

# 차등 서비스 네트워크의 확신 서비스에서 공평성 향상을 위한 3색 마킹 메커니즘

## (A Three-Color Marking Mechanism for Fairness Improvement in the Assured Service of the Diffserv Network)

모 상 덕<sup>†</sup> 정 광 수<sup>\*\*</sup>  
(Sangdok Mo) (Kwangsue Chung)

**요 약** 차등 서비스 네트워크(Diffserv network)의 확신 서비스(Assured Service)에 대한 기존 연구는 TCP 플로우의 RTT(Round Trip Time) 및 계약한 목표 전송률(CTR: Committed Target Rate)에 따른 전송률 분배의 공평성에 대한 고려가 부족하다. 본 논문에서는 기존 연구에서의 문제점들을 개선한 TRA3CM(Target rate and RTT Aware 3 Color Marker) 메커니즘을 제안한다. TRA3CM에서는 평균 전송률을 예측하기 위한 시간 창 길이로 RTT를 이용하며, 3색 마킹을 제공하고, RTT와 목표 전송률을 동시에 고려하여 집합 플로우들 사이에 공평하게 전송률을 분배할 수 있다. 또한 under-provisioned 네트워크에서도 RTT의 영향을 완화시켜 집합 플로우들 사이에 공평성을 보장하고 있다. 기존 방식들과 비교한 결과 제안한 TRA3CM은 RTT의 영향을 완화시키는 데 있어 좋은 성능을 보이며, 목표 전송률에 비례하는 전송률 제공에서도 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

**키워드** : 차등 서비스, 확신 서비스, TRA3CM, RTT, 목표 전송률, 공평성

**Abstract** Previous works for the assured service in the Diffserv network have no sufficient consideration on the fairness of bandwidth share based on RTTs and the target rates of TCP flows. In this paper, in order to solve these problems, we propose a TRA3CM(Target rate and RTT Aware 3 Color Marking) mechanism. The TRA3CM mechanism provides three color marking and fair transmission rates among aggregate flows by considering RTT and target rate simultaneously. In case of higher target rate than bottleneck bandwidth, the TRA3CM mechanism is able to mitigate the RTT effect and provides fair transmission rates. In the results of comparing the performance among existing mechanisms and the TRA3CM, the TRA3CM mechanism was able to mitigate the RTT effect better than the former. The TRA3CM is shown to provide good performance for transmission rates proportional to various target rates.

**Key words** : Diffserv, Assured Service, TRA3CM, RTT, Target Rate, Fairness

### 1. 서 론

현재의 인터넷은 VoIP, VoD, 화상회의 등의 멀티미디어 트래픽이 전체 인터넷 트래픽에서 점점 많은 대역을 점유하며 발전하고 있다. 이러한 서비스들은 최선형 서비스(best-effort services)와는 다른, 다양한 요구사항을 갖는 서비스들이다. 따라서 기존의 네트워크 구조

로는 이러한 멀티미디어 서비스의 요구사항을 만족시킬 수 없기 때문에 다양한 환경에서 IETF(Internet Engineering Task Force)의 차등 서비스(Differentiated Services) 구조에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 차등 서비스에서는 제공하고자 하는 서비스에 따라 클래스를 나누고 각 클래스에 속하는 플로우들에게 해당하는 서비스를 제공한다. 즉, 같은 클래스에 속하는 모든 플로우는 같은 수준의 서비스를 제공 받는다. 차등 서비스는 일반적으로 고급 서비스(Premium Service)와 확신 서비스(Assured Service)로 나눌 수 있다. 전자는 인터넷 전화, 화상회의 등에 알맞은 낮은 지연시간과 지터(jitter)를 갖는 서비스이고, 후자는 지연시간과 지터에 민감하지 않고 최선형 서비스보다는 좋은 서비스를 제

· 본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(R01-2002-000-00179-0(2002))의 지원에 의해 수행되었음

† 비 회 원 : 광운대학교 전자통신공학과  
sdmo@adams.kw.ac.kr

\*\* 중 심 회 원 : 광운대학교 전자공학부 교수  
kchung@daisy.kwangwoon.ac.kr

논문접수 : 2003년 5월 6일

심사완료 : 2003년 8월 5일

공하고자 하는 경우에 이용될 수 있다[2,3]. 확산 서비스는 4개의 클래스로 나누어지고 각 클래스는 3개의 폐기 선호도(drop precedence)를 갖게 된다.

클래스에 기반한 패킷의 분류는 에지 라우터(edge router)에서 이루어지게 되며 분류된 패킷에는 DSCP (Differentiated Services Code Point)가 마킹(marking)된다. 마킹된 패킷은 코어 라우터(core router)에서 각 DSCP에 대응하는 PHB(Per Hop Behavior)의 동작에 따라 차별화된 서비스를 제공받는다. 이러한 차등 서비스 메커니즘에 의해 같은 DSCP를 갖는 패킷은 같은 PHB에 의해 처리되어 같은 종류의 서비스를 제공 받는다. 차등 서비스에서는 다양한 PHB가 존재하지만 확산 서비스에서는 일반적으로 RED(Random Early Detection)를 확장한 RIO(RED with In/Out) 방식을 이용하고 있다[4,5]. 확산 서비스에서 패킷을 분류하고 마킹하는 방법은 크게 평균 전송률 예측 기반 방식과 토큰 버킷 기반의 방식으로 구분될 수 있다[6-8]. 평균 전송률 예측 기반의 방식은 평균 전송률을 적용하여 계산된 확률 값을 마킹에 이용하게 되며, 토큰 버킷 기반의 방식은 버킷의 크기와 토큰이 채워지는 속도를 이용하여 마킹을 결정한다.

차등 서비스에서 같은 클래스에 속하는 TCP 플로우들은 같은 등급의 서비스를 제공 받아야 하지만 UDP와 같은 무응답 플로우에 의한 영향, RTT(Round Trip Time)의 차이, 목표 전송률(CTR: Committed Target Rate)의 차이 등의 이유로 같은 클래스에 속하는 플로우들 사이에서도 전송률이 다르게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 기존 연구로는 지능형 TC(Intelligent Traffic Conditioner)가 있다. 그러나 고정된 시간 창(time window) 길이를 이용하여 평균 전송률을 예측하기 때문에 RTT가 다른 집합 플로우들(aggregate flows) 사이에 오차가 존재할 수 있다. 또한 지능형 TC는 기본적으로 2색 마킹만을 제공하고, RTT와 목표 전송률을 동시에 고려하는 메커니즘이 없으며, under-provisioned 네트워크의 경우에는 RTT의 영향을 완화시킬 수 없다[9].

본 논문에서는 TCP 플로우에서 발생할 수 있는 이러한 문제들을 해결하고 공평성을 향상시키기 위하여 RTT 및 목표 전송률을 고려한 3색 마킹 메커니즘(TRA3CM: Target rate and RTT Aware 3 Color Marker)을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 TRA3CM 메커니즘은 평균 전송률 예측 기반 방식인 TSW(Time Sliding Window) 마킹 메커니즘을 개선하여, RTT 및 목표 전송률에 따라 Green, Yellow 및 Red로 마킹되는 확률을 조정함으로써 RTT에 의한 영향을 최소화시킨다. 또한 각 집합 플로우의 전송률이 목표 전송률에 비

례하도록 하여 공평성을 향상시킨다. 차등 서비스 네트워크에서는 계약한 목표 전송률에 비례하도록 과금하는 것을 일반적인 경우로 볼 수 있기 때문에, 서비스 제공자 및 사용자 입장에서 목표 전송률에 비례한 전송률을 갖는 것을 공평성을 보장하는 것으로 생각할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 차등 서비스 네트워크에서 공평성 향상에 대한 관련 연구를 기술하고, 3장에서 제안한 TRA3CM에 대하여 설명한다. 4장에서는 ns 시뮬레이터를 이용하여 TSW 방식, 지능형 TC 및 TRA3CM의 성능을 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

