

# 무선 채널의 에너지 소비를 줄이기 위한 공평 큐잉 알고리즘

김 태 준<sup>†</sup>

## 요 약

품질 보장을 요구하는 실시간 멀티미디어 서비스가 이동 무선 네트워크로 확산됨에 따라 무선 채널에서 에너지 효율의 중요성이 더욱 강조되고 있으며, DMS(Dynamic Modulation Scaling)의 도입으로 스케줄러의 출력 링크의 속도를 낮춤으로서 무선 채널의 에너지 소비를 줄일 수 있게 되었다. 본 연구에서는 WFQ (Weighted Fair Queuing)의 대역폭 이용도 저하 문제를 해결한 LOFQ(Latency-Optimized Fair Queuing)를 확장하여 출력 링크의 속도를 줄일 수 있는 공평 큐잉 알고리즘인 REFQ(Rate Efficient Fair Queuing)를 제안하고 성능을 평가한다. 평가결과 WFQ에 비해서 35%의 링크 속도 절감 효과를 얻었고, DMS 무선 모뎀에 적용 시 에너지 소비를 최대 90% 정도 줄일 수 있었다.

## A Fair Queuing Algorithm to Reduce Energy Consumption in Wireless Channels

Tae Joon Kim<sup>†</sup>

## ABSTRACT

Since real-time multimedia applications requiring quality-of-service guarantees are spreading over mobile and wireless networks, energy efficiency in wireless channels is becoming more important. Energy consumption in the channels can be reduced with decreasing the rate of scheduler's outgoing link by means of Dynamic Modulation Scaling (DMS). This paper proposes a fair queuing algorithm, termed Rate Efficient Fair Queuing (REFQ), in order to reduce the outgoing link's rate, which is based on the Latency-Optimized Fair Queuing algorithm developed to enhance Weighted Fair Queuing (WFQ). The performance evaluation result shows that REFQ does decrease the link rate by up to 35 % in comparison with that in WFQ, which results in reducing the energy consumption by up to 90% when applied to the DMS based radio modem.

**Key words:** Wireless Channel(무선 채널), Fair Queuing(공평 큐잉), Energy Efficiency(에너지 효율), WFQ(WFQ)

## 1. 서 론

센서 네트워크의 개발, 무선 LAN의 활성화 및 무선 인터넷의 도입으로 유비쿼터스 시대가 현실화되고 있으며, 인터넷 전화와 같은 고 수준의 품질을 요

구하는 실시간 멀티미디어 통신 서비스가 유비쿼터스 환경으로 급속히 확산되고 있다. 이동 무선 통신 환경에서 이러한 서비스를 원활히 제공하기 위해서는 품질 보장 기술과 더불어 통신장치의 배터리 가동시간을 늘리기 위한 에너지 절약 기술도 매우 중요하다.

\* 교신저자(Corresponding Author) : 김태준, 주소 : 충남 천안시 부대동 275번지(330-717), 전화 : 041)550-0209, FAX : 041)556-6447, E-mail : tjkim@kongju.ac.kr

접수일 : 2006년 12월 19일, 완료일 : 2007년 6월 15일  
<sup>†</sup> 정회원, 공주대학교 정보통신공학부

트래픽 흐름의 요구속도를 충족시키는 대역폭 품질 보장과 약속된 지연한계를 준수하는 지연 품질 보장을 위해 공평 페킷 스케줄러가 사용되며, 무선채널을 위해 다양한 스케줄링 방식[1-3]이 연구되었다. 이들은 모두 무 에러(error-free) 무선 채널에 대한 공평 큐잉 기법과 에러 보상 기법으로 구성되며, 전자는 대부분 이상적 알고리즘인 General Processor Sharing (GPS)[4]을 구현한 Weighted Fair Queuing (WFQ)[5]을 따르고 있다. 그러나 WFQ는 속도와 지연의 결합 특성으로 인해 대역폭 이용도가 저하되는 문제점을 갖고 있다[6]. 최근에 흐름의 레이턴시를 그의 지연규격, 즉 최적 레이턴시와 항상 일치하게 하여 이러한 문제점을 해결한 Latency-Optimized Fair Queuing (LOFQ)가 개발되었다[7,8].

이동 무선 통신장치의 에너지 소비는 CPU 기반의 연산동작에 따른 연산 에너지 소비와 무선 전송에 따른 무선 채널 에너지 소비로 구분할 수 있다. 전자를 줄이기 위해 전압을 동적으로 제어하는 DVS (Dynamic Voltage Scaling)가 개발되었고[9], 후자를 줄이기 위해 무선 채널의 전송 속도를 동적으로 조절하는 DMS(Dynamic Modulation Scaling)가 개발되었다[10]. 후자가 전자 보다 훨씬 크기 때문에 후자, 즉 무선 채널 에너지 소비를 줄이는 것이 중요한데, 이를 위해 스케줄러의 출력 링크의 속도를 줄여야 한다[10].

링크 속도를 줄이기 위해 Lazy 알고리즘[11]과 Energy Efficient Weighted Fair Queuing ( $E^2$ WFQ) [12]가 연구되었다. Lazy 알고리즘에서는 트래픽의 간헐성 특성을 이용하여 흐름에 할당되는 속도를 줄이는 것으로 고정 속도 트래픽의 경우 간헐성이 없으므로 개선효과를 기대할 수 없다.  $E^2$ WFQ 역시 트래픽의 간헐성 특성을 이용하여 출력 링크의 속도를 줄이며, 최악의 경우 지연품질의 회생도 감수하나 슬랙(slack)을 활용하여 지연품질을 느슨하게 함으로서 지연품질의 회생을 최소화한다. 슬랙이란 자원 예약 프로토콜 (RSVP: Reservation Protocol)로 종단간 지연한계 값을 각 노드에 배분함에 있어 유연성(flexibility)을 위해 도입된 일종의 여유 지연시간이다. 따라서  $E^2$ WFQ는 슬랙에 여유가 없을 경우 지연 품질이 보장되지 않는 문제점을 내포하고 있다.

