

실시간 온라인 네트워크 게임 환경에서의 게임 트래픽 특성 분석

Analysis of Game Traffic Characteristics of Realtime Online Network Games

정 증 민* 이 문 규** 이 구 연***
Jeong, Jong-Min Lee, Mun-Kyu Lee, Goo-Yeon

Abstract

The study of game traffic has been neglected by scientists, but as Internet gaming becomes more popular, multiplayer online games have become a significant element of Internet traffic. In this paper we analyze Internet traffic generated by sessions of multiplayer online games and study source models of multiplayer online game traffic.

Our analysis shows that the empirical game traffic can be characterized by certain analytical model. We describe how our empirical traffic data set can be modeled and discuss how game server type influences packet interarrival distribution.

키워드 : 게임, 트래픽, 멀티플레이어, 소스모델

Keywords : game, traffic, multiplayer, source model

1. 서론

초고속 네트워크의 급진적인 발전은 인터넷 사용자를 폭발적으로 증가시켰으며, 생활수준의 향상으로 인해 인터넷의 사용 구조가 변화되고 있다. 즉 기존 인터넷 등의 데이터 통신이 비단 정보 교환이나 통신수단으로 여겨졌던 시대에서 이제는 네트워크를 이용한 교육, 서비스, 원격진료가 가능해졌으며, 게임의 수요도 증가하고 있는 추세이다. 게임 수요의 증가는 멀티 유저의 온라인 게임 트래픽이 네트워크 트래픽 소스의 많은 부분을 차지하고 있음을 시사하는 것으로 향후 게임 산업의 진보로 인해 이러한 양상은 더욱 두드러지게 될 것이다.

네트워크 트래픽에 관한 연구는 광대한 네트워크가 구성됨에 따라 각각의 특성화된 트래픽 소스가 네트워크에 어떠한 영향을 미치고 있는지에 관한 올바른 해석을 제공하며, 이는 네트워크 구성의 성능을 증가시켜 결과적으로 사용자에게 좋은 성능의 트래픽을 제공할 수 있다. 그러나 현재까지의 네트워크 트래픽에 관한 연구를 종합해 보면 인터넷 트래픽 및 웹 트래픽 등 기존 인터넷에 이용되고 있는 서비스들에 관한 연구가 대부분이며 게임 소스 트래픽에 관한 연구는 미미한 실정이다.

게임 시장의 거대화와 더불어 네트워크 게임의 활성화로 인한 많은 사용자의 확보는 네트워크에서의 게임 트래픽이 중요한 소스로 작용하게 되었다. 게임 소스 모델링의 결과는 이질적인 환경간의 네트워크 상에서 예측된 지연을 결정하기 위해서, 또는 게임 환경을 테스트하고 시뮬레이션 하기 위한 트래픽 발생에 대한 모델을 도출해 낼 수 있어야 할 것이다.

게임 트래픽 소스에 대한 정확한 모델을 설정하

* 강원대학교 정보통신공학과 박사과정
** 강원대학교 정보통신공학과 석사 졸업
*** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 조교수

고, 이를 분석함으로써 점점 증대되고 있는 온라인 게임 트래픽 소스에 대한 올바른 연구 방향을 제시하고 또한 네트워크 프로토콜을 시험하며 개발하기 위한 연구자들에게 있어 가치있는 도구로 작용될 것이다.

이를 위해 본 논문에서는 온라인 게임에 있어서 데이터 패킷 크기와 패킷 도착시간의 두가지 관점에서 트래픽 소스에 대한 분석적 모델 특성을 살펴보게 되며, 궁극적으로는 적은 지연을 가진 게임 환경을 위한 네트워크 장비 개발과 다자인 연구에 있어서 필요한 네트워크 온라인 게임 트래픽에 대한 정확한 소스 모델을 제시하고자 한다.

2장에서는 기존 네트워크 트래픽에 관한 연구를 정리하며, 3장에서는 네트워크 게임의 모델을 정의한 후 이에 대해 시뮬레이션을 행한다. 4장에서 시뮬레이션 결과 및 분석을 한후 5장에서 결론을 맺기로 한다.