차등 서비스 네트워크에서 확산 서비스의 마킹에 대한 연구로 토큰 버킷 기반 방식의 SRTCM(Single Rate Three Color Marker), TRTCM(Two Rate Three Color Marker) 등이 있으며, 평균 전송률 예측 기반 방식에는 TSW3CM(Time Sliding Window Three Color Marker)이 있다[6,7,8]. 코어 라우터에서는 DSCP에 따라 패킷을 처리하기 위한 PHB로 RIO 방식이 일반적으로 이용된다. 차등 서비스 네트워크에서 공평성을 향상시키기 위한 연구는 토큰 버킷 방식을 기반으로 하는 [10], [11] 등과 평균 전송률 예측 방식을 기반으로 하는 지능형 TC 등으로 분류할 수 있다. [10], [11]은 토큰 버킷에 FRED(Flow Random Early Drop)를 적용시켜 무응답 플로우의 영향을 감소시키고 있다. 그러나 FRED 알고리즘은 TCP 플로우들의 RTT 차이에 의한 효과를 완화시켜 주지는 못하기 때문에 FRED를 적용하는 [10], [11]은 RTT에 의해 큰 영향을 받는다. 지능형 TC에서는 상대적으로 RTT가 높거나 목표 전송률이 높은 집합 플로우에 대해서 IN으로 마킹되는 패킷의 양을 증가시킴으로써, RTT에 의한 영향을 감소시키고 목표 전송률에 비례한 전송률을 얻도록 하고 있다. 그러나 지능형 TC에서는 TSW 방식에서처럼 고정된 시간 창 길이를 이용하고 있기 때문에 평균 전송률 예측에서 오차가 커질 수 있으며 다양한 응용에 적용하기에는 부족한 2색 마킹만을 제공한다. 또한 RTT와 목표 전송률을 동시에 고려하는 메커니즘이 존재하지 않고 under-provisioned 네트워크에서는 RTT의 영향을 완화시킬 수 있는 메커니즘이 동작하지 않는 문제가 있다.

### 2.1 TSW(Time Sliding Window) 마킹 메커니즘

TSW 마킹 메커니즘은 집합 플로우의 평균 전송률을 예측하고 목표 전송률(CTR: Committed Target Rate) 및 최고 목표 전송률(PTR: Peak Target Rate)을 이용하여 마킹 확률을 계산한다. 그리고 계산된 확률에 의해 패킷들은 Green, Yellow, Red로 마킹된다. 그림 1은

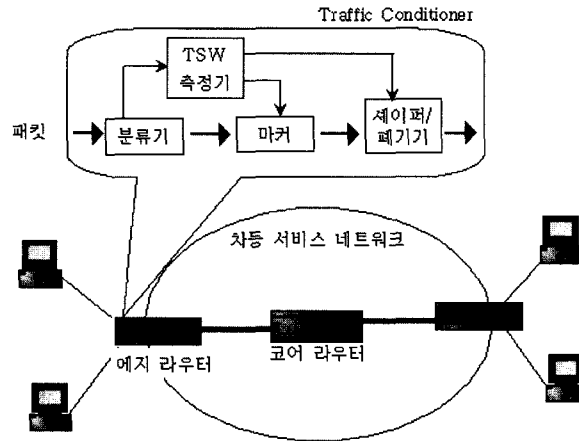


그림 1 확산 서비스를 제공하는 차동 서비스 네트워크의 구조

TSW 방식의 확산 서비스를 제공하는 기본적인 차동 서비스 네트워크의 구조를 보이고 있다. 소스에 의해 전송된 패킷은 에지 라우터에서 분류되어 TSW 방식에 따라 마킹된다. 마킹된 패킷은 DSCP에 따라 코어 라우터에서 RIO 방식을 이용하여 처리된다.

TSW 방식을 이용하는 TC(traffic conditioner)는 패킷을 분류하는 분류기(classifier), 평균 전송률을 예측하는 TSW 측정기(meter), 평균 전송률을 이용하여 마킹을 위한 확률을 계산하고 계산된 확률에 따라 패킷에 마킹하는 마커(marker)와 RIO 방식을 이용하여 패킷의 폐기를 결정하는 폐기기(dropper) 등으로 구성된다. 이 중 TSW 방식의 핵심이 되는 TSW 측정기 및 TSW 마킹 알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1.1 TSW 측정기(meter)

TSW 방식에서 평균 전송률 예측은 시간 창 개념을 이용하여 이루어진다. 그림 2는 시간 창(time window)의 개념을 나타내고 있다. 시간  $t_{n-1}$ 과  $t_n$ 은 각각 n-1번째 및 n번째 패킷이 도착한 시간을 나타내고  $T_{WL}$ 은 시간 창 크기를 나타낸다.

시간 창을 이용한 평균 전송률  $R_{avg}$ 의 계산은 다음과 같이 이루어진다. 가장 최근에 예측된 평균 전송률  $R_{avg}$

와 시간 창 길이  $T_{WL}$ 을 곱하여  $T_{WL}$  동안 전송된 평균 데이터 양을 구하고 여기에 막 도착한 패킷의 크기  $D_n$ 을 더해서 데이터 양  $D_{total}$ 을 계산한다. 그리고 이  $D_{total}$ 을 시간 창 길이와 n-1번째 패킷이 도착한 시각 이후로 지난 시간의 합인  $T_{WL} + (t_n - t_{n-1})$ 으로 나누어 새로운 평균 전송률  $R_{avg}$ 를 구하게 된다. 평균 전송률  $R_{avg}$ 의 계산 방법을 정리하면 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 식 (2)의  $R_{avg}$ 는 TSW 패킷 마킹 알고리즘을 동작시키기 위해 이용된다.

$$D_{total} = R_{avg} \times T_{WL} + D_n \tag{1}$$

$$R_{avg} = \frac{D_{total}}{T_{WL} + (t_{n+1} - t_n)} \tag{2}$$

TSW 방식에서 평균 전송률 예측에 이용하는 고정된 시간 창 길이를 사용한 계산은 시간 창 길이에 비해 RTT가 상대적으로 크거나 작을 경우에 큰 오차가 발생할 수 있다. 시간 창 길이에 비해 RTT가 작을 경우에는 실제 전송률의 급격한 증가를 인지하는 시간이 길어지게 되고 반대로 RTT가 클 경우에는 정상적인 전송률 예측이 불가능하게 된다.

2.1.2 TSW 마커(marker)

TSW 마커는 TSW 측정기에 의해 예측된  $R_{avg}$ 와

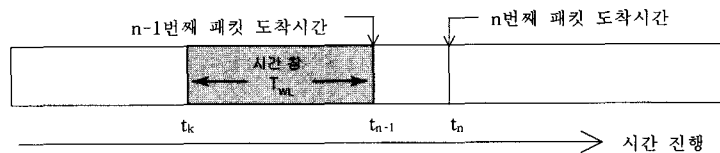


그림 2 TSW 방식의 평균 전송률 측정

서비스 제공자와 사용자 사이의 계약에 의해 정해질 수 있는 목표 전송률 RC 및 최고 목표 전송률 RP를 이용하여 동작한다. 그림 3은 TSW 마커의 알고리즘을 나타낸다.

$R_{avg}$  = 예측된 평균 전송률

if ( $R_{avg} \leq R_C$ )  
 Green 마킹

else if ( $R_{avg} \leq R_P$ ) AND ( $R_{avg} > R_C$ )  
 $P_0 = \frac{R_{avg} - R_C}{R_{avg}}$   
 $P_0$  확률로 Yellow 마킹  
 $(1 - P_0)$  확률로 Green 마킹

else  
 $P_1 = \frac{R_{avg} - R_P}{R_{avg}}$   
 $P_2 = \frac{R_P - R_C}{R_{avg}}$   
 $P_1$  확률로 Red 마킹  
 $P_2$  확률로 Yellow 마킹  
 $(1 - (P_1 + P_2))$  확률로 Green 마킹

그림 3 TSW 마킹 알고리즘

TSW 알고리즘은 패킷의 중요도에 따라 Green, Yellow, Red 등으로 마킹할 수 있고 집합 플로우의 평균 전송률을 계약에 의한 목표 전송률 이상으로 유지하기 위해 이용될 수 있다. TSW 방식은 기본적으로 3색 마킹을 이용하지만 RP 값을 무한대로 설정함으로써 2색 마킹(TSW2CM: Time Sliding Window 2 Color Marker)을 제공할 수도 있다. 그러나 TSW 알고리즘에서 RTT 차이에 의해 같은 클래스에 속하는 플로우 사이에 발생할 수 있는 불공평성과 전송률이 계약한 목표 전송률에 비해하지 않는 문제 등은 해결되어야 할 과제이다.