본 연구는 무선 채널의 에너지 소비를 줄이기 위한 것으로 LOFQ를 확장하여 스케줄러의 출력 링크

의 속도를 줄일 수 있는 공평 큐잉 알고리즘을 제안한다. 2장에서 관련 연구를 살펴보고, 3장에서 제안된 방식을 기술하며, 4장에서 제안된 방식의 성능특성을 평가하고 5장에서 결론을 정리한다.

## 2. 관련 연구

먼저 [10]의 연구결과를 참조하여 DMS 무선 모뎀에서 무선 채널의 속도와 소비 에너지의 관계를 살펴보자. 무선채널로 정보를 전송하기 위해 먼저 비트열을 채널 심볼로 부호화한다. 하나의 심볼에 담을 수 있는 비트 수를 변조레벨  $n$ 라 하며, 소비 에너지와 채널 속도의 이율 배반(trade-off)을 조절하는데 사용된다. 한 비트 전송 시간  $T_{bit}$ 는 다음과 같이 주어진다:  $T_{bit}=1/(nR_S)$ , 여기서  $R_S$ 는 심볼속도, 즉 초당 전송되는 심볼의 수이다. 그리고 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 방식으로 변조할 경우 한 비트 전송에 소비되는 에너지  $E_{bit}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$E_{bit}=C_S(2^n-1)/n+C_E/n, \quad (1)$$

여기서  $C_S$ 와  $C_E$ 는 무선모뎀의 구현에 의해 결정되는 상수이다. (1)로부터 스케줄러의 출력 링크의 속도 증가 시  $n$ 값이 증가하므로 무선채널의 에너지 소비가 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

다음은 무선 채널에서의 공평 큐잉 알고리즘에 대해 살펴보자. 유선 채널에서의 공평 큐잉 알고리즘과 동일하나 무선 채널의 에러 특성을 수용하기 위한 별도의 기법이 추가된다. 무선 채널의 에러 특성을 살펴보면 다중 경로 전파 등에 기인하는 위치 의존적인 에러가 많이 발생하고, 특히 노이즈와 무선채널 사이의 간섭 등에 의해 에러의 발생빈도가 높을 뿐만 아니라 집단적으로 발생하는 성질을 보인다. 이러한 에러 특성으로 인해 무선 채널에 수용되는 트래픽 흐름들에게 공평한 전송 서비스를 보장하기가 어렵다. 대부분의 알고리즘에서 이러한 문제를 해결하기 위해 서비스 보상 기법을 사용한다. 무선채널의 에러로 인해 일부 흐름의 서비스가 지체될 경우 채널의 상태가 좋아졌을 때 서비스가 앞선 흐름들이 대역폭을 이들에게 양보하도록 하여 지체된 서비스를 보상해주는 것이다. 무선채널용 공평 큐잉 알고리즘은 대부분 무선 채널에 에러가 없을 경우 WFQ와 동일한

동작을 하며, 서비스 보상에 있어 서로 다른 기법을 사용한다[2].

WFQ에서 각 흐름의 전달지연, 즉 레이턴시  $q$ 는 그 흐름의 속도에 반비례하므로  $q$ 가 그 흐름에게 허용된 지연한계, 즉 지연규격  $b$  보다 클 경우 다음 식과 같이 스케줄링 속도  $s$ 를 높여  $q$ 를  $b$ 와 일치하도록 한다[5]. 참고로 대역폭 보장 때문에 흐름의 스케줄링 속도  $s$ 는 흐름의 요구속도  $r$ 과 같거나 더 높아야 한다.

$$q = \frac{M}{s} + \frac{M^{\max}}{C^B} \leq b \quad (2)$$

여기서  $C^B$ 는 출력 링크의 용량,  $M$ 은 흐름의 최대 패킷 크기,  $M^{\max}$ 는 모든 흐름의 최대 패킷 크기이다. 그러나 이러한 속도와 지연의 결합 특성으로 인해 대역폭 이용도가 낮은 문제점을 갖고 있다. 특히 VoIP와 같이 속도는 낮으나 엄격한 지연규격을 요구하는 흐름의 경우 대역폭 이용도가 크게 저하된다 [6]. 최근에 연구된 LOFQ에서는 WFQ의 문제점을 다음과 같이 분석하였다[7]: 흐름의 레이턴시가 그 흐름의 지연규격보다 작을 경우 WFQ는 아무런 조치를 취하지 않기 때문에 지연규격과 레이턴시의 차이에 해당하는 지연자원이 낭비되어 자원 이용도가 저하된다는 것이다. 그리고 낭비되는 지연자원을 재활용하는 방법을 고안하여 대역폭 이용도를 높였다. 본 연구는 이러한 LOFQ를 확장하여 이동 무선 통신 장치의 에너지 소비를 줄이기 위한 공평 큐잉 알고리즘을 개발하고자 하는 것이다. 먼저 [7,8]의 연구결과를 참조하여 LOFQ를 자세히 살펴보자.

LOFQ에서 각 흐름의 레이턴시  $q$ 는 (3)과 같이 스케줄링 속도  $h$ 와 레이턴시 지수  $\beta$ 의 함수가 되므로,  $h$ 와  $\beta$ 를 조절하여  $q$ 를 그의 지연규격  $b$ 와 일치하게 하는데,  $h$ 를 우선적으로 줄여서 대역폭 이용도를 높인다.

$$q = D^B + \beta \frac{M}{h} = b \quad (3)$$

(3)에서  $D^B$ 는 총 지연자원 량을 의미하며 가장 엄격한 지연규격, 즉 흐름들의 지연규격 중 최소값  $b^{\min}$ 으로 설정된다. 0 이상의 값을 갖는 레이턴시 지수  $\beta$ 는 다음에 설명되는 흐름의 점유 지연자원의 량을 결정하는 중요한 상수로서 (3)에 의해 각 흐름 별로 계산

