

# 버스트 교환 방식 CDMA 시스템에서의 패킷 데이터 서비스를 위한 전송률 스케줄링 기법 비교 분석

정회원 김 미 정\*, 김 수 원\*\*

## Performance Analysis of Transmission Rate Scheduling Schemes for Integrated Service in Burst-Switching DS/CDMA System

Meejung Kim and Soo-Won Kim *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 패킷 데이터 서비스를 지원하는 DS/CDMA 시스템에서 역방향 링크의 대기 패킷 버스트들이 겪는 평균 전송 시간을 최소화하기 위한 여러 가지 패킷 스케줄링 방식을 비교 분석하였다. 모든 활성화된 데이터 사용자들이 동시에 전송을 하는 경우의 최적의 스케줄링 방식에 대하여 논하고 기존의 여러 가지 다른 전송률 스케줄링 방식들과의 수학적 비교 분석을 통하여 평균 전송 지연을 고려한 전송률 스케줄링 방식의 효율적인 지표를 제시하였다.

Key Words : Radio Resource Management; Code Division Multiple Access Rate Scheduling Optimal scheduling

### ABSTRACT

This paper shows the performance comparisons of several different rate scheduling schemes for non-real time data service over the uplink of burst switching-based direct sequence code division multiple access (DS/CDMA) system to support the integrated voice/data service. The closed-form solution of optimal scheduling formulation, which minimizes average transmission delay when all of the active data users are transmitting simultaneously, is presented and mathematical analyses with other rate scheduling schemes, which provide efficiency criterion of transmission delay for rate scheduling schemes, are performed. Numerical results show the analyses explicitly.

### 1. 서 론

제 4세대 이동통신 시스템의 가장 기본적인 설계 목표는 높은 전송률과 더불어 주파수 효율성의 극대화를 실현하는 것이다. 이를 위해 회선 교환 방식의 기존 음성 서비스뿐만 아니라 패킷 데이터 서비스의 통합을 전제로 하고 있으며, 특히 DS/CDMA 시스템에서는 데이터 트래픽의 특성을 고려하여 다중 접속(multiple access)에 의해 발생하는 간섭을

적절히 제어함으로써 각 서비스가 요구하는 품질을 만족시키면서 채널의 효율성을 극대화할 수 있는 매체접근제어(media access control: MAC) 프로토콜의 구현이 필수적이다. 역방향 링크의 경우에는 독립적으로 분산된 이동국들에 대한 트래픽 발생 특성을 알 수 없으므로 MAC 프로토콜을 통해 채널의 효율성을 극대화 시키면서 서비스 트래픽에 따른 지연시간 등의 QoS를 보장할 수 있어야 한다. 웹 브라우징이나 WWW 트래픽과 같이 고속 전송을

\* 고려대학교 BK21 정보기술사업단 (meejkim@korea.ac.kr)  
 \*\* 고려대학교 공과대학 전자공학과 (ksw@asic.korea.ac.kr)  
 논문번호: 030337-0806, 접수일자: 2003년 8월 6일

요하면서 버스티한 특성을 갖는 데이터 서비스의 성능을 향상시키기 위해 버스트 교환(burst switching)이라는 새로운 개념이 제안된 바 있다 [1]-[2]. 버스트 교환 방식에서는 기존의 패킷 교환 방식과 달리 일련의 패킷으로 구성된 버스트 단위로 무선 자원을 할당하고, 버스트가 종료되면 무선 자원을 해제하게 된다. 이 때 패킷 데이터 사용자가 겪는 지연 시간을 최소화하기 위해 미리 설정된 타 임어 값을 기준으로 물리계층과 상위 계층의 무선 자원에 대한 유지와 해제를 2단계의 절차에 따라 결정하게 된다 [1]. 고속 데이터 전송을 필요로 하는 경우 자원의 예약 요구 및 할당 메시지는 dedicated control channel 을 통하여 이루어진다. 특히 cdma2000에서는 supplementalcode channel 요구 메시지는 메시지의 길이나 이웃 셀의 파일럿 정보 등을 포함하는 반면 할당 메시지(assignment message)는 지속시간(duration), 시작시간(start time) 및 패킷의 전송률(rate) 등과 같은 스케줄링 파라미터들을 포함한다 [2].

기존 관련 연구는 하향 링크에서의 QoS를 보장하기 위한 전송률 스케줄링(rate scheduling) 문제 [3]-[6] 및 상향 링크를 고려한 문제들을 다루고 있다 [7]-[11]. [3]에서는 각 시분할 슬롯마다 한명의 사용자를 서비스하는 단일 서버 모델을 고려하였다. 즉 한번에 한 사용자에게 허용 가능한 최대의 전송률을 할당하고, 이때 잔여 수명이 최소가 되는 패킷을 우선적으로 전송하는 Earliest Deadline Algorithm (EDA)이 최적의 스케줄링 방식이라고 결론을 내렸다. 한편, CDMA 시스템의 특성에 따라 동시에 여러 사용자들을 다중화하여 서비스할 수 있는 다중 서버 모델에 기반을 두기도 하다. 예를 들어, [4]에서는 한 사용자에게 할당되고 남은 자원이 있는 한 적절하게 설정된 순위와 사용자간의 간섭을 고려하여 다른 사용자에게 남은 자원을 추가로 할당하는 PEDF (Powered Earliest Deadline First) 방식을 제안하였다. 또한, 유사한 방법으로 [5]에서는 가중치를 둔 잔여 수명을 패킷 길이로 정규화한 동적 우선 순위(dynamic priority)라는 새로운 메트릭(metric)을 고려하였다. 제안된 메트릭은 패킷의 길이가 짧고 잔여 수명이 짧은 패킷에 우선 순위를 주는 것이며, 간섭 제약식을 만족하는 한 우선 순위에 따라 패킷들에게 전송률을 할당한다. 또한 [6]에서는 셀간 간섭의 통제를 위하여 전력 제어 알고리즘과 셀내의 스케줄링 기법을 통합한 문제를 고려하였는데 전송 완료 시간을 최소화하기 위해서

