

프레임 구조를 갖는 무선 매체접속제어 프로토콜 상에서 퍼지 기반의 음성/데이터 통합 임의접속제어기 설계 및 성능 분석

홍 승 은[†], 최 원 석[†], 김 용 배[‡], 강 충 구[†], 임 묘 태[†]

† 고려대학교 전기전자전파공학부, Tel. No.: 02-3290-3691, Fax. No.: 02-3290-3691

E-mail: seraph@mail.korea.ac.kr

‡ 한국전자통신연구원 무선 방송 기술 연구소

Design and Performance evaluation of Fuzzy-based Framed Random Access Controller (F²FRAC) for the Integration of Voice and Data over Wireless Medium Access Control Protocol

S.-E. Hong[†], W.-S. Choi[†], E.-B. Kim[‡], C.-G. Kang[†], M.-T. Lim[†]

[†]School of Electrical Engineering, Korea University

[‡]Radio&Broadcasting Technology, ETRI

Abstract

This paper proposes a fuzzy-based random access controller with a superimposed frame structure (F²FRAC) for voice/data-integrated wireless networks. F²FRAC adopts mini-slot technique for reducing contention cost, and these mini-slots of which number may dynamically vary from one frame to the next as a function of the traffic load are further partitioned into two regions for access requests coming from voice and data traffic with their respective QoS requirements. And F²FRAC is designed to properly determine the access regions and permission probabilities for enhancing the data packet delay while ensuring the voice packet dropping probability constraint. It mainly consists of the estimator with Pseudo-Bayesian algorithm and fuzzy logic controller with Sugeno-type of fuzzy rules. Simulation results prove that F²FRAC can guarantee QoS requirement of voice and provide the highest throughput efficiency and the smallest data packet delay amongst the different alternatives including PRMA[1], IPRMA[2], and SIR[3].

I. 서론

패킷 무선망은 점-대-다중점(point-to-multipoint) 형태의 다중접속매체(multi-access media)이므로 매체를 공유하기 위한 무선 접속 기술을 필요로 한다. 최근 들어 음성과 같은 실시간 고정 대역을 필요로 하는 트래픽과 불규칙적으로 발생하는 트래픽까지 포함하는 광대역 서비스 응용 프로그램을 지원하기 위해 MAC 계층의 역할이 보다 중요하게 되었다. 광대역 서비스를 지원하기 위한 대부분의 MAC 프로토콜들은 예약 과정을 도입하고 있다. 예약 기반의 MAC 프로토콜에 따르는 무선 단말은 무선 채널로의 충돌 없는 접속을 획득하기 위해 기지국으로 자원 요청 메시지를 전송한다. 그러나 대다수의 시스템 상에서 이러한 자원 요청 메시지는 다른 단말들과 경쟁하여 전송된다. 따라서 예

약 MAC 프로토콜에서 지연에 관한 QoS(Quality of Service)에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 충돌 없는 패킷 전송이 허용되기 전에 거쳐야 하는 경쟁 단계의 임의 접속 방식이라 할 수 있다. 무선 ATM과 광대역 유/무선 가입자망을 포함한 대부분의 예약 프로토콜 시스템들은 기존의 슬롯 기반의 임의 접속 방식을 사용하지 않고 복수의 경쟁 슬롯(슬롯 사용의 효율성을 위해 미니슬롯 개념을 도입)과 다수의 데이터 슬롯으로 이루어진 프레임 구조하에서 임의 접속에 의한 예약과 예약된 슬롯을 이용한 정보 전송 절차를 혼합하고 있다.

본 논문은 프레임 구조 하에서 음성과 같은 실시간 트래픽과 데이터와 같은 비실시간 트래픽을 효율적으로 지원하기 위해 트래픽 부하에 따라 예약 요청 구간의 길이를 가변시키고, 트래픽 유형별 QoS 요구 사항을 만족시킬 수 있도록 예약 요청 구간을 트래픽 유형별로 분할한다. 또한 전체 예약 요청 구간의 길이와 유형별 세부 구간 길이 및 그 전송 허용 확률을 결정하기 위해 퍼지 제어 시스템을 사용한다.

