 병목 구간인 수송 계층에서의 고속 처리를 위하여 제안된 모델로는 F-CSS(Function-based Communication Sub-System)^[6], HOPS(Horizontally Oriented Protocol Structure)^[7] 등이 있는데 이들 모델들은 일괄처리로 수행되는 수송 프로토콜을 각각의 단위 역할에 따라 기능(예: 오류 제어 기능, 흐름 제어 기능)으로 분리함으로써, 단위 기능별로 활성화(또는 비 활성화) 시키거나 독립적인 기능들에 대하여 병렬

처리를 수행할 수 있게 하여 처리 효율상의 이점을 제공하는 방안을 제안하고 있다.

1.1 문제점 및 해결 방안

지금까지 개발 및 표준화된 수송 프로토콜 그리고 모델에서의 오류 제어 방법을 다양한 매체의 속성을 보유한 멀티미디어 응용에 적용할 때, 발생하는 문제점 및 이를 해결하기 위한 방안은 다음과 같다.

1.1.1 문제점

(1) 2분법적 논리의 문제

매체에 적용되는 기존의 신뢰성 기준은 오류 제어 수행 또는 미수행을 요구하는 것으로서, 각 매체의 다양한 오류 허용률을 지원할 수 없다.

(2) 오류 제어 수행시 확인화의 문제

기존의 수송 프로토콜/모델은 응용의 속성에 따라 프로토콜 기능 집합을 구성하는 것으로서, 멀티미디어 응용이 단일의 수송 프로토콜에 의해 서비스 받을 시, 응용에 포함된 모든 매체에 대하여 동일한 오류 제어 메카니즘을 적용하게 한다.

1.1.2 해결 방안

멀티미디어 응용 환경에서, 기존의 오류 제어 방법을 적용함에 따라 발생하는 문제(대역폭 낭비, 지연의 증가, 부하의 증가)^[8]를 해결하기 위하여 각 매체 별로 오류 제어 메카니즘을 독립적으로 적용한다.

1.2 디자인 개념

기존 오류 제어의 기본적 개념하에서는 응용이 실시간 처리를 요구하거나 매체가 신뢰성을 요구하지 않는다면, 오류 제어와 연관된 기능들은 사용되지 않으며, 이와 반대의 경우 오류 제어와 연관된 기능들은 사용되어야 한다. 그러나 이들 두 가지 기준(응용의 실 시간성과 매체의 신뢰성)은 상호 배타적인 관계에 있다. 이로인하여 신뢰성 매체인 텍스트를 포함하는 실 시간성 응용이 사용될 경우 오류 제어의 적

용/비적용 결정은 혼란 상태에 빠지게 된다. 그러므로 이와 같은 이분법적 적용에 따라 발생하는 문제를 해결하기 위하여, 그림 1과 같이 오류 허용률과 지연과의 관계에 따라서 6가지의 조합으로 확대하였다.

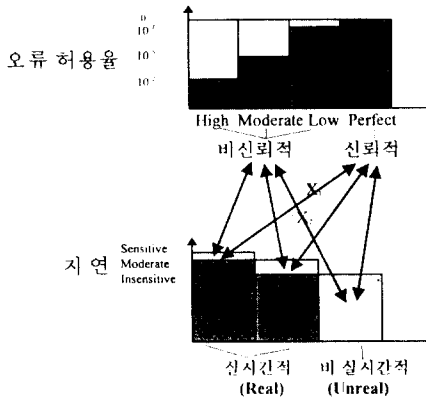


그림 1. 오류 허용률과 지연의 상호 관계.
Fig. 1 Mutual relationship between ETL and delay.

오류 허용률(=오류를 포함한 TPDU의 허용 수/전체 TPDU의 수)의 값이 0, 즉 'Perfect'일 경우는 약간의 오류도 허용하지 않는 신뢰성 매체이며, 'High', 'Moderate', 그리고 'Low'일 경우는 데이터에 어느 정도의 오류를 허용하는 비 신뢰성 매체이다. 비 신뢰성 매체에 대해서는 사용자/응용에 의해 보다 정교한

값으로 요구될 수 있다. 또한 지연에 있어서, 응용이 허용하는 지연의 값이 짧거나(sensitive) 'Moderate' 정도일 경우, 실시간 매체로 고려되며, 허용된 지연의 값이 길(Insensitive) 경우는 비 실시간 매체로 고려된다.

그림 1에서 X_1 은 망에서, 혼잡에 의한 데이터 손실이 극히 적을 때에 가능한 응용이며, X_2 는 현실적으로 구현 필요성이 거의 없는 응용이다. 그러므로 X_2 를 제외한 5가지의 조합만이 본 논문에서 고려된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장은 유연한 오류 제어 모델의 구조를 구성하기 위한 기능적 구조, 영향 인자 그리고 모델의 구조를 설명하였으며, 3장은 유연한 오류 제어 방법의 선정으로써, 영향 인자를 고려하여 오류 제어 방법을 선정하는 오류 제어 구성자의 동작을 보였다. 4장에서는 응용으로 화상회의 시스템(Desktop Conference System)을 지원할 때, 본 모델에서 각 매체별로 오류 허용률을 보장하기 위하여 어떤 오류 제어 방법이 선정되는가를 검증하였고, 기존의 프로토콜과의 성능을 비교하였다. 5장은 결론으로써, 이와 같은 방법을 통한 효과 등에 대하여 언급하였다.

II. 유연한 오류 제어 모델의 구조

2.1 기능 본위의 구조

수송 계층은 논리적으로 제어 평면과 사용자 평면으로 나뉘어 진다. 제어 평면은 연결 제어와 연관된

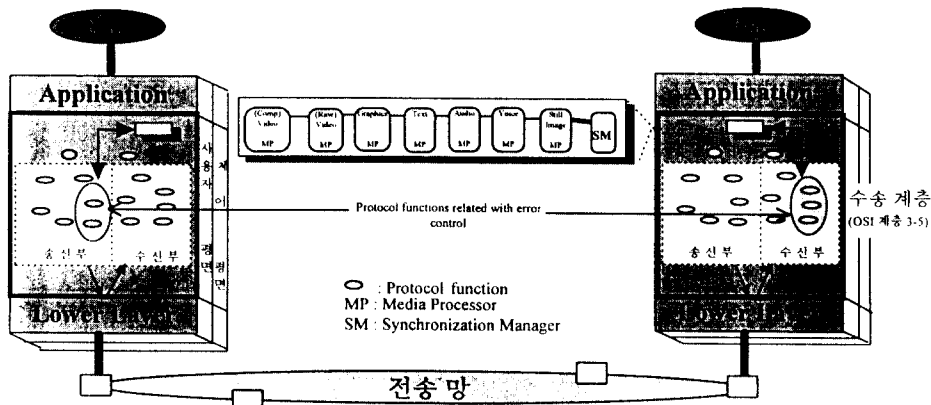


그림 2. 수송 계층의 논리적 구조.
Fig. 2 The logical structure of transport layer

작업(연결 설정 및 해제)을 수행하며, 사용자 평면에서는 연결이 설정된 후 데이터의 송신 및 수신과 연관된 작업이 수행된다. 또한 수송 계층에서의 각 평면은 다시 송신부와 수신부로 나뉘어 진다. 위에서 언급한 개념은 그림 2와 같이 묘사된다.