는 한번에 하나씩 순차적으로 전송하는 단일 서버 모델이 효율적이라는 사실을 유도하였다. 그러나 기존의 스케줄링 방식은 우선 순위를 가진 패킷에 높은 전송률을 할당하는 것이므로 고속 데이터 서비스에 적합하지만 순위가 낮은 패킷은 서비스를 받지 못할 수 있다는 공정성 문제가 단점이 될 수 있다. 단일 서버 모델에서 이와 같은 공정성 문제를 해결하기 위해 제시된 대표적인 접근 방법은 cdma2000 1x EV-DO 시스템에서 제안된 Proportional Fairness 알고리즘이다.

버스트 교환 방식을 고려한 상향 링크는 시스템 내에서 동시에 다중버스트 데이터 전송률 할당 요구가 이루어지므로 이에 따른 전송률 스케줄링이 이루어져야 한다. [7]에서는 회선교환 방식하의 DS/CDMA 시스템에서 음성/데이터 통합 서비스에서의 데이터 사용자의 수율을 개선하는 방식을 고려하였고, [8]에서는 최대 전력과 비실시간 사용자들간의 간섭과 최대 가능한 전송 전력의 제한을 고려하면서 채널의 효율성을 극대화하기 위한 전송률 할당 방식을 고려하였다. [9]에서는 전송 지연 시간을 고려한 최적화 정칙을 통해 단일 서버 모델과 다중 서버 모델간의 득실관계를 고려한 최적해의 속성을 제시하였으나 복잡도로 인한 구현의 문제가 있으므로 최적의 스케줄링 방식을 구현하기 위하여는 휴리스틱한 접근 방법이 적합한 해의 형태라는 것을 유도하였다. 한편, [10]에서는 모든 활성 사용자들이 동시에 서비스되는 다중 서버 모델에서 평균 전송 지연을 최소화하면서 구현이 단순한 그룹 전송 기법(Length-based Group-wise Transmission Scheme: LGT)을 제안하였다. LGT 방식은 활성화된 모든 데이터 사용자를 특정 순위 메트릭(예를 들면 패킷 길이)에 의해 두 개의 서브 그룹(전송률 그룹)으로 나누어 각각의 전송률 그룹에 전송 지연이 최소가 되도록 전송률(dual-rate)을 할당하여 동시에 전송하는 방식이다. 또한 [11]에서는 평균 전송 지연과 전송 완료 시간을 동시에 최소화하는 최적의 스케줄링 문제를 정식화하였고 휴리스틱한 접근 방식으로서 Ordered Length-based Group-wise Transmission(OLGT) 방식을 제안하고 분석하였다. 본 논문에서는 활성화된 데이터 사용자들 동시에 서비스하는 다중 서버 모델에서 전송 지연을 최소화하는 최적해와 Shortest Processing Time First(SPTF) 알고리즘이나 LGT 방식과 같은 기존의 스케줄링들을 비교 분석하여 전송률 스케줄링 방식의 효율적인 지표를 제시하고자 한다.

## II. 시스템 모델 및 최적화 정식

### 1. 시스템 모델

확산 대역폭이  $W$ 이며, 음성과 데이터의 통합 서비스를 지원하는 단일 셀의 DS/CDMA 시스템에서 상향 링크를 고려한다. 음성 서비스에 대해서는 음성 활성 상태 검출(voice activity detection)이 가능하며,  $R_v$ (bps)의 고정된 전송률을 할당하는 회선 교환 방식이 적용된다. 반면, 데이터 서비스의 경우에는 시스템 내의 사용자 수에 의해 야기되는 간섭의 정도에 따라 데이터 전송률  $R_d$ (bps)를 패킷 단위로 동적으로 할당한다. 새로운 패킷 버스트가 발생하면 주기적으로 반복되는 스케줄링 시점까지 대기하고, 그 시점에서 모든 단말들의 패킷 전송 요구 사항에 따라 신호 대 간섭비의 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 최대 허용 가능한 전송률을 할당 받게 된다. 일단 데이터 전송률이 결정되면 해당 전용 트래픽 채널이 각 사용자에게 예약되고, 버스트의 전송이 종료될 때까지 고정적으로 할당된다. 버스트의 길이는 특정 크기에 의해 제한되고, 스케줄링 주기는 이 최대 버스트 길이보다 크다고 가정한다.