II. 시스템 모델

고려하는 시스템의 상향링크는 그림 1에서와 같이 고정된 복수(N)의 시간 슬롯들로 구성된 프레임 구조를 가지며, 기능상 경쟁 기반의 예약 슬롯들로 이루어진 예약-하위프레임(reservation subframe: R-subframe)과 예약을 통해 경쟁 없이 데이터를 전송할 수 있는 전송-하위프레임(transmission subframe: T-subframe)으로 나뉜다. 기존 시스템들에서는 R-subframe과 T-subframe을 이루는 슬롯의 수가 고정적인데 반해, 본 논문에서는 그 수가 시스템에 인가된 트래픽 상태에 따라 적응적으로 변화된다. 특히, R-subframe을 이루는 슬롯들은 보다 작은 미니슬롯들로 분할되고 혼합된 트래픽을 수용시 트래픽 유형에 따라 다시 세분된다. 슬롯과 미니슬롯과의 비는 $i=4$ 로 가정한다. 이러한 미니슬롯들은 경쟁기반으로 예약 요청 메시지를 전송할 때 발생할 수 있는 충돌로 인한 슬롯의 낭비를 줄이기 위해 도입

된다. T-subframe의 시간 슬롯을 예약하기 위해 사용되는 미니슬롯은 그림 1의 (b)와 같이 전송 오버헤드와 예약-요청(REQ) 필드로 구성되는데, 일반적으로 REQ 필드는 단말 식별자(Source identifier: SID)와 트래픽 유형(Traffic of Class: TOC), 요청 슬롯 수(Number of Slots to Request: NSR), 그리고 부가 정보로 이루어진다. F²RAC에서는 부가정보란에 단말의 패킷 전달 지연 값을 실어 보냄으로써 중앙제어기로 하여금 보다 효율적으로 임의접속을 제어하도록 한다. T-subframe을 이루고 있는 슬롯은 오버헤드와 전송 패킷으로 이루어지는데, 전송 패킷은 무선 MAC의 상위 계층 정보를 전달하는 부분과 무선 구간에서의 효율적인 전송을 위해 새롭게 정의되는 헤더로 이루어진다. 헤더에 삽입되는 내용으로는 SID, TOC, 그리고 패킷의 시퀀스번호(Sequence number: SEQ)이다. F²RAC에서는 SEQ를 이용하여 음성 패킷의 손실 확률을 계산한다.

다중 트래픽들이 T-subframe에 있는 슬롯을 예약하기 위해 예약 요청 슬롯을 R-subframe을 통해 전송하게 되는데, 이 때 두 가지 방안이 존재한다. 즉, 서로 다른 종류의 트래픽간의 충돌 발생을 허용하는 방안과 그림과 같이 다른 종류의 트래픽들이 접속할 수 있는 영역을 구분함으로써 이종 트래픽 간의 예약 요청 메시지 충돌을 허용하지 않는 방안이다. 본 논문에서는 음성과 데이터 트래픽의 요구 QoS를 만족시킬 수 있는 효율적인 임의의 접속제어기를 설계하는 것이 목적이므로, 설계 파라미터는 예약 요청을 전송할 수 있는 구간의 총 슬롯 수 m , 음성과 데이터를 위한 각각의 미니 슬롯 수 R 과 $m \times i - R$, 그리고 음성과 데이터 각각에 할당된 예약 구간에 예약 요청 메시지를 전송할 수 있는 허용 확률(permission probability) p_v 및 p_d 이다.