2. 네트워크 트래픽 모델링에 관한 연구

네트워크 트래픽 모델은 네트워크 디자인과 성능 평가, 대역폭 할당 알고리즘의 디자인, 그리고 전송률 제어 등에 있어서 매우 중요한 요소로 작용하게 된다.

2.1 트래픽 소스 모델링

네트워크의 트래픽 모델은 거의 메모리스스 포아송(memoryless poisson) 프로세스에 따라 간단하게 모델링 되어져 왔다. 그러나 많은 트래픽에 대한 연구들이 패킷의 도착 간격이 지수적인 분포를 나타내지 않는다는 결과가 나와 있다. 최근에는 LAN 트래픽에 대해서 자기 유사성 프로세스를 통해서 잘 모델링하려는 움직임이 일어나고 있음을 알수 있다.

1993년 이래로 여러 연구결과에서 데이터 트래픽이 자기유사성을 가진 프로세스를 통해 모델링 되어 진다고 밝히고 있는데, 그 예를 살펴본다면 이더넷 트래픽에 있어서 새로운 모델링[1]을 들수 있으며, 웹 트래픽[2], SS7, TCP, FTP와 TELNET 트래픽, 가변 전송률 비디오 트래픽[3]에서 그 실례를 들고 있다. 특히 네트워크 게임에 있어서 패킷 사이즈를 일정할 수 있도록 프로그램하기 때문에 확정적(deterministic)데이터 세트를 발생하게 되며, 이런 부분에 있어 패킷 사이즈에 대한 분포를 살펴 볼 때 자기 유사성을 나타내는지 또한 게임 트래픽 소스 모델링에 있어 중요한 요소로 자리 잡을 수 있다.

● Ethernet : [4]는 포아송 트래픽 가정을 사용한

간단한 큐잉 분석이 모든 네트워크 트래픽 모델에 적합하다는 착각을 뒤엎고 있다. 이 연구는 이더넷 트래픽을 위해서 대량의 데이터와 주의깊은 통계적 분석을 사용하는 것에 중점을 두고 있으며, 보다 새로운 모델링과 분석적 연구가 필요하다고 주장한다. [5]에서는 길이에 대한 분석과 접근은 많은 Pareto-like ON/OFF소스의 상태에 의해 생성된 것으로 이더넷 트래픽을 모델링하는 것이다. 그러한 각 소스에서는 패킷이 폭주되어 전달되는 ON주기와 그렇지 않은 주기의 OFF가 번갈아 일어난다. [5]는 많은 Pareto분포를 지닌 ON/OFF소스의 상태 결과가 Hurst 파라미터 $H=(3-\alpha)/2$ 를 가지는 자기 유사성 트래픽으로 나타난다는 것을 보여준다. $1 < \alpha < 2$ 에 대해, [5]의 논문에서는 $0.5 < H < 1$ 의 자기유사성 범위를 가진다. 각 소스는 $\alpha = 1.2$ 를 가지며, $H=0.9$ 를 가진 자기 유사성 트래픽으로 결과가 나타났다는 것을 발견했다.

● WWW : [2]에서는 Web과 관련된 트래픽이 자기 유사성을 가지고 있다는 것으로, 각각의 웹 브라우저에 대해서 ON/OFF 소스모델로 분석하였고, 데이터가 Pareto 분포에 매우 적합한 것을 나타내고 있다.

● Signal System Number 7 : 디지털 텔레코뮤니케이션 네트워크에서의 제어 신호 프로토콜은 SS7의 신호였고, 이는 ISDN과 다른 디지털 네트워크에서 사용된다. 연구의 결과는 분명히 전통적인 포아송 분포를 근거로 한 모델이 SS7의 특성을 설명하기에는 불충분하며, 부적당하다는 것을 보여주고 있다.

