IE Interfaces
Vol. 22, No. 1, pp. 95-103, March 2009.

인터넷 전화의 사용자 관점 품질 최적화를 위한 강건 설계 기법 연구

윤협상[1†] · 최수현[2] · 김성준[3]

[1]KT 중앙연구소 / [2]런던대학교 컴퓨터과학과 / [3]노스캐롤라이나주립대학교 컴퓨터과학과

Robust Design Methodology for Optimizing Perceived QoS of VoIP

Hyoup-Sang Yoon[1] · Soo-Hyun Choi[2] · Seong Joon Kim[3]

[1]Central R&D Laboratory, KT, Korea
[2]Department of Computer Science, University College London, UK
[3]Department of Computer Science, North Carolina State University, NC

During the past few years, design of experiments (DOE) has been gaining acceptance in the telecommunications research community as a mean for designing and analyzing experiments economically and efficiently. In addition, the need for introducing a systematic robust design methodology (i.e., one of the most popular DOE methodologies) to network simulations has been increasing. In this paper, we present an architecture of voice over IP (VoIP) application and the E-Model for calculating the perceived quality of service (QoS). Then, we apply the Taguchi robust design methodology to optimize the perceived QoS of VoIP application, and describe the detailed step-by-step procedures. We have used *ns*-2 simulator to collect experimental data in which the SN ratio, a robustness measure, is analyzed to determine an optimal design condition. The analysis shows that "initial delay time in playout buffer" is a major control factor for ensuring robust behaviors of the perceived QoS of VoIP. Finally, we verify the proposed optimal design condition using a confirmation experiment.

Keyword: robust design, voice over IP, E-Model, design of experiments, SN ratio

1. 서 론

실험계획법(DOE : Design of Experiments)은 경제적이고 효과적으로 실험을 설계하고 실험 결과를 통계적으로 분석하는 체계적인 방법을 지칭한다. 실험계획법의 목적은 대상 시스템의 성능에 유의한 영향을 주는 인자를 발견하고, 시스템의 성능과 인자 사이의 관계를 나타내는 통계적 모형을 구축하거나 인자를 최적으로 설정하는 것이다.

실험계획법은 주로 자연 과학 및 제조 공학 분야에서 널리 적용되었으나, 최근 들어 통신 시스템 분야로도 점차 확산되고 있는 추세이다(Gendy *et al.*, 2003; Yoon and Yum, 2007). 두 연구 모두 인터넷 기술 국제 표준화 단체인 IETF(Internet Engineering Task Force)에서 인터넷 서비스 품질 보장을 위해 제안한 차별적 서비스(DS : Differentiated Services(Blake *et al.*, 1998))를 대상으로 하고 있다.

실험계획법 중에서 최근 들어 제품이나 공정의 설계에 광범위하게 사용되고 있는 것으로 강건 설계 기법을 들 수 있다(Taguchi, 1986; Phadke, 1989). 강건 설계 기법은 성능 특성치의 평균뿐만 아니라 산포까지 다루고 있다는 장점이 있다. 강건 설계기법 이외에도 반응표면기법(Myers and Montgomery, 1995)

†연락저자 : 윤협상, 305-811 대전광역시 유성구 전민동 463-1 KT 중앙연구소, Fax : 042-870-8378, E-mail : yoonhs@kt.com
투고일(2008년 07월 02일), 심사일(1차 : 2008년 07월 10일, 2차 : 2008년 12월 26일), 게재확정일(2009년 01월 23일).

을 평균과 분산을 동시에 고려하도록 확장한 쌍대반응표면기법(Myers *et al.*, 1992) 등 평균과 산포를 동시에 고려하는 실험계획법이 제안되었다. 본 연구는 실험계획법의 적용이 활발하지 않은 통신 시스템 분야에 실험계획법을 활용하여 문제를 해결하는 절차를 보여주기 위해 비교적 적용 절차가 단순하고 직관적인 다구치의 강건 설계 기법을 활용하고자 한다.

일반적으로 제품이나 공정의 설계에 있어 통제 불가능한 다양한 영향(잡음인자라고 지칭함)으로 인해 성능 특성치가 변동하게 되는데, 강건 설계의 목적은 이러한 변동 하에서 제품이나 공정의 설계변수(제어인자라고 지칭함)를 최적으로 설정하는 것이다.

강건성의 개념은 통신 분야에서 새로운 것은 아니며 유사한 개념(예, sensitivity 또는 model invariance property)이 네트워크 시뮬레이션 분야에서 중요하게 고려되어 왔다(Heidemann and Mills, 2001). 통신 시스템 분야에서 강건 설계 기법은 주로 신뢰성을 중요시 하는 군용 네트워크 등에 적용되었다. 반면에 인터넷 서비스에 대한 강건 설계는 비교적 초기 단계이며, 체계적이고 효율적인 접근이 필요한 실정이다. 최근 들어, 인터넷 전화(VoIP : Voice over IP)와 같은 실시간 통신 서비스가 점차 널리 보급되면서 사용자에게 일관성 있게 우수한 서비스를 제공하기 위해 강건성이 보장된 통신 시스템을 설계할 필요성이 더욱 중요하게 인식되고 있다.

인터넷 전화는 음성 신호를 데이터 패킷으로 변환하여 인터넷을 기반으로 송수신자 간의 통화를 할 수 있는 서비스를 지칭한다. 국내에서도 주요 기간 통신 사업자들이 인터넷 전화 서비스를 출시하여 본격적으로 경쟁하는 상황이며, 주요 인터넷 포털 사업자가 운영하는 대부분의 인스턴트 메시징 서비스에서 인터넷 전화 서비스를 제공하고 있다.