III. 음성/데이터 통합 F²RAC 설계

그림 2는 프레임구조를 갖는 MAC 환경하에서 Pseudo-Bayesian 알고리즘[4]과 퍼지 논리 제어를 이용하여 음성과 데이터의 임의접속을 효율적으로 제어하는 F²RAC의 기능 블록도이다. F²RAC는 Bayes의 규칙을 이용하여 음성과 데이터 사용자의 접속 수를 추정하는 트래픽 예측기, 예약 구간의 길이 m 과 음성의 예약 구간 길이 R 을 결정하는 퍼지 MAC 경계값 제어기, 그리고 유형별 전송 허용 확률을 결정하는 퍼지 접속 허용 제어기로 구성된다.

3.1 Pseudo-Bayesian 트래픽 예측기

Pseudo-Bayesian 알고리즘은 슬롯에 접속한 과거의 전송 결과들을 바탕으로 현재 슬롯에 접속할 사용자 수를 추정하는 기법이다[4]. 참고문헌 [4]에서는 매 슬롯마다 사용자의 수를 추정하는 반면, 프레임 구조를 갖는 시스템에서는 다음과 같이 사용자 수를 추정할 수 있다.

$$\hat{N}^t = K\lambda + n_{nc}^t \cdot \max\left(0, \frac{\hat{N}^{t-1}}{R^t} - 1\right) + n_c^t \left(\frac{\hat{N}^{t-1}}{R^t} + \frac{1}{e-2}\right) \quad (1)$$

여기서 K 는 프레임당 슬롯의 수, R^t 은 현재 프레임에

서의 경쟁 슬롯 수, n_{nc}^t 는 현재 프레임에서 '없음'과 '성공' 슬롯의 수, 그리고 n_c^t 는 현재 프레임에서의 '충돌' 슬롯의 수이다. 식 (1)은 음성과 데이터 트래픽에 대해 독립적으로 적용된다.

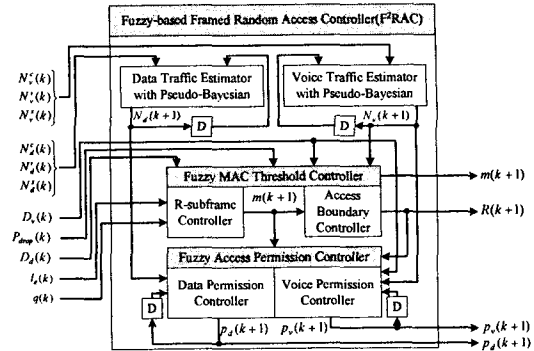


그림 2. 퍼지 기반의 임의접속제어기 (입력변수: $N^d(k), N^v(k), N^s(k)$ -k 번째 프레임에서 '충돌', '없음', '성공' 슬롯의 수, $N^d(k+1)$ -접속 사용자 수의 추정치, $D_v(k)$ -지연, $P_{drop}(k)$ -음성 패킷의 손실 확률, $l_v(k)$ -데이터에 의한 예약 요청 슬롯의 평균 개수, $q(k)$ -아직 할당되지 않은 데이터 슬롯 수, 출력변수: $m(k+1)$ -예약 구간의 슬롯 수, $R(k+1)$ -음성을 위한 예약 구간의 미니슬롯 수, $p_v(k+1)$ -전송 허용 확률)

3.2 퍼지 MAC 경계값 제어기

변동하는 트래픽 부하에 효과적으로 적용하고 데이터 보다 음성에 보다 높은 우선 순위를 부여하기 위한 목적으로 예약-하위프레임(R-subframe)의 길이와 음성 사용자의 접속 슬롯 수를 퍼지 논리를 이용하여 결정하는 제어기를 설계한다.

3.2.1 예약-하위프레임 제어기

본 논문에서는 예약-하위프레임 제어기의 입력 변수로서 음성의 패킷 손실 확률 $P_{drop}(k)$, 데이터의 지연 $D_d(k)$, 데이터의 평균 요청 슬롯 수 $l_d(k)$, 그리고 아직 할당되지 못한 데이터 슬롯 수 $q(k)$ 를 선택한다.