● TCP, FTP, TELNET : [6]에서는 TCP트래픽에 대해서 연구를 하였다. 이 논문에서는 TCP상에서 수행되는 TELNET과 FTP에 대해서 같이 고려하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다. 흔히 사용되는 포아송 모델은 시간 간격이 넓은 범위에서의 TCP트래픽의 버스트(burst)를 심각하게 저평가하고 있다. TELNET데이터와 FTP세션 여라이별은 포아송 모델과 상용하나 데이터 연결에 대해서는 보다 버스트한 도착률을 보여준다.

● VBR Video : [3]은 두시간 정도의 비디오 소스를 사용하여 실험을 하였다. 비디오는 JPEG 표준을 사용하여 인코딩된 것이다. 분석의 결과로는 비디오 전송은 자기 유사성 특성을 가지며, 프레임 길이는 적어도 분포의 후미에서는 Pareto 분포에 해당된다는 것이다.

2.2 모델 평가 척도

어떠한 분포 모델을 설정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 실험 모델에 비해 본 논문에서의 궁극적인 목적이 되는 분석 모델이 가지고 있는 장점은 첫째, 분석 모델들은 수학적으로 표현 가능하며, 둘째, 분석 모델은 아주 간결하며, 컴퓨터케이션이 수월하다, 세째는 다른 데이터 세트에 대해서 쉽게 상관관계를 파라미터들을 이용해서 평가비교가 가능하다. 이러한 분명한 효용성과 매력에도 불구하고 결정적인 논점으로 남아 있는 것은 과연 분석적 모델이 확률변수에 의해 측정된 실험 데이터에 대해 특성을 잘 나타낼 수 있는나 하는 것이다. 이를 위해 모델의 적합성 검증을 위한 테스트 방법이 필요하게 되는데 본 절에서는 이에 대해 살펴보고자 한다.

실험모델과 분포모델의 적합성을 측정하는 방법으로는 Chi-square와 KS 테스트를 통한 적합성 측정과 quantile-quantile plot과 normal probability plot을 이용하여 시각적 방법을 통해 적합도를 측정하는 방법이 있으며 본 논문에서는 quantile-quantile plot을 이용하여 적합도에 대한 비교에 접근하였다.

● Chi-square 테스트

Chi-square 테스트에 대해서 살펴본다면, 만약 확률 변수 Y가 n개의 인스턴스를 가지고 있다고 하고, 그리고 비교하고자 하는 또 다른 모델 분포 Z를 사용하여 모델링한다고 가정하자. 분포 Z를 N개의 bin으로 나눈다. 그러면 각각의 i 번째 bin에 주어진 인스턴스가 포함될 확률에 대해서 Pi의 확률을 가지게 될 것이다. 이는 실험적인 데이터의 관측회수에 대한 확률이며, Yi를 실제 i 번째 bin에 해당되는 도수의 관측 횟수라고 한다면 다음과 같은 식이 만들어진다.

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(Y_i - np_i)^2}{np_i}$$

위의 식에 의해서 관측도수와 기대도수 사이의 적합도 검증을 위한 값이 결정되며, 여기서 근사적으로 자유도 V = N - 1인 Chi-square 분포를 따르는 확률 변수의 값이 X²가 된다. 또 이의 정확한 측정을 위해서는 X²의 값이 Chi-square 분포에 해당되는 범위안에 있는나가 매우 중요하다.

● Graphical method

Quantile-quantile plot의 경우, 우선 n개의 관측치를 오름차순으로 정렬한다. 즉, x₍₁₎ ≤ ... ≤ x_(n) (순으로 정렬하게 되고, i번째 순서를 가지는 관찰치 x_(i)를 Y축의 값으로 두고, X축의 값은 아래 식과 같이 구한다.

$$Q(i) = F^{-1}\left(\frac{i - \text{rank}_{\text{adj}}}{n + n_{\text{adj}}}\right)$$

여기서 F⁻¹은 확률 분포 함수에 역함수로 정의

되어 진다. 또 rank_{adj}와 n_{adj}는 사용자 정의로써 사용자가 이론적 quantile에 대해서 결정하는 요소로써 값을 조절하기 위한 옵션에 해당된다.