**2.2 지능형 TC(Intelligent Traffic Conditioner)**

지능형 TC는 TSW 알고리즘에서 발생할 수 있는 집합 플로우 사이의 RTT 차이에 의한 불공평성과 계약한 목표 전송률에 비해하지 않는 전송률 분배 문제를 해결하기 위해 [9]에서 제안되었다. 지능형 TC의 측정기와 마커의 기본 알고리즘은 TSW2CM 방식과 동일하다. 다른 점은 집합 플로우 1, 2의 OUT으로 마킹되는 확률 계산에 RTT 또는 목표 전송률의 영향을 고려하고 있다는 사실이다. 지능형 TC는 RTT만을 고려한 RATC(Rate Aware Traffic Conditioner)와 목표 전송률만을 고려한 TATC(Target Aware Traffic Conditioner)로 구분될 수 있다.

RATC에서는 TCP의 전송률, RTT 및 폐기 확률 P 사이의 관계를 나타내는 식 (3)을 이용하여 계산한 확률을 마킹에 이용한다[12].  $R_1, R_2$ 가 각각 1, 2번 집합 플로우의 전송률을 나타내고  $RTT_1, RTT_2$ 는 RTT를,  $P_1, P_2$ 가 폐기 확률을 나타낸다고 할 때, 1, 2번 집합 플로우의 전송률이 RTT에 독립적으로 같도록 하기 위해서는 식 (4)가 만족해야 한다.

$$R = \frac{C \times MSS}{RTT \times \sqrt{P}} \tag{3}$$

$$R_1 = \frac{C \times MSS}{RTT_1 \times \sqrt{P_1}} = R_2 = \frac{C \times MSS}{RTT_2 \times \sqrt{P_2}} \tag{4}$$

식 (4)를 이용하여  $P_2$ 의 폐기 확률과 RTT 사이의 관계를 구하면 식 (5)와 같다. RATC에서는  $P_1$ 과  $P_{out1}$ ,  $P_2$ 와  $P_{out2}$ 가 각각 같다고 가정함으로써 식 (6), (7)과 같이 OUT으로 마킹될 확률을 유도할 수 있다. 여기서  $P_{out1}, P_{out2}$ 는 OUT으로 마킹될 확률을 나타낸다.

$$P_2 = \left( \frac{RTT_1}{RTT_2} \right)^2 P_1 \tag{5}$$

$$P_{out1} = \frac{R_{avg} - R_C}{R_{avg}} \tag{6}$$

$$P_{out2} = \left( \frac{RTT_1}{RTT_2} \right)^2 P_{out1} \tag{7}$$

집합 플로우 1을 차등 서비스 네트워크에서 가장 RTT가 작은 플로우로 가정할 경우에 집합 플로우 1, 2의 RTT와  $P_{out1}$ 을 알면 이를 이용하여 집합 플로우 2의 OUT 마킹 확률을 얻을 수 있다. 각 집합 플로우의 RTT 값은 미리 설정된 전송 지연(transmission delay)을 이용하거나 에지 라우터에서 측정에 의해 구할 수 있으며, 차등 서비스 네트워크 내의 최소 RTT를 얻기 위해서는 에지 라우터 사이의 정보 교환이 필요하다. 집합 플로우 1, 2가 공평한 대역분배가 이루어진 경우에  $P_{out1}$ 을 구하기 위해서 필요한  $R_{avg}$ 와  $R_C$ 는 두 집합 플로우가 같은 값을 갖게 되므로, 집합 플로우 2의  $R_{avg}$ 를 이용하여  $P_{out1}$ 을 계산할 수 있다.

TATC는 두 집합 플로우의 RTT가 같다고 가정할 때 식 (8)을 이용하여 전송률이 목표 전송률에 비해하도록 할 수 있다. 이는 식 (7)과 비슷한 방법으로 유도될 수 있다. 지능형 TC의 TATC2D(Target Aware TC with 2 drop precedence)는 2색 마킹 메커니즘을 이용하고, TATC3D(Target Aware TC with 3 drop precedence)는 3색 마킹 메커니즘을 이용하고 있다. 그러나 TATC3D는 3색 마킹을 위하여 계약에 의한 최고 목표 전송률을 이용하지 않고 전송률이 목표 전송률에 비해하도록 만들기 위한 목적으로 3색 마킹을 이용하고 있다. 식 (8)에서 minTarget은 차등 서비스 네트워크의 목표 전송률 중 최소 값을 나타내고 aggrTarget은 해당 플로우의 목표 전송률을 나타낸다.  $P_C, P_Y, P_R$ 는 각

각 Green, Yellow, Red로 마킹될 확률을 나타낸다.

$$P_{out} = \left( \frac{\min Target}{aggr Target} \right)^2 P_{out} \} TATC2D \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{G2} &= \frac{R_C}{R_{avg}} \\ P_{Y2} &= \left( 1 - \frac{\min Target}{aggr Target} \right) P_{G2} \\ P_{R2} &= \left( \frac{\min Target}{aggr Target} \right) P_{G2} \end{aligned} \right\} TATC3D$$

지능형 TC는 TSW 방식과 같이 고정된 시간 창 길이와 관련된 문제를 갖게 된다. 또한 기본적으로 2색 마킹만을 제공하기 때문에 패킷의 중요도 구분이 2개로 제한된다. 지능형 TC는 각각 RTT와 목표 전송률을 고려한 RATC 및 TATC를 제안하고 있지만, 동시에 적용할 수 있는 메커니즘은 제공하지 않는다. 또한 지능형 TC는 평균 전송률이 목표 전송률보다 작을 경우 (under-provisioned network)에는 모든 패킷을 Green으로 마킹하고 있다. 이것은 평균 전송률이 목표 전송률보다 작은 이유가 RTT의 영향 때문인지, under-provisioned 네트워크 때문인지를 판단할 수 있는 근거가 없기 때문이다. 그러므로 지능형 TC에서는 under-provisioned 네트워크의 경우에 RTT의 영향을 완화시키기 위한 메커니즘이 동작할 수 없다.

### 3. TRA3CM(Target rate and RTT Aware 3 Color Marker) 메커니즘

본 장에서는 차등 서비스에서 TCP 플로우의 RTT 및 목표 전송률에 따른 공평성 문제를 해결할 수 있는 3색 마킹 메커니즘인 TRA3CM을 제안한다. TRA3CM에서는 지능형 TC와는 다르게 3색 마킹을 제공하며 고정된 시간 창 길이 대신에 현재 RTT 값을 시간 창 길이로 이용하여 평균 전송률 예측 오차를 감소시킨다. TRA3CM은 RTT 및 목표 전송률을 동시에 고려하여 목표 전송률에 비례한 전송률을 제공할 수 있으며, under-provisioned 네트워크의 경우에도 RTT의 영향을 완화시켜 집합 플로우들 사이에 공평한 전송률을 제공할 수 있다.

지능형 TC에서는 RTT 및 목표 전송률을 고려하여 IN 및 OUT으로 마킹되는 패킷의 비율을 조정하기 때문에 RTT가 큰 플로우의 경우 IN으로 마킹되는 패킷이 증가하게 된다. TRA3CM은 기본적으로 Yellow와 Red 마킹 확률을 조정하며 under-provisioned 네트워크에서는 Green 및 Yellow의 마킹 확률을 조정하여 RTT의 영향을 완화시킨다. TRA3CM의 마킹 확률 계산에서 기본적인 표기는 지능형 TC에서와 동일하며, 집합 플로우 1이 차등 서비스 네트워크에서의 최소 RTT를 갖는다고 가정하여 집합 플로우 2의 각 색별 마킹 확률을 계산한다.