이들 입력 변수들의 용어 집합은 $T(P_{drop}(k)) = \{\text{Bad-low, Good, Bad-high}\} = \{BL, GD, BH\}$, $T(D_d(k)) = \{\text{Small, Large}\} = \{SM, LA\}$, $T(l_d(k)) = \{\text{Non-large, Large}\} = \{NL, LA\}$, $T(q(k)) = \{\text{Few, Many}\} = \{FE, MA\}$ 로 정의된다. 퍼지부호기와 퍼지복호기에서 사용될 멤버십 함수로는 실시간 연산의 단순함을 장점으로 갖는 등변사다리꼴 함수 $g(x; a, b, c, d)$ 을 사용한다. 등변사다리꼴 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$g(x; a, b, c, d) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a < x < b; \\ 1 & \text{for } b < x < c; \\ \frac{x-d}{c-d} & \text{for } c < x < d; \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$T(P_{drop}(k))$ 의 원소인 GL , GD , BH 에 대한 멤버쉽함수를 $\mu_{BL}(P_{drop}(k))$, $\mu_{GD}(P_{drop}(k))$, 그리고 $\mu_{BH}(P_{drop}(k))$ 로 표시할 때, 그 각각은 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{BL}(P_{drop}(k)) = g(P_{drop}(k); 0, 0, BL_c, BL_d), \quad (3)$$

$$\mu_{GD}(P_{drop}(k)) = g(P_{drop}(k); GD_a, GD_b, GD_c, GD_d), \quad (4)$$

$$\mu_{BH}(P_{drop}(k)) = g(P_{drop}(k); BH_a, BH_b, 1, 1). \quad (5)$$

또한, $T(D_d(k))$, $T(l_e(k))$, 그리고 $T(q(k))$ 의 멤버쉽 함수도 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{SM}(D_d(k)) = g(D_d(k); 0, 0, SM_c, SM_d) \quad (6)$$

$$\mu_{LA}(D_d(k)) = g(D_d(k); LA_a, LA_b, \infty, \infty) \quad (7)$$

$$\mu_{NL}(l_e(k)) = g(l_e(k); 0, 0, l_e, NL_d) \quad (8)$$

$$\mu_{LA}(l_e(k)) = g(l_e(k); l_e, LA_b, l_{max}, l_{max}) \quad (9)$$

$$\mu_{FE}(q(k)) = g(q(k); 0, 0, FE_c, FE_d) \quad (10)$$

$$\mu_{MA}(q(k)) = g(q(k); MA_a, MA_b, \infty, \infty) \quad (11)$$

위 멤버쉽 함수에서 사용된 파라미터 $BL_c, BL_d, GD_a, GD_b, GD_c, GD_d, BH_a, BH_b, SM_c, SM_d, LA_a, LA_b, NL_d, LA_b, FE_c, FE_d, MA_a, MA_b$ 들은 실험을 통해 적당히 선택된다. $P_{drop}(k)$ 에 대한 BH_d 와 GD_d 는 음성 사용자의 QoS 제약 조건 값인 최대 패킷 손실 확률로 설정되며, GD_c 와 BH_a 는 음성 패킷 손실 확률의 순간적인 변화를 고려하여 QoS 제약 조건을 보장할 수 있도록 설정된다. $l_e(k)$ 의 l_e 와 l_{max} 는 데이터 메시지의 평균 길이와 한번에 요청할 수 있는 최대 슬롯 수를 나타낸다.

이렇게 선택된 입력 변수들과 그들의 용어에 기반하여, 예약-하위 프레임 제어기는 다음과 같은 24개의 퍼지 결정 규칙들을 갖게 된다.

