

# 광 가입자 망 진화를 위한 기술 경제성 평가

이영호<sup>1\*</sup> · 함태훈<sup>1</sup> · 김영진<sup>1</sup> · 한정희<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 산업시스템정보공학과 / <sup>2</sup>강원대학교 경영대학

## A New Techno-Economic Modeling and Analysis for FTTH Optical Access Networks

Youngho Lee<sup>1</sup> · Taehoon Hahm<sup>1</sup> · Youngjin Kim<sup>1</sup> · Junghee Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

<sup>2</sup>College of Business Administration, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701

In this paper, we deal with a new techno-economic modeling and analysis for optical access networks. In deploying the fiber-to-the-home (FTTH) architecture, network planner needs to consider the following techno-economic issues: when do we need to upgrade existing local access network to FTTH network? how much do we invest to maximize profit? In order to answer these techno-economic questions, we need to consider the impact of emerging technologies and business environment. Toward this end, we develop a new techno-economic modeling to deal with the inherent complexity of technology evolution and cost economics. In particular, the new modeling approach provides us with a techno-economic analysis of technology alternatives such as ethernet passive optical network (E-PON) and wavelength division multiplex passive optical network (WDM-PON). In this analysis, we focus on the impact of critical factors such as the cost characteristic of proposed architecture and digital subscriber line (DSL) subscriber's churn-in to FTTH service and churn-out. We develop mixed integer-programming models for finding the evolution path of local access networks to broadband network architectures.

**Keywords:** FTTH, optical access networks, techno-economic analysis, WDM-PON, network evolution

### 1. 서론

정부의 BcN 가입자 망 정책에 따라 홈 네트워크, 고화질 동영상, 원격진료 그리고 HDTV 같은 차세대 초고속 인터넷 서비스 제공에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 차세대 초고속 인터넷 서비스는 현재 구리선 기반의 가입자 망으로 제공하지 못하므로, 50Mbps 이상의 양방향 데이터 전송이 가능한 새로운 기술의 가입자 망을 구축해야 한다. 차세대 초고속 인터넷 서비스 가입자 망 구축은 구축 비용과 함께 서비스 가입 행태에 따른 신규 수입을 고려해야 한다. 서비스 가입 행태는 기존

서비스를 계속 이용하거나 신규 서비스로 이탈하는 형태로 나타난다. 서비스 사업자가 이탈을 막기 위해 타사 보다 먼저 망을 구축하면 신규 개발된 장비의 가격이 높아 투자 비용이 커진다. 반대로 서비스 제공 시기를 늦추면 이탈자 증가에 따라 신규 서비스 수입은 감소하며 기술 개발에 따른 장비 단가 하락으로 구축 비용은 낮아진다. 따라서 신규 가입자 망 구축은 진화 시기에 따른 수입과 비용의 상충관계(Trade-off)를 고려해야 한다. 한편, 가입자 망 진화에 나타나는 신규 가입자 수, 이탈자 수 그리고 장비의 단가 하락은 정확히 예측할 수 없으므로 불확실성 요인으로 고려하여 평가한다. 이 논문은 진화시

\*연락처 : 이영호 교수, 서울시 성북구 안암동 5가 1 고려대학교 산업시스템정보공학과, Fax : 02-929-5888,

E-mail : yhlee@korea.ac.kr

2005년 4월 2일 접수, 1회 수정 후 2005년 5월 26일 게재 확정.

기에 따른 기존과 신규 가입자 망의 비용과 수입에 상충관계를 최적화 모형으로 설계하고, 불확실성 요인을 고려한 망 진화를 위한 기술 경제성을 평가한다.

서비스 수입과 망 투자비용을 고려한 경제성 평가의 전체 흐름을 <그림 1>이 보여준다. 가입자 망 기술 대안은 신규 가입자 망에 설치할 기술 대안 종류, 성능, 그리고 장비 단가 정보를 나타낸다. 지역모형은 기존 가입자 망 서비스 제공지역의 전화국에서 가입자까지 거리와 가입자 밀집도 정보를 나타낸다. 비용 모듈은 기존 가입자 망과 신규 가입자 망에서 발생하는 비용으로 구성되는데, 기존 가입자 망에서 이탈자 수에 따른 회회 비용과 유지보수 비용이 발생하고, 신규 가입자 망에서 설치 비용, 서비스 제공 비용 그리고 유지보수 비용이 발생한다. 서비스와 요금은 기존 가입자 망과 신규 가입자 망의 제공 서비스와 요금 수준을 나타낸다. 신규 서비스 수요에 따라 기존 가입자가 신규 가입자로 이동하게 되면 기존과 신규 가입자 수에 변동이 발생하므로, 수입 모듈은 기존 가입자와 신규 가입자 변화에 따른 전체 수입 분석을 나타낸다. 경제성 최적화는 비용과 수입을 모두 고려하여 이익을 최대로 하는 가입자 망 설치 시기와 기술 대안을 선정한다. 마지막으로 순현가를 통해 대안의 경제성을 평가하고 민감도 분석으로 가입자 망 진화의 영향 요소를 분석한다.