수송 계층에서 수행되는 일련의 작업을 '기능'(Protocol Function)이라는 단위 영역으로 분리하면 사용자 평면의 송신부에서 오류 제어와 연관된 기능으로는 오류 감지/수정 코드 발생 기능과 재전송기능이 있으며, 수신부에는 오류 회복, 오류 통보 그리고 순서 제어 기능이 있다. 또한 제어 평면에서 오류 제어와 연관된 기능으로는 QoS 관리 기능, 연결 관리 기능 등이 있으며 이들은 송신부와 수신부 양쪽에 존재한다. 그러므로 제어 평면의 연결 관리 기능에서 연결 설정 작업을 수행할 때 사용자 평면의 송신부와 수신부에서 매체별로 적용할 오류 제어 방법이 결정된다.

2.2 영향 인자

유연한 오류 제어 모델을 구현하기 위해서 표 1과 같은 세 가지 범주의 영향 인자들이 고려되었다. 첫째, 매체의 형태에 따라 결정되는 오류 허용률과 동시성의 유무, 둘째, 응용의 형태에 따라 결정되는 지연, 셋째, 환경 파라미터가 있다. 이중 환경 파라미터는 다시 망의 혼잡에 의해 발생하는 데이터 손실율과 망의 데이터 전달 형태, 그리고 응용에 의해 결정되는 연결 모드로 나뉘어 진다.

표 1. 영향 인자.

Table 1. Effect factors.

구분	파라미터	값	
매체의 속성	오류 허용률	Real value	
	동시성	(Yes, No)	
응용의 속성	지연	(실시간, 비 실시간)	
환경 파라미터	망	데이터 손실율	Real value
		망의 전송 형태	(Virtual Ckt, Datagram)
	응용	연결모드	(1-대-1, 1-대-N)

2.2.1 매체의 속성

현재까지 개발된 멀티미디어 응용에 포함되는 매체의 수는 최대 7개정도(또는 확장될 수 있음)이며, 수송 프로토콜 디자인을 위하여 각 매체의 속성을 표

2와 같이 표현하였다.

표 2에서 정지 화상과 텍스트는 오류 허용률의 값이 고정되어 적용되는 것이 아니라 제한된 범위 내에서 응용의 종류 또는 사용자의 요구에 따라 가변적으로 결정되며, 매체의 속성 중 동시성은 고정되어 있음을 볼 수 있다. 그래픽 데이터를 전송하는 방식으로 still image화하여 전송하는 방식과 제어 신호만을 전송하는 두 가지 방식이 가능한데 위의 표에서는 후자를 고려하였다.

표 2. 매체의 속성.

Table 2. The attributes of on the media.

매체의 종류	속 성	
	오류 허용률의 범위	동시성 유무
정지 화상(still image)	Perfect, Low, Moderate	No
음 성(voice)	High	Yes
음 향(music)	Moderate	Yes
텍스트	Perfect, Low, High	No
그래피스	Perfect	No
비압축 화상 (uncompressed moving picture)	High	Yes
압축 화상 (compressed moving picture)	Low	Yes

(오류 허용률) (Perfect: ETL=0, Low: ETL ≤ 10⁻⁷, Moderate: ETL ≤ 10⁻⁵, High: ETL ≤ 10⁻²)

2.2.2 응용의 속성

응용이 가지고 있는 속성은 지연 뿐이다. 그러나 멀티미디어 응용일 경우는 각 매체가 모두 동일한 지연 특성을 가지는 것이 아니라 각 매체별로 다른 지연 특성을 가지게되며, 매체의 속성인 오류 허용률 역시 정지화상과 텍스트 매체에 대하여서는 응용의 종류에 따라 가변적으로 적용되므로 지연과 오류 허용률은 결국 응용의 종류에 따라 영향을 받는다. 다음 표 3은 멀티미디어 응용을 중심으로 각 매체별로 요구되는 QoS 파라미터인 오류 허용률과 지연의 값을 나타내고 있다.

표 3에서 화상 데이터의 오류 허용률을 'High'로 하였는데 이는 비 압축 화상 데이터에 대한 것으로 압축 화상 데이터의 경우 오류 허용률은 'Low'로 된다.

2.3 유연성을 제공하기 위한 오류 제어 모델의 구조

2.3.1 오류 제어와 연관된 메카니즘들간의 관계

표 3. 응용에 의한 분류.

Table 3. The classification on the multimedia application.

응용의 종류	매체의 종류	오류 허용률	지연
Tele-education	음성	High	Sensitive
	텍스트	Perfect	Moderate
	정지 화상	Moderate	Moderate
	그래픽스	Low	Sensitive
	화상	High	Sensitive
Tele-medicine	음성	High	Sensitive
	텍스트	Low	Moderate
	정지 화상	Perfect	Moderate
	화상	High	Sensitive
Video telephony	음성	High	Sensitive
	화상	High	Sensitive
VOD	음성	High	Sensitive
	화상	High	Sensitive
Conference (Pure, Co-Program, Co-CAD)	음성	High	Sensitive
	텍스트	Perfect(Co-Pgm) Low(Pure, Co-CAD)	Insensitive
	음향	Moderate	Sensitive
	정지 화상	High	Insensitive
	그래픽스	Perfect	Moderate
	화상	High	Sensitive

각 프로토콜 기능에서 제공할 수 있는 알고리즘(예 :재전송 기능에서의 Go-Back-N과 Selective Retransmission)을 메카니즘이라 할 때, 각 기능에서 제공하는 메카니즘들 사이에는 상호 의존적인 관계가 존재한다. 즉, 기능 'A'의 메카니즘 집합 "i"중 하나의 메카니즘이 선정됐을 경우, 기능 'B'의 메카니즘 집합 "j"중 하나만이 선정될 수 있을 때, 이 두 기능 사이의 상호 의존적인 관계를 ("i" of 'A' R "j" of 'B')로 표현하면, 각 기능의 메카니즘 사이의 의존 관계는 다음과 같다.

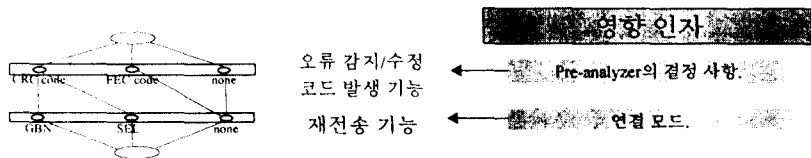


그림 3. 송신부에서의 통합된 프로토콜 기능 및 영향 인자.
Fig. 3 Integrated protocol function and effect factors in the sending block.