Rule j : IF $P_{drop}(k)$ is X_{1j} , $D_d(k)$ is X_{2j} , $l_e(k)$ is X_{3j} , and $q(k)$ is X_{4j} , THEN $m_j(k+1)$

여기서 X_{ij} 는 규칙 $j(1 \leq j \leq 24)$ 에서 사용된 $i(1 \leq i \leq 4)$ 번째 언어 변수의 용어이고, $m_j(k+1)$ 은 $(k+1)$ 번째 프레임에 대한 규칙 j 의 출력 함수이다. 표 1에는 예약 하위 프레임의 길이 제어를 위한 규칙 기반의 퍼지 제어 규칙이 정리되어 있다. $(k+1)$ 번째 프레임에 대한 예약 하위 프레임 길이 $m(k+1)$ 을 결정하기 위해서 먼저 max-min 추론 방식을 통해 규칙 j 의 적합도 w_j 를 산출하고, 퍼지 복호를 위해 다음과 같은 무게중심법을 사용한다.

$$m(k+1) = \frac{\sum_{j=1}^{24} w_j \cdot m_j(k+1)}{\sum_{j=1}^{24} w_j} \quad (12)$$

3.2.2 접속 경계 제어기

데이터 트래픽 보다 높은 우선순위를 음성 트래픽에 부여하기 위해, 음성의 QoS($P_{drop}^{max} = 0.01$)를 만족시킬 수 있는 접속 구간을 먼저 정한 후 데이터 트래픽의 접속 구간을 정한다. 본 제어기는 현재 프레임에 전송한 음성 단말들이 사용한 전송 허용 확률 $p_v(k)$, 트래픽 예측기로부터 추정된 $N_v(k+1)$, 그리고 현재 프레임까지 측정된 지연과 패킷 손실 확률 값인 $D_d(k)$ 와 $P_{drop}(k)$ 를 입력으로 사용한다.

사용되는 입력 변수들에 대한 용어 집합은 $T(N_v(k+1)) = \{\text{Few, Many}\} = \{FE, MA\}$, $T(P_v(k)) = \{\text{Low, High}\} = \{LO, HI\}$, $T(D_v(k)) = \{\text{Short, Long}\} = \{SH, LN\}$, $T(P_{drop}(k)) = \{\text{Bad-low, Good, Bad-high}\} = \{BL, GO, BH\}$ 로 정의된다.

3.3 퍼지 접속허용 제어기

퍼지 접속허용 제어기는 입력 변수 집합, $\{R(k+1)/m(k+1), N_v(k+1), D_v(k)\}$ 와 $\{R(k+1)/m(k+1), N_d(k+1), D_d(k)\}$ 에 따라 음성과 데이터의 접속허용 확률을 결정한다. 여기서 $R(k+1)/m(k+1)$ 은 $(k+1)$ 번째 프레임에서 음성 트래픽에 대한 접속 구간의 크기에 대한 지표이며, $N_v(k+1)$ 과 $D_v(k)$ ($N_d(k+1)$ 와 $D_d(k)$)는 다음 프레임에서의 음성(데이터) 트래픽의 부하와 현재 프레임에서의 음성(데이터) 트래픽의 성능 지표이다.

$I(k+1) = R(k+1)/m(k+1)$ 를 위한 용어 집합은 $T(I(k+1)) = \{\text{Voice Prior, Fair, Data Prior}\} = \{VP, FA, DP\}$ 로 정의되며, 각각에 대한 멤버쉽 함수는 다음과 같다.

$$\mu_{VP}(I(k+1)) = g(I(k+1); VP_a, VP_b, 1, 1) \quad (13)$$

$$\mu_{FA}(I(k+1)) = g(I(k+1); FA_a, FA_b, FA_c, FA_d) \quad (14)$$

$$\mu_{DP}(I(k+1)) = g(I(k+1); 0, 0, DP_c, DP_d) \quad (15)$$

또한, $N_v(k+1)$ 와 $D_v(k)$ 의 용어 집합은 접속 경계 제어기에서 정의된 것을 사용하며, $N_d(k+1)$ 와 $D_d(k)$ 에 대한 용어 집합도 음성과 유사하게 정의한다. 제안 방식에서는 음성과 데이터가 분리된 접속 영역을 사용하기 때문에, 음성과 데이터의 전송 허용 확률 $p_v(k+1)$ 와 $p_d(k+1)$ 는 서로 독립적으로 결정된다. 이러한 두 가지 유형의 단말에 대한 전송 허용확률 결정은 Sugeno 유형의 12개의 퍼지 결정 규칙을 사용한다.