시스템 내에 있는 음성과 데이터 사용자의 수는 각각  $N_v$ 와  $N_d$ 로 나타낸다. 음성과 데이터 서비스의 요구 품질에 따라서 필요한 비트 오류율이 있으며, 이를 만족하기 위해 요구되는 비트 에너지 대 잡음비( $E_b/N_0$ )가 각각  $\eta_v$ 와  $\eta_d$ 로 주어졌다고 하자. 열잡음을 제외한 다른 잡음은 없다고 가정하고, 전력제어가 완벽하다고 가정하면 음성 및 데이터의 통합 서비스를 위해 다음과 같은 정규화 된 제약식을 만족해야 한다.

$$\frac{N_v}{W/\alpha_v R_v \eta_v + 1} + \frac{N_d}{W/\alpha_d R_d \eta_d + 1} \leq 1 \quad (1)$$

(1)식에서  $\alpha_v$ 는 회선 교환 방식에 따른 음성 트래픽의 활성비(voice activity factor)를 나타내며, 데이터 트래픽 채널은 버스트 전송이 끝날 때까지 채널을 고정적으로 사용하므로 데이터 서비스의 활성비는 1로 가정한다. (1)식에서 음성과 데이터 사용자에게 할당되는 전력비를 각각  $\Delta_v$ 와  $\Delta_d$ 로 표현한다.

### 2. 스케줄링 문제의 정식화

일반적인 전송 방식으로는 패킷 전송을 요청하는 모든 사용자들이 동시에 전송하도록 하는 방식(all-at-once transmission)과 한번에 한 사용자씩 순차적으로 전송하도록 하는 방식(one-at-a-time transmission)으로 크게 구분할 수 있다. 후자의 경우에 대하여는 처리시간이 가장 짧은 사용자부터 순차적으로 순서를 정해 모든 전송률  $R_{SPTF} = W/\eta_d \{1/(1-\Delta_v) - 1\}$ 를 할당하여 전송하는 Shortest Processing Time first (SPTF) 방식이 최적의 스케줄링 정책으로 알려져 있다 ([13]). 그러나, 여러 가지 물리계층의 제약에 따라 최대 허용 가능한 전송률이  $R_M$ (bps)로 제한될 수 있다. 반면에 전자의 경우 중에 패킷 전송 지연시간을 최소화 하기 위한 가장 단순한 방법은 모든 사용자들에게 단일의 전송률을 할당하되, (1)의 제약식을 만족하면서 패킷 전송 지연시간을 최소화하기 위한 전송률을 결정하는 단일 전송률(single rate, non-grouping transmission (NGT)) 방식이다. 이 경우에 모든 데이터 사용자에게 할당되는 전송률은  $R_{NGT} = W/\eta_d \{N_d/(1-\Delta_v) - 1\}$ 이다. 전자의 또 다른 스케줄링 기법은 특정한 순위 메트릭에 따라 전송 지연이 최소가 되도록 모든 데이터 사용자들 두 개의 그룹(전송률 그룹)으로 나누고 적절한 전송률을 할당하는 LGT가 있다.

그러나 최적의 스케줄링 방식은 두 가지의 극단적인 스케줄링 방식을 혼합한, 즉 특정 순서에 의해 동시에 전송되는 일부 사용자들의 그룹화와 각 그룹에서 전송되는 각 사용자들의 개별 전송률을 결정하는 방식, 것일 것이다. [11]에서는 전송 지연 시간 및 전송 완료 시간을 최소화하기 위한 정식을 고려하였는데 그 정식은 NP-hard문제이므로 Ordered Length-based Group-wise Transmission (OLGT) 방식이라는 휴리스틱한 접근 방법을 제시하고 분석하였다. OLGT 방식에서는 순위 메트릭에 의해 모든 데이터 사용자가 그룹화(전송 시간 그룹)되고 각 전송 시간 그룹 또한 순위 메트릭에 따라 두개의 서브 그룹(전송률 그룹)으로 나누어 LGT 방식에 의해 전송률을 결정한 후 특정 순서에 의해 전송한다. OLGT 방식의 목적은 전송 지연 시간 및 전송 완료 시간을 최소화하기 위하여 전송 시간 그룹과 전송 시간 그룹내의 전송률 그룹에 각각의 전송률을 할당하고 전송 순서를 결정하는 것이다.

동시에 전송되는 데이터 사용자의 수를  $N_d$  라고 하자.  $i$  번째 데이터 사용자의 패킷 길이를  $L_i$  라고 하고 그들이 할당 받는 데이터 전송률을  $R_i$ ,  $i=1,2,\dots,N_d$ , 라 하면 스케줄링 문제를 다음과 같은 최적화 정식으로 표현할 수 있다.

$$(P) \quad \min_{\mathbf{R} \in F} \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \frac{L_i}{R_i}$$

(P)는 평균 전송 지연을 최소화하는 관점에서의 최적화 정식이며 feasible set  $F$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$F = \{\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_{N_d}) : 0 < R_i, \Delta_v + \sum_{i=1}^{N_d} P_i \leq 1, \\ P_i = 1/(W/R_i\eta_d + 1), i=1, \dots, N_d\}$$

여기서  $P_i$ 는 정규화 된 전력이며 정식 (P)의 전송 지연을  $E_p(D)$ 로 나타내기로 한다.