- {"GBN"(Go-Back-N), "SR"(Selective Recovery)} of error recovery protocol Function(PF) R {"resequence"} of sequence control PF
- {"FEC", "none"} of error recovery PF R {"duplication/late discard", "none"} of sequence control PF
- {"GBN"} of error recovery PF R {"CUM/AK"} (Cumulative Acknowledgement), "NAK"(Negative Acknowledgement)} of acknowledgement PF
- {"SR"} of error recovery PF R {"NAK", "SA"} (Selective Acknowledgement)} of acknowledgement PF
- {"FEC", "none"} of error recovery PF R {"none"} of acknowledgement PF
- {"CRC code"} of error detection/correction code generation PF R {"GBN", "SEL"} (Selective Retransmission)} of retransmission PF
- {"FEC code", "none"} of error detection/correction code generation PF R {"none"} of retransmission PF

위의 관계에서 언급된 "none" 메카니즘은 기능에서 아무런 동작도 수행되지 않고 통과됨을 나타낸다.

2.3.2 통합된 오류 제어 모델의 구조

앞 절에서 언급한 오류 제어와 연관된 메카니즘들 간의 의존 관계를 고려함으로써, 송신부와 수신부에서의 통합된 프로토콜 기능은 각각 그림 3과 4의 좌측과 같이 구성된다.

송신부에서 두 프로토콜 기능에서의 메카니즘은 pre-analyzer에 의해 결정된 오류 회복 방법과 연결 모드를 고려함으로써 선정되며, 선정 순서는 오류 감지/수정 코드 발생 기능에서 메카니즘을 선정한 후, 재전송 기능에서 메카니즘을 선정한다.

수신부에서 통합된 오류 제어 메카니즘은 지연, 연

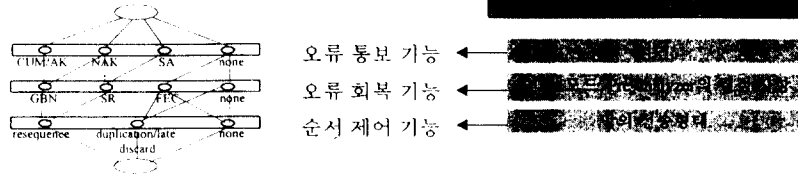


그림 4. 수신부에서의 통합된 프로토콜 기능 및 영향 인자.
Fig. 4 Integrated protocol function and effect factors in the receiving block.

결 모드, pre-analyzer의 결정 사항, 그리고 망의 전송 형태를 고려하여 구성되며, 구성 순서는 오류 회복 기능에서 메카니즘을 선정한 후 순서 제어 기능, 오류 통보 기능에서 메카니즘을 선정하여 구성된다.

III. 유연한 오류 제어 방법의 선정

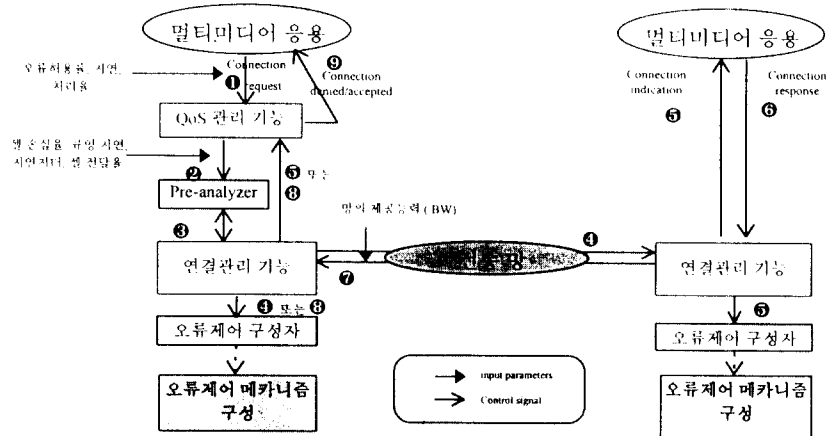
본 장에서는 ATM망을 하부 망으로 고려할 때의 호접속 제어(CAC: Call Admission Control)를 중심으로 수송 계층에서의 QoS 관리 기능과 연결 관리 기능을

에서의 동작과 pre-analyzer 및 오류 제어 구성자에 의한 매체별 오류 제어 방법의 선정에 대하여 기술하였다.

3.1 오류 제어 방법을 선정하기 위한 제어 흐름

각 매체별로 적용할 오류 제어 방법은 종단간의 연결설정시 선정되는데, 이를 위한 제어 흐름은 다음 그림 5와 같다.

QoS 관리 기능은 응용으로부터 연결 요구를 수신 하면 사용자의 관점에서 설정된 QoS 파라미터(오류



a) 송신자의 송신부

b) 수신자의 수신부

그림 5. 제어 평면에서의 오류 제어 메카니즘을 구성하기 위한 제어 흐름.

Fig. 5 Flow for configuring the error control mechanism in control plane.

a) Sending block of sender

b) Receiving block of receiver

허용률, 지연, 처리율)를 망의 QoS 파라미터(ATM망의 경우: 셀 손실율(Cell Loss Ratio), 스위치에서 큐잉 지연, 스위치에서의 지연 지터, 셀 전달율(Bit rate))로 변환한 후, 변환된 망의 QoS 파라미터들을 사용하여 망에서 필요한 대역폭을 계산한다.^[9] 이때, 대역폭 계산을 위해 사용되는 CLR값으로는 상위 계층에서 오류 제어를 수행하지 않아도 매체의 오류 허용률이 보장될 수 있도록 요구되는 값, CLR_{none}을 적용한다. 즉, 수송 계층에서의 최대 오류 허용률을 ETL(Error Tolerance Level)이라 할 때,

$$ETL = 1 - (1 - CLR_{none})^L \quad (1)$$

여기서는 L은 $\left\lceil \frac{TPDU \text{ length}}{Cell \text{ payload length}} \right\rceil$ 이다.

식 (1)로 부터

$$\therefore CLR_{none} = 1 - (1 - ETL)^{1/L} \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 구해진 CLR_{none} 값을 적용하여 망에서 필요한 대역폭을 계산한 후 pre-analyzer로 제어를 넘긴다. 또한 이 기능은 연결 관리 기능으로부터 수신된 정보를 처리하여 응용에 연결 설정이 수락 또는 거절됐음을 통보하며 QoS 파라미터의 재고섭을 수행하기도 한다.^[10,11]

Pre-analyzer는 오류 회복 방법의 사용 여부를 먼저 결정하는데 ATM망을 전송 망으로 사용할 경우 CLR_{none}을 적용한 대역폭이 망에서 제공되면 오류 회복 방법을 적용하지 않아도 ETL이 보장되므로 오류 회복에 관한 어떤 작업도 수행하지 않기로 결정하며, CLR_{none}을 보장하는 대역폭이 망에서 제공되지 않으면 등시성 매체에 대해서는 FEC 방법을, 비 등시성 매체에 대해서는 ARQ 방법을 적용하기로 결정한다. 단, 비 등시성 매체의 경우 ETL이 0(즉, perfect)인 매체일 경우 식 (2)에 의하여 CLR_{none}값으로 0이 망에서 보장되어야 하나 이는 ATM망의 특성상 보장이 불가능하다. 그러므로 [11, 12]등에서 정의된 값을 고려하여 10⁻¹⁰을 CLR_{none}으로 요구하며, 이 값이 망에서 보장되어도 ARQ오류 제어 방법을 적용하여야 한다.