Rule j : IF $I(k+1)$ is X_{1j} , $N(k+1)$ is X_{2j} , and $D_v(k)$ is X_{3j} , THEN $p_{vj}(k+1)$

여기서 j 번째 규칙에 사용되는 $p_{vj}(k+1)$ 값의 선택 기준으로 두 측면을 고려할 수 있는데, 먼저 하나의 미니 슬롯에 한 사용자만 접속하도록 전송 허용 확률값을 정하는 것과 전송 지연에 비례하도록 정하는 것이다. 따라서 본 제어기에서는 $p_{vj}(k+1)$ 값을 제어기의 입력 변수의 함수로써 다음과 같이 결정한다.

$$p_{vj}(k+1) = \alpha_{vj} \cdot \frac{R(k+1)}{N_v(k+1)} + \beta_{vj} \cdot D_v(k) \quad (16)$$

$$p_{dj}(k+1) = \alpha_{dj} \cdot \frac{m(k+1) - R(k+1)}{N_d(k+1)} + \beta_{dj} \cdot D_d(k) \quad (17)$$

여기서 α_{vj} 와 β_{vj} 는 시뮬레이션을 통해 경험적으로 결정된다.

IV. 시뮬레이션 결과와 분석

본 장에서는 BONEs(Block Oriented Network Simulator)를 사용하여 III장에서 설계한 F²RAC의 성능 분석을 수행한다. 시뮬레이션에 사용되는 음성과 데이터 통합 시스템의 파라미터들은 참고문헌 [5]와 같다.

그림 3는 $P_{drop}^{max} = 0.01$ 의 QoS 제약을 갖는 음성의 패킷 손실 확률에 대한 성능 비교 결과로서, 모든 시스템들이 음성 패킷 손실 확률에 대한 QoS를 보장하는 것을 알 수 있다. 하지만 각각의 시스템이 음성의 QoS를 보장하기 위해 도입한 방안은 서로 다르다는 점을 인식하여야 한다. 즉, PRMA와 IPRMA는 음성에 비해 데이터의 전송 허용 확률을 아주 낮게 제한함으로써 음성과 데이터 패킷 전송 간에 발생하는 충돌 상황을 억제한다. 이 점은 데이터 패킷의 전송 지연을 가중시킬 수 있다. 음성/데이터 트래픽 간의 충돌을 허용하지 않는 F²RAC와 SIR은 서로 다른 데이터 전송 매커니즘을 사용하는데, F²RAC가 경쟁 방식의 예약 과정을 도입하는 반면에 SIR은 폴링 방식을 통한 예약 과정을 사용한다. 이 때 F²RAC는 접속 구간의 길이를 가변시키고 그에 따른 전송 허용 확률도 동적으로 변화시키는 적응적 시스템인데 반해, SIR은 폴링 주기를 고정하는 고정적 시스템이다. 이 점은 데이터의 성능에 큰 영향을 끼칠 수 있다.