Proposition 1. (P)의 최적해  $(R_1, R_2, \dots, R_{N_d}) \in F$ 는 다음 두 식을 만족하는 벡터  $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_{N_d})$ 에 의하여 얻는다.

$$\Delta_v + \sum_{i=1}^{N_d} P_i = 1, \quad \frac{L_1}{P_1^2} = \frac{L_2}{P_2^2} = \dots = \frac{L_{N_d}}{P_{N_d}^2}$$

(P)를 최소화하는 전송률  $R_i$ 와 그 때의 (P)의 값  $E_p(D)$ 는 다음과 같다.

$$R_i = (1 - \Delta_v)W \sqrt{L_i} / \left\{ \eta_d \left( \sum_{i=1}^{N_d} \sqrt{L_i} - (1 - \Delta_v) \sqrt{L_i} \right) \right\} \\ E_p(D) = \frac{\eta_d}{N_d W} \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_d} \sqrt{L_i} \right)^2}{1 - \Delta_v} - \sum_{i=1}^{N_d} L_i \right] \quad (2)$$

Proposition 1의 증명은 Lagrange multiplier 방법을 사용하였으며 증명은 [14]에서 볼 수 있다.

### III. 성능 분석

본 장의 분석에서는 최대 허용 전송률을 고려하지 않는다 (즉  $R_i < \infty$ ). 데이터 사용자의 패킷 길이  $\{L_i\}_{i=1}^{N_d}$ 는 서로 독립이고 평균 길이가  $1/\mu$ 인 지수 분포를 따른다고 가정한다. (independent identically distributed: i.i.d.). 본 분석에서는 패킷 길이를 순위로 고려한 LGT 방식과 OLGT 방식을 다룰 것이므로 일반성을 잃지 않고 패킷의 길이는 모두 다르다고 가정하고 다음과 같이 패킷 길이를 증가하는 순서로 재배열한 순서 통계량(order statistics)  $\{L_{(i)}\}$ 를 고려하자.

$$L_{(1)} < L_{(2)} < \dots < L_{(k)} < L_{(k+1)} < \dots < L_{(N_d)}$$

이 패킷 길이에 대하여 NGT 방식과 SPTF 방식에 의한 전송 지연  $E_{NGT}(D)$ ,  $E_{SPTF}(D)$ 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$E_{NGT}(D) = \frac{1}{\mu R_{NGT}} \quad (3)$$

$$E_{SPTF}(D) = \frac{1}{\mu R_{SPTF}} \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{i=0}^{j-1} \frac{N_d - j + 1}{N_d - i} = \frac{N_d + 3}{4\mu R_{SPTF}} \quad (4)$$

또한 LGT 방식과 OLGT 방식에 의한 전송 지연  $E_{LGT}(D)$ 와  $E_{OLGT}(D)$ 은 각각 다음과 같다 [10-11].

$$E_{LGT}(D) = \frac{1}{N_d \mu} \left[ \frac{1}{R_{\min}^{(LGT)}} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{N_d - i} + \frac{1}{R_{\max}^{(LGT)}} \sum_{i=k}^{N_d} \frac{1}{N_d - i} \right] \quad (5)$$

$$E_{OLGT}(D) = \frac{1}{N_d \mu} \left[ \frac{1}{R_{\min}^{(OLGT)}} \sum_{j=1}^{k_{\min}} \left\{ n \sum_{i=0}^{j-1} \frac{1}{N_d - i} + (n-1) \sum_{i=0}^{k_{\min}-j} \frac{1}{N_d - i} \right. \right. \\ \left. \left. + (n-2) \sum_{i=0}^{k_{\min}-j-1} \frac{1}{N_d - i} + \dots + \sum_{i=0}^{k_{\min}-j} \frac{1}{N_d - i} \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{R_{\max}^{(OLGT)}} \sum_{j=1}^{k_{\max}} \left\{ n \sum_{i=0}^{j-1} \frac{1}{N_d - i} + (n-1) \sum_{i=0}^{k_{\max}-j} \frac{1}{N_d - i} \right. \right. \\ \left. \left. + (n-2) \sum_{i=0}^{k_{\max}-j-1} \frac{1}{N_d - i} + \dots + \sum_{i=0}^{k_{\max}-j} \frac{1}{N_d - i} \right\} \right] \quad (6)$$

여기서  $R_{\min}^{(LGT)}$  ( $R_{\min}^{(OLGT)}$ ) 와  $R_{\max}^{(LGT)}$  ( $R_{\max}^{(OLGT)}$ )는 LGT (OLGT) 방식에서 전송 시간 그룹 내의 두

전송률 그룹에 할당하는 전송률이고,  $k_{i,\min}$  와  $k_{i,\max}$  는  $i$  번째 전송 시간 그룹의 각각의 전송률 그룹을 결정하는 경계수이다. 그림 1은  $N_d = 18$  이고 3개의 전송 시간 그룹을 고려한 경우의 경계수들과 OLGT 방식의 알고리즘을 도시한 것이다.

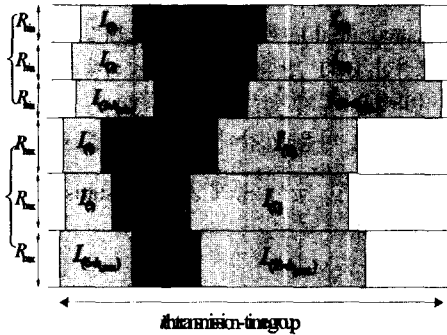


그림 1. OLGT 스케줄링 알고리즘 ( $N_d = 18$ , 3 전송 시간 그룹)

다음 분석은 여러 가지 전송률 스케줄링 방식들의 전송 지연을 비교한 것으로 여러 가지 경우에 따른 효율적인 방식을 제안한다.