되고, 그 흐름의 패킷의 타임스탬프 계산시 반영된다. 한편 각 흐름의 점유 대역폭(OBW: Occupied BandWidth)은 바로 그 흐름에 할당된 스케줄링 속도  $h$ 가 되며, 점유 지연자원(ODW: Occupied DelayWidth)  $d$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$d = \max(0, 1 - \beta) M / C^B \quad (4)$$

그리고 스케줄러의 OBW  $H$ 와 ODW  $D$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$H = \sum_{B(t)} h \text{ 및 } D = \sum_{B(t)} \max(0, 1 - \beta) M / C^B \quad (5)$$

여기서  $B(t)$ 는 수락된 흐름의 집합을 의미한다. 흐름 수락 요청을 받을 때 LOFQ 스케줄러는  $h$ 를 WFQ에서 그 흐름의 스케줄링 속도인  $s$ 로 설정, 즉  $h=s$ 로 설정한 후 (3)에 의해  $\beta$ 값을 결정한다. 그러면  $H$ 와  $D$ 는 각각 수락되는 흐름의 OBW인  $h$ 와 ODW인  $d$ 만큼 증가되며,  $H$ 가  $C^B$ 를 초과할 수 없듯이  $D$  역시  $D^B$ 를 초과할 수 없다.

한편 (3)과 (4)로부터  $d$ 와  $h$ 는 서로 반비례하므로  $h$ 를 늘리는 대신  $d$ 를 줄이거나  $d$ 를 늘리는 대신  $h$ 를 줄일 수 있다. 전자, 즉 가용 BW를 줄이고 가용 DW를 늘리는 것을 B2D 변환, 후자, 즉 가용 DW를 줄이고 가용 BW를 늘리는 것을 D2B 변환이라 한다.  $\Delta d$ 의 DW 투입( $\Delta d$ 만큼  $d$  증가)시 생겨나는 BW(줄어드는  $h$ 의 량)을  $\Delta h$ 라 할 때  $\Delta h / \Delta d$ 를 흐름의 D2B 변환효율이라 하고  $E^{D2B}$ 로 표기한다. 반대로 투입하는 BW  $\Delta h$ 에 대해  $\Delta d$ 의 DW가 생겨날 경우  $\Delta d / \Delta h$ 를 흐름의 B2D 변환효율이라 하고  $E^{B2D}$ 로 표기한다. 그러면 (3)과 (4)로부터  $E^{D2B} = 1/E^{B2D} = C^B h / \beta M$ 이 된다. 참고로 변환이 불가능한 흐름의 경우 효율은 널값을 갖는다. 따라서 어느 한 자원이 부족할 경우 여유가 있는 다른 자원을 부족한 자원으로 변환하여 새로운 흐름을 수락하며, 효율이 높은 흐름 순으로 자원변환을 수행한다. 한 예로  $D^B=1\text{ms}$  및  $C^B=1\text{Gbps}$ 인 경우  $r=10\text{Kbps}$ ,  $b=2\text{mS}$  및  $M=1\text{Kbit}$ 인 흐름을 살펴보자. (3)에 의해  $h=10\text{Kbps}$ 일 경우  $\beta=0.01$ 이므로 (4)에 의해  $d=0.99\mu\text{s}$ 가 되고,  $h=1\text{Mbps}$ 일 경우  $\beta=1$ 이므로  $d=0$ 이 된다. 따라서 최대  $990\text{Kbps}$ 의 가용 BW가  $0.99\mu\text{s}$ 의 가용 DW로, 또는 반대로 변환될 수 있다.

LOFQ는 B2D-D2B 자원변환을 통해 점유자원을 최적화한다. B2D-D2B 자원변환이란 어떤 흐름에

대한 B2D 변환을 통해서 얻어진 DW를 이용하여 다른 흐름에 대한 D2B 변환을 수행하는 것을 말한다. B2D-D2B 자원변환 시 스케줄러의 ODW D는 변화가 없지만 OBW H는 변하게 된다. H의 변화량은  $g^{B2B} \equiv E^{B2D}E^{D2B}$ 로 정의되는 이득  $g^{B2B}$ 에 의존하며,  $g^{B2B} > 1$ 이면 H가 줄어든다. 따라서 임의의 두 흐름에 대해  $g^{B2B} > 1$ 이면 흐름간 자원변환을 통해 H를 줄일 수 있게 된다. 이와 같은 이론에 근거하여  $g^{B2B} > 1$ 인 임의의 두 흐름이 있는 한 점유자원의 최적화를 계속 수행한다.

### 3. 제안방식

#### 3.1 방식개요

본 연구에서 제안되는 공평 큐잉 알고리즘은 스케줄러 출력 링크의 속도를 줄이는, 즉 링크 속도의 효율성을 높이기 위한 것이므로 REFQ(Rate Efficient Fair Queueing)라 부른다. REFQ 기반 고 에너지 효율 무선 통신 장치는 그림 1과 같이 구성된다. 스케줄러에 도착하는 흐름의 속성은 그의 요구속도  $r_i$ , 지연규격  $b_i$  및 최대 패킷크기  $M_i$ 의 세가지 요소에 의해 결정되므로 흐름의 규격을  $F(r_i, b_i, M_i)$ 로 표시한다.

$$R = \sum_{i=1}^N r_i$$

여기서 N은 수용된 흐름의 수,  $r_i$ 는 정의되는 트래픽 속도  $R$ 의 부하가 입력되면 REFQ 스케줄러는 각 흐름의 요구속도와 지연규격을 만족시키면서 공평 스케줄링하여 속도  $H$ 의 트래픽을 출력하고, 출력 트래픽은 DMS 무선모뎀에서 변조되어 무선채널로 전송된다. 여기서  $H$ 는 앞에서 정의한 대로 수용된 흐름의 스케줄링 속도의 합, 즉 스케줄러의 OBW이다. 그리고 무선채널의 전송 용량을  $C^B$ 라 할 때  $R \leq H \leq C^B$ 의 관계를 갖는다.