저렴한 가격과 편리한 부가 기능과 같은 인터넷 전화의 주요 장점에도 불구하고, 기존 유선 전화(PSTN : Public Switched Telecommunication Networks) 대비 열위에 있는 인터넷 전화의 통화 품질은 개선해야 할 대표적인 문제점이다. 이러한 통화 품질 문제는 인터넷의 전송 특성으로 인하여 발생한다. 인터넷은 패킷 스위칭을 통해 통신하는 방식이므로 회선 스위칭 방식인 PSTN에 비해 품질이 열위에 있게 된다.

일반적으로 인터넷의 전송 서비스 품질(QoS : Quality of Service)은 대역폭(Bandwidth), 패킷 전송 지연(One-way packet delay), 패킷 손실(Packet Loss) 등 네트워크의 전송 성능과 관련된 지표로 표현되지만, 인터넷 전화의 품질은 앞서 언급한 네트워크 성능 지표뿐만 아니라 사용자의 주관적인 견해가 종합적으로 반영된 사용자 관점 QoS로 표현하는 것이 바람직하다(Atzori, 2006).

국제 통신 표준화 기관인 ITU-T(International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector)는 송신자의 입에서 수신자의 귀까지 통화의 전 구간에서 발생하는 패킷의 지연과 손실을 반영하여 사용자의 체감 품질을 계산할 수 있는 방안으로써 E-Model을 제안하였다(ITU-T Recommendation G.107, 2005).

본 연구에서는 인터넷 전화 어플리케이션을 구성하는 주요 기능을 분석하여 E-model로 계산할 수 있는 사용자의 체감 품질에 영향을 주는 인자를 파악하고, 인터넷에서 발생할 수 있는 통제 불가능한 요인의 변동에 대응하여 사용자 체감 품질을 최적화하기 위해 강건 설계 기법을 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 제 2장에서는 인터넷 전화 어플리케이션을 구성하는 기능 요소와 인터넷 전화의 체감 품질을 계산하는 방안에 대해 살펴본다. 다음으로, 성능 특성치, 제어인자, 그리고 잡음 인자를 선정하고 각 인자의 수준을 결정하여 실험 계획을 수립하는 절차는 제 3장에서 소개한다. 제 4장에서는 시뮬레이터를 이용하여 실험을 실시하고 결과 데이터를 수집하는 과정에 대해 설명하고 실험 결과를 분석하여 성능 특성치를 최적화한다. 마지막으로, 제 5장에서는 본 논문의 결론과 추후 연구 방향을 제시한다.

2. 연구 배경

본 장에서는 인터넷 전화 서비스를 구현하기 위한 인터넷 전화 어플리케이션의 기능 요소 및 구조를 파악하고, 인터넷 전화 사용자의 체감 품질을 평가하고자 ITU-T가 제정한 E-Model의 개념과 계산 절차에 대해 살펴보기로 한다.

2.1 VoIP

VoIP 어플리케이션은 송신자의 음성신호를 디지털 신호로 변환하여 패킷에 담아 전송하고 패킷을 다시 음성신호로 변환하여 수신자에게 들려주는 역할을 수행한다. 기본 구성 요소는 <Figure 1>과 같다.

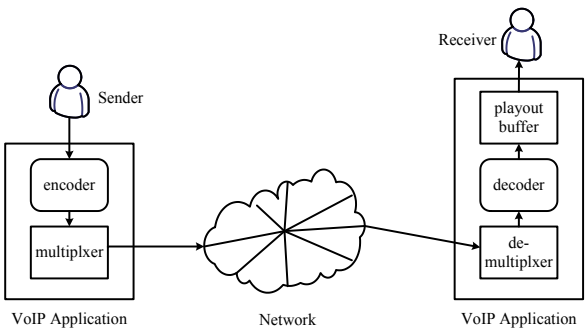

Figure 1. VoIP application architecture

송신자(sender) 측의 구성 요소는 인코더(encoder)와 멀티플렉서(multiplexer)가 있고, 수신자(receiver) 측은 디멀티플렉서(demultiplexer), 재생 버퍼(playout buffer), 그리고 디코더(decoder)로 구성되어 있다. 송신자의 음성 신호는 인코더를 통해 주기적으로 샘플링되어 디지털 신호로 변환된다. 멀티플렉서는 디지털 신

호를 모아 데이터 패킷으로 변환하는 기능을 수행한다. 네트워크를 통해 수신자에게 전송된 데이터 패킷은 디멀티플렉서를 통해 디지털 신호로 변환되고, 재생 버퍼에서는 인코딩된 시간 간격대로 재생 간격이 결정된다. 마지막으로, 디코더에서는 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하여 수신자에게 음성신호를 들려주게 된다. 각 구성 요소의 기능은 다음과 같다.

- 인코더 : 통화 품질과 네트워크 대역폭 소모 측면에서 서로 다른 특성을 갖는 다양한 인코더가 개발되었다. 인코더는 크게 샘플기반(예, G.711)과 프레임기반(예, G.729)으로 구분할 수 있다. 샘플기반 인코더는 주기적으로 음성 샘플을 수집하여 코딩하는 반면, 프레임기반은 수 밀리초 동안의 시간 간격 동안 특정 개수의 샘플을 수집하여 묶음으로 코딩한다. 동일한 프레임에 묶음으로 코딩되는 샘플의 수가 많을수록 신호 압축률이 올라가는 것이 일반적이므로, 프레임 기반 인코더는 샘플기반 인코더에 비해 네트워크 대역폭을 적게 소모하지만 품질이 저하 된다.
- 멀티플렉서 : 여러 개의 음성 샘플을 하나의 패킷에 담아 전송하여 전송 오버헤드를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면 패킷의 크기가 증가하게 되므로 패킷 전송 지연도 증가하는 단점이 발생한다.
- 재생 버퍼 : 음성 패킷을 원래 인코딩된 시간 간격대로 재생하기 위해 임시로 보관하는 역할을 수행한다. 이와 같은 역할을 위해, 수신측에 도착한 패킷의 순서를 조정하거나 재생 시점을 지연하고, 계획된 재생 시점 이후에 도착한 경우 패킷을 폐기하기도 한다.