지난 10년간 가입자 망의 경제성 평가 연구가 많이 이루어졌다. 통신회사와 케이블 회사에서 광대역 가입자 망으로 진화하기 위한 경제성 분석에 대해 Ims *et al.*(1997)은 fiber-to-the-building(FTTB)와 fiber-to-the-node(FTTN) 형태로 광케이블과 동선을 혼합해 사용하는 진화 방안을 제시했다. 경제성 분석을 위해 tool for introduction scenarios and technoeconomic evaluation of access networks(TITAN)을 이용해 비용을 산출하고 수요와 요금을 통해 수입을 결정했다. Lee *et al.*(2000)은 광대역 가입자 망의 최적 진화 방안 수립에 관해 연구하였다. 불확실성 요소를 고려한 의사 결정과 위험 분석 방법론을 통해 경제성을 평가하고, 새로 건설중인 주거지역을 대상으로 기술 경제성 평가 모형을 수립했다. 기술 대안은 5가지, 서비스는 음성, 데이터, 실시간 동영상 그리고 케이블 TV를 선정하여 순현가와 최종 연도 현금 흐름을 통해 경제성을 평가했다. Weldon *et al.*(2003)은 VDSL, fiber-to-the home passive optical network(FTTH PON) 그리고 FTTH active optical network(FTTH AON) 3가지 기술 대안의

비용과 성능을 고려한 연구를 했다. 비용과 성능을 가입자 대역폭, 지역 밀집도, 가입률에 따라 평가했다. Bell and Trigger (1998)는 서비스의 수명 주기(life-cycle)에 발생하는 모든 비용을 고려하여 경제성을 평가했다. 비용을 3가지 기술 대안 비용, 네트워크 설치비용 그리고 서비스 제공 비용으로 나누어 분석하고, 특히 망을 설치하는 비용보다 운용하고 관리하는 데 소요되는 변동 비용에 중점을 두었다.

이 논문은 기존 가입자 망이 설치된 지역을 대상으로 신규 가입자 망의 진화시기에 따른 기술 경제성을 평가한다. 신규 가입자 망은 PON 구조로 가정까지 광케이블을 연결하는 FTTH 형태이며, 차세대 인터넷 서비스 제공 기술 대안으로 wavelength division multiplex-PON(WDM-PON)과 ethernet-PON(E-PON)을 선정한다. 신규 가입자 망을 구축할 때 발생하는 서비스 가입률, 장비 비용 단가 하락률 그리고 기존 가입자 망의 이탈률을 불확실성 요인으로 다루어 경제성을 평가한다. 논문 구성은 다음과 같다. 2장은 기술 경제성 평가 이슈를 검토하고, 3장은 진화 시나리오 평가 모형을 제시한다. 4장은 평가 방법론을 통해 모의 지역에 대하여 기술 경제성을 분석한다. 5장에서 결론과 향후 연구 과제를 기술한다.

## 2. 가입자 망 기술 진화 경제성 분석 이슈

현재 사용하고 있는 구리선 기반 가입자 망은 대역폭의 한계와 전송 거리의 제한 때문에 2Mbps 이하의 인터넷 서비스와 초기 단계의 인터넷 방송, 작은 화면의 실시간 동영상 서비스를 제공하고 있다. 따라서 차세대 인터넷 서비스를 제공하려면 구리선보다 전송 거리가 길고 제공 대역폭이 높은 광케이블을 이용해 가입자 망을 구축해야 한다.

신규 가입자 망 구축은 집까지 광케이블을 설치하는 FTTH 형태를 선정하고 PON 구조로 가입자 망을 구성한다. PON 구조는 수동 광 부품을 사용하여 전력 공급이 필요 없는 장점이 있고 1:N 형태로 연결하기 때문에 광케이블의 설치 길이가 줄어들어 경제적이다.

FTTH PON 구조의 가입자 망 연결 형태는 <그림 2>와 같으며, 가입자는 전화국에 설치하는 광 종단장치(optical line terminal, OLT)와 수동 분배기를 거쳐 집안의 가입자 단말기(optical

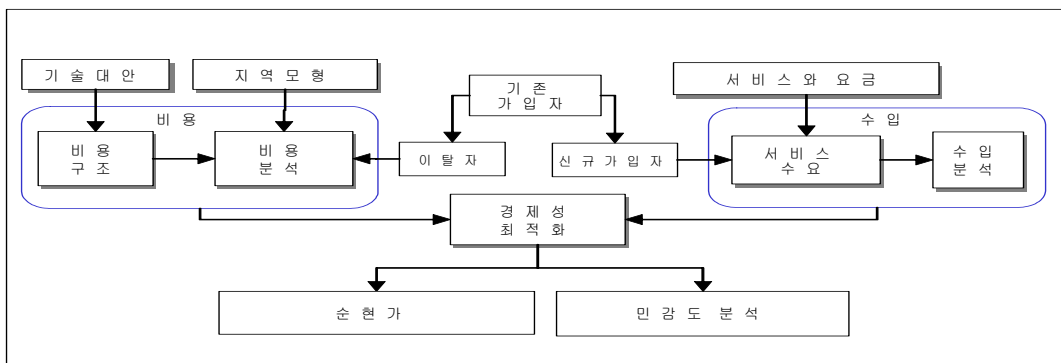


그림 1. 기술 진화 경제성 평가 흐름도.

network terminal; ONT)를 통해 서비스를 제공받는다. 분배기 (splitter)는 1개의 광 종단장치 카드(OLT PON Card)와 연결되고, 광 종단장치 카드는 광 종단장치 슬롯에 삽입하여 사용한다.

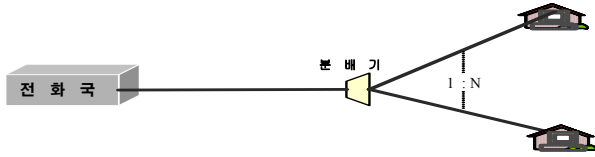


그림 2. PON 구조의 가입자 망 연결 형태.

광 가입자 망에 사용할 기술대안으로 E-PON(Kramer, et al., 2002)과 WDM-PON(Kani et al., 2003)을 선정한다. 두 가지 기술 대안이 제공하는 서비스 종류는 동일하지만 제공 대역폭에 차이가 있다. 현재 제공할 수 있는 가입자당 대역폭은 E-PON의 경우 최대 50Mbps이고 WDM-PON은 최대 100Mbps를 제공하므로 성능에 따른 서비스 요금에 차이를 두어 평가한다.

기존 가입자 망의 기술은 digital subscriber line(DSL) 형태로 가정한다. DSL은 전화국에서 가입자까지 음성신호 전달을 목적으로 설치한 구리선을 이용하여 디지털 데이터를 전송하는 기술이다. 현재 DSL을 이용한 초고속 인터넷 서비스가 제공되고, 높은 밀집도로 인하여 아파트와 전화국 기점 3km 이내에 공급되었다.