**Theorem 1.** (a)  $N_d \geq \frac{\pi + 6\Delta_v}{\pi - 2\Delta_v}$  인 경우에는

$$E_{SPTF}(D) \leq E_p(D) \text{ 이 성립한다.}$$

(b) 모든  $N_d \geq 1$  인 경우에 다음 식이 성립한다.

$$0 \leq E_{OLGT}(D) - E_p(D) = [\eta_d \{ (1 - \pi/8)N_d + \pi/8 - (1 - \Delta_v) \}] / \{ \mu W (1 - \Delta_v) \},$$

(c) 모든  $N_d \geq 1$  인 경우에 다음 식이 성립한다.

$$E_p(D) \leq E_{LGT}(D),$$

$$|E_{LGT}(D) - E_p(D)| \leq \frac{1}{\mu} \left| \frac{b + a(1-b)}{aR_{\max}^{(LGT)}} - \frac{\pi\eta_d(N_d - 1)}{8W(1 - \Delta_v)} \right|$$

여기서  $a$  와  $b$  는 LGT 방식에 의한 값으로 각각 0.44 와 0.54 이다.

(d)  $|E_{OLGT}(D) - E_p(D)|$

$$\leq \frac{1}{\mu N_d} \left| \frac{[N_d/2] \left( \frac{3}{2} + 2a(1-b) + b \right) - \frac{\pi\eta_d(N_d - 1)}{8W(1 - \Delta_v)}}{aR_{\max}^{(OLGT)}} \right|$$

여기서  $E_{OLGT}(D)$  는 두 개의 전송 시간 그룹을 고려하였고, 즉  $k_{1,\max} = \lceil N_d/2 \rceil$  와  $k_{2,\max} = N_d$ ,  $E_p(D)$  는 한 개의 전송 시간 그룹을 고려하였으며,  $a$  와  $b$  는 (c)에서와 같은 값이다.

**증명** (a)  $L_i$  들은 독립이고

$E(\sqrt{L_i}) = \int \sqrt{l} \mu e^{-\mu l} dl = \sqrt{\pi}/2\sqrt{\mu}$  이므로  $E_p(D)$  는 다음과 같이 주어진다.

$$E_p(D) = \frac{\pi\eta_d(N_d - 1)}{8\mu W(1 - \Delta_v)} \quad (7)$$

반면에 식(4)와  $R_{SPTF} = W/\eta_d \{1/(1 - \Delta_v) - 1\}$  를 이용하면  $E_{SPTF}(D)$  는 다음과 같이 주어진다.

$$E_{SPTF}(D) = \frac{\eta_d \Delta_v}{\mu N_d W (1 - \Delta_v)} \left\{ \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{i=0}^{j-1} \frac{1}{N_d - i} \right\} = \frac{\eta_d \Delta_v (N_d + 3)}{4\mu W (1 - \Delta_v)}$$

그러므로  $N_d \geq \{ \pi + 6\Delta_v \} / \{ \pi - 2\Delta_v \}$  인 경우 (a)의 부등식은 명백하다.

(b) 식(3)과 식(7)에 의하여 두 번째 등식은 명백하고  $N_d = 1$  와  $\Delta_v = 0$  인 특별한 경우(첫 번째 부등식에서 등식 성립)를 제외하면 첫 번째 부등식에서는 항상 부등식이 성립한다.

(c)  $E_p(D)$  가 (P)의 최적의 값이므로  $E_p(D) \leq E_{LGT}(D)$  는 명백하며 두 번째 부등식은 다음과 같이 분석된다.

$$\begin{aligned} |E_{LGT}(D) - E_p(D)| &= \frac{1}{\mu N_d} \left| \frac{1}{aR_{\max}^{(LGT)}} \sum_{j=1}^{\lceil bN_d \rceil - 1} \sum_{i=0}^{j-1} \frac{1}{N_d - i} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R_{\max}^{(LGT)}} \sum_{j=\lceil bN_d \rceil}^{N_d - 1} \sum_{i=0}^{j-1} \frac{1}{N_d - i} - \frac{\pi\eta_d N_d (N_d - 1)}{8W(1 - \Delta_v)} \right| \\ &\leq \frac{1}{\mu N_d} \left| \frac{N_d b + N_d a(1-b)}{aR_{\max}^{(LGT)}} - \frac{\pi\eta_d N_d (N_d - 1)}{8W(1 - \Delta_v)} \right| \\ &\leq \frac{1}{\mu} \left| \frac{b + a(1-b)}{aR_{\max}^{(LGT)}} - \frac{\pi\eta_d (N_d - 1)}{8W(1 - \Delta_v)} \right| \end{aligned}$$

(d) 식 (6) 에서  $k_{1,\min} = \lceil b \lceil N_d/2 \rceil \rceil$ ,  $k_{1,\max} = \lceil N_d/2 \rceil$ ,  $k_{2,\min} = \lceil N_d/2 \rceil + \lceil b \lceil N_d/2 \rceil \rceil$ ,  $k_{2,\max} = N_d$ , 와  $R_{\min}^{(OLGT)} = aR_{\max}^{(OLGT)}$  ((11)) 인 경우  
 이므로, 다음과 같은 식을 얻는다.