앞서 설명한 각 구성요소는 다양한 방법으로 설정 가능하며 인터넷 전화 음성 품질에 직접적인 연관이 있으므로 본 연구에서 제어인자로 다루고자 한다. 각 구성요소에 대해 선택 가능한 설정치는 제 3장에서 자세하게 다루기로 한다.

2.2 E-Model

E-Model은 사용자 관점의 주관적인 통화 품질을 측정하기 위해 ITU-T가 표준안 G.107을 통해 제정한 품질 계산 기법이다. 부연하면, E-Model은 통신 네트워크에 존재하는 다양한 통화 품질 손상(impairment)을 종합하여 계산하는 알고리즘이다.

E-model의 계산 결과로써 “Rating Factor” R이라는 단일 품질 등급 수치(scalar quality rating value)를 얻게 된다. G.107 표준안에서는 R 값을 주관적인 사용자의 의견(customer opinion)을 나타내는 MOS(Mean opinion score(Cole, 2001)) 값으로 변환하는 방법도 제안하고 있다. 다만, 이렇게 변환된 사용자 의견 추정치는 실제 사용자의 의견을 예측하는 용도로 사용하지 않으며 단지 통신 서비스를 기획하기 위한 용도로 사용할 수 있다. 또한, 불필요한 네트워크 자원의 낭비를 줄일 수 있도록, 전송 성능 달성에 필요한 적정 네트워크 자원을 산정하고자 할 때 사용 할 수 있다.

E-Model의 자세한 계산 과정과 R 값을 MOS 값으로 변환하는 과정은 다음과 같다. 먼저, R 값을 계산하는 E-Model은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e_{eff}} + A \tag{1}$$

단, R_0(basic signal-to-noise)는 기본 신호대 잡음비를 나타내고, 다음과 같이 정의된다.

$$Ro = 15 - 1.5 \times (\mathrm{SLR} + No) \tag{2}$$

SLR(Send Loudness Rating)은 송신자측에서의 신호 감쇄를 표현하고, No는 다양한 잡음원에서 추가되는 신호의 세기를 나타낸다.

I_s(simultaneous impairment factor)는 음성 신호에 따라 발생하는 모든 손상의 조합을 의미하고, I_d(delay impairment factor)는 전송 지연으로 인해 발생하는 손상을 의미하고, Ie_{eff}(effective impairment factor)는 저속(low bit-rate)의 코덱을 사용하여 발생하는 손상을 나타내고, A(advantage factor)는 통신망의 특성에 따라 사용자가 기대하는 품질 수준이 달라지는 경우를 반영한 보정계수이다. <Table 1>에서는 통신망에 따라 다르게 설정된 보정계수의 예를 나타내고 있다.

Table 1. Provisional examples for the advantage factor A

Communication system example	Maximum value of A
Conventional (wirebound)	0
Mobility by cellular networks in a building	5
Mobility in a geographical area or moving in a vehicle	10
Access to hard-to-reach locations, e.g., via multi-hop satellite connections	20

주관적인 사용자의 품질을 표현하기 위해 E-Model을 이용하여 계산된 R 값을 MOS 값으로 변환한다. MOS는 사용자의 주관적인 만족도를 표현하기 위해 사용되는 전통적인 방법이며, 1부터 5까지 5점 척도를 사용하여 사용자의 서비스 품질 만족도를 표시한다. 점수가 높을수록 품질에 대한 만족도가 큰 것을 의미한다. MOS는 사용자의 주관적인 품질 만족도를 측정할 수 있는 장점이 있는 반면에 실제 상황에서 수행하기 어렵다는 단점이 있으므로 일반적인 상황에서는 MOS를 추정하는 계산식을 사용한다. ITU-T G.107 표준안에서는 E-Model을 이용하여 R 값을 계산하고 이 값을 MOS 추정치($\mathrm{MOS_{CQ}}$)로 변환

하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$\mathrm{MOS}_{\mathrm{CQ}}=\begin{cases}1, & R\le 0\\ 1+0.035R+ & \\ 7R(R-60)(100-R)10^{-6}, & 0<R<100\\ 4.5, & R\ge 100\end{cases} \quad (3)$$

<Table 2>는 R 값, MOS 값, 그리고 사용자 만족도에 대한 관계를 나타내고 있다. 참고로, 일반 유선전화의 통화 품질은 MOS 기준 4.0이상이다.

3. 실험 설계 및 데이터 수집 단계

본 장에서는 성능치와 인자를 선정하여 실험을 설계하고, 실험을 수행하여 데이터를 수집하는 단계에 대해 상세히 설명하고자 한다.