국내 가입자 망 지역모형은 아파트 단지와 일반 주거 지역으로 구분된다. 아파트 지역은 지하 단자함을 통해 서비스를 제공하므로 분배기 설치 장소나 용량을 쉽게 결정할 수 있다. 또한, 밀집도가 일정하고 전화국에서 가입자까지 거리도 일정하게 나타난다.

그러나 일반 주거 지역은 밀집도가 지역마다 다르고 전화국과 가입자 거리도 다르므로 분배기 설치 장소나 용량 결정이 어렵다. 이 연구는 아파트 단지를 대상으로 가입자 망 진화 경제성을 평가한다. 아파트 단지의 PON 망 구성은 <그림 3>과 같다.

케이블 비용은 <표 1>과 같이 항목별로 거리에 비례해서 발생한다. 그리고 거리에 따라 포설비(인건비)도 추가된다. 케이블 자체비는 매년 단가가 하락하고, 반대로 포설비는 매년 상승한다.

표 1. 케이블 설치 구역

항 목	거 리
중앙기지국~아파트 관리실	20km 이내
아파트 관리실~동단지함	2km 이내
동단지함~가입자	50m 이내

### 3. 기술 경제성 최적화 모형

기술 경제성 최적화 모형은 이익이 최대가 되는 기술 대안과 진화시기를 결정한다. 경제성 최적화 문제에 필요한 집합과 모수를 정의하면 다음과 같다.

- $N$ : 기술 대안 집합
- $T$ : 연구 기간 집합
- $\gamma_{it}$ :  $i$  기술을  $t$  시기에 설치할 때 발생하는 설치 비용(장비, 케이블 비용 그리고 인건비)
- $\pi_{it}$ :  $t$  시기에 설치될  $i$  기술 광 종단장치 카드 비용
- $\delta_t$ :  $t$  시기의 FTTH 누적 가입자 수
- $\theta_i$ :  $i$  기술 광 종단장치 카드의 분기수(분기 수가 32이면 가입자 32명을 수용)
- $\omega$ : 가입자 이탈률
- $\eta$ : FTTH 가입자 망 유지보수 비용 비율
- $\mu$ : DSL 가입자 망 유지보수 비용 비율
- $M$ : 상수 값
- $\alpha_i$ :  $i$  기술의 서비스 요금
- $\beta$ : DSL 서비스 요금

결정변수  $x_{it}$ 는  $t$  시기에 설치된  $i$  기술 광 종단장치 카드 수를 의미한다.  $z_{it}$ 는  $t$  시기에  $i$  기술의 설치 여부를 의미한다.  $f_{it}$ 는  $t$  시기에  $i$  기술 FTTH 서비스에 가입한 누적 가입자 수를 의미한다.  $y_t$ 는  $t$  시기에 DSL 서비스 사용자 수를 의미한다.

차세대 인터넷 서비스 경제성 평가 수학 모형은 다음과 같다. 목적함수는 수입에서 비용을 뺀 이익을 최대로 한다. 수입은 DSL 서비스 수입과 FTTH 서비스 수입으로 이루어지며, 비용은 FTTH 서비스를 위해 설치하는 장비 비용과 수요가 발생할 때 마다 추가하는 광 종단장치 카드 비용이 있다. 그리고

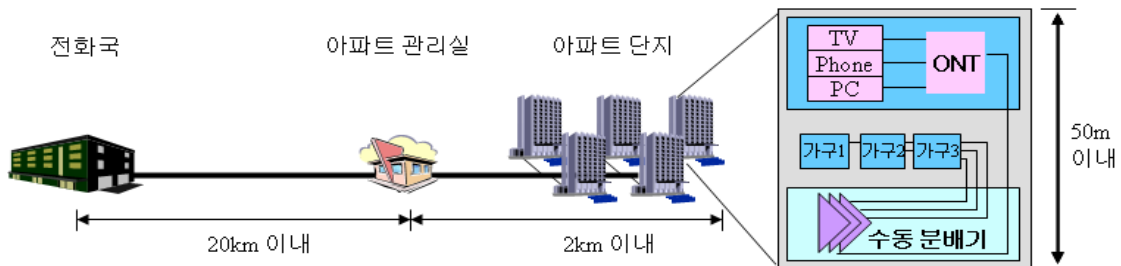


그림 3. 가입자 망 설치 구역 아파트 단지 예.

DSL 서비스 가입자가 DSL 서비스를 더 이상 사용하지 않고 다른 회사나 다른 서비스로 이동하는 경우 발생하는 기회 비용과 DSL과 FTTH 서비스의 유지보수 비용이 있다.

수입 부분은 DSL 서비스 수입과 FTTH 서비스 수입으로 다음과 같이 구성된다.

$$\text{수입} = \beta \sum_{i \in T} y_i + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \alpha_i f_{it} .$$

비용 부분은 설치 비용, 광 종단장치 카드 비용, 기회손실 비용, 그리고 유지보수 비용으로 구성된다. 설치 비용  $\gamma_{it}$ 는 광 종단장치 비용, 케이블 비용, 그리고 인건비의 합이다.

$$\text{설치비용} = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{it} z_{it} .$$

광 종단장치 카드 비용은 가입자에 비례해서 발생한다. 광 종단장치 카드 규격에 따라 1장에 32 또는 64 가입자를 수용한다.

$$\text{광 종단장치 카드 비용} = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \pi_{it} x_{it} .$$

기회손실 비용은 이탈자에 의해 발생한다. FTTH 예상 가입자 수에서 FTTH 서비스에 가입하지 않은 일부가 타사로 이탈된다.  $e_t$ 는  $t$  시기에 이탈자 수를 의미한다.

$$\text{기회손실 비용} = \beta \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^t e_k .$$

유지보수 비용은 FTTH 가입자 망 초기 설치 장비의 유지보수 비용, 광 종단장치 카드의 유지보수 비용 그리고 DSL 가입자 망 유지보수 비용으로 구성된다.