그림 4와 5는 음성과 데이터를 각각 20개씩 지원할 때 데이터의 패킷 발생율을 가변시키면서 음성과 데이터의 전송 지연을 측정 한 결과이다. 음성 패킷이 겪는 평균 지연값이 패킷이 손실되는 지연 한계값인 32ms보다 작다는 것은 고려하는 모든 시스템이 음성 패킷의 손실 확률에 대한 QoS를 만족시킨다는 것을 뒷받침한다. 하지만 그림 5의 결과를 통해 본 논문에서 설계한 F²RAC 시스템이 월등히 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 즉, F²RAC 시스템만이 음성의 패킷 손실 확률 0.01을 만족하면서 동시에 보다 짧은 데이터 지연을 제공한다. 이러한 결과는 그림 6의 시스템의 자원 사용도와 데이터 패킷 발생율에 대한 측정 결과를 통해서 다시 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 프레임 구조를 갖는 무선 MAC 프로토콜 상에서 음성과 데이터를 효율적으로 통합하는 임의접속제어기 (F²RAC) 설계를 고찰하였다. 프레임 구조를 갖는 MAC 프로토콜에서 예약을 위한 임의접속제어기 고려해야 할 사항은 예약을 위해 할당해야 할 슬롯의 수와 해당 슬롯에 접속을 허용하는 확률 값의 결정이다. F²RAC는 퍼지 논리 제어를 통해 트래픽 부하에 따라 적응적으로 접속 슬롯 수를 조절하고, 또한 음성의 QoS 제약을 만족하면서 최대한 데이터 트래픽을 수용하기 위해 접속 슬롯들을 양분하여 트래픽 유형에 따른 독립적인 접속 구간과 접속 허용 확률을 결정한다.

참고문헌

[1] D. J. Goodman et al., "Packet reservation multiple access for local wireless communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, Aug. 1989.
 [2] W. C. Wong and D. J. Goodman, "A packet reservation multiple access protocol for integrated speech and data transmission," *IEE Proc.-1*, vol. 139, Dec. 1992

[3] G. Anastasi, D. Grillo, and L. Lenzini, "An access protocol for speech/data/video integration in TDMA-based advanced mobile systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 15, no. 8, Oct. 1997.
 [4] R. L. Rivest, "Network Control by Bayesian Broadcast," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. IT-33, no. 3, May 1987.
 [5] F.-C. Ren et al., "An intelligent transmission controller for TDMA/PRMA wireless multimedia communication systems," In *Proc. IEEE VTC'99 Fall*.

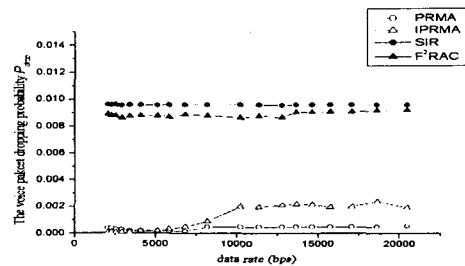


그림 3. 음성 패킷 손실 확률에 대한 성능 비교 (음성단말 수: 20, 데이터 단말 수: 20)

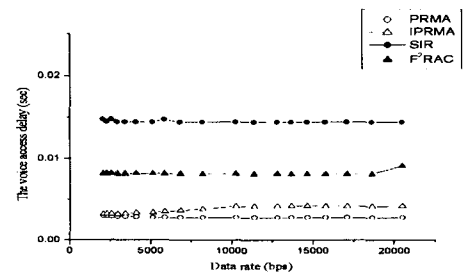


그림 4. 음성 패킷 지연에 관한 성능 비교

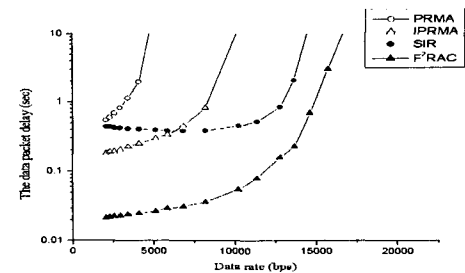


그림 5. 데이터 패킷 지연에 관한 성능 비교

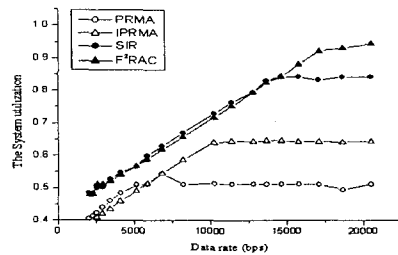


그림 6. 시스템 자원 사용도에 대한 성능 비교