3. 시뮬레이션 설계

3.1 네트워크 게임 분류 및 모델 설정

네트워크 게임은 게임 형태에 따라 분류가 될 수 있겠으나, 본 논문에서는 네트워크 게임을 서버 특성으로써 분류를 한다. 네트워크 게임 서버는 독점 또는 비독점 모드로 운영된다.

비독점의 경우 플레이어중의 한사람이 자기의 호스트를 서버로 설정하게 된다. 그리고 다른 플레이들이 클라이언트로 서버에 접속을 하는 구조로 되어 있다.

독점 모드의 경우는 서버는 어떠한 클라이언트로도 사용되지 않는 경우이다. UDP의 경우 흔히 게임의 전송 프로토콜로 사용되게 되며, 클라이언트의 전송 주기에 대해서 살펴보면, 우선 서버의 패킷을 읽고 그것은 처리하여 플레이어 화면에 렌더링하게 되고, 입력장치로부터 플레이어의 데이터를 읽어들이며, 서버에게 패킷형태의 데이터(흔히 24 바이트 정도)를 전송하게 된다.

일반적으로 게임은 TCP에서 요구되는 ACK가 원치 않는 지연의 원인이 되기 때문에 TCP/IP보다 UDP/IP의 사용을 더 선호한다.

본 논문에서는 서버-클라이언트형 게임보다는 peer-to-peer형태의 게임의 트래픽 분석에 중점을 두게 된다. 이러한 이유는 서버-클라이언트 게임의 경우 서버에서 모든 데이터를 관리하게 되지만, peer-to-peer형태의 게임에서는 데이터를 n명의 플레이어가 존재한다면 업데이트된 데이터에 대하여 n-1번 보내야 하기 때문에 더 독특한 트래픽 특성을 나타낼 것으로 보기 때문이다. 또한 게임에서 게임서버를 이용해서 접속되는 게임 커넥션 세션 서버와 교환되는 데이터를 포함해서 어떠한 특성을 나타내는지 살펴보고자 한다.

게임의 트래픽 모델 분석에 있어서 패킷사이즈는 확정적 특성을 어떻게 나타내는지 또 도착 간격 시간은 어떤 특성을 나타내는지 분석하는 것은 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 본 논문에서의 타임 스케일의 경우 기존의 네트워크 모델 연구에 있어서 쓰였던 것처럼 ms단위를 사용하게 된다.

본 논문에서는 스타크래프트라는 멀티미디어 온라인 게임에 대한 트래픽을 분석한다. 스타크래프트는 8명까지 지원하며 독특한 통신 모델을 사용한다. 게임 세션의 시작점에서 listen 서버(game hosting machine) 뿐만 아니라 playing machine)는 현재의 게임 세션을 설정하는 데에 사용된다. 그러

나 일단 게임이 시작되고 진행되면 생성되는 트래픽은 그것이 peer-to-peer 모델을 사용한다는 것을 나타낸다.

3.2 시뮬레이션 환경

스타크래프트라는 게임은 배틀넷이라는 다중 player 게임 세션인 상업용 인터넷 게임 접속 프로그램을 통하여 인터넷상의 게이머들과 게임을 즐길 수 있다. 일반 세션은 다양한 게임에 8명까지 참가할 수 있도록 구성되어 있다. 트래픽 모니터로서 사용되는 기종은 128MB RAM을 지니는 Pentium II 이며 운영 체제로 Linux를 사용한다. 소스 트래픽의 움직임은 tcpdump를 사용해 얻었으며 dump 파일에 저장되었다. 이러한 원시 데이터는 각 player의 게임 트래픽 정보를 추출한 후에 삭제된다. 패킷을 위한 단위는 byte이며, 도착간격 시간을 위한 시간 간격은 ms로 하였고, 본 논문에서는 각 사용자 컴퓨터의 처리력에 대해 전혀 알고있지 않았으며, 그들이 모두 펜티엄급 이거나 혹은 이보다 더 높은 사양의 시스템을 가졌으며 진행되는 게임에 의해 요구되는 자원을 충분히 가졌다는 사실은 별도의 문제로 여겼다. 그러므로 각 사용자에게 의해 생성되는 트래픽에 영향을 줄 수도 있는 프로세싱 능력과 다른 자원들에 따라 얼마만큼 다른 결과를 내는 지에 대한 연구는 배제되었다고 할 수 있다.