유지보수 비용 =

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \eta \sum_{k=1}^t \gamma_{ik} z_{ik} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \eta \sum_{k=1}^t \pi_{ik} x_{ik} + \beta \sum_{t \in T} \mu y_t .$$

따라서 목적함수 값은 기존 가입자 망 수입과 광 가입자 망 수입을 합한 값에서 초기투자 비용, 광 종단장치 카드 비용, 기회손실 비용 그리고 유지보수 비용을 뺀 총 이익이다. 목적함수를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & \beta \sum_{t \in T} y_t + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \alpha_i f_{it} - \left( \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{it} z_{it} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \pi_{it} x_{it} \right) - \beta \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^t e_k \\ & - \left( \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \eta \sum_{k=1}^t \gamma_{ik} z_{ik} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \eta \sum_{k=1}^t \pi_{ik} x_{ik} + \beta \sum_{t \in T} \mu y_t \right) . \end{aligned}$$

$t$  시기에 이탈자 수  $e_t$ 는 예상 누적 가입자 수  $\delta_t$ 에서  $(t-1)$  기간까지 누적 이탈자 수와  $t$  시기의 FTTH 누적 가입자 수를 뺀 값에 이탈률을 곱하여 정의한다.

$$e_t = \omega \left( \delta_t - \sum_{k=1}^{t-1} e_k - \sum_{i \in N} f_{it} \right) ,$$

$$t \in T . \quad (1)$$

$t$  시기에  $i$  기술의 FTTH 누적 가입자 수와 DSL 가입자 수의 합은 전체 가구 수(960가구)에서 누적 이탈자 수를 뺀 값과 동일하다.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} f_{it} + y_t &= 960 - \sum_{k=1}^t e_k , \\ t &\in T . \end{aligned} \quad (2)$$

FTTH 서비스는 광 종단장치 카드를 설치해야 서비스를 제공할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{it} &\leq \theta_i \sum_{k=1}^t x_{ik} , \\ i &\in N , \quad t \in T . \end{aligned} \quad (3)$$

FTTH 장비 설치 후에 광 종단장치 카드를 설치할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{it} &\leq M \sum_{k=1}^t z_{ik} , \\ i &\in N , \quad t \in T . \end{aligned} \quad (4)$$

FTTH 누적 가입자 수는 누적 예상 가입자  $\delta_t$ 에서 누적 이탈자 수를 뺀 값보다 작아야 한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} f_{it} &\leq \delta_t - \sum_{k=1}^{t-1} e_k , \\ t &\in T . \end{aligned} \quad (5)$$

진화 기술 대안은 한 가지만 선택하고 연구 기간에 한번 설치한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} z_{it} &\leq 1 , \\ i &\in N , \quad t \in T . \end{aligned} \quad (6)$$

식 (7), (8), (9) 그리고 (10)은 변수의 비음조건, 정수조건, 이진 정수조건을 나타낸다.

$$e_t, y_t \geq 0 , \quad t \in T , \quad (7)$$

$$f_{it} \geq 0 , \quad i \in N , \quad t \in T , \quad (8)$$

$$x_{it} \geq 0 \text{ and integer} , \quad i \in N , \quad t \in T , \quad (9)$$

$$z_{it} \in \{0,1\} , \quad i \in N , \quad t \in T . \quad (10)$$

따라서 이익을 최대화 하는 광 가입자 망 최적화 수학적 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & \beta \sum_{t \in T} y_t + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \alpha_i f_{it} - \left( \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{it} z_{it} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \pi_{it} x_{it} \right) - \beta \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^t e_k \\ & - \left( \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \eta \sum_{k=1}^t \gamma_{ik} z_{ik} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \eta \sum_{k=1}^t \pi_{ik} x_{ik} + \beta \sum_{t \in T} \mu y_t \right) . \end{aligned}$$

Subject to

$$e_t = \omega((\delta_t - \sum_{k=1}^{t-1} e_k) - \sum_{i \in N} f_{it}), \quad t \in T,$$

$$\sum_{i \in N} f_{it} + y_t = 960 - \sum_{k=1}^t e_k, \quad t \in T,$$

$$f_{it} \leq \theta_i \sum_{k=1}^t x_{ik}, \quad i \in N, \quad t \in T.$$

$$x_{it} \leq M \sum_{k=1}^t z_{ik}, \quad i \in N, \quad t \in T.$$

$$\sum_{i \in N} f_{it} \leq \delta_t - \sum_{k=1}^{t-1} e_k, \quad t \in T,$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} z_{it} \leq 1, \quad i \in N, \quad t \in T.$$

$$e_t, y_t \geq 0, \quad t \in T,$$

$$f_{it} \geq 0, \quad i \in N, \quad t \in T.$$

$$x_{it} \geq 0 \text{ and integer}, \quad i \in N, \quad t \in T.$$

$$z_{it} \in \{0,1\}, \quad i \in N, \quad t \in T.$$

#### 4. 사례 분석

지역 모형은 총 10개 동으로 1동에 96가구가 입주한 아파트 단지를 선정하고, 연구 기간은 10년, 이자율은 5%로 가정한다. 유지보수 비용은 신규 가입자 망 설치 연도부터 매년 투자 비용의 8%가 발생하고 기존 가입자 망은 서비스 수입의 2%로 가정한다. <그림 4>는 아파트 가입자 지역을 보여주고 있다. 10개 동은 관리사무소를 통해 전화국과 연결된다.