### 3.1 TRA3CM 마킹 확률

TRA3CM은 지능형 TC와는 다르게 3색 마킹을 제공하면서 RTT의 영향을 최소화시킬 수 있고, RTT 및 목표 전송률을 고려하여 Yellow 및 Red 확률을 조정함으로써 Green 마킹 확률에 영향을 주지 않는다. 이러한 패킷 마킹 확률의 계산은 지능형 TC와 비슷하게 식 (3)으로부터 유도된다. 식 (9)는 식 (3)으로부터 유도된 목표 전송률을 포함한 패킷 폐기 확률을 나타내고 있으며 식 (10)은 패킷 폐기 확률  $P_1$ 과  $P_2$ 를 나타내고 있다. 여기서 아래 첨자 1, 2는 집합 플로우 1, 2를, R,  $R_C$ 는 각 집합 플로우의 예측된 평균 전송률 및 목표 전송률을 나타내고,  $P_{Gd}$ ,  $P_{Yd}$ ,  $P_{Rd}$ 는 각각 Green, Yellow, Red 패킷의 폐기 확률을 나타낸다. 각 색별로 마킹된 패킷 수 및 폐기된 패킷 수가 각각  $N_G$ ,  $N_Y$ ,  $N_R$ ,  $N_{Gd}$ ,  $N_{Yd}$ ,  $N_{Rd}$ 라고 할 때,  $P_{Gd}$ ,  $P_{Yd}$ ,  $P_{Rd}$ 는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 지능형 TC에서처럼 집합 플로우 1의 RTT를 네트워크내의 최소 RTT로 가정한다.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{C1}}{R_{C2}} = \frac{RTT_2}{RTT_1} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1}} \quad (9)$$

$$P_2 = \left( \frac{RTT_1}{RTT_2} \right)^2 \left( \frac{R_{C1}}{R_{C2}} \right)^2 P_1$$

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{Gd1} + P_{Yd1} + P_{Rd1} \\ P_2 &= P_{Gd2} + P_{Yd2} + P_{Rd2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} N_{A1} &= N_{G1} + N_{Y1} + N_{R1}, & N_{A2} &= N_{G2} + N_{Y2} + N_{R2} \\ P_{Gd1} &= \frac{N_{Gd1}}{N_{A1}}, & P_{Gd2} &= \frac{N_{Gd2}}{N_{A2}} \\ P_{Yd1} &= \frac{N_{Yd1}}{N_{A1}}, & P_{Yd2} &= \frac{N_{Yd2}}{N_{A2}} \\ P_{Rd1} &= \frac{N_{Rd1}}{N_{A1}}, & P_{Rd2} &= \frac{N_{Rd2}}{N_{A2}} \end{aligned} \quad (11)$$

집합 플로우의 각 색별 패킷 폐기 확률  $P_{Gd}$ ,  $P_{Yd}$ ,  $P_{Rd}$ 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며 여기서  $P_G$ ,  $P_Y$ 와  $P_R$ 은 각각 Green, Yellow, Red 마킹 확률이다.  $g$ ,  $y$ ,  $r$ 은 3색 각각에서의 폐기 확률이다.  $g$ 는  $g = N_{Gd}/N_G$ 로 나타낼 수 있으며 이는 Green 패킷들 중에서 폐기되는 패킷의 비율을 나타낸다.  $y$ 와  $r$ 도 Yellow, Red 패킷에 대해서 같은 의미이다.  $g$ ,  $y$ ,  $r$  값은 에지 라우터에서 측정에 의해서 또는 코어 라우터의 정보 제공에 의해 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Gd1} &= g_1 P_{G1}, & P_{Gd2} &= g_2 P_{G2} \\ P_{Yd1} &= y_1 P_{Y1}, & P_{Yd2} &= y_2 P_{Y2} \\ P_{Rd1} &= r_1 P_{R1}, & P_{Rd2} &= r_2 P_{R2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_{G1} + P_{Y1} + P_{R1} = 1, \quad P_{G2} + P_{Y2} + P_{R2} = 1 \quad (13)$$

각 집합 플로우 사이의  $g$ ,  $y$ ,  $r$  관계는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 각 집합 플로우 사이에 식 (14)가 성립되는 이유는 RIO의 패킷 폐기 메커니즘에 의해 플로우 구분 없이 각 색별로 임의의 패킷이 폐기되기 때문이다.

$$g = g_1 = g_2, \quad y = y_1 = y_2, \quad r = r_1 = r_2 \quad (14)$$

$$0 \leq g \leq 1, \quad 0 \leq y \leq 1, \quad 0 \leq r \leq 1$$

식 (10), (12), (14)를 식 (9)에 적용하면 식 (15)를 얻을 수 있고 이를  $g, y, r$ 에 대하여 정리하면 식 (16)과 같은 결과를 얻을 수 있다. 식 (16)에서  $g, y, r$ 은 코어 라우터의 RIO 메커니즘에 따라 0에서 1 사이의 값을 갖게 된다. 차동 서비스 네트워크에서  $g$ 는 항상 0으로 유지되어 Green 패킷이 보호되어야 하는 것이 일반적이다. 그러나 under-provisioned 네트워크에서는  $g$ 의 값이 0이상이 될 수 있다.  $y$ 는  $r$ 이 1보다 작은 경우에는 0으로 유지되며  $r=1$ 이 되면 0과 1 사이의 값을 갖는다. 이러한  $g, y, r$  값에 따른 식 (16)의 세 가지 경우가 식 (17), (18)과 (19)이다.

$$a^2 = \left(\frac{RTT_1}{RTT_2}\right)^2 \left(\frac{R_{C1}}{R_{C2}}\right)^2 \quad (15)$$

$$gP_{C2} + yP_{Y2} + rP_{R2} = a^2 gP_{G1} + a^2 yP_{Y1} + a^2 rP_{R1} \quad (16)$$

$$(P_{C2} - a^2 P_{G1})g + (P_{Y2} - a^2 P_{Y1})y + (P_{R2} - a^2 P_{R1})r = 0$$

if  $0 \leq r < 1, y=0, g=0$   
then  $(P_{R2} - a^2 P_{R1})r = 0$  (17)

if  $r=1, 0 < y < 1, g=0$   
then  $(P_{Y2} - a^2 P_{Y1})y + (P_{R2} - a^2 P_{R1})r = 0$  (18)

if  $r=1, y=1, 0 < g < 1$   
then  $(P_{C2} - a^2 P_{G1})g + (P_{Y2} - a^2 P_{Y1})y + (P_{R2} - a^2 P_{R1})r = 0$  (19)

식 (13), (17), (18), (20)을 식 (16)에 적용하여 각 색별 마킹 확률을 정리하면 식 (21), (22), (23)과 같으며, 식 (13), (19)를 식 (16)에 적용하면 식 (24)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서  $P_{G1}, P_{Y1}, P_{R1}$ 은 TSW 방식의 마킹 확률 계산과 식 (9)로부터 유도되어 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (20)에서  $R_{C2}, R_{Y2}$ 는 각각 목표 전송률과 최고 목표 전송률을 나타내며, 서비스 제공자와 사용자간 계약에 의해 결정될 수 있다. 식 (20), (21), (22), (23)의 결과는  $y$ 가 1보다 작고  $g$ 가 0인 동안에 만족하며,  $g$ 가 0과 1 사이의 값을 갖게 되면 패킷 마킹에 식 (24)를 이용하게 된다. 식 (24)에서의  $P_{G1}$ 의 값은 0.5를 이용하고 있으며, 이는 실험을 통해서 선택된 값이다.

$$P_{G1} = \frac{R_{C2}}{R_2}, \quad P_{Y1} = \frac{R_{Y2} - R_{C2}}{R_2}, \quad P_{R1} = \frac{R_2 - R_{C2}}{R_2} \quad (20)$$

$$P_{C2} = P_{G1} = \frac{R_{C2}}{R_2} \quad (21)$$

$$P_{Y2} = a^2 P_{Y1} + \frac{1-a^2}{1-y} (1-P_{G1}) \quad (22)$$

$$= a^2 \frac{R_2 - R_{Y2}}{R_2} + \frac{1-a^2}{1-y} \left(\frac{R_2 - R_{C2}}{R_2}\right)$$

$$P_{R2} = a^2 P_{R1} - \frac{y(1-a^2)}{1-y} (1-P_{G1}) \quad (23)$$

$$= a^2 \frac{R_2 - R_{R2}}{R_2} - \frac{y(1-a^2)}{1-y} \left(\frac{R_2 - R_{C2}}{R_2}\right)$$

$$P_{C2} = \frac{1-a^2}{1-g} + a^2 P_{G1} \quad (24)$$

### 3.2 TRA3CM 마킹 알고리즘

TRA3CM의 마킹 알고리즘에서는 고정된 시간 창 길이 대신에 RTT를 시간 창 길이로 이용하여 평균 전송률을 예측한다. 시간 창 길이에 비해 RTT가 상대적으로 크거나 작을 경우에 발생할 수 있는 오차를 감소시킬 수 있다. 이렇게 예측된 평균 전송률은 식 (21), (22), (23)과 함께 TRA3CM의 동작에 이용되며, 실제 마킹 알고리즘은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 패킷이 도착할 때마다 그림 4의 마킹 알고리즘에 따라 마킹 동작이 이루어진다.