Table 2. Relationship between R-value and MOS

User satisfaction	R-value (lower limit)	$\mathrm{MOS}_{\mathrm{CQE}}$
Very satisfied	90	4.34
Satisfied	80	4.03
Some users dissatisfied	70	3.60
Many users dissatisfied	60	3.10
Nearly all users dissatisfied	50	2.58

Table 3. Control factors and their levels

Control factors	Description	Levels		
		I	II	III
A	Type of encoder	G.711	G.723.1	G.729A
B	Size of play-out buffer (in frames)	5	15	25
C	Frames per payload	1	3	5
D	Initial delay time (sec.)	0.05	0.15	0.25

3.1 실험 설계 단계

(1) 성능 특성치 선정

Yoon and Yum(2007)과 Ziviani *et al.*(2002)을 비롯한 기존 연구에서는 네트워크의 성능을 연구 대상으로 선정하였으나, 본 연구에서는 인터넷 전화 사용자 관점의 품질을 연구 대상으로 한다. 다시 말해, E-Model을 통해 계산되는 MOS 값을 성능 특성치로 사용하고자 한다.

(2) 제어 인자 선정 및 수준 결정

일반적으로 성능 특성치에 직접적인 영향을 끼치는 인자 중에서 통제 가능한 인자를 제어인자라고 한다. 본 연구에서는 제 2장에서 소개된 인터넷 전화 어플리케이션의 주요 기능 요소인 코덱의 종류(*A*), 재생 버퍼의 크기(*B*), 동시에 전송되는 음성 프레임의 수(*C*), 재생 버퍼의 초기 딜레이(*D*)를 각각 제어인자로 선정한다. 실험 결과 분석을 통해 각 제어인자의 통계적 유의성을 검정하게 되므로, 성능 특성치에 직접적인 영향을 끼치고 있다는 근거가 확실하지 않은 인자를 제어인자로 선정하더라도 문제가 발생하지 않는다. 선정된 제어 인자의 의미와 각 제어 인자의 수준은 <Table 3>에 정리되어 있다.

(3) 잡음인자 선정 및 수준 결정

일반적으로 성능 특성치에 영향을 주는 인자 중에서 통제가 불가능하거나 통제에 많은 비용이 소요되는 것을 잡음 인자라고 한다. <Table 4>는 잡음 인자에 대한 설명과 각 잡음인자의 수준을 나타내고 있다.

인터넷 전화의 품질과 관련하여 대표적인 잡음 인자는 음성신호 도달 지연 시간과 통신선로의 트래픽 혼잡도이다. 따라서, 본 연구에서는 송신자와 수신자의 물리적 거리로 인한 지연 시간(*U*)과 통신 선로를 공유하는 TCP 연결의 수(*V*)를 잡음인자로 선정한다.

Table 4. Noise factors and their levels

Noise factors	Description	Levels	
		I	II
U	Propagation delay	10	60
V	The number of TCP connections	60	100

(4) 실험 계획 설계

실험 계획 설계는 제어인자와 잡음인자 각각에 대해 인자의 개수와 수준의 개수를 고려하여 직교표를 선정하고 직교표의 열에 인자를 배치하는 과정을 의미한다. Taguchi(1986)는 강건 설계 실험을 위해 두 개의 직교표(OA: orthogonal array)를 교차 배치하여 사용하도록 권고하고 있다. 제어 인자와 잡음 인자에 대해 각각 하나씩 직교표를 사용한다. 제어 인자를 배치한 직교표를 내측 직교표, 잡음 인자를 배치한 직교표를 외측 직교표라고 지칭한다.

먼저, 제어 인자와 잡음 인자 각각에 대해 적합한 직교표를 선택해야 한다. 직교표의 형태를 $L_r(s^c)$와 같이 표현할 수 있으며, r과 c는 각각 직교표의 행과 열의 개수를 나타내고 s는 수준의 개수를 의미한다. 다시 말해, 수준의 개수가 s인 인자 c개를 배치하여 총 r회 실험을 실시하고자 한다면 $L_r(s^c)$ 직교표를 선택해야 한다(Taguchi and Konishi, 1959).

다음으로, 직교표에 인자를 배치한다. 이 때, 주효과와 교호작용을 고려해서 배치해야 한다. 주효과는 제어 인자의 수준이 변화함에 따라 발생하는 SN비의 변화를 의미한다. 교호작용은 둘 이상의 제어 인자 사이에 발생하며, 한 제어 인자에 의

한 효과가 다른 제어 인자의 수준에 따라 달라지면, 제어 인자 간에 교호작용이 존재한다고 말한다.

주효과와 교호작용의 표현 방법을 제어 인자 *A*와 *B*를 예로 들면, *A*의 주효과는 *A*로, 제어인자 *A*와 *B*의 교호작용의 효과는 *AB*로 표현한다. 본 연구에서는 *A*, *B*, *C*, 그리고 *D*의 주효과와 교호작용의 효과 *BC*, *BD*, 그리고 *CD*를 추정하고자 한다.

파악하고자 하는 주효과와 교호작용의 효과가 결정되면 직교표의 적절한 열에 제어인자를 배치하기 위해 선점도(Taguchi and Konishi, 1959)를 이용한다. 본 연구에서는 *BC*, *BD*, 그리고 *CD*의 교호작용을 파악하기 위해 제어인자 *A*, *B*, *C*, 그리고 *D*를 $L_{27}(3^{13})$ 직교표의 9, 1, 2, 그리고 5열에 각각 배치한다.

본 연구에서는 제어 인자를 $L_{27}(3^{13})$ 직교표에, 잡음 인자를 $L_4(2^3)$ 직교표에 배치한다. 외측 직교표를 반시계 방향으로 90도 회전하고 내측 직교표에 결합하여 <Figure 2>와 같은 실험 계획을 수립한다.