연결 관리 기능은 하부 망이 다양한 서비스(Multi-service)를 제공할 수 있는 ATM 망일 경우는 호 접속

제어 과정을 통하여 대역폭 예약 가능성 여부를 검사한다. 이때 요구되는 대역폭은 QoS 관리 기능에서 CLR_{none}을 적용했을 경우 구해진 대역폭을 요구하고 이 대역폭이 망에서 제공되지 않으면, 현재 망에서 보장될 수 있는 CLR_{network}값(CLR_{network} ≥ CLR_{none})을 pre-analyzer에 보고한다. 망에서 대역폭이 제공된다면, 종단간의 연결 설정 작업을 수행한다. 만약 망에서 QoS 파라미터를 보장할 수 없거나 또는 수신단에서 연결을 거부하면 연결 관리 기능은 상태 정보를 QoS 관리 기능으로 보고한다.^[13,14] 또한 하부 망이 가상 회선망이거나 데이터그램망일 경우에는 ATM망에서와 같은 대역폭 예약 과정 없이(단, 가상 회선망일 경우는 회선의 사용 가능성 검사) 종단간의 연결 설정 작업을 수행한다.

오류 제어 구성자는 연결 요구가 연결 관리 기능에 의해 수락되었을 경우, 영향 인자들을 고려하여 오류 제어와 관련된 기능 중 어느 기능이 활성화 될 것인가와 이 활성화된 기능 중 어느 메카니즘이 활성화 될 것인가를 결정한다. 그러므로 송신부와 수신부에서 각 매체에 대하여 오류 제어 방법이 선정되며 이는 연결이 해제될 때까지 동작한다.

3.2 오류 제어 방법을 선정하기 위한 알고리즘

매체별로 오류 제어 방법을 선정하기 위하여 고려되는 수송 계층에서의 QoS 파라미터는 오류 허용률(ETL) 한계와 지연 한계이다. 이들 파라미터중 오류 허용률 한계는 0보다 큰 실수로 표현되는 정량적(Quantitative) 파라미터로 반드시 보장되어야 하나, 지연 한계는 실시간 또는 비 실시간으로 표현되는 정성적(Qualitative) 파라미터로써 최적의 오류 제어 방법 선정을 위하여 고려된다.

오류 제어 메카니즘 선정을 위한 Pre-analyzer와 오류 제어 구성자의 알고리즘은 다음과 같다.

Pre-analyzer

step①: determines whether error recovery scheme is used or not.

If error tolerance level is guaranteed without any error recovery scheme such as FEC or ARQ.

{any error recovery scheme is not used.}

Else {some error recovery scheme is used.}

step②: in step①, if it was determined that error recovery scheme was used, pre-analyzer determines which scheme between FEC and ARQ is used.

If discrete media is sent,

{It is determined that ARQ scheme is used.}

Else if continuous media is sent and ETL is guaranteed by FEC error control scheme,

{It is determined that FEC scheme is used.}

각각의 매체에 적용할 오류 회복 방법의 결정과정은 다음과 같다.

현재 망에서 보장 가능한 셀 손실율, $CLR_{network}$ 에 따라, 오류 회복 방법을 적용하지 않을 때의 TPDU 오류 발생율인 TER_{none} 은 다음 식에 의하여 구해진다.

$$TER_{none} = 1 - (1 - CLR_{network})^L \quad (3)$$

위의 식에서 $CLR_{network}$ 은 ATM망에서의 가상 채널별로 보장되는 셀 손실율이다.

또한 RSE(Reed-Solomon Erasure) 코드^[15]를 사용하는 FEC 방법을 사용할 경우, 오류 복구를 위하여 추가된 RSE 코드 길이 만큼의 오류는 수신단에서 복구될 수 있으므로 FEC 오류 회복 방법을 적용했을 때의 TPDU 오류 발생율, TER_{FEC} 은 다음식에 의하여 구해진다.

$$TER_{FEC} = 1 - \sum_{i=0}^N CLR_{network}^i (1 - CLR_{network})^{L-i} \quad (4)$$

식에서 N은 RSE 코드를 포함하는 셀의 수로써 TPDU내에서 하나까지의 셀 손실만을 수신부에 회복할 수 있는 경우 N은 1이 된다.

그러므로 ETL이 TER_{none} 보다 크거나 같으면 ETL이 보장되므로 오류 회복 방법 적용하지 않고, 그렇지 않으면, 비 동시성 매체일 경우는 ARQ 방법을 적용하고, 동시성 매체일 경우는 ETL이 TER_{FEC} 보다 클 때에만 FEC 방법을 적용한다.

송신부의 오류 제어 구성자

If it is determined that ARQ scheme is used,

{“CRC code” mechanism in error detection/correction code generation protocol function(PF) is selected.

ted.

If the connection mode is multicast,

{“GBN” mechanism in retransmission PF is selected.}

Else {“SEL” mechanism in retransmission PF is selected.^[7]}

Else if it is determined that FEC scheme is used,

{“FEC code” mechanism in error detection/correction code generation PF is selected.

“none” mechanism in retransmission PF is selected.}

송신부의 오류 제어 메카니즘은 pre-analyzer에 의해 결정된 오류 회복 방법과 연결 모드를 고려하여 선정된다.

수신부의 오류 제어 구성자

If it is determined that FEC scheme is used,

{“FEC” mechanism in error recovery PF is selected.

If connection oriented network is supported,

{“none” mechanism in sequence control PF is selected.}

Else if connectionless network is provided,

{“duplication/late discard” mechanism in sequence control PF is selected.}

“none” mechanism in acknowledgment PF is selected.}

Else if it is determined that ARQ scheme is used,

{If the connection mode of application is multicast,

{“GBN” mechanism in error recovery PF is selected.

If allowed delay is ‘sensitive’ or ‘moderate’,

{“NAK” mechanism in acknowledgment PF is selected.}

Else {“CUM/AK” mechanism in acknowledgment PF is selected.}}

Else if the connection mode of application is unicast,

{“SR” mechanism in error recovery PF is selected.

If allowed delay is ‘sensitive’ or ‘moderate’,

{“NAK” mechanism in acknowledgment PF is selected.}

Else {“SA” mechanism in acknowledgment PF is selected.}

“resequence” mechanism in sequence control PF is selected.}

Else if it is determined that any error recovery scheme is not used,

{“none” mechanism in error recovery PF is selected.