$$E_{OLGT}(D) = \frac{1}{\mu N_d} \left[ \frac{1}{aR_{\max}^{(OLGT)}} \sum_{j=1}^{\lceil N_d/2 \rceil} \left\{ 2 \sum_{i=0}^{j-1} \frac{1}{N_d-i} + \sum_{i=0}^{\lceil N_d/2 \rceil - j} \frac{1}{N_d-i} \right\} \right. \\
 + \left. \frac{1}{R_{\min}^{(OLGT)}} \sum_{j=1}^{\lceil N_d/2 \rceil} \left\{ 2 \sum_{i=0}^{\lceil N_d/2 \rceil - j - 1} \frac{1}{N_d-i} + \sum_{i=0}^{\lceil N_d/2 \rceil - j} \frac{1}{N_d-i} \right\} \right] \\
 \leq \frac{1}{\mu N_d} \left\{ \frac{N_{OLGT}}{aR_{\max}^{(OLGT)}} \left( \frac{3}{2} + 2a(1-b) + b \right) \right\} \quad (8)$$

식(7) 과 식(8)로부터 (d)의 결과를 얻는다.

전송 시간 그룹이 3개 이상인 경우는 전송 지연 이 순서 통계량  $L_{(i)}$  의 확률 밀도 함수

$$f_{L_{(i)}}(t) = N_d \binom{N_d-1}{i-1} (1 - e^{-\mu t})^{i-1} e^{-(N_d-i)\mu t} \mu e^{-\mu t}$$

((15)) 를 포함하므로 이를 이용하면  $E_p(D)$  는 다음과 같이 계산된다.

$$E_p(D) = \frac{\eta_d}{WN_d(1-\Delta_v)} E \left\{ 2 \left( \sum_{i=1}^{N_{OLGT}} \sqrt{L_{(i)}} \sqrt{L_{(i)}} + \Delta_v \sum_{i=1}^{N_{OLGT}} L_{(i)} \right) \right\} \\
 + \left( \left( \sum_{i=1}^{N_{OLGT}} \sqrt{L_{(i)}} \right) \left( \sum_{i=1}^{N_{OLGT}} \sqrt{L_{(i+N_{OLGT})}} \right) - (1-\Delta_v) \sum_{i=1}^{N_{OLGT}} L_{(i+N_{OLGT})} \right)$$

여기서  $E(\sqrt{L_{(i)}})$  는 다음과 같이 주어진다.

$$E(\sqrt{L_{(i)}}) = \sqrt{\pi} N_d \binom{N_d-1}{i-1} \mu \sum_{k=0}^{i-1} (-1)^k \binom{i-1}{k} \frac{1}{(\mu k + N_d - i + 1)^{3/2}}$$

3개 이상의 전송 시간 그룹을 고려하는 경우에 첫 번째 전송 시간 그룹에 속한 패킷들의 전송 완료 시간은 동일하지 않으므로 첫 번째 전송 시간 그룹에 할당된 전송률은 두 번째 전송 시간 그룹의 전송에는 최적이지 아닐 수 있다. 즉 첫 번째 전송 시간 그룹에서(P)식을 만족하는 데이터 전송률은 전체적인 전송 지연을 최소화하는 전송률이 아닐 수 있으므로 결국 실제적인 최적의 전송 방식은 아닐 수

있음을 주목하자. 또한 최대 허용 전송률을 고려하지 않는 경우, 즉  $R_i < \infty$  인 경우에 목적 함수가 에너지 효율이나 전송 완료 시간인 경우에는 SPTF 방식이 최적으로 알려져 있으나, Theorem 1 (a)에 의하면 목적 함수가 전송 지연인 경우에는 더 이상 SPTF 방식이 최적이지 않음을 알 수 있다.

Remark 1. 패킷 길이가 일정하게  $L$  인 경우 모든  $N_d \geq 1$  에 대하여  $E_{SPTF}(D) = (\eta_d \Delta_v L (N_d + 1)) / 2W(1-\Delta_v)$  과  $E_{NGT}(D) = E_{LGT}(D) = E_p(D) = \frac{\eta_d L (N_d - (1-\Delta_v))}{W(1-\Delta_v)}$  이 성립하므로 다음과 같은 전송 지연의 관계식을 얻는다.

$$E_{SPTF}(D) \leq E_{NGT}(D) = E_{LGT}(D) = E_p(D).$$

또한 이 경우에 두 개의 전송 시간 그룹을 고려하면, 즉  $k_{1,\max} = \lceil N_d/2 \rceil$ ,  $k_{2,\max} = N_d$ , OLGT 방식에 의한 전송 지연  $E_{OLGT}(D)$  과 (P)의 최적해  $E_p(D)$  는 다음과 같이 계산된다.

$$E_{OLGT}(D) = E_p(D) = \frac{L}{N_d R} (2N_d - k_{1,\max})$$

여기서 데이터 전송률  $R$  은 식  $\Delta_v + k_{1,\max} / \{(W/R\eta_d) + 1\} \leq 1$  을 만족하고 두 번째 전송 시간 그룹은 첫 번째 전송 시간 그룹의 전송 완료 시간까지 기다려야 하므로 전송까지 기다린 시간이 포함되어 있음에 주목하자.

Remark 2. 최대 허용 전송률  $R_M$  을 고려하는 경우는 위의 분석에서  $R_M$  보다 큰 전송률은  $R_M$  으로 바꾸면 된다.