$a'$  = RTT 및 목표 전송률 계수  
 $R_{avg}$  = 예측된 평균 전송률  $g = N_{Vd}/N_A$   
 $R_P$  = 계약된 최고 목표 전송률  $y = N_{Vd}/N_A$   
 $R_C$  = 계약된 목표 전송률  $r = N_{Rd}/N_A$

```

if ( $R_{avg} \leq R_C$ )
    if ( $y = 1$ )  $P_G =$  식 (24)
         $P_G$ 의 확률로 Green 마킹
        ( $1-P_G$ )의 확률로 Yellow 마킹
    else Green 마킹
else  $P_G =$  식 (21)
    if ( $y = 1$ )
         $P_G$  확률로 Green 마킹
        ( $1-P_G$ ) 확률로 Red 마킹
    else
        if ( $R_{avg} < R_P$ )  $R_P = R_C$ 
             $P_Y =$  식 (22),  $P_R =$  식 (23)
             $P_G$  확률로 Green 마킹
            if ( $P_R \leq 0$ )
                ( $1-P_G$ ) 확률로 Yellow 마킹
            else
                 $P_Y$  확률로 Yellow 마킹
                 $P_R$  확률로 Red 마킹
    
```

그림 4 TRA3CM 마킹 알고리즘

TRA3CM에서는 TSW 및 지능형 TC에서와는 다르게 평균 전송률이 목표 전송률보다 작을 경우에 모든 패킷을 Green으로 마킹하지 않는다. 이는 RTT의 영향 또는 under-provisioned 네트워크가 원인이 되어 평균 전송률이 목표 전송률보다 작은 경우가 발생할 수 있기 때문이다. TRA3CM은  $y$  값을 검사하여 이를 판별한다. Green 패킷이 폐기되지 않는다면( $y < 1, g=0$ 인 경우), RTT의 영향에 의해서 평균 전송률이 목표 전송률보다 작아졌다고 판단하여 목표 전송률을 보장하기 위해 모든 패킷은 Green으로 마킹된다. 그러나  $y=1, g>0$ 이라면 under-provisioned 상황으로 판단하여 식

(24)의 확률로 Green으로 마킹하고 나머지 패킷은 Yellow로 마킹한다 이러한 동작에 의해서 TRA3CM은 under-provisioned 네트워크에서도 RTT의 영향을 완화시켜 공평한 대역 분배를 제공할 수 있다.

예측된 평균 전송률이 목표 전송률보다 크다면 기본적으로 식 (21), (22), (23)에 기반한 마킹 확률을 이용하여 패킷을 마킹하게 된다. 이때  $y$ 는 혼잡 상황의 정도를 결정하기 위하여 이용된다.  $y=1$ 이라면 현재 혼잡 상황으로 인해 모든 Yellow 및 Red 패킷이 폐기되고 있다는 사실을 나타내므로, Green 패킷 이외의 패킷은 Red로 마킹하여 빠르게 혼잡 상황에서 벗어날 수 있도록 한다.  $y < 1$ 인 경우에는 각 색의 마킹 확률을 계산하여 패킷들을 마킹하게 된다. 이때 예측된 평균 전송률이 최고 목표 전송률보다 작다면, 마킹 확률 계산에 이용되는  $R_p$ 를 목표 전송률과 같은 값으로 설정하여 평균 전송률이  $R_p$  값보다 항상 큰 값을 유지하도록 한다. 이것은 평균 전송률이  $R_p$ 보다 작게 되면 모든 패킷이 Green과 Yellow로만 마킹되어 RTT의 영향을 완화시키기 위한 Yellow 및 Red 마킹 확률의 조정이 불가능해지기 때문이다.

마킹을 위한  $P_G$ ,  $P_Y$ ,  $P_R$ 의 계산에서  $P_R$ 은 음수 값이 되고  $P_Y$ 는 그만큼 더 증가되는 경우가 있는데, 이는 Yellow로 마킹해야 될 패킷이 부족한 경우에 발생한다. 두 집합 플로우의 RTT 차이가 너무 커서 마킹 확률 조정으로 RTT의 영향력을 상쇄할 수 없게 되는 것이다. 이러한 경우에도 Green 패킷은 계약 값만큼 보장하고, 나머지 패킷들은 모두 Yellow로 마킹함으로써 가능한 범위에서 RTT의 영향을 완화시키고 있다.

#### 4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 2장에서 설명한 TSW 방식 및 지능형 TC와 3장에서 제안한 TRA3CM 메커니즘을 비교 분석

한다. 기존 메커니즘 및 TRA3CM에 대하여 RTT의 영향력 완화 정도에 대한 실험, 목표 전송률에 비례한 전송률 보장에 대한 실험, under-provisioned 네트워크에서 RTT에 독립적인 전송률 보장에 대한 실험 등을 수행하였다.

##### 4.1 실험 환경

실험은 ns 시뮬레이터를 이용하여 이루어졌으며 실험을 위한 네트워크 구성은 그림 5와 같다. 코어 및 에지 라우터의 RIO 메커니즘을 위한 RED 매개 변수는 표 1과 같다.

표 1 RIO의 RED 매개 변수 설정

	Green(IN)	Yello(OUT)	Red
Min <sub>th</sub>	40 pkts	25 pkts	10 pkts
Max <sub>th</sub>	55 pkts	40 pkts	25 pkts
Max <sub>p</sub>	0.02	0.05	0.1
w <sub>q</sub>	0.002	0.002	0.002

그림 5의 모든 링크 대역폭은 10Mbps이며 병목 구간은 코어 라우터와 에지 라우터 4 사이에 존재하게 된다. RTT 및 목표 전송률은 실험에 따라 조정된다.

##### 4.2 RTT에 따른 공평성 비교

본 절에서는 2색 마킹만을 제공하는 TSW2CM 및 지능형 TC와 3색 마킹을 제공하는 TSW3CM 및 TRA3CM에서 RTT의 영향을 비교하였다. 실험을 위한 각종 매개 변수 및 환경 설정은 표 2와 같다.

집합 플로우 1은 호스트 1, 4 사이에 생성되며 집합 플로우 2는 호스트 2, 5 사이에 전송된다. 최고 목표 전송률은 TSW3CM의 경우에는 3Mbps로, TRA3CM은 3Mbps 또는 무한대로 설정하였다. TRA3CM에서 최고 목표 전송률을 무한대로 설정한 이유는 최고 목표 전송률의 영향을 제거하여 RATC와 비슷한 상황에서 실험

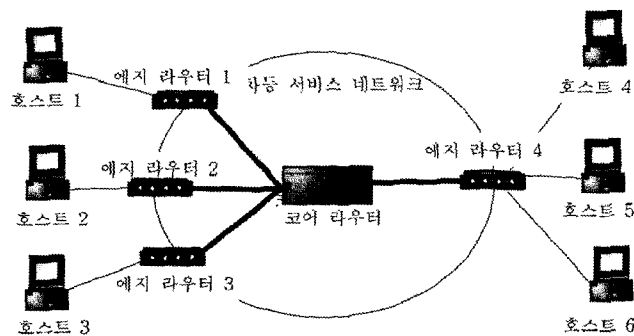


그림 5 실험 환경

표 2 RTT에 따른 공평성 비교 실험을 위한 매개 변수 및 환경 설정

TC	집합 플로우	RTT	목표 전송률	최고 목표전송률	플로우 수
TSW2CM/ 지능형 TC (RATC)	집합 플로우 1	20 ms	2 Mbps	×	6
	집합 플로우 2	20 ~ 200 ms	2 Mbps	×	6
TSW3CM/ TRA3CM	집합 플로우 1	20 ms	2 Mbps	3Mbps/ 무한대(TRA3CM)	6
	집합 플로우 2	20 ~ 200 ms	2 Mbps	3Mbps/ 무한대(TRA3CM)	6