If connection oriented network is supported,

{“none” mechanism in sequence control PF is selected.}

Else if connectionless network is provided,

{“duplication/late discard” mechanism in sequence control PF is selected.}

“none” mechanism in acknowledgment PF is selected.}

수신부에서의 오류 제어 메카니즘은 pre-analyzer에 의해 결정된 오류 회복 방법, 망의 전송 형태, 허용되는 지연, 연결 모드를 고려하여 선정되는데, 이중 지연은 best-effort하게 지원하기 위한 영향 인자로서 고려된다. 예를 들면, 위의 알고리즘에서 실 시간성 응용일 경우 오류 통보 기능에서 “SA”이나 “CUM/AK” 메카니즘보다 지연을 줄이기 위해 “NAK”이 선정된다.

IV. 동작 검증 및 성능 비교

본 장에서는 다음과 같은 가정 아래서 화상회의(표 3에서 언급된 Pure conference)를 응용으로써 지원하기 위하여 본 모델에서의 Pre-analyzer와 오류 제어 구성자에 의해 송신부와 수신부에서 각 매체별로 선

정되는 오류 제어 방법을 검증하였고, 본 모델과 기존 수송 프로토콜에서의 오류 제어 메카니즘의 성능을 비교하였다.

- 가정 사항 -

(1) Multi-point로 연결된다.

(2) 전송 망은 ATM망으로써, 매체별로 가상 채널(Virtual channel)을 사용하며, 화상 회의 응용에 포함된 각 매체의 QoS 특성 및 호 접속 제어 과정에서 망으로부터 보장받을 수 있는 $CLR_{network}$ 은 다음 표 4와 같다.

(3) TPDU 크기는 CS-PDU 크기와 같으며, 1.4k byte로 고정되어 있고, 셀의 payload는 등시성 매체에 대해서 47 바이트(AAL type 1)이고, 비 등시성 매체에 대해서는 44 바이트(AAL type 3)이다.

(4) AAL의 CS(Convergence Sublayer) 부계층에서는 오류 제어와 관련된 동작이 수행되지 않는다.

(5) FEC방법은 single level 오류 회복 방법을 적용한다.

4.1 동작 검증

등시성 매체와 비 등시성 매체에 적용되는 오류 제어 메카니즘의 선정 과정은 다음과 같다.

(1) 등시성 매체

가정 사항을 고려하여 망으로부터 보장되는 $CLR_{network}$ 을 식 (3)와 (4)에 대입하여 TER_{none} 과 TER_{FEC} 를 구하면 표 5와 같다. 이때 L은 $\left[\frac{1400}{47} \right]$ 이다.

• 음성과 비압축 화상(Voice and Raw Video)

이들 매체의 수송 계층에서의 오류 허용률(ETL)은 10^{-2} 으로, 이는 망에의 셀 손실율, $CLR_{network}$ 에 의한

표 4. 매체별 QoS 특성과 망에서 보장하는 CLR.

Table 4. QoS characteristics and CLR per media.

매체의 종류		QoS 특성			$CLR_{network}$
		ETL	지연	평균 비트 전송율(bps)	
등시성 매체	음성	10^{-2}	실시간	64K	$3.35 * 10^{-4}$
	비압축 화상	10^{-2}	실시간	4.1M	$3.35 * 10^{-4}$
비 등시성 매체	음향	10^{-5}	실시간	1.4M	$3.4 * 10^{-7}$
	정지 화상	10^{-2}	비 실시간	2M	$3.14 * 10^{-4}$
	그래픽스	0	실시간	10K	10^{-10}
	텍스트	10^{-7}	비 실시간	500K	$4 * 10^{-9}$

* 평균 비트 전송율은 ⁽¹⁶⁾을 참조하였음.

표 5. 동시성 매체의 오류 허용률과 오류 제어 방법별 TPDU 오류 발생율.

Table 5. ETL and TPDU error ratio per error control scheme of continuous media.

매체의 종류	ETL	TER _{none}	TER _{FEC}	비 고
음성/비압축 화상	10 ⁻²	10 ⁻²	9.6 * 10 ⁻³	ETL = TER _{none} > TER _{FEC}
음향	10 ⁻⁵	1.02 * 10 ⁻⁵	9.86 * 10 ⁻⁶	TER _{none} > ETL > TER _{FEC}

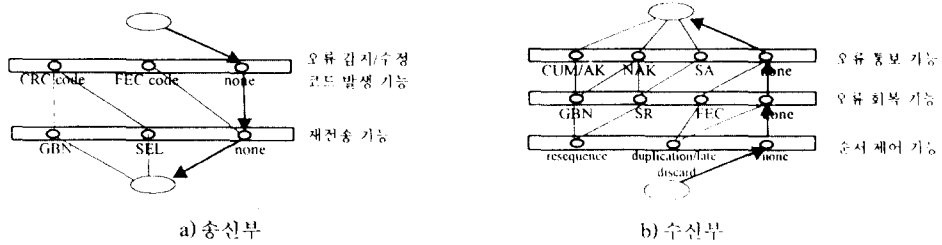


그림 6. 음성 및 비압축 화상을 위하여 선정될 수 있는 메카니즘 루트.

Fig. 6 The route of selected mechanisms for voice and raw video media.

a) Sending block b) Receiving block

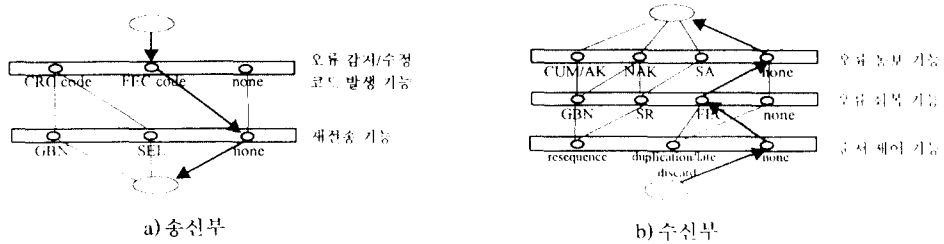


그림 7. 음향을 위하여 선정될 수 있는 메카니즘 루트.

Fig. 7 The route of selected mechanisms for CD/music media.

a) Sending block b) Receiving block

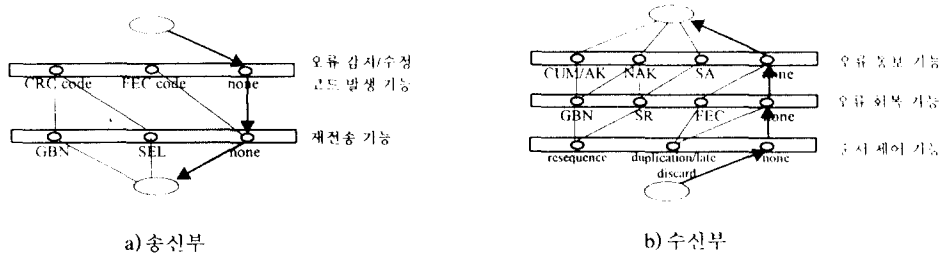


그림 8. 정지 화상을 위하여 선정될 수 있는 메카니즘 루트.