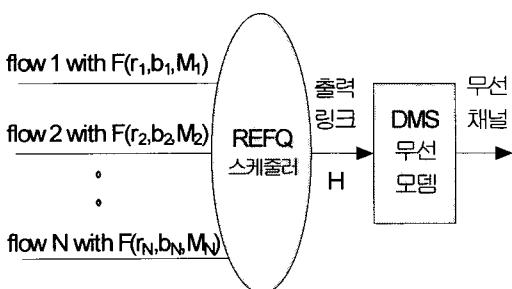


그림 1. 제안 방식의 전체 구성도

REFQ는 LOFQ를 기반으로 하지만 출력 링크의 속도를 줄이기 위해  $H$ 가 최소가 되도록 자원을 관리해야 할 뿐만 아니라 흐름의 레이턴시가 고정된 값을 갖는 무선채널의 전송 용량  $C^B$  대신 가변적인 값을 갖는 링크 속도  $H$ 에 의존하므로 LOFQ 알고리즘이 대폭 수정된다. REFQ에서 흐름의 레이턴시  $q_i$ 는 LOFQ에서와 마찬가지로 (3)에 의해 결정된다. 그리고 (4)와 (5)로부터 임의 흐름의 ODW  $d_i$ 와 스케줄러의 ODW  $D$ 는 다음과 같이  $H$ 의 함수가 된다.

$$d_i = \max(0, 1 - \beta)M_i/H. \quad (6)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \max(0, 1 - \beta)M_i/H. \quad (7)$$

#### 3.2 링크 속도 계산

무선채널의 소비 에너지를 결정하는 스케줄러의 출력 링크 속도  $H$ 에 대해 살펴보자.  $H$ 와  $D$ 는 서로 반비례 하므로 REFQ 스케줄러는 출력 링크의 속도  $H$ 를 최소로 유지하기 위해 가용 DW를 모두 가용 BW로 변환, 즉  $D=D^B$ 가 되도록 자원을 관리한다. 따라서 DW를 점유하는 흐름을 수락할 경우 B2D 변환을 통해 필요한 DW 자원을 확보한 후 수락해야 한다. B2D 변환시  $H$ 가 증가하며 (3.2)로부터  $H$  증가분에 의해  $D$ 가 줄어든다. 이때 발생하는 가용 DW, 즉  $(D^B - D)$ 를 가용 BW로 변환하여  $H$ 를 더 줄일 수 있으나 (3.2)로부터 줄어든  $H$ 에 의해  $D$ 가 증가되므로  $D \leq D^B$ 를 만족시키기 위해서  $H$ 를 또 다시 늘려야 하므로  $H$ 의 계산이 복잡해진다. 수락된 흐름을 해제할 경우 그 흐름의 OBW  $h_i$ 와 ODW  $d_i$ 를 반납하므로  $H$ 가  $h_i$ 만큼 줄어들며, 줄어든  $H$ 에 의해 증가된  $D$ 가  $D^B$ 를 초과할 경우  $H$ 를 늘려서  $D$ 를 줄여야 하므로 역시  $H$ 의 계산이 복잡해진다.

최적 링크속도를 계산하는 알고리즘의 순서도가 그림 2에 도시 되어 있다. 수락된 임의 흐름  $i$ 는 파일  $P_i(r_i, b_i, h_i, \beta, M_i)$ 를 갖는다. 여기서  $r_i$ ,  $b_i$  및  $M_i$ 은 흐름 규격의 구성 요소,  $h_i$ 는 스케줄링 속도, 그리고  $\beta$ 는 레이턴시 지수이다. 먼저 (5)에 의해 스케줄러에 수용된 모든 흐름의 OBW를 합한 값인 요구 BW  $H^R$ 을 계산하고, 이로부터 요구 DW  $D^R$ 을 산정한다. 그리고 가용 DW가 있으면, 즉  $D^R < D^B$ 이면  $D^R$ 이  $D^B$ 에 근접하도록 D2B 변환을 통해  $H^R$ 을 줄이고, 가용 DW가 부족, 즉  $D^R > D^B$ 이면 B2D 변환을 통해  $D^R$ 가  $D^B$ 를 초과하지 않도록  $H^R$ 을 늘리는데 각각 변환효

율이 높은 흐름 순서로 자원 변환을 수행한다. 흐름  $i$ 에 대한 D2B 변환시 투입될 최적 DW량을 결정하는 레이턴시 지수의 감소분  $\Delta\beta_i^B$ 는 [7]의 보조정리 3에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\beta_i^B = \min(\beta_i, \frac{h_i - r_i}{h_i}, \beta_i, \frac{(D^B - D^R)H^R}{M_i}) \quad (8)$$

D2B 변환 결과 얻어지는 BW량인  $\Delta h_i^B$ 는 (2.3)에 의해  $h_i \Delta\beta_i^B / \beta_i$ 로 계산된다. 그리고 흐름  $i$ 에 대한 B2D 변환시 투입될 최적 BW량  $\Delta h_i^B$ 는 [7]의 보조정리 4에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta h_i^B = \min(\frac{h_i}{\beta_i} - h_i, C^B - H^R) \quad (9)$$

B2D 변환 결과 흐름  $i$ 의 ODW를 줄이게 되는 레이턴시 지수의 증가분  $\Delta\beta_i$  역시 (3)에 의해  $\beta_i \Delta h_i^B / h_i$ 로 계산된다. 이와 같이 B2D 또는 D2B 변환을 통해  $D^R$ 이  $D^B$ 를 초과하지 않는 범위 내에서 최대값을 갖도록 하여 최적 요구 BW  $H^R$  값을 구한 후 이를 최적 링크속도  $H$ 로 설정한다. 그리고 링크 속도 계산 알고리즘이 동작하는 동안 수락된 흐름 내역이 변경되지

않아야 하므로 이 알고리즘은 3.3절의 흐름 수락제어 기능과 상호 배타적으로 수행된다.