다음 표 1 은 시뮬레이션에 사용된 시스템 환경을 정리한 것이다.

표 1. 실험 환경 description

Host	CPU 속도	OS	램용량
데이터 측정용 서버	Pentium-II MMX 330MHz	Linux	128M
Client 1		Window s 98	
Client 2			
Client 3			
Client 4			32M

측정된 데이터는 패킷데이터와 이에 대한 도착간격 시간으로 크게 구분지어 분류될 것이며, 패킷데이터에 대한 발생분포에 대해서는 발생시점에서 어떻게 트래픽 분포를 나타내는지 간단하게 요약될 것이다. 실험데이터는 위에 표와 같은 형태의 실험 조건을 통해서 얻어지게 될 것이며, 도착간격 시간에 대한 분석을 패킷사이즈에 대한 분석보다 더 주된 논점으로 살펴보게 된다.

4. 측정 및 분석

2장에서 논의된 모델 평가방법과 기법을 바탕으로 해서 스타크래프트의 게임에 적용하였다. 우선 게임 트래픽 소스의 모델일 경우 서버의 존재가 트래픽에 끼치는 영향과 그 이외 조건으로 인해 나타나는 트래픽에 대해서 어떻게 분석하는가가 트래픽 소스 모델을 설정하는 주요 특징 요소가 된다고 볼 수 있다. 이런 특징들이 실제 게임에서 나타나는 형태를 측정데이터를 통해 분석하여 보자.

아래 표 2와 표 3 에서는 측정된 실제 데이터에 대한 통계적인 특성을 요약하여 보여주고 있다.

표 2. 게임 trace data의 statistic description

Host	Total (byte)	Mean (byte)	Stdev	Interarrival time(ms)		Mean Bitrate (bps)
				Mean	Stdev	
Client 1	267567	24.73	4.53	67.99	97.04	2910.58
Client 2	251428	23.24	2.35	68.01	96.73	2735.03
Client 3	254511	23.46	3.05	67.8	97.2	2769.07
Client 4	256726	23.67	3.12	67.79	96.76	2793.5

표 3. Interarrival time의 분리된 statistic description

Host	Interarrival time(ms)			
	Lower 33%		Upper 67%	
	Mean	Stdev	Mean	Stdev
Client 1	1.66	9.55	205.7	17.74
Client 2	2.05	10.83	206.75	14.88
Client 3	1.49	8.77	205.11	19.07
Client 4	1.1	6.95	206.82	14.85

각 전송된 패킷데이터에 대한 총량과 평균, 분산과 도착간격 시간에 대한 특성을 보여주고 있는데, 특히 표 3에서는 패킷을 복사 전송하는 부분과 업데이트된 패킷이 발생하는 도착간격 시간에 대하여 상위 67%와 하위 33%에 대해서 각각의 통계적인 특성을 구분하여 기술하였다.