표 3 각 색별 마킹된 패킷 수

	TSW2CM		RATC		TSW3CM			TRA3CM		
	IN	OUT	IN	OUT	Green	Yellow	Red	Green	Yellow	Red
20ms	19348	29606	21058	28947	19518	9641	19963	18787	10382	20520
20ms	19449	30716	20255	28870	19586	9681	19610	18759	10163	20175
20ms	19631	42933	19271	31019	19528	9632	27228	18598	8732	20051
80ms	19269	15736	39338	6519	19342	9587	9105	18960	24759	3704
20ms	19718	50197	19505	37582	19546	9862	33889	18950	9363	25485
160ms	19206	7772	37881	1739	19149	9388	3559	19100	22678	804
20ms	19465	52082	19537	40545	19465	9772	35173	18836	9327	27706
200ms	19267	5832	35086	981	19342	8872	2477	19251	20470	421

하기 위한 것이다. 이것은 RATC에서처럼 서비스 제공자와 사용자 사이에 목표 전송률만을 이용하여 계약한 것과 동일하게 생각될 수 있다.

실험 동안에 마킹된 각 색별 패킷의 수를 살펴보면 표 3과 같다. RTT의 영향을 고려하지 않는 TSW2CM 및 TSW3CM의 경우에는 RTT의 차가 커질수록 두 집합 플로우의 전체 패킷 수의 차이가 커지게 된다. 이러한 차이는 대 부분 보호되지 않는 OUT이나 Red 패킷에서 나타나게 된다. RTT의 영향을 고려하고 있는 RATC 및 TRA3CM의 경우에는 두 집합 플로우의 RTT 차가 커지더라도 전송되는 전체 패킷의 수는 두 집합 플로우가 비슷하게 유지된다. RATC 및 TRA3CM에서는 RTT가 상대적으로 큰 집합 플로우의 IN 또는 Yellow 패킷의 수를 증가시켜 패킷 폐기 확률을 낮춤으로써 RTT가 다른 플로우 사이에 비슷한 전송률을 유지할 수 있다. 이러한 경향은 모든 실험에서 비슷하게 나타나게 된다.

그림 6은 실험 결과 그래프로써 집합 플로우 2의 RTT 변화에 대한 집합 플로우 1, 2간의 공평성 지수(fairness index) 변화를 나타낸다. 공평성 지수는 식 (25)와 같이 표현된다[13]. n은 플로우의 수, xi는 i번째 플로우의 전송률을 나타낸다. 공평성 지수가 1이면 플로우들 사이의 전송률 분배가 가장 공평하고 0이면 가장 불공평하다.

그림 6을 살펴보면 TSW 방식의 경우 RTT의 영향

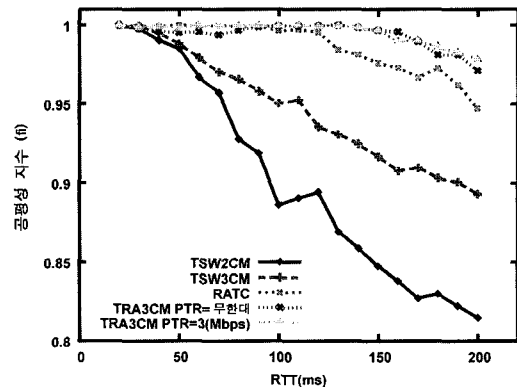


그림 6 TSW, 지능형 TC 및 TRA3CM의 RTT에 따른 공평성 지수 변화

$$\text{공평성 지수}(f_i) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i^2)} \quad (25)$$

으로 두 집합 플로우 사이의 RTT 차이가 커질수록 공평성 지수 상당히 낮아진다. RATC와 TRA3CM은 둘 다 우수한 성능을 보이지만, RTT 차이가 많이 나는 영역에서는 TRA3CM이 약간 더 좋은 성능을 나타낸다. 이것은 TRA3CM이 평균 전송률을 예측할 때 시간 창 길이를 RTT로 적용함으로써 각 집합 플로우의 현재 평균 전송률이 보다 정확히 예측될 수 있고, TRA3CM의 마킹 확률 계산 및 동작 알고리즘이 지능형 TC의



RATC보다 좀 더 정확하기 때문이다.

**4.3 동일한 RTT에서 목표 전송률에 따른 공평성 비교**

이번 실험에서는 목표 전송률에 따른 전송률 분배에 대하여 살펴본다. 실험을 위한 매개 변수 및 환경 설정은 표 4와 같다. TRA3CM의 최고 목표 전송률을 무한대로 설정한 이유는 4.2절의 실험과 동일하다. 그림 7에서 보이는 실험 결과는 목표 전송률이 변화함에 따라 측정된 집합 플로우 1, 2 전송률의 비율을 나타낸 것이다. CTR 및 PTR은 목표 전송률과 최고 목표 전송률을 나타낸다. 각 그래프가 Ideal 그래프에 근접할수록 목표 전송률에 보다 정확히 비례한 전송률 분배가 이루어진다. 그림 7의 결과를 보면 지능형 TC인 TATC2D와 TATC3D 사이에 TRA3CM의 두 가지 경우가 위치하

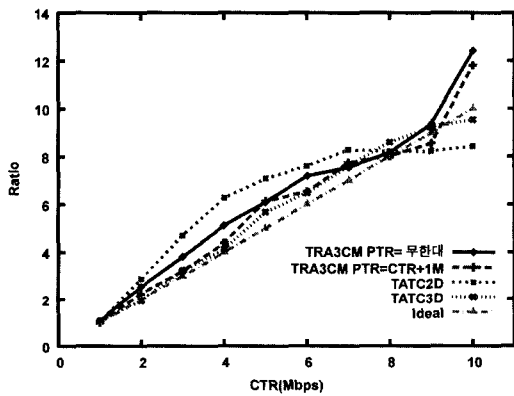


그림 7 지능형 TC 및 TRA3CM의 목표 전송률에 따른 전송률의 비율

며, 이들 모두 Ideal 그래프에 아주 근접하다는 것을 알 수 있다. 지능형 TC와 TRA3CM 둘 다 목표 전송률에 상당히 비례하게 전송률이 분배된다고 할 수 있다.

**4.4 다양한 RTT에서 목표 전송률에 따른 공평성 비교**

본 절에서는 RTT 및 목표 전송률을 변화시키며 실험하였다. 한 번은 집합 플로우 1의 RTT를 20ms로 고정하고, 다른 한 번은 집합 플로우 2의 RTT를 20ms로 고정하여 실험하였다. 실험 환경은 표 5와 같으며 그림 8과 9는 각각 TATC 및 TRA3CM의 실험 결과를 나타낸다. 그림 8-1 및 9-1은 집합 플로우 2에서 RTT를 변화시키고, 그림 8-2 및 9-2는 집합 플로우 1에서 RTT를 변화시키며 실험한 결과이다.

그림 8-1을 보면 RTT가 커질수록 전송률의 비율이 Ideal 그래프에서 급격하게 멀어지게 된다. 이것은 집합 플로우 2의 RTT와 목표 전송률이 동시에 커지게 되면 RTT의 영향을 완화 시키면서 동시에 목표 전송률에 비례한 전송률을 얻기 위해서 상당히 많은 패킷이 IN으로 마킹될 필요가 있지만, 느린 RTT 때문에 실제 IN으로 마킹될 수 있는 패킷의 수가 부족해지기 때문이다. 그림 8-2에서는 RTT와 목표 전송률을 각각 다른 집합 플로우에서 변화시키며 실험하였기 때문에, RTT의 차가 점점 커지더라도 그림 8-1에서의 같은 변화는 없다. 그러나 지능형 TC의 경우에는 RTT와 목표 전송률을 동시에 고려하고 있지 않기 때문에, 두 실험 모두에서 두 집합 플로우 사이의 RTT 차이가 커질수록 Ideal 그래프에서 상당히 멀어진다는 것을 알 수 있다.