### 3.3 REFQ 스케줄러

REFQ 스케줄러는 흐름을 수락 및 해제하고 출력 링크의 속도를 최소화하는 흐름 제어와 수락된 흐름들의 트래픽을 그들의 품질 규격에 맞게 서비스하는 패킷 스케줄링의 두 가지 기능을 갖는다. 후자는 [7]의 패킷 스케줄링 기능과 동일하므로 생략하고, 흐름 수락 제어와 접유자원 최적화 기능으로 구성되는 전자에 관해서만 기술한다.

#### 3.3.1 흐름 수락 제어 기능

흐름 수락 제어 알고리즘의 순서도가 그림 3에 정리되어 있다.  $F(r_i, b_i, M_i)$ 를 갖는 임의 흐름  $i$ 에 대한 수락요청이 입력되면 수락 제어 기능이 동작한다. 먼저 출력 링크의 속도를 최소화하기 위해 스케줄링 속도  $h_i$ 를 흐름의 요구속도인  $r_i$ 로 설정한 후 레이턴시 지수  $\beta_i$ 와 흐름  $i$ 의 요구 DW를 계산한다. 스케줄러의 사용 BW와 DW가 모두 충분하면 흐름을 수락하고, 사용 BW가 부족하면 스케줄러에는 수락을 거절한다. 참고로 스케줄러의 접유 DW를 최대화하는 대신 접유 BW를 최소화, 즉 최적 링크 속도를 유지하므로 사용 BW가 없으면 스케줄러에는 더 이상 남은 자원이 없음을 의미한다. 반면 사용 DW가 부족하면 B2D 변환으로 부족한 DW를 확충한 후 흐름을 수락한다. 자원 변환 시 효율이 높은 흐름 순서로 변환을 수행하며, 흐름  $j$ 의 B2D 변환에 투입되는 BW량  $\Delta h_j^B$ 는 [7]의 보조정리 4로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta h_j^B = \min(h_j / \beta_j - h_j, \Delta D / E_j^{B2D}, C^B - H), \quad (10)$$

여기서  $\Delta D = D + d_i - D^B$ .

B2D 변환 도중에 사용 BW가 고갈되면 수락이 거절된다. 흐름이 수락되면 그 흐름의 프로파일을 생성하고, 최적 링크 속도 계산 알고리즘을 수행하여 링크 속도를 최소화 한다.

한편 수락된 임의 흐름  $i$ 에 대한 해제 요청 시 해당 흐름의 프로파일을 삭제한 후 최적 링크 속도 계산 알고리즘을 수행시켜 출력 링크의 속도  $H$ 를 최소화 한다.