Fig. 8 The route of selected mechanisms for still image media.

a) Sending block b) Receiving block

TPDU 오류 발생율, TER_{none} 과 같으므로 이들 매체에 대해서는 오류 제어를 수행하지 않아도 오류 허용률이 보장된다. 그러므로 송/수신부에서 선정되는 오류 제어 방법은 다음 그림 6과 같다.

• 음향(Hi-fi Audio)

이 매체의 오류 허용률은 10^{-5} 이고 $CLR_{network}$ 에 의한 TER_{none} 과 TER_{FEC} 는 각각 $1.02 * 10^{-5}$ 과 $9.86 * 10^{-6}$ 이므로 음향의 오류 허용률은 FEC 방법을 사용하여야만 보장될 수 있다.

(2) 비 등시성 매체

망으로 부터 보장되는 $CLR_{network}$ 을 식 (3)에 대입하여 TER_{none} 을 구하면 표 6와 같이 계산된다. 이때의

$$L = \left\lfloor \frac{1400}{47} \right\rfloor = 32 \text{이다.}$$

표 6. 비등시성 매체의 오류 허용률과 오류 제어 방법별 TPDU 오류 발생율.

Table 6. ETL and TPDU error ratio per error control scheme of discrete media.

매체의 종류	ETL	TER_{none}	비고
정지 화상	10^{-2}	10^{-2}	$ETL = TER_{none}$
그래픽스	0	$3 * 10^{-9}$	$TER_{none} > ETL$
텍스트	10^{-7}	$1.28 * 10^{-7}$	$TER_{none} > ETL$

비 등시성 매체에 대하여는 FEC 방법을 적용하지 않으므로, pre-analyzer는 TER_{FEC} 를 계산할 필요가 없다.

• 정지 화상(Still Image)

이 매체의 오류 허용률은 10^{-2} 으로 TER_{none} 과 같다. 그러므로 정지 화상은 아무런 오류 회복 메커니즘을 사용하지 않아도 오류 허용률이 보장된다.

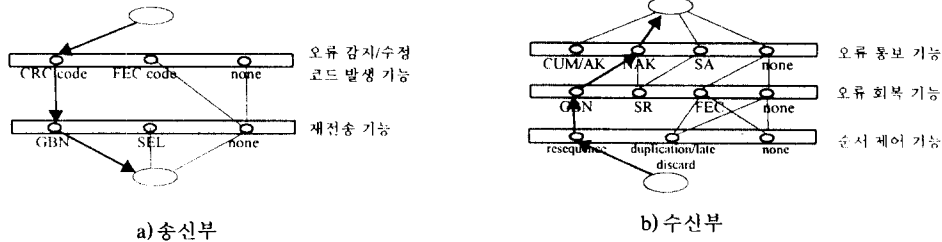


그림 9. 그래픽 매체를 위하여 선정될 수 있는 메커니즘 루트.

Fig. 9 The route of selected mechanisms for graphics media.

a) Sending block b) Receiving block

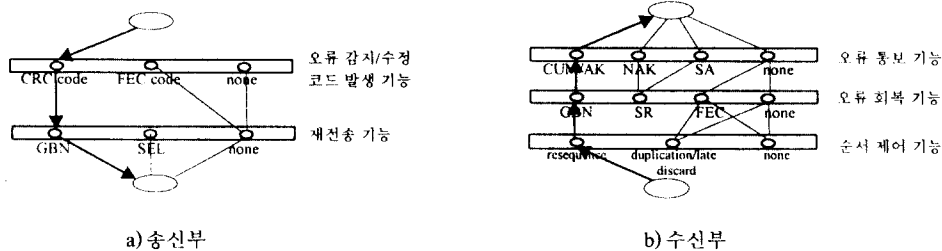


그림 10. 텍스트를 위하여 선정될 수 있는 메커니즘 루트.

Fig. 10 The route of selected mechanisms for text media.

a) Sending block b) Receiving block

• 그래픽스(Graphics)

이 매체는 오류를 허용하지 않으므로 ARQ방법을 사용하여야 한다. 그리고 응용에서 이 매체의 지연은 'Moderate'이므로 매체의 처리를 위한 수신부의 메카니즘 구조에서 오류보고 기능의 메카니즘중 "NAK"이 선정되었다. 이는 지연을 가능한 한 최대로(best-effort) 줄이기 위하여 선정된 것이다.

• 텍스트

이 매체의 오류 허용률은 10^{-7} 으로 TER_{none} 보다 작으므로 오류 회복 방법을 적용하지 않을 경우, 오류 허용률이 보장되지 않으므로 ARQ방법을 사용하여야 한다. 그리고 응용에서 이 매체는 지연에 민감하지 않으므로 망의 과부하를 줄이기 위하여 오류보고 기능의 메카니즘 중에서 "NAK" 대신 "CUM/AK"이 선정된다.

4.2 성능 비교

성능 평가를 위한 대상 프로토콜은 기존의 프로토콜인 TCP와 UDP를 비롯하여 최근 고속 프로토콜로 소개되고 있는 XTP와 제안하는 모델등 네가지 프로토콜을 대상으로 수행하였다. 이들 프로토콜에서 제공하는 오류 제어 메카니즘은 다음 표 7과 같다.

위의 표에서 TCP와 UDP는 응용 계층에서의 오류 허용율과 망에서의 오류 발생율을 고려하지 않고 모든 매체에 대하여 단일의 오류 제어메카니즘을 적용하고 있다. 이와 같은 문제를 보완한 프로토콜인 XTP에서는 응용 계층에서 매체별로 적용할 오류 제어 방법을 선택적(optional)으로 지정할 수 있도록 하고 있

으나, XTP에서도 역시 망에서의 오류 발생율은 고려하지 못하고 있다. 성능 평가에 있어서 XTP에서 적용한 메카니즘은 크게 두 가지로 하였는데, 동시성 매체에 대해서는 각 기능에서 "none"을 적용하였고, 비 동시성 매체에 대해서는 오류 감지/수정 코드 기능에서 "TPDU CRC", 재전송 기능에서 "GBN", 오류 통보 기능에서 "sender-control NAK", 오류 회복 기능에서 "GBN", 그리고 순서 제어 기능에서 "resequence"을 적용하였다. 제안된 모델에서 적용한 오류 제어 메카니즘은 1절에서와 동일한 가정 사항을 고려하였기 때문에 각 매체별로 그림 6~10에 표현된 오류 제어 방법을 적용하였다. 단, 표 7에서 언급된 CRC 코드는 CRC, WSC 그리고 CXOR와 같은 모든 종류의 오류 감지를 위한 코드를 내포하고 있다.