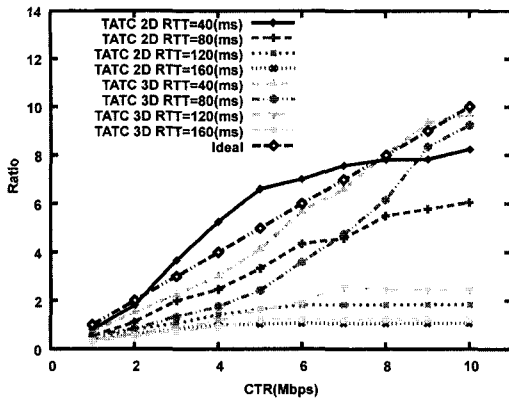
TRA3CM의 경우에는 지능형 TC와 달리 RTT 및 목표 전송률을 동시에 고려하고 있기 때문에, 다른

표 4 목표 전송률 변화에 따른 공평성 비교 실험을 위한 환경 설정

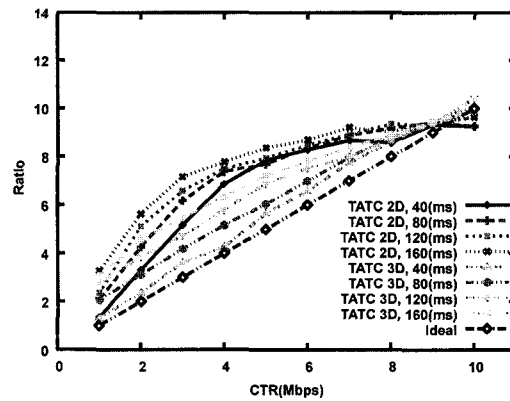
TC	집합 플로우	RTT	목표 전송률	최고 목표 전송률	플로우 수
지능형 TC (TATC)	집합 플로우 1	20 ms	1 Mbps	×	6
	집합 플로우 2	20 ms	1~10 Mbps	×	6
TRA3CM	집합 플로우 1	20 ms	1 Mbps	3 Mbps / 무한대	6
	집합 플로우 2	20 ms	1~10 Mbps	3 Mbps / 무한대	6

표 5 RTT 및 목표 전송률 변화에 따른 공평성 비교 실험을 위한 환경 설정

TC	집합 플로우	RTT (ms)	목표 전송률	최고 목표 전송률	플로우 수
지능형 TC (TATC)	집합 플로우 1	20, (40, 80, 120, 160)	1 Mbps	×	6
	집합 플로우 2	(40, 80, 120, 160), 20	1~10 Mbps	×	6
TRA3CM	집합 플로우 1	20, (40, 80, 120, 160)	1 Mbps	2 Mbps	6
	집합 플로우 2	(40, 80, 120, 160), (20)	1~10 Mbps	CTR + 1	6

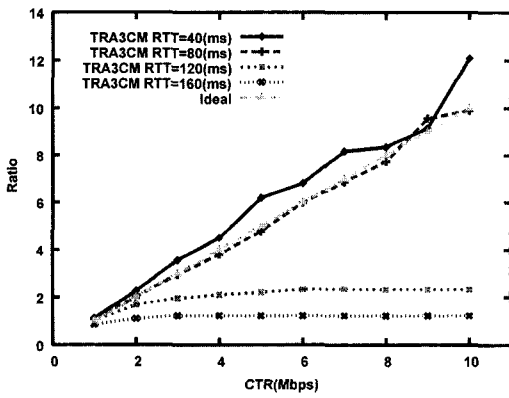


(1) 같은 집합 플로우에서 RTT 및 목표 전송률을 변화시킨 경우

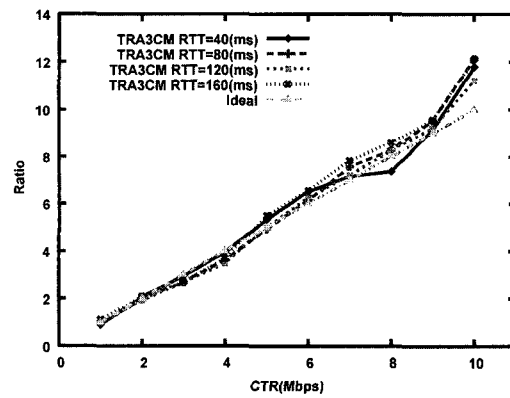


(2) 다른 집합 플로우에서 RTT와 목표 전송률을 변화시킨 경우

그림 8 지능형 TC에서 RTT 및 목표 전송률 변화에 따른 전송률의 비율



(1) 같은 집합 플로우에서 RTT 및 목표 전송률을 변화시킨 경우



(2) 다른 집합 플로우에서 RTT와 목표 전송률을 변화시킨 경우

그림 9 TRA3CM에서 RTT 및 목표 전송률 변화에 따른 전송률의 비율

RTT 및 목표 전송률을 동시에 적용하더라도 상당히 우수한 결과를 보인다. TRA3CM의 실험 결과는 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 그림 9는 그림 8의 실험과 같은 환경에서 TRA3CM을 이용하여 실험한 결과이다. 최고 목표 전송률은 목표 전송률보다 1Mbps 크게 설정하여 실험을 수행하였다.

그림 9-1을 그림 8-1과 비교해보면 각 색별 마킹에 필요한 충분한 패킷이 존재하는 경우에, TRA3CM이 지능형 TC에 비해 상당히 Ideal 그래프에 근접한 결과를 보인다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 8-2와 9-2를 비교해 보면, TRA3CM의 경우에는 거의 전 영역에서 Ideal 그래프에 근접하는 결과를 보이는 반면, RTT를 고려하고 있지 못하는 지능형 TC의 경우에는 RTT가 커질수록 Ideal 그래프에서 멀어진다는 것을 알 수 있다.

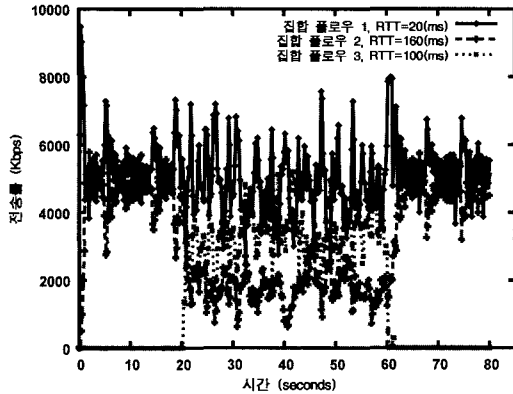
이번 실험을 통해서 두 집합 플로우의 RTT가 같을 경우에 TATC는 만족할 만한 성능을 보이지만, 다른 RTT 및 목표 전송률을 동시에 적용할 경우에는 상당한 성능 저하가 발생함을 확인하였다. 이것은 지능형 TC에서 RTT 및 목표 전송률의 영향을 동시에 고려하는 메커니즘을 제공하지 않기 때문이다. 그러나 제안한 TRA3CM 메커니즘은 다른 RTT 및 목표 전송률을 동시에 적용하더라도 집합 플로우들 사이에 공평한 전송률을 제공한다는 것을 알 수 있다.

#### 4.5 Under-provisioned 네트워크에서의 공평성 비교

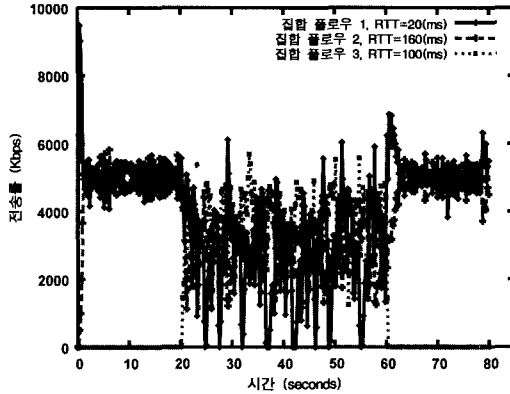
차등 서비스 네트워크에서 확산 서비스는 QoS에 대한 절대적인 보장을 해주지 않기 때문에, 병목 구간의 대역폭이 각 집합 플로우의 목표 전송률의 합보다 작은 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우 지능형 TC는 평균