#### IV. 분석 결과 및 결론

본 분석에서는 다음과 같은 시스템 파라미터를 사용하였다.  $W = 5\text{MHz}$ ,  $\alpha_v = 3/8$ ,  $R_s = 9.6\text{kbps}$ ,  $\eta_v = 7\text{dB}$ ,  $\eta_d = 10\text{dB}$ , and  $1/\mu = 25,000$  bits. 그림 2에서는 최대 허용 전송률을 고려하지 않고 (즉  $R_i < \infty$ ) OLGT 방식은 두 개의 전송 시간 그룹,

나머지 방식은 한 개의 전송 시간 그룹인 경우의 전송 지연을 비교하였다. Theorem 1 (a)를 만족하는  $N_d$ 에 대하여는 SPTF 방식이 최적이지만 (P)의 최적해와의 차이는 아주 작음을 알 수 있다. 또한 혼합 방식인OLGT 방식은 모든 데이터 사용자들 동시에 전송하는 방식 중 (P)의 최적해를 제외하고는 항상 성능이 우수함을 알 수 있다. 그림 3은 최대 허용 전송률이 고려되지 않은 경우라도 에너지 효율의 측면이 아닌 전송 지연의 측면에서 볼 때 SPTF방식이 항상 최적의 방식이아님을 보여준다. SPTF 방식이 최적이지 않은 영역이 많은 부분을 차지하고 있지는 않지만 이 영역에서는 사용자들의 간섭이 전송 지연에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 최대 허용 전송률  $R_M$ 이 고려된 경우에 4가지의 스케줄링 방식의 전송 지연을 비교하였다. SPTF 방식의 경우  $R_M$ 이 작으면 자원 낭비가 발생하므로 SPTF 방식이 최적이지 않음을 알 수 있다. 예를 들면  $R_M = 384$  kbps 인 경우는 두 개의 전송 시간 그룹을 고려한 OLGT 방식이 거의 가장 성능이 우수하고 (P)의 최적해와 SPTF 방식이 차이가 거의 없는 반면  $R_M = 64$  kbps인 경우는 OLGT 방식과 (P)의 최적해가 SPTF 방식보다 성능이 월등히 우수함을 알 수 있다.  $R_M = 384$  kbps 인 경우 데이터 사용자의 수가 증가할수록 전송 지연들이 급격한 차이를 나타냄을 볼 수 있는데 이는 데이터 사용자의 수가 많을수록 OLGT 방식이나 (P)의 최적해가 좋은 방식임을 의미한다고 하겠다. 최대 허용 전송률  $R_M$ 에 상관없이, 고려되거나 고려되지 않거나, 데이터 사용자나 음성 사용자의 증가는 전송 지연의 차이를 증가시킴을 알 수 있다.

본 논문에서는 CDMA 네트워크에서 모든 데이터 사용자를 동시에 전송하는 방식의 최적해에 대하여 고찰하였다. 동시에 전송하는 모든 데이터 사용자의 전송률을 한번에 결정하는 것은 동적 우선 순위에 의하여 전송하는 방식보다는 복잡도가 작아질 수 있다는 점에서 효율적이며, 데이터 전송률의 구체적인 형태는 효율적인 전송 방식을 구현하는데 간단한 수단을 제공한다. 분석에서 나타난 바와 같이 (P)의 최적해는 기존의 다중 서버 모델 및 경우에 따라서는 최대 허용전송률이 고려된 경우의 단일 서버 모델보다 좋은성능을 나타내었다. 본 논문에서

고려된 방식이 데이터 사용자들의 전송 시작 시간을 달리하는 스케줄링 방식(NP-hard problem)을 포함하는 모든 전송률 스케줄링 방식을 고려했을 때 최적은 아니지만 본분석은 전송률 스케줄링 방식의 효율성을 판단하는 좋은 지표가 될 것이다.

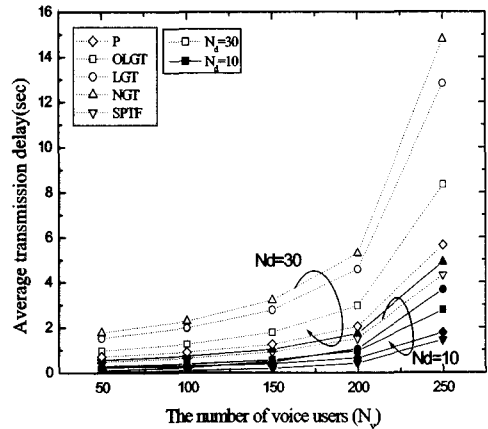


그림 2. 여러 가지 스케줄링 방식의 성능 비교 ( $R_i < \infty$ )

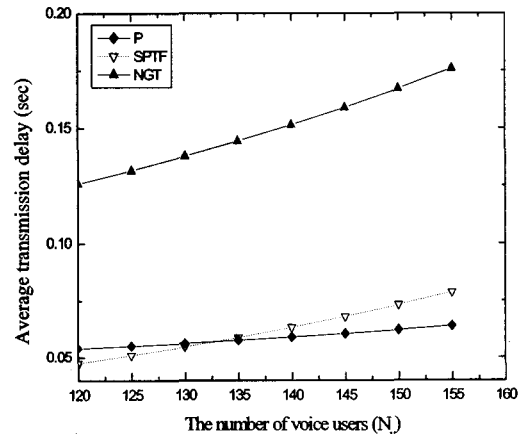


그림 3. 구체적인 영역에서의 성능비교 ( $R_i < \infty, N_d = 2$ )