모의 실험은 siman version 3.0을 이용하여 세 가지 성능 평가 인자를 대상으로 수행하였다. 일반적으로 가장 기본적인 성능 평가 수단인 전송 지연, 망 자원의 효과적 사용을 나타내는 효율성, 그리고 오류 허용율의 만족도를 고려하였다. 실험 환경으로써, $CLR_{network}$ 값으로 10^{-4} 을 적용하였고 망의 부하는 0.3으로 하였으며, 발생하는 워킹 트래픽들은 앞서 표 4에서 언급한 여섯 가지 매체들의 QoS 특성을 적용하였다.

1) 전송 지연

전송 지연은 양 종단간에 셀을 전달하는데 소요되는 평균 지연 시간으로써, 그림 11은 각 트래픽 상황을 고려한 전송 지연을 도시하고 있다. 이 그림에 따르면, 거리에 따라 전송 지연이 조금씩 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 기본적으로 전송 거리에 따라

표 7. 각 프로토콜의 오류 제어와 연관된 기능에서 제공하는 메카니즘.

Table 7. Mechanisms provided in PFs related with error control in each Protocol.

프로토콜	송 신 부		수 신 부		
	오류 감지/수정 코드 발생 기능	재전송 기능	오류 통보 기능	오류 회복 기능	순서 제어 기능
TCP(TP 4)	CRC.	GBN.	CUM/AK.	GBN.	resequence.
UDP	none.	none.	none.	none.	none.
XTP	none, header CRC, TPDU CRC.	none, GBN, SR.	none, FASTNAK, sender-control NAK, sender-control SA.	none, GBN, SR.	none, resequence.
This model	none, CRC, FEC.	none, GBN, SR.	none, CUM/AK, NAK, SA.	none, GBN, SR, FEC.	none, resequence, duplicated/late discard.

전달 시간이 길어짐에 따른 것이다. UDP의 경우 모든 트래픽들에 대해 오류를 복구하지 않기 때문에 지연이 가장 적게 나타남을 알 수 있으며, 반대로 TCP의 경우, 최적의 버퍼를 할당하고 시뮬레이션을 수행했음에도 불구하고, 모든 트래픽들에 대해 GBN방식으로 오류를 복구함에 따라 가장 큰 전송 지연을 나타내고 있다. 또한 XTP에서는 비 동시성 매체에 대해서 GBN 방식을 적용함에 따라 UDP 보다 큰 전송 지연이 크지만, TCP보다는 비교적 작은 전송 지연을 가진다. 이에 반해, 제안 모델의 경우 음성, 비압축 화상, 정지 화상의 오류 허용율이 오류 복구를 수행하지 않아도 만족되므로 이들 매체에 대해서는 오류 제어를 수행하지 않으며, 음향에 대해서는 FEC 방식을 적용하기 때문에 XTP 보다도 약간 적은 지연을 나타낸다.

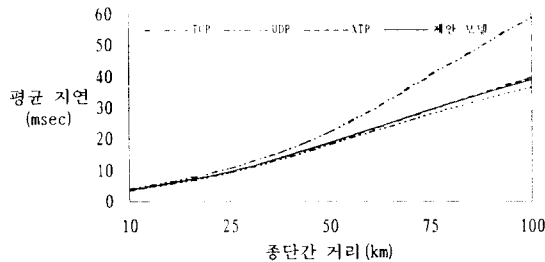


그림 11. 전송 거리에 따른 전송 지연 분포.
Fig. 11 Distribution of transmission delay according to the distance.

2) 효율성

효율성은 재전송과 오버 헤드에 따른 대역폭의 낭비를 고려한 값으로써, UDP의 경우를 기준으로 하였다. 즉, 어떠한 오류 복구 메커니즘도 적용하지 않는 이 프로토콜의 효율성을 1로 하여, 그림 12는 다른 프로토콜들의 효율성을 나타내고 있다. TCP의 경우 잦은 재전송이 발생하여 거리의 증가에 따라 전송 효율이 급속하게 감소하는 것을 알 수 있고, XTP에서는 거리가 멀어지면서 비 동시성 매체에 대해 적용하고 있는 GBN 방식의 오류 복구에 따라 효율이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 제안된 모델의 경우 동시성 매체인 음향에 FEC를 적용함에 따라 가까운 거리에서는 XTP 보다 효율이 떨어지나 거리가 멀어지면서 정

지 화상에 GBN 방식을 적용하지 않기 때문에 XTP 보다 높은 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

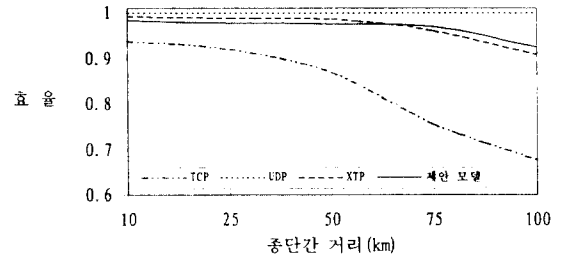


그림 12. 전송 거리에 따른 전송 효율.
Fig. 12 Efficiency according to the distance.

3) 오류 허용율 만족도

이 평가 인자는 매체가 허용하는 오류율(ETL)의 보장 정도를 나타내는 것으로서, 다음 식으로 정의하였다.

$$\text{만족도} = \frac{M - \sum_{i=1}^N m_i \times E}{M} \quad (5)$$

여기서 m_i 는 i 매체가 사용하는 평균 비트 전송율(average bit rate), N 은 응용에 포함된 매체의 총 수, M 은 각 매체가 사용하는 평균 비트 전송율의 합(즉, $M = \sum m_i$), 그리고 E 는 표 5와 6에서 언급된 각 매체의 오류 허용율의 보장 여부를 나타내는 것으로서, 보장하면 0이고 보장하지 못하면 E 의 값은 1로 된다.

그림 13에서 TCP는 모든 트래픽들에 대해 오류 제어 메커니즘을 적용함에 따라 오류 없는 전송이 이루어지므로 만족도는 1이 되나, UDP의 경우 음향, 그래픽스, 텍스트 매체의 오류 허용율이 보장되지 않으므로 약 0.76정도의 만족도를 보이고 있다. XTP에서는 비 동시성 매체에 대하여 GBN 방식으로 오류를 복구하기 때문에 100% 만족시키지만, 동시성 매체 중에서 음향의 오류 허용율을 만족시키지 못하여 전체적으로 0.83정도의 만족도를 나타내고 있다. 제안된 모델에서는 음향에 대하여 FEC 오류 제어, 그래픽과 텍스트에 대해서는 GBN 방식을 적용하여 모든 매체의 오류 허용율을 100% 만족함을 알 수 있다.

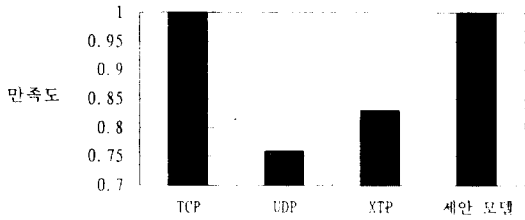


그림 13. 프로토콜별 오류 허용율 만족도.
Fig. 13 Guarantee percent of error tolerance level per protocol.