표 6 Under-provisioned 네트워크에서의 실험을 위한 환경 설정

TC	집합 플로우	RTT	목표 전송률	전송 시간	플로우 수
지능형 TC (RATC)	집합 플로우 1	20 ms	5 Mbps	0~80 초	6
	집합 플로우 2	160 ms	5 Mbps	0~80 초	6
	집합 플로우 3	100 ms	5 Mbps	20~60 초	6
TRA3CM	집합 플로우 1	20 ms	5 Mbps	0~80 초	6
	집합 플로우 2	160 ms	5 Mbps	0~80 초	6
	집합 플로우 3	100 ms	5 Mbps	20~60 초	6



(1) 지능형 TC(RATC)의 전송률 변화



(2) TRA3CM의 전송률 변화

그림 10 under-provisioned 네트워크에서 RATC 및 TRA3CM의 비교

전송률이 목표 전송률보다 작기 때문에 거의 모든 패킷을 IN 또는 Green으로 마킹하게 된다. 따라서 RTT의 영향력을 완화시키기 위한 지능형 TC의 메커니즘은 동작할 수 없게 된다. 그러나 TRA3CM의 경우에는 이러한 under-provisioned 네트워크 상황에서도 RTT의 영향을 완화시켜서 집합 플로우들 사이의 공정성을 보장해 주고 있다. 본 실험을 위한 환경 설정은 표 6과 같다. Under-provisioned 네트워크에서 지능형 TC 및 TRA3CM의 동작에 대한 실험 결과는 그림 10과 같다.

그림 10의 실험에서 집합 플로우 1, 2가 계속 전송되고 있는 중에 집합 플로우 3이 20~60초 구간 동안 전송된다. 따라서 20~60초 구간 동안은 전체 목표 전송률의 합이 병목 구간의 대역폭보다 크게 되어 under-provisioned 네트워크가 된다.

지능형 TC의 실험 결과인 그림 10-1을 보면, 0~20초 사이의 구간동안에는 집합 플로우 1, 2만 있기 때문에 20ms의 집합 플로우와 160ms의 집합 플로우 사이에 RTT의 영향을 완화시키는 메커니즘이 동작하게 된다. 두 집합 플로우가 비슷한 전송률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 100ms의 RTT를 갖는 집합 플로우

3이 20초부터 전송되기 시작하면서 전체 목표 전송률의 합은 병목 구간의 대역폭보다 크게 되어 under-provisioned 네트워크가 된다. 거의 모든 패킷이 IN으로 마킹되어 RTT의 영향을 완화시킬 수 없게 되며, 그 결과로 그림 10-1의 20~60 초 구간에서는 RTT가 작은 순서인 집합 플로우 1, 3, 2 순으로 전송률이 높게 나타난다. 그리고 60초부터 집합 플로우 3의 전송이 중단되어 IN과 OUT 패킷으로 구분이 가능해지면서 두 집합 플로우 사이에 비슷한 전송률을 보이게 된다.

그러나 TRA3CM의 실험 결과인 그림 10-2에서는, 0~20초, 60초~80초 구간뿐만 아니라, 20~60초 구간에서도 RTT가 다른 집합 플로우 사이의 전송률이 비슷하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 TRA3CM의 동작 메커니즘이 under-provisioned 네트워크에서도 RTT를 고려한 동작을 수행할 수 있다는 사실을 보여준다. TRA3CM은 평균 전송률이 목표 전송률보다 작은 경우에 RTT에 의한 영향인지 under-provisioned 상황인지 판별이 가능하기 때문에 under-provisioned 상황에서도 지능형 TC보다 우수한 성능을 갖는다.

5. 결론 및 향후 과제

현재 인터넷에서의 QoS에 대한 주요한 연구 중의 하나로 차등 서비스에 대한 연구가 이루어지고 있다. 차등 서비스의 확산 서비스는 토큰 버킷 기반의 방식과 평균 전송률 예측 기반 방식이 존재하며, 후자의 경우에 대표적인 메커니즘은 TSW 방식이다. 이러한 기본적인 차등 서비스 구조에는 RTT의 영향으로 인한 집합 플로우 사이의 불공평한 현상을 완화시킬 수 있는 메커니즘이 없고, 목표 전송률에 비례한 전송률 분배를 위한 메커니즘 또한 존재하지 않는다. 지능형 TC의 경우 이러한 두 가지 경우에 대한 해결 방법을 제시하고 있으나, 2색 마킹 기법만 제공하여 이용될 수 있는 응용 영역에 제한이 있고, RTT와 목표 전송률을 동시에 고려하는 메커니즘이 없으며, 목표 전송률 보다 전송률이 작은 경우에 RTT의 영향인지 under-provisioned 네트워크 때문인지를 구분할 수 있는 방법이 없어서, 후자의 경우에는 RTT의 영향을 완화시킬 수 없게 된다.

본 논문에서는 3색 마킹을 제공하고 RTT와 목표 전송률을 동시에 고려하여 전송률을 조정할 수 있는 TRA3CM을 제안하였다. TRA3CM은 RTT의 영향을 완화시켜 RTT가 다른 집합 플로우 사이에도 비슷한 전송률을 보이도록 하며, 보다 많은 비용을 지불하여 높은 목표 전송률로 계약한 사용자가 목표 전송률에 비례한 전송률을 갖도록 하여 비용에 따른 공평성을 제공하고 있다. 또한 under-provisioned 네트워크에서도 RTT의 영향을 완화시켜 집합 플로우들 사이에 공평성을 보장하고 있다. 본 논문에서는 ns 시뮬레이터를 이용한 실험을 통해서 TSW, 지능형 TC와 TRA3CM 사이의 성능을 비교 분석하였다. 실험 결과 제안한 TRA3CM은 TSW 및 지능형 TC에 비해서 다양한 환경에서 공평성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

향후 연구 과제로는 제안한 TRA3CM에 무응답 플로우와 응답 플로우 사이의 공평성을 제공할 수 있도록 하는 방법에 대한 연구가 수행되어야 하고, 다른 집합 플로우의 RTT 정보 없이도 RTT의 영향을 완화시킬 수 있는 방법에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

[1] S. Blake, D. Blake, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang and W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services," *IETF RFC 2475*, Dec. 1998.  
 [2] V. Jacobson, K. Nichols, and K. Poduri, "An Expedited Forwarding PHB," *IETF RFC 2598*, June 1999.  
 [3] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J.

Wroclawski, "Assured Forwarding PHB Group," *IETF RFC 2597*, June 1999.  
 [4] S. Floyd and V. Jacobson, "Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1, No. 4, pp. 397-413, Aug. 1993.  
 [5] D. Clark and W. Fang, "Explicit Allocation of Best Effort Packet Delivery Service," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 6, No. 4, pp. 362-373, Aug. 1998.  
 [6] J. Heinanen and R. Guerin,, "A Single Rate Three Color Marker," *IETF RFC 2697*, Sep. 1999.  
 [7] J. Heinanen, and R. Guerin, "A Two Rate Three Color Marker," *IETF RFC 2698*, Sep. 1999.  
 [8] W. Fang, N. Seddigh, and B. Nandy, "A Time Sliding Window Three Colour Marker(TSWTCM)," *IETF RFC 2859*, June 2000.  
 [9] B. Nandy, N. Seddigh, P. Piedad, and J. Ethridge, "Intelligent Traffic Conditioners for Assured Forwarding based Differentiated Services networks," *IFIP High Performance Networking*, June 2000.  
 [10] I.B.H. Alves, J.F. Rezende, and L.F.M. Moraes, "Evaluating Fairness in the Aggregated Traffic Marking," *Proceeding of IEEE Global Telecommunications Conference*, Nov. 2000.  
 [11] I. Andrikopoulos, L. Wood, and G. Pavlou, "A Fair Traffic Conditioner for the Assured Service in a Differentiated Services Internet," *Proceeding of IEEE International Conference on Communications*, June 2000.  
 [12] M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, and T. Ott, "The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 27, No. 3, pp. 67-82, 1997.  
 [13] R. Jain, "The art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling," pp.387, John Wiley and Sons Inc., New York, 1991.



모 상 덕  
 1998년 광운대학교 전자통신공학과 학사  
 2000년 광운대학교 전자통신공학과 석사  
 2000년~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사 과정. 관심분야는 분산처리, 인터넷 QoS, 내장형 시스템

정 광 수  
 한국정보과학회논문지 : 정보통신  
 제 30 권 제 2 호 참조