<표 2>는 가입자 망 비용 구조를 보여주고 있다. 장비는 전

화국에 설치하는 광 종단장치와 아파트 단지 지하에 설치하는 분배기, 광 종단장치 카드 그리고 기구물이 있다. 가입자 집에 설치하는 광 가입자 장치는 가입자 임대를 가정하여 비용 항목에서 제외한다. 선로와 자재는 광케이블과 연결 부품을 포함한다. 선로비와 자재비의 단가 하락은 연구 기간 5차년도까지 적용된다. 포설비는 장비와 케이블을 설치할 때 발생하며, 매년 지난해 장비 단가의 10% 상승을 가정한다. 광 종단장치 카드는 1장에 32 가구를 수용하며, 가입자 발생에 따라 설치한다. E-PON과 WDM-PON의 장비단가는 WDM-PON 광 종단장치가 E-PON 장치보다 5배 정도 단가가 높고, 분배기는 3배 높다. 한편, 광 종단장치 카드 단가는 E-PON이 WDM-PON보다 4배 높다.

표 2. 가입자 망 비용 구조

가입자 망	항목	세부 항목
신규 가입자 망	장비	광 종단장치
		분배기
		광 종단장치 카드
		방송 서비스 장비, 기구물
	선로와 자재	광케이블
		분배함
		접속함체와 연결 부품
포설(공사)	전화국~가입자	
광 종단장치 카드	가입자가 발생할 때마다 설치	
유지 보수	전화국~가입자	
기존 가입자 망	유지 보수	전화국~가입자

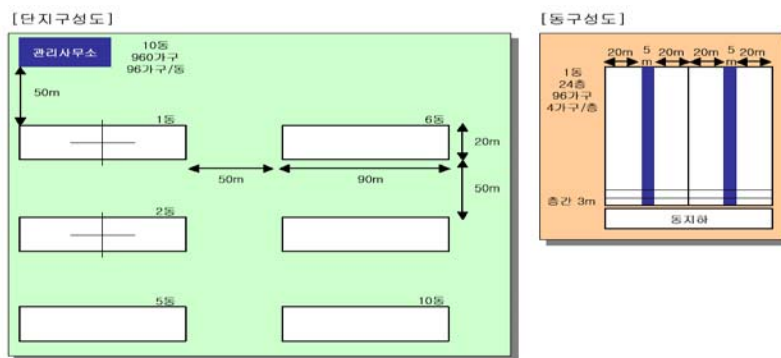


그림 4. 가입자 지역 모형.

표 3. 예측 가입자 수

구분 \ 연도	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
순증(명)	60	40	20	60	100	120	110	90	80	40
누적(명)	60	100	120	180	280	400	510	600	680	720

FTTH 신규 가입자 예측은 2000년~2004년 초고속 가입자 자료를 이용하는데, 6개월 단위로 산출한 가입자 증가율을 이용하여 전체 가구 수가 960(가구)일 경우 FTTH 예상 가입자 수를 도출하였다. <표 3>은 10년간 FTTH 서비스 예측 가입자 수이다.

한편, 기존 가입자 망에서 신규 가입자 망으로 이동하거나 타 서비스로 이동하는 가입자 이탈률, 신규 가입자 망의 장비와 케이블 단가 하락률 그리고 신규 가입자 망 예상 가입자 수는 불확실성 요소로 평가한다. <표 4>는 기존 가입자 이탈률, 요금, 장비 단가 하락률 그리고 예상 가입자 평가표이다. 단, 하

락률은 1~5차년도까지 적용하고, 6~10차년도는 5차년도 장비 단가와 동일하다. 그리고 DSL 가입자 요금은 평균 3만 원으로 설정한다.

**이탈률 변화에 따른 순현가**

요금, 장비 단가 하락률 그리고 예상 가입자를 중간 값(보통)에 고정하고 이탈률이 변동할 때 나타나는 순현가를 산출한다. 이탈률이 높고, 진화시기가 빠를수록 순현가가 높게 나타났다. 장비 단가 하락에 따른 투자 비용 감소보다 가입자 이탈에 따른 기회 비용과 FTTH 가입자 수 감소가 순현가에 더 많은 영향

**표 4. 이탈률, 요금, 장비 단가 하락률, 예상 가입자 평가표**

항목		낮음	보통	높음
이탈률		10%	20%	30%
요금	E-PON	3만 원	4만 원	5만 원
	WDM-PON	4만 원	5만 원	6만 원
장비 단가 하락률		5%	10%	15%
예상 가입자		90%	100%	110%

**표 5. 이탈률 평가표**

이탈률		10%	20%	30%
요금	DSL	3만 원		
	E-PON	4만 원		
	WDM-PON	5만 원		
장비 단가 하락률		10%		
예상 가입자		100%		

**표 6. 이탈률에 따른 이익의 총 순현가(설치년도 1~5년)**

(단위: 억 원)

이탈률	FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	설치년도				
			1	2	3	4	5
10%	29.7	E-PON	32.7	33.0	33.0	32.9	32.5
		WDM-PON	35.4	35.8	35.8	35.7	35.3
20%	26.8	E-PON	32.7	32.7	32.3	31.9	31.2
		WDM-PON	35.4	35.4	35.1	34.6	33.8
30%	24.8	E-PON	32.7	32.4	31.7	31.1	30.2
		WDM-PON	35.4	35.1	34.4	33.7	32.6

**표 7. 이탈률에 따른 이익의 순현가(설치년도 6~10년)**

(단위: 억 원)

이탈률	FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	설치년도				
			6	7	8	9	10
10%	29.7	E-PON	31.7	30.6	29.5	28.4	27.5
		WDM-PON	34.1	32.6	31.0	29.4	27.9
20%	26.8	E-PON	29.9	28.4	26.8	25.5	24.6
		WDM-PON	32.1	30.1	28.0	26.3	24.9
30%	24.8	E-PON	28.6	26.6	24.8	23.4	22.5
		WDM-PON	30.6	28.1	25.9	24.0	22.8

을 준다. <표 5>는 이탈률 변화에 따른 순현가를 알아보기 위한 평가표이다. 이탈률을 제외한 나머지 불확실성 요소를 고정하고 이탈률을 낮춤, 중간 그리고 높음으로 나누어 평가한다.