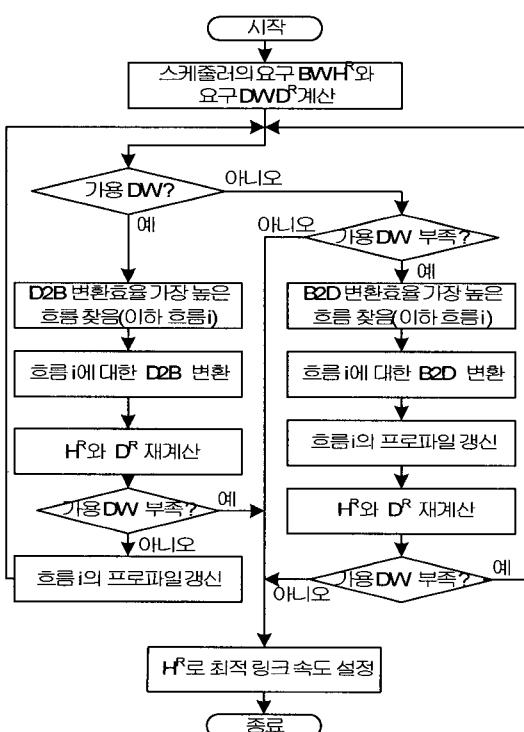


그림 2. 최적 링크 속도 계산 알고리즘의 순서도

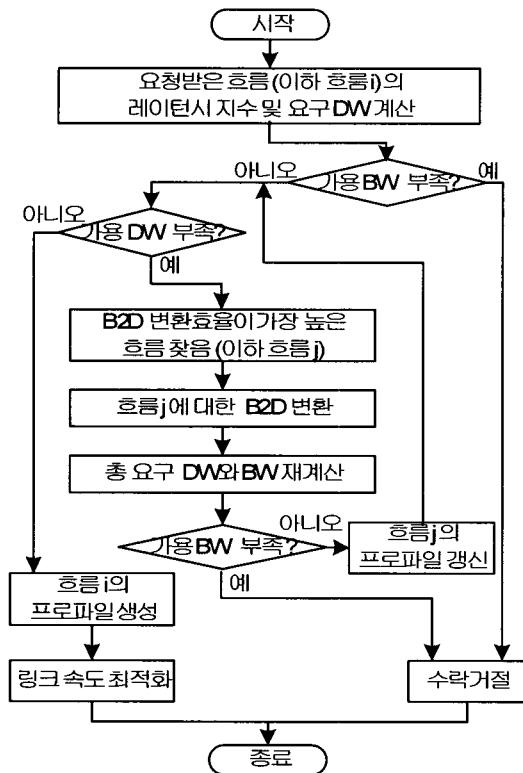


그림 3. 흐름 수락 제어 알고리즘의 순서도

### 3.3.2 접유자원 최적화 기능

LOFQ에서 사용된 B2D-D2B 자원변환 기반 접유자원 최적화는 출력 링크 속도  $H$ 를 변화시키므로 REFQ에 적용하기에 어려움이 있다. 따라서  $H$ 의 변경 없이 스케줄러의 ODW  $D$ 만 줄일 수 있는 D2B-B2D 자원변환, 즉 어떤 흐름에 대한 D2B 변환을 통해서 얻어진 BW를 이용하여 다른 흐름에 대한 B2D 변환을 수행하는 흐름간 자원변환을 이용한다. 한 예를 통해서 D2B-B2D 자원변환의 의미를 살펴보자. 프로파일이 각각  $P_i(10Kbps, 21ms, 30Kbps, 0.6, 1000bit)$ 과  $P_j(10Kbps, 41ms, 10Kbps, 0.4, 1000bit)$ 인 흐름  $i$ 와  $j$ 를 생각해보자.  $E_i^{D2B} = Hh_i / \beta_i M_i = 50H$ 이고  $E_j^{B2D} = 1/E_j^{D2B} = 1/(25H)$ 가 된다. 흐름  $i$ 의 레이턴시 지수  $\beta_i$ 를 0.6에서 0.4로 줄여서 흐름  $i$ 의 ODW를 200/H 만큼 늘리면 흐름  $i$ 의 OBW는  $(200/H)E_i^{D2B} = 10Kbps$  만큼 줄어들게 된다. 이를 흐름  $j$ 에 투입, 즉 흐름  $j$ 의 OBW를 10Kbps 만큼 늘리면  $10Kbps * E_j^{B2D} = 400/H$  만큼 ODW가 줄어드는데, 이는  $\beta_j$ 를 0.4에서 0.8로 높임으로서 이루어진다. 이러한 D2B-B2D 자원변환으로

두 흐름의 프로파일은  $P_i(10Kbps, 21ms, 20Kbps, 0.4, 1000bit)$  및  $P_j(10Kbps, 41ms, 20Kbps, 0.8, 1000bit)$ 로 변경되고, 그 결과  $H$ 의 변경 없이  $D$ 를 200/H 만큼 줄이게 된다.

D2B-B2D 자원변환 시 발생되는  $D$ 의 변화량은  $g^{D2D} \equiv E^{D2B} E^{B2D}$ 로 정의되는 D2B-B2D 자원변환 이득  $g^{D2D}$ 에 의존한다.  $g^{D2D} > 1$  일 경우  $D$ 가 줄어들므로 링크 속도 계산 알고리즘을 이용하여 출력 링크의 속도를 줄일 수 있다. 이와 같은 이론에 근거하여  $g^{D2D} > 1$ 인 임의의 두 흐름이 있는 한 접유자원 최적화를 통해 출력 링크의 속도를 최소화 한다.

접유자원 최적화 알고리즘의 순서도가 그림 4에 정리되어 있다. D2B-B2D 자원변환 이득이 최대가 되는 임의의 흐름 쌍  $i$ 와  $j$ 를 찾은 후, 그 값이 1보다 작으면 종료하고, 아니면 먼저 흐름  $i$ 에 대해 DW  $\Delta d_i$ 를 투입하여 D2B 변환을 통해  $\Delta h_i$ 의 BW를 확보한다. 여기서  $\Delta d_i$ 는 [7]의 보조정리 7에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta d_i = \min\left(\frac{(1-\beta_i)M_i}{H}, \frac{\beta_j M_j}{H}, \frac{(h_j - r_j)\beta_j M_j}{h_j H}\right) \quad (11)$$

다음은 확보된  $\Delta h_i$ 를 투입하여 흐름  $j$ 에 대한 B2D 변환을 통해  $\Delta d_j$ 의 DW를 확보한다. 이와 같은 D2B-B2D 변환으로 얻어진 DW량, 즉  $(\Delta d_j - \Delta d_i)$ 이

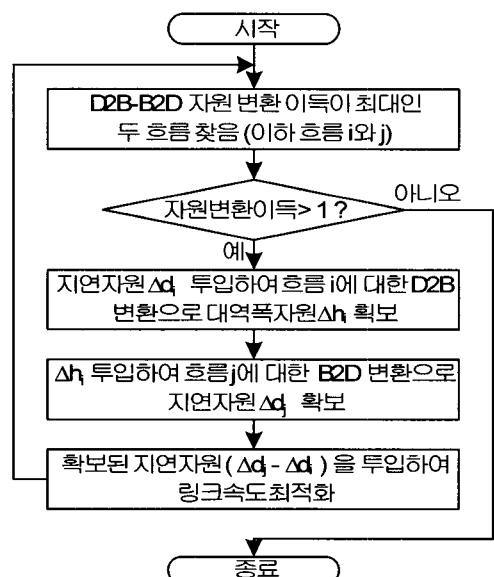


그림 4. 접유자원 최적화 알고리즘의 순서도

출력 링크 속도의 최소화에 반영되도록 최적 링크 속도 계산 알고리즘을 수행한다. 이와 같은 D2B-B2D 자원변환 작업을 D2B-B2D 자원변환 이득이 1보다 큰 두 흐름이 있는 한 반복한다.

#### 4. 성능평가

성능평가에 사용할 흐름의 규격  $F(r, b, M)$ 에서 요구속도  $r$ 과 지연규격  $b$ 의 분포를 고찰해보자. 인터넷에서 유통되는 미디어는 8Kbps급의 저속 음성부터 1Mbps급의 고속 영상까지 다양하므로 [8,1000]Kbps 내 균등하게 분포하는 균등분포와 8Kbps급 음성 흐름, 128Kbps급 오디오 흐름 및 1Mbps급 비디오 흐름이 각각 70%, 20% 및 10%의 비율로 구성되는 VoIP(Voice over Internet Protocol) 분포의 두 가지 요구속도 분포를 고려한다. 널리 이용되는 VoIP의 경우 이용자의 민족을 위해서 단방향 종단간 지연시간이 300ms 이내가 되어야 하는데[13], 본 연구에서는 각 라우터에 할당되는 지연규격이 [1,11]ms에 분포한다고 가정한다. 그러면 대부분의 경우 종단간 라우터의 수가 20개를 넘지 않을 것이므로 종단간 큐잉 지연은 약 [20,220]ms가 되고, 종단간 전송지연은 약 [80, 280]ms가 된다. 그런데 스케줄러에는 다수의 흐름이 수용되므로 널리 알려진 중심극한정리(Central Limit Theorem)에 의해 지연규격은  $N(6\text{ms}, \sigma^2)$  분포를 따르게 된다. 여기서  $N()$ 은 정규(Normal)분포, 6ms는 평균 지연규격 그리고  $\sigma^2$ 는 지연규격의 분산을 의미한다. 참고로 분산이 줄어들수록 지연규격의 분포가 평균값에 집중되는 엘타분포로 근접하고, 분산이 증가할수록 전 구간에 골고루 분포하는 균등분포로 근접한다. 그리고 모든 흐름의 패킷 크기는 모두  $M$  bit로 가정한다.