		Noise Conditions									
						1	2	3	4		
		B	***C***	***D***	***A***	1	1	2	2	**1**	***U***
		1	2	5	9	1	2	1	2	**2**	***V***
Design Conditions	1	1	1	1	1						SN Ratio
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						⋮
	9	1	3	3	2						SN9
	10	2	1	1	2						SN10
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		y_{ijk}				⋮
	18	2	3	3	3						SN18
	19	3	1	1	3						SN19
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						⋮
	27	3	3	3	1						SN20

Figure 2. Structure of robust design experiment

3.2 데이터 수집

본 연구에서는 통신 연구 분야에 널리 사용되고 있는 네트워크 시뮬레이터인 *ns*-2(NS-2, 2008) 시뮬레이터를 사용하여 실험을 수행한다. 또한, 인터넷 전화 트래픽을 생성하고 MOS값을 계산하기 위해 Bacioccola *et al.*(2007)에 의해 *ns*-2에 추가 개발된 코드를 이용한다. 데이터 수집 절차는 측정용 음성 트래픽과 백그라운드 데이터 트래픽를 생성하고, 음성 트래픽의 MOS 값을 계산하고, 성능특성치를 계산하는 단계로 구성되어 있다. 실험 환경은 <Figure 3>과 같은 네트워크 토폴로지를 가정한다.

각 링크의 대역폭과 지연시간은 그림에 표시된 바와 같고, R0～R1과 R2～R3가 병목 구간이다. 그림에 표현되지 않은 S～R0와 R3～R 사이의 링크 지연시간은 잡음 인자 *U*에 의해 결정된다. 노드 S(sender)와 R(receiver) 사이에서 총 10건의 인터넷 전화 서비스가 연결되어 있고, 백그라운드 트래픽은 전송 프로토콜로 TCP(Transmission Control Protocol)를 이용하는 FTP(File Transfer Protocol) 어플리케이션이 B0～B2, B1～B3 사이에서 각각 발생한다. 트래픽의 수는 잡음 인자 *V*에 의해 결정된다.

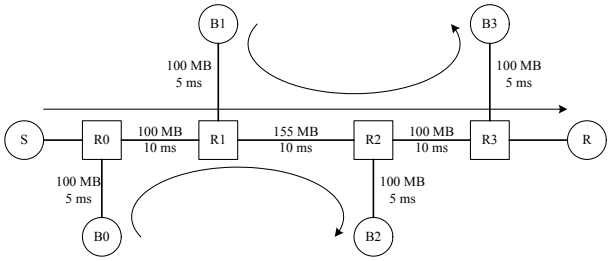

Figure 3. Simulation network topology

실험계획에 따라 총 108회의 실험(또는 시뮬레이션)이 수행된다. 각 실험 조건에서 사전에 선정된 제어 인자와 잡음 인자에 의해 인터넷 전화 어플리케이션이 설정되고, 음성 트래픽과 백그라운드 트래픽이 발생된다.

음성 트래픽이 송신자 S로부터 수신자 R로 전송되는 동안 발생하는 손실이 반영되어 식 (1)과 같이 R 값이 구해진다. R을 계산하기 위해 필요한 R_0, I_s, I_d, $I_{e_{eff}}$ 그리고 A 각각에 대해 값을 생성하는 방법은 다음과 같다. R_0, I_s, 그리고 A는 제어인자와 잡음인자에 영향을 받지 않으므로 각 실험조건에서 동일한 고정된 값을 사용한다. 따라서 실험조건에 따른 R값의 변화에 영향을 주지 않는다. 참고로, Bacioccola *et al.*(2007)에 의하여, R_0는 93.2, I_s는 0, 그리고 A는 5로 설정한다. I_d, $I_{e_{eff}}$는 *ns*-2 시뮬레이터로부터 구해지는 음성 트래픽의 패킷의 지연과 손실을 이용하여 각각 계산되는 값이다. 따라서 I_d, $I_{e_{eff}}$는 제어인자와 잡음인자에 영향을 받게 되고 R 값 변화에 영향을 주게 된다. R_0, I_s, I_d, $I_{e_{eff}}$ 그리고 A에 대한 상세한 의미와 계산식은 ITU 표준안(ITU-T Recommendation G.107, 2005)에 정의되어 있으며 *ns*-2에 적용된 방법은 Bacioccola *et al.*(2007)을 참조할 수 있다.

R 값은 식 (3)을 통해 MOS 값으로 변환된다. 단, 동시에 10건의 인터넷 전화가 사용되고 있으므로 각 조건에서 10개의 MOS 값이 측정된다. 따라서 각 설계 조건 당 40개의 MOS 값이 얻어지고, 이 값으로부터 SN비를 계산한다.

시뮬레이션은 총 186초 동안 수행되며, 0~20초 사이에 일양분포를 따라 백그라운드 트래픽이 시작되고, 10～30초 사이에 역시 일양분포를 따라 음성트래픽이 시작된다. 초기 워밍업 구간을 감안하여 36초 이후 MOS 측정을 시작한다.

4. 분석 및 검증 단계

4.1 SN비 계산

다구치 강건 설계 기법은 성능 특성치를 직접 분석하지 않고 성능 특성치를 SN비로 변환하여 분석을 실시한다는 측면에

서 다른 실험계획법과 차별화 된다. 성능 특성치를 SN비로 변환하는 계산식은 바람직한 성능특성치의 모습이 무엇인가에 따라 달라지며, 성능특성치가 클수록 바람직한 경우(망대특성, larger-the-better), 작을수록 바람직한 경우(망소특성, smaller-the-better), 목표 값에 가까울수록 바람직한 경우(망목특성, nominal-the-best) 등 총 3가지 계산 방법이 있다.