<표 6>은 1~5차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. 이탈률이 높을수록 초기에 진화해야 높은 순현가를 얻을 수 있다. 이탈률이 낮을 경우 E-PON은 1~5차년도에 WDM-PON은 2~4차년도에 진화해야 높은 순현가를 얻을 수 있다. WDM-PON은 장비 단가가 상대적으로 높아 1차년도보다 단가가 하락한 2차년도에 진화하면 유리하다. 그리고 E-PON과 WDM-PON 기술대안의 순현가를 비교하면 WDM-PON이 높게 나타났다. WDM-PON의 장비 비용이 높지만 요금에서 발생하는 수입이 더 크기 때문이다.

<표 7>은 6~10차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. 8~9차년도에 가입자 망을 진화하면 신규 망을 설치하지 않는 경우보다 총 순현가가 낮게 나타났다.

**요금 변화에 따른 순현가**

E-PON과 WDM-PON의 요금 변동에 따른 순현가를 산출한다. 요금에 따른 순현가는 망 설치 시기가 늦어질수록 하락하는데, 기존 가입자의 이탈에 따른 손실이 장비 단가 하락보다 크기 때문이다. <표 8>은 요금 변화에 따른 순현가를 알아보기 위한 평가표이다. 요금을 제외한 나머지 불확실성 요소를 중간으로 고정하고 평가한다. 단 E-PON과 WDM-PON은 서비스 제공 대역폭에 차이가 있으므로 요금을 다르게 평가한다.

<표 9>는 1~5차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. 장비 단가의 하락보다 가입자 이탈에 의한 손실이 커서 요금이 높아질수록 초기에 진화해야 높은 순현가를 얻을 수 있다.

<표 10>은 6~10차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. 요금이 낮은 경우 E-PON을 7~10차년도에 설치하거나 WDM-PON을 8~10차년도에 설치하면 설치하지 않는 경우보다 순현가가 낮게 나타났다.

**표 8. 요금 평가표**

이탈률		20%		
요금	DSL	3만 원		
	E-PON	3만 원	4만 원	5만 원
	WDM-PON	4만 원	5만 원	6만 원
장비 단가 하락률		10%		
예상 가입자		100%		

**표 9. 요금 수준에 따른 이익의 순현가(설치년도 1~5년)**

(단위: 억 원)

FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	요금	설치년도				
			1	2	3	4	5
26.8	E-PON	3만 원	28.4	28.5	28.4	28.3	27.9
	WDM-PON	4만 원	31.0	31.3	31.2	31.0	30.5
	E-PON	4만 원	32.7	32.7	32.3	31.9	31.2
	WDM-PON	5만 원	35.4	35.4	35.1	34.6	33.8
	E-PON	5만 원	37.1	36.9	36.2	35.6	34.5
	WDM-PON	6만 원	39.8	39.6	39.0	38.3	37.1

**표 10. 요금 수준에 따른 이익의 순현가(설치년도 6~10년)**

(단위: 억 원)

FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	요금	설치년도				
			6	7	8	9	10
26.8	E-PON	3만 원	27.1	26.2	25.3	24.6	24.2
	WDM-PON	4만 원	29.3	27.9	26.5	25.3	24.5
	E-PON	4만 원	29.9	28.4	26.8	25.5	24.6
	WDM-PON	5만 원	32.1	30.1	28.0	26.3	24.9
	E-PON	5만 원	32.7	30.6	28.4	26.5	25.0
	WDM-PON	6만 원	34.9	32.3	29.6	27.2	25.3

**장비 단가 하락률에 따른 순현가**

장비 단가 하락률에 따른 순현가는 낮음, 중간, 그리고 높음에 관계없이 초기에 신규 가입자 망을 설치해야 높은 순현가를 얻을 수 있다. <표 11>은 장비 단가 하락률에 따른 순현가를 알아보기 위한 평가표이다. 장비 단가 하락률을 제외한 나머지 불확실성 요소를 중간으로 고정하고 하락률을 낮음, 중간 그리고 높음으로 평가한다. 단, 장비 단가 하락률은 1~5차년도까지 적용하고, 6~10차년도는 5차년도 장비 단가와 동일하다.

<표 12>는 1~5차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구 기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. 장비 단가 하락률이 높더라도 E-PON과 WDM-PON 모두 1~3차년도에 진화해야 높은 순현가를 얻을 수 있다.

<표 13>은 6~10차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구 기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. E-PON과 WDM-PON을 8~10차년도에 진화할 경우 진화하지 않을 경우보다 순현가가 낮게 나타난다.

**표 11. 장비 단가 하락률 평가표**

이탈률		20%		
요금 수준	DSL	3만 원		
	E-PON	4만 원		
	WDM-PON	5만 원		
장비 단가 하락률		5%	10%	15%
예상 가입자		100%		

**표 12. 장비 단가 하락률에 따른 이익의 순현가(설치년도 1~5년)**

(단위: 억 원)

FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	장비 단가 하락률	설치년도				
			1	2	3	4	5
26.8	E-PON	5%	32.7	32.5	32.0	31.6	30.8
	WDM-PON		35.2	35.1	34.5	34.0	33.1
	E-PON	10%	32.7	32.7	32.3	31.9	31.2
	WDM-PON		35.4	35.4	35.1	34.6	33.8
	E-PON	15%	32.8	32.9	32.6	32.2	31.6
	WDM-PON		35.6	35.8	35.6	35.2	34.4

**표 13. 하락률에 따른 이익의 순현가(설치년도 6~10년)**

(단위: 억 원)

FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	장비 단가 하락률	설치년도				
			6	7	8	9	10
26.8	E-PON	5%	29.6	28.1	26.5	25.3	24.4
	WDM-PON		31.5	29.5	27.6	25.8	24.5
	E-PON	10%	29.9	28.4	26.8	25.5	24.6
	WDM-PON		32.1	30.1	28.0	26.3	24.9
	E-PON	15%	30.2	28.6	27.1	25.7	24.8
	WDM-PON		32.7	30.6	28.4	26.6	25.2