V. 결 론

멀티미디어 응용을 위하여 본 논문에서 제안된 오류 제어 모델은 영향 요소들을 고려하여 각 매체별로 개별적인 오류 제어 메카니즘을 구성한다. 이 오류 제어 메카니즘에서, 송신부에서 선택적으로 활성화될 수 있는 기능은 오류 감지/수정 코드 발생 기능과 재전송 기능이며 수신부에서는 오류 통보 기능, 오류 회복 기능, 순서 제어 기능이 있다. 이들 기능들이 보유한 다양한 메카니즘들 중 최적의 메카니즘이 연결 설정 단계에서 송·수신부에서 선택된다.

이와 같은 구조에 의한 장점으로, 첫째, 오류 제어 메카니즘을 각각의 기능으로 분리하여 각 기능에서 필요한 메카니즘을 선정하고 불필요한 기능에서 "none" 메카니즘을 선정함으로써 통과(bypass)하여 일괄처리시 발생하는 시스템의 과부하를 줄일 수 있다. 둘째, 기존의 프로토콜은 모두 응용의 속성에 따라 오류 제어 메카니즘을 적용함으로써, 멀티미디어 응용에 포함된 각 매체에 대하여 일률적으로 오류 제어를 적용하였으나 본 구조에서는 매체별로 다양한 QoS 요구사항을 개별적으로 지원할 수 있다. 셋째, 기존의 프로토콜은 망의 환경 인자를 고려하지 않고, 오류 제어 메카니즘을 선정하였으나, 본 구조에서는 환경에 대한 적응 능력이 존재한다. 그럼으로써 결국, 기존의 오류 제어 메카니즘의 적용에서 발생하는 문제(시스템과 망의 과부하, 응용에 따른 오류 회복 적용/비적용의 결정)를 해결함으로써, 응용에 대해서는 유연한 오류 제어를 수행할 수 있으며, 각각의 매체에 대해서는 보다 정교한 오류 제어 메카니즘을 제공할 수 있다.

시뮬레이션을 통하여 기존의 프로토콜과 제안 모델의 성능을 비교한 결과, 제안 모델은 TCP와 XTP보다 낮은 지연을 가지고 동작하였으며, 효율성 측면에서도 거리가 멀어짐에 따라 이들 프로토콜보다 훨씬 높은 효율성을 제공하였다. 또한 제안 모델에서는 QoS 관리 기능과의 유기적 동작으로 UDP와 XTP에서 발생하는 오류 허용율의 미 보장 문제를 해결하여 각 매체의 오류 허용율을 100% 보장함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Thomas F. La Porta and Mischa Schwartz, "The Multistream Protocol: A Highly Flexible High-Speed Transport Protocol," IEEE JSAC, Vol. 11, No. 4, May 1993.
2. Sidnie Feit, "TCP/IP: Architecture, Protocols and Implementation," McGraw-Hill, Inc., 1993.
3. W. Timothy Strayer, Bert J. Dempsey and Alfred C. Weaver, "XTP: The Xpress Transfer Protocol," Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1992.
4. Luca Delgrossi, Christian Halstrick and Ralf Guido Herrtwich, "HeiTP-A Transport Protocol for ST-II"
5. David C. Feldmeier, "An overview of the TP++ transport protocol project," High Performance Network.
6. Martina Zitterbart, Burkhard Stiller and Ahmed N. Tantawy, "A Model for Flexible High-Performance Communication Subsystems," IEEE JSAC, Vol. 11, No. 4, May 1993.
7. Zygmunt Haas, "A Communication Architecture for High-Speed Networking," IEEE Network, Jan. 1991.
8. Arch/QoS/94-001, Rev. 1.5, Multimedia Communications Forum, Inc., May 1994.
9. R. Guerin and M. Naghshineh, "Equivalent Capacity and its Application to Bandwidth Allocation in High Speed Networks," IEEE JSAC., pp. 965-981, Vol. 9, No. 3, Sep. 1991.
10. Jae-il Jung, "Translation of QoS parameters into ATM performance parameters in B-ISDN," IEEE

- Infocom'93, 1993.
11. Raif O, Onvural, "Asynchronous Transfer Mode Networks: performance issues," Artech House Inc., 1994.
 12. Klara Nahrstedt and Ralf Steinmetz, "Resource management in Networked Multimedia Systems," IEEE Computer, pp. 52-63, May 1995.
 13. Israel Cidon, Inder S. Gopal and Adrian Segall, "Connection Establishment in High-Speed Networks," IEEE ACM Transactions on Networking, Vol. 1, No. 4, Aug. 1993.
 14. Willibald A. Doeringer, "A Survey of Light-Weight Transport Protocol for High-Speed Networks," IEEE Transactions on Communications, Vol. 38, No. 11, Nov. 1990.
 15. A. J. Mcauley, "Reliable Broadband Communication using a Burst Erasure Correcting Code," ACM Sigcomm'90, Sept. 1990.
 16. Galassi, G., G. Rigolio, and L. Verri, "Resource Management and Dimensioning in ATM Networks," IEEE Network Magazine, May 1990, pp. 8-17.



朴 東 星(Dong Seong Park) 정회원
 1961년 12월 15일생
 1984년 3월: 공군사관학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1993년 3월~현재: 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※주관심분야: 고속 수송 프로토콜, 멀티미디어 처리, QoS



李 相 憲(Sang Heon Lee) 정회원
 1969년 4월 17일생
 1992년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1994년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1994년 3월~현재: 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※주관심분야: PCS, 고속 수송 프로토콜, 멀티미디어 응용

高 峯 洪(Bong Hong Ko)

정회원

1957년 1월 13일생

1979년 3월: 공군사관학교 전자공학과(공학사)

1990년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1993년 3월~현재: 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※주관심분야: C4I, 멀티미디어 처리



李 載 用(Jai Yong Lee) 정회원

1977년: 연세대학교 전자공학과(공학사)

1984년: 미국 Iowa State University, Computer Eng.(석사)

1987년: 미국 Iowa State University, Computer Eng.(박사)

1977년~1982년: 국방과학 연구소 연구원

1987년~1992년: 포항공과대학 전자계산학과 조교수

1992년~1994년: 포항공과대학 전자계산학과 부교수

1994년~현재: 연세대학교 전자공학과 부교수

李 相 培(Sang Bae Lee) 정회원

1958년: 공군사관학교(이학사)

1961년: 서울대학교 공과대학(공학사)

1964년: 미국 Stanford대학교(공학석사)

1975년: 영국 Newcastle대학교(공학박사)

1969년~1979년: 서울대학교 공과대학 조교수

1986년~1987년: IEEE KOREA SECTION CHAIRMAN

1989년 1월~1989년 12월: 대한전자공학회 부회장

1990년 1월~1990년 12월: 대한전자공학회 회장

1992년: IEEE KOREA COUNCIL CHAIRMAN

1979년~현재: 연세대학교 전자공학과 교수