본 연구에서 다루고 있는 성능 특성치인 MOS값은 사용자의 만족도를 5점 척도로 점수화한 수치이며 점수가 높을수록 바람직하므로 망대특성이다. 망대특성에 대해 SN비를 계산하는 방법은 다음과 같다.

y_{ijk}를 i번째 설계조건($i=1, 2, \cdots, 27$), j 번째 잡음조건($j=1, 2, \cdots, 4$), 그리고 k번째 음성 트래픽($k=1, 2, \cdots, 10$)에서 얻어진 성능 특성치(MOS값)이라고 하면, 각 설계조건 i에 대해 SN비를 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$SN_i = -10\log\left\{\frac{1}{40}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{10}\frac{1}{j_{ijk}^2}\right\} \quad (4)$$

성능 특성치를 직접 분석하는 대신 SN비를 사용하는 목적은 성능 특성치의 평균(μ)과 분산(σ)를 동시에 다루고자 하기 때문이다. 망소특성과 망목특성에 대해 SN비를 계산하는 방법과 각 SN비를 계산하는 방법에 내포된 의미를 자세히 파악하기 위해 Phadke(1989)와 Taguchi and Konishi(1992)를 참조할 수 있다.

각 설계 조건에서 계산된 SN비는 <Table 5>와 같다. 각 설계조건당 40개의 MOS 값이 얻어지지만, 지면의 낭비를 피하기 위해 첫 번째 음성 트래픽의 MOS만 나타내도록 한다.

Table 5. SN ratios of MOS

Exp. i	y_{i11}	y_{i21}	y_{i31}	y_{i41}	SN_i
1	1.255	1.436	1.332	1.244	2.873
2	3.759	2.814	2.325	1.805	7.671
3	1.286	1.153	1.097	1.035	1.467
4	4.033	3.059	2.790	2.092	8.755
5	1.477	1.434	1.184	1.381	2.921
6	1.122	1.000	1.069	1.000	1.078
7	4.174	2.947	2.997	2.062	8.730
8	1.127	1.000	1.082	1.000	1.207
9	1.464	1.616	1.164	1.197	2.806
10	4.033	3.059	2.790	2.092	8.755
11	4.098	2.760	2.599	1.825	7.846
12	1.243	1.165	1.139	1.054	1.558
13	4.174	2.947	2.997	2.062	8.736
14	1.444	1.840	1.289	1.341	3.337
15	3.642	2.572	2.020	1.594	6.563
16	4.445	2.804	3.541	1.994	8.954
17	3.955	2.862	2.400	1.805	7.769
18	3.474	2.482	2.112	1.563	6.557
19	4.174	2.947	2.997	2.062	8.736
20	4.102	2.672	2.968	1.803	8.216
21	3.642	2.572	2.020	1.594	6.567
22	4.445	2.804	3.541	1.994	8.968
23	3.955	2.862	2.400	1.805	7.769
24	3.809	2.545	2.208	1.588	6.768
25	4.033	3.059	2.790	2.092	8.755
26	4.098	2.760	2.599	1.825	7.853
27	1.487	1.732	1.244	1.276	3.440

4.2 분석 단계

주 효과 또는 교호작용 효과의 통계적인 유의성은 분산분석(ANOVA, analysis of variance)를 통해 평가할 수 있다. <Table 6>의 내용은 MOS값의 SN비에 대한 분산분석 결과이다. 'DF'는 '자유도(degree of freedom)', 'SS'는 '제곱합(sum of squares)', 그리고 'MS'는 '평균 제곱합(mean square)'를 의미한다. F_0값은 '(효과의 평균 제곱합)/(오차의 평균 제곱합)'으로 계산된다. p-값은 대응되는 효과의 통계적 유의성을 판단하는 기준이 되며, p-값이 유의 수준(α)에 비해 크다면 대응되는 효과가 통계적으로 유의하지 않다고 판정한다. 일반적으로 유의 수준은 0.1 보다 작은 값을 취하며, 본 연구에서는 0.05로 가정한다. <Table 6>에서 p-값이 0.05보다 큰 *C*(0.874), *BC*(0.226), 그리고 *BD*(0.500)는 통계적으로 유의하지 않은 효과라고 판단한다.

Table 6. Analysis of variance for SN ratio

Source	DF	SS	MS	F_0	p	ρ
A	2	40.643	20.321	17.78	0.003	17.81
B	2	53.046	26.523	23.21	0.001	23.57
C	2	0.315	0.158	0.14	0.874	-0.92
D	2	73.856	36.928	32.31	0.001	33.23
BC	4	7.806	1.952	1.71	0.226	1.50
BD	4	4.304	1.076	0.94	0.500	-0.12
CD	4	28.561	7.140	6.25	0.025	11.14
Error	6	6.857	1.143			
Total	26	215.388				

ρ는 각 효과가 SN비의 변동에 얼마나 많은 기여를 하는지 나타내는 '기여율'이다. 각 효과의 기여율 ρ_{Effect}는 다음과 같이 계산할 수 있다(Taguchi and Yokoyama 1993).

$$\rho_{\text{Effect}} = \frac{\text{SS}_{\text{Effect}} - \text{DF}_{\text{Effect}} \cdot \text{MS}_{\text{Error}}}{\text{SS}_{\text{Total}}} \times 100(\%) \quad (5)$$

ρ값이 크면 해당 효과가 SN비의 변동에 많은 기여를 하고 있다는 것을 의미한다. 즉, 제어 인자 *D*(재생 버퍼의 초기 지연)의 주효과가 SN비의 변동에 가장 많은 기여를 하고 있다.

분산분석을 통해 제어인자 *A*, *B*, *D*, 그리고 *CD*가 통계적으로 유의하다는 결론이 도출되므로, 다음 절차로써 통계적으로 유

의한 제어인자에 대해 최적 수준을 결정한다. 먼저 요인효과도를 통해 각 제어인자의 수준 변화에 따른 SN비의 변화를 파악한다. <Figure 4>는 주 효과 요인효과도이며 수준별 평균치를 나타내고 있다.