**표 14. 예상 가입자 평가표**

이탈률		20%		
요금	DSL	3만 원		
	E-PON	4만 원		
	WDM-PON	5만 원		
장비 단가 하락률		10%		
예상 가입자		90%	100%	110%



**가입자에 따른 순현재가**

<표 14>는 가입자 변화에 따른 순현재가를 알아보기 위한 평가표이다. 가입자를 제외한 나머지 불확실성 요소는 중간으로 고정하고 가입자 수를 낮음, 중간, 그리고 높음으로 나누어 평가한다. FTTH 신규 가입자 예측은 100%일 경우 2000년~2004년 초고속 인터넷 가입자 증가율과 동일하게 나타나는 경우를 말한다. 110%일 경우 2000년~2004년 초고속 인터넷 가입자 수보다 10% 가입율이 높고, 90%는 10% 감소한 형태로 가입자가 나타난다. 그리고 가입자 수는 <표 3>을 참고한다.

<표 15>는 1~5차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구 기간 동안 발생하는 총 이익의 순현재가를 나타낸다. 가입자가 100%일 경우 WDM-PON은 1~4차년도 사이에 신규 가입자 망을 설치해야 높은 순현재가를 얻을 수 있고 가입자가 110%일 경우 가입자 이탈에 따른 손실을 줄이기 위해 1~3차년도에 설치해야 높은 순현재가를 얻을 수 있다.

<표 16>은 6~10차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구

기간 동안 발생하는 총 이익의 순현재가를 나타낸다. 가입자 증가와 감소에 관계없이 9~10차년도에 신규 가입자 망을 설치하면 설치하지 않는 경우보다 순현재가가 낮게 나타났다.

**WDM-PON 요금 변동에 따른 순현재가**

WDM-PON 요금에 따른 순현재가를 평가하는데, WDM-PON 요금을 제외한 나머지 불확실성 요소를 중간 값으로 고정한다. <표 17>은 7가지 WDM-PON 요금과 나머지 불확실성 요소 값이다.

<표 18>은 1~5차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구 기간 동안 발생하는 총 이익의 순현재가를 나타낸다. WDM-PON은 요금 수준이 높을수록 초기에 진화해야 많은 순현재가가 발생한다. 요금이 3만 원일 경우 1차년도에 진화하면 FTTH 가입자 망을 설치하지 않는 경우보다 순현재가가 낮게 나타나고, 4차년도에 진화해야 순현재가가 높게 나타난다. 요금 수준이 높을수록 장비 단가 하락에 의한 비용 절감보다 가입자 이탈에 따른 손

표 15. 가입자에 따른 이익의 순현재가(설치년도 1~5년)

(단위: 억 원)

예상 가입자	FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	설치년도				
			1	2	3	4	5
90%	27.5	E-PON	32.3	32.3	32.0	31.7	31.1
		WDM-PON	34.6	34.7	34.5	34.2	33.4
100%	26.8	E-PON	32.7	32.7	32.3	31.9	31.2
		WDM-PON	35.4	35.4	35.1	34.6	33.8
110%	26.1	E-PON	33.2	33.1	32.6	32.1	31.3
		WDM-PON	36.2	36.2	35.7	35.2	34.2

표 16. 가입자에 따른 이익의 순현재가(설치년도 6~10년)

(단위: 억 원)

예상 가입자	FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	설치년도				
			6	7	8	9	10
90%	27.5	E-PON	30.0	28.6	27.2	26.1	25.2
		WDM-PON	32.0	30.1	28.3	26.7	25.5
100%	26.8	E-PON	29.9	28.4	26.8	25.5	24.6
		WDM-PON	32.1	30.1	28.0	26.3	24.9
110%	26.1	E-PON	29.9	28.2	26.4	25.0	23.9
		WDM-PON	32.3	30.1	27.8	25.8	24.3

표 17. WDM-PON 요금 평가표

이탈률		20%						
요금	DSL	3만 원						
	E-PON	4만 원						
	WDM-PON	(1) 3만 원	(2) 3만5천 원	(3) 4만 원	(4) 4만5천 원	(5) 5만 원	(6) 5만5천 원	(7) 6만 원
장비 단가 하락률		10%						
예상 가입자		100%						

실이 커서 빨리 진화할 경우에 높은 이익이 발생한다.

<표 19>는 6~10차년도에 신규 가입자 망을 설치하여 연구 기간 동안 발생하는 총 이익의 순현가를 나타낸다. WDM-PON 요금이 3만 원일 경우 5~10차년도에 진화하면 FTTH 가입자 망을 설치 안할 경우보다 낮은 순현가가 발생한다. WDM-PON 요금이 6만 원일 경우 10차년도에 진화하면 설치 하지 않는 경우보다 순현가가 낮게 발생한다.

5. 결론

이 논문은 FTTH 형태의 광 전송 가입자 망으로 진화하는 경우 발생하는 기술 경제성 평가 문제를 해결하기 위해서 MIP(mixed integer-programming) 최적화 모형을 개발하였다. 평가 모형은 기존 가입자 망에서 이탈하거나 신규 서비스로 이동하는 가입자 행태를 고려하고, 새로운 가입자 망을 도입할 때 발생하는 불확실성 요소에 따라 이익의 순현가를 평가했다. 불확실성 요소는 이탈률, 요금 수준, 장비 단가 하락률, 가입자 수가 있다. 먼저 이탈률 변화에 따른 순현가는 이탈률이 높고, 진화 시기가 빠를수록 높게 나타났다. 장비 단가 하락에 따른 투자 비용 감소보다 기회 비용과 FTTH 가입자 수 감소가 순현가에 더 많은 영향을 준다. 요금 변화에 따른 순현가는 신규 가입자 망 설