시뮬레이션 방법을 이용하여 제안된 REFQ의 성능을 출력 링크의 속도와 무선채널 에너지 소비의 두 가지 측면에서 WFQ의 성능과 비교 평가한다. 시뮬레이션은 SMPL(Simulation Model Programming Language)[14]에 공평 패킷 스케줄러 루틴을 추가하여 수행한다.

링크 속도 개선 측면에서 비교한 결과가 그림 5, 6 및 7에 도시되어 있다. 그림 5는  $\sigma^2=4$ 이고  $R=1\text{Gbps}$ 인 트래픽 하에서 패킷 크기 증가에 따른 출력 링크의 속도 변화를 보여준다. VoIP 트래픽이

균등 트래픽보다 더 높은 링크 속도를 요구하는데, 이는 저속이면서 엄격한 지연규격의 흐름이 상대적으로 많기 때문이다 그리고 REFQ가 WFQ에 비해서 35% 정도 링크 속도가 개선, 즉 감소됨을 관찰할 수 있다. 참고로 [7]에서 LOFQ가 WFQ 대비 35% 정도의 대역폭 이용도 개선을 보였다. LOFQ를 기반으로 하는 REFQ 역시 비슷한 정도의 링크 속도 개선 효과를 보이는 것을 관찰할 수 있다. 그림 6은  $M=1.5\text{Kbit}$ 로 고정한 상태에서 가하진 트래픽 부하  $R$ 에 따른 링크 속도의 변화를 도시한 것이다. VoIP와 균등 트래픽 모두에 대해 35% 정도의 링크 속도 개선 효과를 확인할 수 있다. 그림 7은 그림 5의 실험에 대해  $M=1.5\text{Kbit}$ 로 고정한 상태에서 지연규격의 분산을 증가시키면서 링크 속도를 살펴본 것이다. 분산이 증가할 수록 WFQ의 경우 링크 속도가 증가한 후 수렴하며, REFQ의 경우 점유자원 최적화의 결과로 큰 변화 없이 일정한 링크 속도를 보여준다.

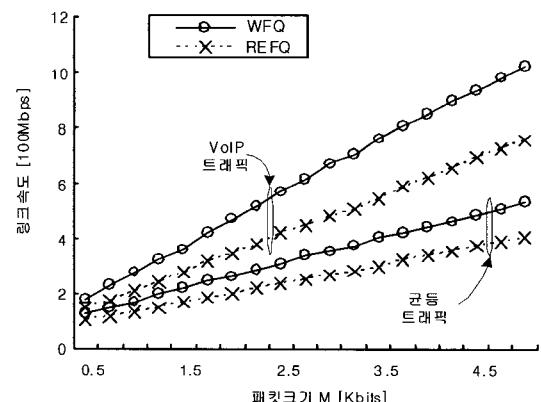


그림 5. 패킷 크기에 따른 링크 속도

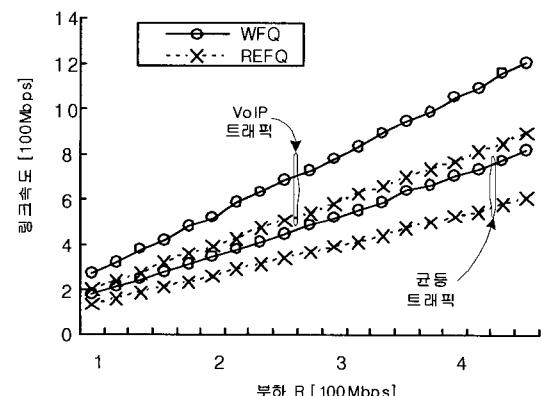


그림 6. 부하에 따른 링크 속도

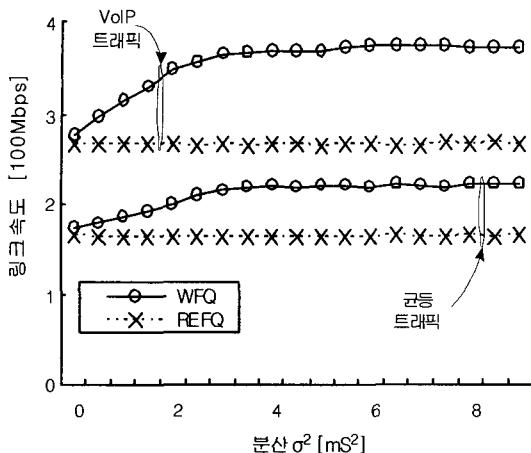


그림 7. 분산에 따른 링크 속도

다음은 무선 채널의 에너지 소비 측면에서 제안방식의 성능을 평가한다. QAM 변조방식을 사용하는 DMS 무선모뎀을 대상으로 하며  $R_S$ ,  $C_S$  및  $C_E$ 값을 다음과 가정하였다:  $R_S=50\text{MHz}$ ,  $C_S=100\text{nJ}$  및  $C_E=180\text{nJ}$ .  $M=1.5\text{Kbit}$ 이고  $\sigma^2=4$ 인 트래픽 하에서 가하진 부하  $R$ 에 따른 무선 채널 에너지 소비의 변화가 그림 8에 도시되어 있다. 참고로 그림 8은 그림 6의 링크 속도에 대한 에너지 소비를 의미한다. 그림 6에서 WFQ 대비 35% 정도의 링크 속도 개선이 관찰되었으나 그림 8로부터 에너지 소비 측면에서는 최대 90% 정도 개선, 즉 감소됨을 보인다. 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 링크 속도의 증가 시 에너지 소비가 지수적으로 증가하기 때문이다.