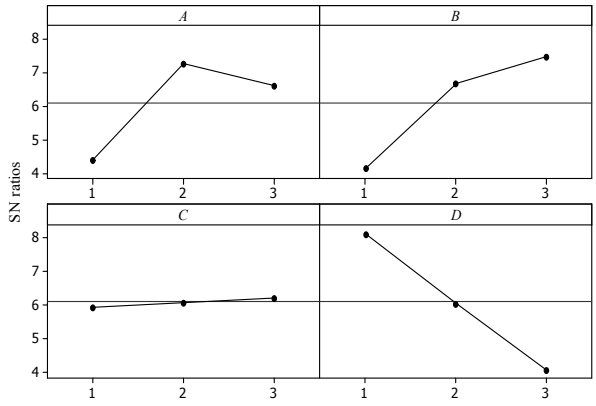

Figure 4. Main effect plots

<Figure 4>에서 보는 바와 같이 *A*의 2수준, *B*의 3수준, *C*의 3수준, 그리고 *D*의 1수준에서 SN비의 수준 별 평균이 가장 높다. 분산분석 결과에 의하면, *C*는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으므로 *C*의 최적 수준을 결정하기 위해서 *CD*의 교호작용 효과 요인도를 분석할 필요가 있다.

<Figure 5>는 교호작용 *CD*의 효과에 대한 요인효과도이다. *D*가 1수준이고 *C*가 2 또는 3수준일 경우 수준별 평균이 다른 경우에 비해 월등한 것을 알 수 있다. *C*의 수준별 평균에 대해 2수준의 값(8.819)이 3수준의 값(8.812)보다 미세하나마 크기 때문에 *C*의 2수준을 최적 수준으로 결정한다.

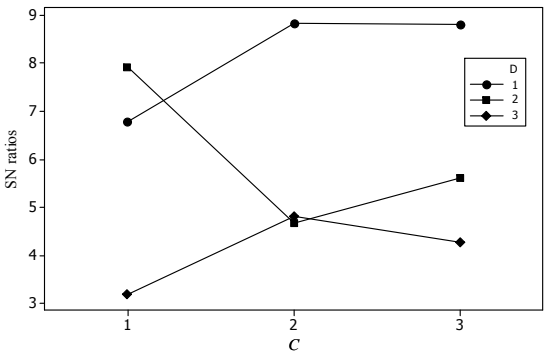

Figure 5. Interaction plots for *CD*

결론적으로, 사용자 관점의 품질에 대해 인터넷 전화 어플리케이션 파라미터 설정의 최적 조건은 *A*(코덱의 종류)의 2수준(G.723.1), *B*(재생 버퍼의 크기) 3수준(15 프레임), *C*(동시에 전송되는 음성 프레임 수)의 2수준(3 프레임), 그리고 *D*(버퍼의 초기 딜레이)의 1수준(0.05 sec)이다.

4.3 검증 단계

마지막 단계로써, 최적 조건을 도출하는 과정에서 채택한 가정과 모형이 통계적으로 적합한지 검증하기 위한 절차가 필요하다. 검증 절차는 추가 실험을 수행하고, 실험 결과의 SN비 평균에 대한 예측 구간을 계산하는 과정으로 이루어진다. 일반적으로, 최적 조건에서 실험이 실시되지 않은 경우라면 최적 조건에서 추가 실험을 수행하게 된다.

최적 조건에서 h회 반복하여 추가 실험을 수행하면, 결과적으로 h개의 SN비를 얻게 되고, 이 때 평균인 $\overline{\mathrm{SN}}$에 대해 $100(1-\alpha)\%$ 예측 구간을 계산한다. $\overline{\mathrm{SN}}$이 예측 구간에 포함되면 검증 결과가 타당한 것으로 판단한다. $\overline{\mathrm{SN}}$의 $100(1-\alpha)\%$ 예측 구간을 계산하는 방법은 Taguchi(1986)에 자세히 소개되어 있다.

본 연구에서는 최적 조건에서 추가 실험을 1회 수행한다. 유의 수준은 분산분석에서 사용한 것과 동일하게 0.05(5%)로 설정하고, 95% 예측 구간을 계산하여 추가 실험을 통해 얻은 SN비와 비교한다. 추가 실험에서 얻은 SN비는 10.416이며 95% 예측 구간인(8.581, 14.103) 사이에 포함된다. 따라서 실험 결과가 타당함을 확인할 수 있다. <Figure 6>은 추가 실험에서 구한 각 잡음 조건에 대한 MOS 값의 평균과 표준편차를 나타내고 있다.

Figure 6. MOS of the i-th traffic

본 실험이 극단적인 잡음조건을 포함하여 설계된 점을 감안하면, 최적 조건에서 얻을 수 있는 MOS 값이 평균 3.5이므로 일상적인 상황을 가정하면 사용자의 품질 기준(MOS값 3.6)을 만족한다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통해, 사용자 관점에서 인터넷 전화의 품질을 최적화하는 인터넷 전화 어플리케이션의 설계를 위해 강건 설계 기법을 적용하였다. 먼저, 인터넷 전화 어플리케이션의 구성 기능과 사용자 관점의 품질을 측정하기 위한 'E-Model'의 계산 과정을 소개하였다. 다음으로, 강건 설계 기법을 적용한 실험 설계와 분석 방법을 이용하여 통계적으로 유의한 주효과와 교

호작용의 효과를 파악하고 인터넷 전화 어플리케이션의 최적 설계 방안을 도출하였다. 결론적으로, 최적 수준은 G.723.1 코덱을 사용하고, 재생 버퍼의 크기를 15 프레임으로 설정하고, 3개의 음성 프레임을 하나의 패킷에 담아 전송하고, 버퍼의 초기 딜레이를 0.05초로 설정하는 것이다.