치 시기가 늦어질수록 하락했고, 단가 하락률에 따른 순현가는 낮음, 중간 그리고 높음에 관계없이 초기에 망을 설치해야 높게 나타났다. 가입자 수에 따른 순현가는 망을 초기에 설치해야 높게 나타났다. 그리고 WDM-PON의 요금수준을 3만 원에서 6만 원까지 5천 원 단위로 7가지 요금을 설정하여 순현가를 평가하였는데, 요금이 3만 원~4만5천 원일 경우 첫 해보다 장비 단가 하락이 적용되는 2차년에 망을 설치해야 높은 순현가를 얻을 수 있다. 따라서 FTTH 가입자 망의 순현가는 단가 하락에 따른 비용 감소보다 가입자 이탈에 따른 기회 비용에 더 많은 영향을 받는다. 또한 요금 수준에 관계없이 신규 가입자 망을 초기에 설치하고 가입자를 확보해야 순현가가 높게 나타난다. 향후 연구과제로 아파트 지역뿐만 아니라 일반 주거 지역에 대한 경제성 평가를 제안한다. 일반 주거 지역은 지역마다 밀집도가 일정하지 않으므로 분배기 위치가 달라지고 가입자까지의 광케이블 설치 거리도 다르다. 따라서 분배기 위치와 변동하는 광케이블 설치 비용을 고려한 연구가 필요하다.

참고문헌

B. T. Olsen, A. Zaganiaris, K. Stordahl, L. A. Ims, D. Myhre, T. Overli, M. Tahkokorpi (1996), Techno-economic evaluation of narrowband and

표 18. WDM-PON 요금 수준에 따른 이익의 순현가(설치년도 1~5년) (단위: 억 원)

FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	요금	설치년도				
			1	2	3	4	5
26.8	E-PON	4만 원	32.7	32.7	32.3	31.9	31.2
	WDM-PON	3만 원	26.7	27.1	27.3	27.4	27.2
		3만5천 원	28.8	29.2	29.2	29.2	28.9
		4만 원	31.0	31.3	31.2	31.0	30.5
		4만5천 원	33.2	33.4	33.1	32.8	32.1
		5만 원	35.4	35.4	35.1	34.6	33.8
		5만5천 원	37.6	37.5	37.0	36.5	35.4
	6만 원	39.8	39.6	39.0	38.3	37.1	

표 19. WDM-PON 요금 수준에 따른 이익의 순현가(설치년도 6~10년) (단위: 억 원)

FTTH 설치 안 할 경우	FTTH 기술 대안	요금	설치년도				
			6	7	8	9	10
26.8	E-PON	4만 원	29.9	28.4	26.8	25.5	24.6
	WDM-PON	3만 원	26.5	25.7	25.0	24.4	24.1
		3만5천 원	27.9	26.8	25.7	24.9	24.3
		4만 원	29.3	27.9	26.5	25.3	24.5
		4만5천 원	30.7	29.0	27.3	25.8	24.7
		5만 원	32.1	30.1	28.0	26.3	24.9
		5만5천 원	33.5	31.2	28.8	26.7	25.1
	6만 원	34.9	32.3	29.6	27.2	25.3	

broadband access network alternatives and evolution scenario assessment, *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, 14(6), 1184-1203.

D. Kettler, H. Kafka, D. Spears (2000), Driving Fiber to the Home, *IEEE Communications Magazine*, November, 106-110.

G. Kramer, G. Pesavento (2002), Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network, *IEEE Communications Magazine*, February, 40(2), 66-73.

J. Kani, M. Teshima, K. Akimoto, N. Takachio, H. Suzuki, K. Iwatsuki (2003), A WDM-Based Optical Access Network for Wide-Area Gigabit Access Services, *IEEE Optical Communications*, February, 41(2), S43-S48.

K. S. Kim (2003), On the evolution of PON-based FTTH solutions, *Information Sciences*, 149, 21-30.

L. A. Ims, D. Myhre, B. T. Olsen (1997), Economics of Residential Broadband Access Network Technologies and Strategies, *IEEE Network*, Jan/February, 51-57.

L. A. Ims, K. Stordahl, B. T. Olsen (1997), Risk analysis of residential broadband upgrade in a competitive and changing market, *IEEE Communications Magazine*, June, 96-103.

M. Jankovic, Z. Petrovic, M. Dukic (2000), A Techno-Economic Study Of Broadband Access Network Implementation Models, 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELeCon, 1(1), 168-171.

M. K. Weldon, F. Zane (2003), The Economics of Fiber to the Home Revisited, *Bell Labs Technical Journal*, 8(1), 181-206.

P. I. Bell, J. P. Trigger (1998), Access Network Life-Cycle Costs, *BT Technology Journal*, 16(4), October, 165-174.

Y. Lee, J. Rho, H. Jeong (2000), A New Techno-Economic Modeling and Analysis of Emerging Broadband Access Network, *Korean Institute of Communication Science*, 2(25-2A), 305-316.



**이영호**

서울대학교 산업공학과 학사  
 서울대학교 산업공학과 석사  
 Virginia Tech 산업시스템공학 박사  
 현재: 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수  
 관심분야: 통신경영, 통신시스템, 금융공학, 수리최적화



**김영진**

고려대학교 산업공학과 학사  
 고려대학교 산업공학과 석사  
 현재: 고려대학교 산업공학과 박사과정  
 관심분야: 통신경영, 통신시스템, 수리최적화 기법



**함대훈**

경기대학교 산업공학과 학사  
 현재: 고려대학교 산업공학과 석사과정  
 관심분야: 광 인터넷망 설계, 통신망 경제성 평가



**한정희**

고려대학교 산업공학과 학사  
 고려대학교 산업공학과 석사  
 고려대학교 산업공학과 박사  
 현재: 강원대학교 경영대학 전임강사  
 관심분야: 조합최적화, 네트워크 설계, 기업 정보시스템, e-비즈니스