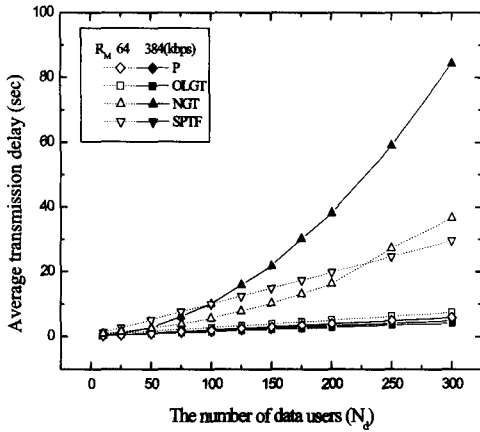


그림 4. 구체적인 영역에서의 성능비교 ( $R_i < \infty$ ,  $N_d = 2$ )

### 참고문헌

[1] M. O. Sunay, Tekinay, and . Z. zer, "Efficient Allocation of Radio Resources for CDMA Based Wireless Packet Data Systems," Proc. IEEE Globecom'99, Vol.1, pp. 638-643, Dec. 1999.

[2] C.2005-A, Upper Layer (Layer 3) Signaling Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, March 2000.

[3] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, and P. Whiting, "Data Rate Scheduling Algorithms and Capacity Estimates for the CDMA Forward Link," Bell Labs Technical Journal, September 13, 1999.

[4] A. C. Varsou, H. C. Huang, and L. Mailaender, "Rate Scheduling for CDMA Downlink Mixed Traffic Networks," Proc. WCNC 2000, vol. 1, pp. 370-375, 2000.

[5] A. C. Varsou and H. V. Poor, "HOLPRO: A New Rate Scheduling Algorithm for the Downlink of CDMA Networks," Proc. Vehicular Technology Conference (Fall), vol. 2, pp 948-954, 2000.

[6] F. Berggren, S.-L. Kim, R. Jantti, and J. Zander, "Joint Power Control and Intracell Scheduling of DS-CDMA Non-real Time

Data," IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 19, no.10. pp. 1860-1870, 2001.

[7] H. Kang and K. Kim, "Throughput enhancement scheme for integrated voice/data DS-CDMA system: Rated-based grouping transmission," IEE Electronics Letters, vol. 35, no.17, pp. 1437-1438, August, 1999.

[8] S.-J. Oh and K. M. Wasserman, "Optimality of greedy power control and variable spreading gain in multi-class CDMA mobile networks," Proc. ACM/IEEE MobiCom'99, pp. 102-112, 1999.

[9] R. Jantti and S.-L. Kim, "Transmission Rate Scheduling for the Non-Real-Time Data in a Cellular CDMA System," IEEE Commun. Letters, vol. 5, no. 5, May 2001.

[10] M. Kim, C. G. Kang, and R. R. Rao, "Group-wise Transmission Rate Scheduling Scheme for Integrated Voice/Data Service in Burst-Switching DS/CDMA System," IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, no. 8, August 2002.

[11] M. Kim, C. G. Kang, I-C Choi, and R. R. Rao, "Scheduling Scheme of Packet Length-based Group-wise Transmission for Integrated Voice/Data Service in Burst-Switching DS/CDMA System," IEEE ICC 2002, vol. 1, pp. 381-385, 2002.

[12] T. Ito et al., "A Wireless Packet Transmission with Adaptive Processing Gain and Transmitter Power Control Scheme for Circuit-Switched and Packet-Switched Modes Integrated DS/CDMA System," IEEE Vehicle Technology Conference, pp. 2039-2043, 1999.

[13] M. Pinedo, Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Prentice Hall, 1995.

[14] 김미정, 최인찬, 강충구, Ramesh R. Rao, "버스트 교환 방식 CDMA 시스템에서의 패킷 데이터 서비스를 위한 전송률 스케줄링 기법," 한국통신학회논문지 '02-12, vol. 27, no. 12B, pp. 1102-1113, 2002.

[15] W. Feller, An introduction to probability theory and its applications, vol. II, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1971.



김 미 정(Meejoung Kim)



1986년 2월: 고려대학교  
수학과 졸업

1986년 2월: 고려대학교  
수학과 석사

1992년 12월: University of  
Minnesota 수학과 석사,  
박사과정수료

1996년 8월: 고려대학교 수학과 박사

1996년-1999년: 고려대학교 박사 후 연구원, 강사

2000년-2002년: 고려대학교 BK21 정보기술단  
연구원

2003년-2004년 현재: 고려대학교 BK21 정보기술단  
연구교수

<관심분야> scheduling and pricing in wireless  
networks, Ad-Hoc networks, white  
noise analysis

김 수 원(Soo-Won Kim)

정회원



1974년 2월 : 고려대학교  
전자공학과 졸업

1983년 2월 : TEXAS A&M  
전자공학과 석사

1987년 2월 : TEXAS A&M  
전자공학과 박사

1987년 9월~현재 : 고려대학교  
전자공학과 교수

<관심분야> 아날로그/디지털 VLSI 설계 기술 개발,  
이동 통신용 부품설계, 고성능 연결망  
용 트랜시버 IC 설계