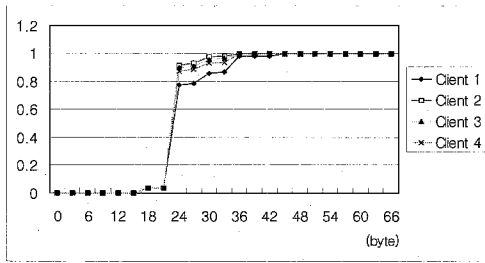


그림 1. 각 클라이언트 패킷사이즈에 대한 CDF plot

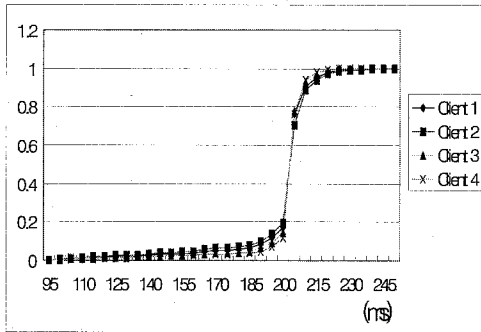


그림 2. Interarrival time(100ms이상)에 대한 CDF plot

그림 1과 그림 2는 복사본을 전송하는데 나타나는 트래픽과 주기적인 업데이트로 인해 나타나는 트래픽에 대해서 각각의 뒳수분포와 CDF를 그려 보았다. 그림 1은 트래픽의 패킷 크기에 대한 CDF이고 그림 2는 도착 간격 시간 뒳수중에 상위 67%에 해당되는 샘플의 CDF를 나타내었다. 하위 33%의 경우는 복사본을 카피하는데 있어서 나타나는 트래픽으로 거의 도착 간격 시간이 0에 가까운 확정적 특성을 보여주고 있어 자세한 분석을 위한 어떠한 방법은 취해지지 않았다. 다만 주기적인 데이터의 갱신이 이루어질 때 나타날 수 있는 트래픽의 소스모델 분석을 위하여 상위 67%에 해당하는 샘플에 대하여 적합한 분포를 찾아내기 위하여 실험치와 여러 분포들 사이의 quantile-quantile plot을 작성하였고, 그 비교는 표 4에서 보는 바와 같다. 표 4에서 보면 실험치는 베타 분포와 정규 분포에 유사함을 알 수 있고, 보다 정확히는 베타 분포에 가깝다고 할 수 있다.

표 4. Interarrival time의 distribution에 대한 error

Host 분포	Client 1	Client 2	Client 3	Client 4
<i>Beta</i>	0.276	0.19	0.299	0.308
<i>Normal</i>	0.287	0.201	0.307	0.316
Triangular	0.318	0.225	0.355	0.368
Gamma	0.323	0.229	0.348	0.367
Erlang	0.323	0.229	0.348	0.367
Lognormal	0.337	0.242	0.367	0.386
Uniform	0.35	0.256	0.39	0.403
Exponential	0.366	0.271	0.405	0.419
Weibull	0.384	0.3	0.412	0.421

우선 패킷사이즈에 대한 시뮬레이션 분포를 살펴보면

● Starcraft에서의 일반 peer에 의해 생성된 payload sizes : player들의 수와 관련되지 않은 것으로 보이며 payload size 21byte정도 이상이 전체 트래픽의 90% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 각각의 측정데이터를 CDF로 그려본 결과 각 클라이언트에 대해서 21~23byte의 패킷사이즈가 전체에서 클라이언트1,2,3,4의 경우 각각 74%, 88%, 87%, 84%를 차지한다. 이 현상은 단순한 정보 교환 방법을 지닌 peer-to-peer 게임으로부터 나타날 수 있다. 그런 게임에서 각 peer는 단순히 각각의 특정 갱신 패킷(자신의 상태에 대한 정보를 포함하는)의 여러 복사본을 보내고 각각은 다른 peer에게 전달된다. 이러한 이유로 인해 패킷 크기는 player들의 수에 대해 일정한 관계를 지니고 있다. 패킷 크기의 분포는 player의 수에 따라 복사본의 수만큼 증가하게 되며, 게임 디자인 방법에 따라 일정한 크기를 보여줌을 알 수 있다.

다음으로 도착 간격 시간에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보면

● 도착 간격 시간에 관한 측정결과 : 각각의 패킷에 대해 10ms를 넘지 않는 부분에서 확정적인 특성을 보여주고 있는데, 이는 서버-클라이언트와는 달리 클라이언트에서 데이터교환을 처리하기 때문에 나타나는 특징이라고 해석할 수 있다. 클라이언트는 데이터가 발생시 이의 복사본을 각각 다른 모든 클라이언트에게 재전송을 하게 될 것이다. 이로 인해 0ms부근에서 매우 결정적인 특성을 보여주고 있다.