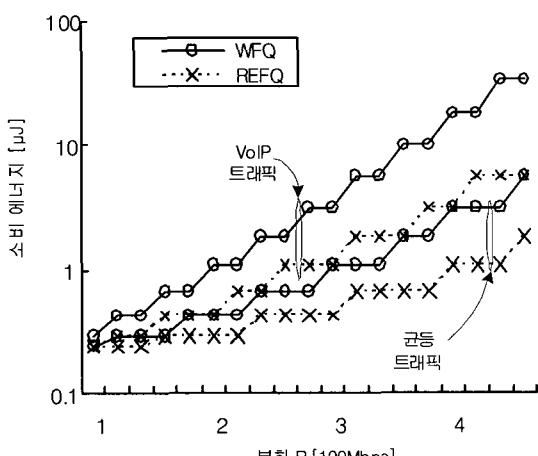


그림 8. 부하에 따른 무선 채널 에너지 소비

## 5. 결 론

무 에러(error-free) 환경에서 스케줄러의 출력 링크 속도를 줄일 수 있는 공평 큐잉 알고리즘인 REFQ (Rate Efficient Fair Queuing)를 제안한 후 DMS 무선모뎀에 적용하여 무선 통신 장치의 에너지 소비를 줄이는 방법을 제시하였다. 제안된 REFQ은 WFQ의 대역폭 이용도 저하 문제를 해결한 LOFQ에 기초하였으며, 가변 출력 링크 속도를 지원하도록 확장하였고, 스케줄러의 점유 자연자원을 최대로 늘리는 대신 점유 대역폭 자원을 줄여서 출력 링크의 속도가 최소화 되도록 하였다.

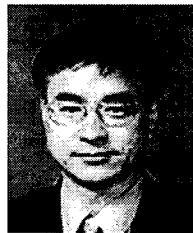
이상적인 균등분포 및 실질적인 인터넷 전화 트래픽 환경에서 시뮬레이션으로 WFQ 스케줄러와 비교 평가한 결과 REFQ 스케줄러는 출력 링크의 속도를 35% 정도 줄였고, 이를 QAM 방식을 사용하는 DMS 무선모뎀에 적용한 결과 WFQ 스케줄러를 적용한 것에 비해 무선채널의 에너지 소비를 최대 90% 정도 줄이는 효과를 보였다.

REFQ에서 흐름의 수락과 해제 시 링크 속도를 다시 계산해야 하며, 이때 흐름 수  $N$ 에 비례하는, 즉  $O(N)$ 의 높은 복잡도를 갖는다. 하지만 품질 보장 서비스의 경우 흐름의 연결 및 해제 응답시간이 수 초 정도로 충분히 길고 세션 연결시간이 긴 연결형 서비스로서 연결 및 해제의 빈도가 높지 않기 때문에 구현에 있어 큰 문제가 되지 않을 것으로 예상된다. 그리고 본 연구는 무 에러 무선 채널 환경을 대상으로 연구하였으므로, 무선 채널 상의 에러 특성을 효과적으로 수용할 수 있도록 알고리즘의 개선이 요구된다.

## 참 고 문 현

- [1] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, "Fair Scheduling in Wireless Packet Networks," *Proc. ACM SIGCOMM'97*, 1997.
- [2] Vaduvur Bharghavan, Songwu Lu, and Thyagarajan Nandagopal, "Fair Queuing in Wireless Networks: Issues and Approaches," *IEEE Personal Comm.*, pp. 44-53, 1999.
- [3] Wasan Pattara-Atikom, Prashant Krishnamurthy, and Sujata Banerjee, "Comparison of Distributed Fair QoS Mechanisms in Wireless

- LANs," *Proc. GLOBECOM*, pp. 230-234, 2003.
- [4] A.K. Parekh, "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks," *PhD dissertation*, Massachusetts Institute of Technology, Feb. 1992.
- [5] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, "Design and analysis of a fair queuing algorithm," *Proc. ACM SIGCOMM'89*, pp. 1-12, 1989.
- [6] A. Francini and F.M.Chiussi, "A Weighted Fair Queuing Scheduler with Decoupled Bandwidth and Delay Guarantees for the Support of Voice Traffic," *Proc. GLOBECOM '2001*, Vol. 3, 2001.
- [7] 김태준, "최적 레이턴시 기반 공평 큐잉 알고리즘 개선에 관한 연구", 멀티미디어학회 논문지 2007년 1월호 게재 예정.
- [8] T. J. Kim, "A Weighted Fair Queueing with optimal rate and delay allocation," *Proc. GLOBECOM*, 2006.
- [9] T. A. Pering, T. D. Burd, and R. W. Brodersen, "The simulation and evaluation of dynamic voltage scaling algorithms," *Proc. International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*. ACM, pp. 76-81, 1998.
- [10] C. Schurges, O. Aberthorne, and M. B. Srivastava, "Modulation scaling for energy aware communication systems," *Proc. International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*. ACM, pp. 96-99, 2001.
- [11] Elif Uysal-Biyikoglu, Balaji Prabhakar, and Abbas El Gamal, "Energy-Efficient Packet Transmission Over a Wireless Link," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 10, No. 4, pp. 487-499, 2002.
- [12] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava, "Energy Efficient Wireless Packet Scheduling and Fair Queueing," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 3 - 23, 2004.
- [13] ITU-T Recommendation G.114: One-way transmission time, 2003.
- [14] M. H. MacDougall, *Simulating Computer Systems*, Techniques and Tools, MIT Press, 1987.



김 태 준

1980년 2월 경북대학교 전자공  
학과 졸업  
1982년 2월 한국과학기술원 전  
자공학 석사  
1999년 8월 한국과학기술원 전  
자공학 박사  
1982년 3월 한국전자통신연구원  
1996년 3월 천안공업대학  
2005년 3월~현재 공주대학교 정보통신공학부 교수  
관심분야 : 고속통신망, VoIP, 트래픽제어