대규모 투자를 수반하는 통신 시스템이나 서비스를 설계하기 전에 최적화가 필요하고, 실제 시스템이 구축되지 않아 실험이 불가능한 상황에서 테스트베드 실험이나 시뮬레이션에 대한 의존도가 높은 것이 사실이다. 시뮬레이션과 현실 상황의 차이에서 발생하는 변동이 개입되는 상황에서 '재현성'이 높은 강건 설계 기법을 활용하면 통신 시스템 설계에 있어 경제성과 정확성을 높일 수 있다. 따라서, 실시간 서비스를 제공하는 통신 시스템의 운용자에게 활용도가 높을 것으로 기대된다.

추후 연구 과제로써, 수치형 제어인자에 대해 회귀분석 등의 기법을 적용하여 정밀한 최적 조건을 선정하는 과제를 진행하고자 한다. 전통적인 강건설계 기법에서는 유의한 것으로 판명된 인자에 대해 실험 계획에서 선정된 수준 중에서 최적 조건을 선정한다. 이와 같은 방법이 "코덱의 종류(*A*)"와 같은 범주형 인자에 대해서는 문제를 야기하지 않을 수 있다. 반면에 수치형 제어인자에 대해서는 선정된 최적 조건 보다 우수한 조건이 존재함에도 불구하고 이러한 조건을 선택하지 못하는 위험을 유발할 수 있다. 또한, 본 연구에서 다루고 있지 않은 새로 개발되어 사용이 확대되고 있는 코덱을 포함하여 분석을 수행하는 것도 의미 있는 연구 주제이다. 마지막으로, 무선인터넷 전화(Mobile VoIP)(Liao 1999)의 사용이 점차 확대되고 있으므로 무선망에서의 인터넷 전화 품질 최적화도 의미 있는 연구 주제이다.

참고문헌

Atzori, L. and Lobina, M. L. (2006), Playout buffering in IP telephony : a survey discussing problems and approaches, *IEEE Communication Surveys Tutorial*, **8**(3), 36-46.

Bacioccola, C., Cicconetti, C., and Stea, C. (2007), User-level performance evaluation of VoIP using ns-2, Proceedings of Workshop on Network Simulation Tools 2007, Nantes, France.

Blake, S., Black, D., Carlson, M., and Davies, E. (1998), An architecture for differentiated services. IETF RFC 2475.

Cole, R. G. and Rosenbluth, J. H. (2001), Voice over IP performance monitoring, *ACM CCR*, **31**(2), 9-24.

Gendy, M. E., Bose, A., Wang, H., and Shin, K. G. (2003), Statistical characterization for per-hop QoS. Proceedings of International Workshop on Quality of Service, 21-40.

Heidemann, J. and Mills, K. (2001), Expanding confidence in network simulations, IEEE Network, **15**(5), 58-63.

ITU-T Recommendation G.107. (2005), The E-model, a computational model for use in transmission planning.

Liao, W. (1999), Mobile Internet telephony protocol : an application layer protocol for mobile Internet telephony services, *Proceedings of IEEE International Conference on Communications ICC '99*, **1**, 339-343.

Montgomery, D. C. (2005), Design and Analysis of Experiments, 6th ed., Wiley : New York, NY.

Myers, R. H. and Montgomery, D. C. (1995), Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Wiley-Interscience : New York, NY.

Myers, R. H., Khuri, A. I., and Vining, G. (1992), Response surface alternatives to the Taguchi parameter design approach, *The American Statistician*, **46**(2), 131-139.

NS-2. (2008), http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Main_Page.

Phadke, M. S. (1989), Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall : Englewood Cliffs, NJ.

Taguchi, G. (1986), Introduction to Quality Engineering, Asia Productivity Organization : Tokyo.

Taguchi, G. and Konishi, S. (1959), Design of Experiments Using Orthogonal Tables, Union of Japanese Scientists and Engineers : Tokyo, Japan.

Taguchi, G. and Konishi, S. (1992), Taguchi Methods : Research and Development, ASI Press : Dearborn, MI.

Taguchi, G. and Yokoyama, Y. (1993), Taguchi Methods : Design of Experiments, ASI Press : Dearborn, MI.

Yoon, H. S. and Yum, B. J. (2007), Robust design of communication systems : The case of expedited forwarding of voice traffic in differentiated services networks, *International Journal of Communication Systems*, **20**, 1131-1154.

Ziviani, A., Rezende, J. F., and Duarte, O. C. M. B. (2002), Evaluating the expedited forwarding of voice traffic in a differentiated services network, *International Journal of Communication Systems*, **15**, 799-813.

윤 협 상

한국과학기술원 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
한국과학기술원 산업공학과 박사
현재: KT 중앙연구소 선임연구원
관심분야: 통신 시스템 품질 최적화, 실험계획법, 미디어 플랫폼 개발

최 수 현

경기대학교 전자공학과 학사
남가주대학교 전기컴퓨터공학부 석사
한국전자통신연구원 네트워크연구소 연구원
현재: 런던대학교 컴퓨터과학과 박사과정
관심분야: 인터넷 혼잡제어, 멀티미디어 컴퓨팅, 시스템 보안

김 성 준

한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
현재: 노스캐롤라이나주립대학교 박사후과정
관심분야: 트래픽 관리, 통신네트워크 구조, 무선랜