또 상위 부분에 있어 패킷데이터의 도착 간격시간의 특징은 CDF로 볼 수 있듯이 거의 90%이상의 뒳수가 10ms이하와 200ms이상을 차지하는것에

서 나타나는 것처럼 일정한 주기에 의해 전송되는 특성이 있는데 이런 특성은 상호작용에 의한 데이터의 발생이 화면 업데이트와 매우 밀접한 관련이 있기 때문에 나타나는 특성이라고 할 수 있다. 또 다른 트래픽 모델의 특성을 결정짓는 요소는 커넥션 세션 서버와의 접속 유지 및 송패기록등의 통신 패킷과 게임 플레이 타임과 클라이언트 수와 관련하여 나타난다고 볼 수 있으며, 이를 통해 해석된 상위 부분의 모델의 특성은 베타분포에 가까운 모델을 나타낸다고 볼 수 있다.

5. 결론

우리는 본 논문에서 측정 트래픽 데이터에 대한 패킷 사이즈와 도착 간격 시간에 대한 분포에 대하여 살펴 보았다. 이 논문에서 가장 큰 증점은 온라인 멀티 플레이어 게임 중에서도 peer-to-peer 형의 게임에 대한 소스 모델을 제시하는 것이다.

요약하여 말하면 peer-to-peer형 게임에서 나타나는 소스트래픽 모델의 특성은 화면 업데이트의 실시간 처리를 위한 주기적인 화면 업데이트에서의 데이터의 발생과 이 주기적인 데이터를 각 peer에게 복사해서 전송하는 과정에 의해서 거의 특징 지워지는 것으로 본 논문에서는 그 원인을 분석할 수 있었다.

앞으로 더 깊은 고찰과 실험을 통해 참여하게 되는 클라이언트 수와 게임 플레이 타임에 따른 분포 모델의 변화특성을 살펴봐야 할 것이며, 게임 세션 설정에 따른 데이터의 분포 모델의 변화 관계에 대해서 한층 더 깊은 연구가 있어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, "In the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (extended version)," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-15, Jan. 1994.
- [2] M. E. Crovella and A. Bestavros, "Self-Similarity in the world-Wide Web: Evidence and Possible Causes," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 5, No. 6, pp.835-846, Dec. 1997.
- [3] M. Garrett and W. Willinger, "Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic," *Proceedings, SIGCOMM '94*, pp. 269-280, Sep. 1994.
- [4] Leland, W., Taqqu, M., Willinger, W., and Willson, D. "On the Self-similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)." *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Feb. 1994
- [5] W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, and D. Wilson, "Self-Similarity Through High Variability: Statistical Analysis of Ethernet Traffic at the Source Level," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 5, No. 1, pp. 71-86, Feb.1997.
- [6] V. Paxson, "An Introduction to Internet Measurement and Modeling," tutorial given at ACM SIGCOMM '96.
- [7] M. S. Borella, "Source Models of Network Game Traffic," *Computer Communications*, Vol. 23, No. 4, pp. 403-410, Feb. 2000.
- [8] 'Erramilli, A., Naryan O., and Willinger, W. "Experimental Queueing Analysis with Long-range Dependent Packet Traffic." *IEEE/ACM Transactions on Networking*, April 1996.
- [9] Norros, I. "On the Use of Fractional Brownian Motion in the Theory of Connectionless Networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Aug. 1995.
- [10] J. Beran, R. Sherman, M. S. Taqqu, and W. Willinger, "Long-Range Dependence in Variable-Bit-Rate Video Traffic," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 43, pp. 1566-1579, 1995.
- [11] M. Grossglauser and J-C. Bolot, "On the Relevance of Long-Range Dependence in Network Traffic," *Proceedings, ACM SIGCOMM '96*, pp. 15-24, Sep. 1996.
- [12] V. Paxson, "Empirically-Derived Analytical Models of Wide-Area TCP Connections," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 2, No. 4, pp. 316-336, Aug. 1994.