

# The Default Risk of the Research Funding with Uncertain Variable in South Korea, Along with the Greeks

Jaehun Sim<sup>†</sup>

Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

## 옵션민감도를 고려한 기술자금의 경제적 가치와 실패확률

심재훈<sup>†</sup>

창원대학교 스마트제조융합협동과정

As a nation experiencing rapid economic growth, South Korea and its government have made a continuous effort toward efficient research investments to achieve transformation of the Korean industry for the fourth industrial revolution. To achieve the maximum effectiveness of the research investments, it is necessary to evaluate its funding's worth and default risk. Thus, incorporating the concepts of the Black-Scholes-Merton model and the Greeks, this study develops a default-risk evaluation model in the foundation of a system dynamics methodology. By utilizing the proposed model, this study estimates the monetary worth and the default risks of research funding in the public and private sectors of Information and Communication technologies, along with the sensitivity of the R&D economic worth of research funding to changes in a given parameter. This study finds that the public sector has more potential than the private sector in terms of monetary worth and that the default risks of three types of research funding are relatively high. Through a sensitivity analysis, the results indicate that uncertainty in volatility, operation period, and a risk-free interest rate has trivial impacts on the monetary worth of research funding, while volatility has large impacts on the default risk among the uncertain factors.

**Keywords :** Black-Scholes-Merton Model, Greeks, Real Option, System Dynamics, And Technology Funding Evaluation

### 1. 서론

기술개발을 통하여 저성장 국가중 가장 빠른 성장을 이룬 대한민국 정부는 기술과 관련된 R&D 분야에 지속적인 관심과 투자를 하여 기술 선진국 진입을 목표로 하고 있다. 하지만, 최근 주요 산업분야에서의 경제적 성장에 어려움을 겪고 있으며, 대한민국 정부는 이러한 성장 문제점들을 해결하기 위해 4차 산업혁명과 관련한 다양한 기술 개발의 필요성을 인지하고 있다. 특히, 정보통신기술과 관

련된 범용 핵심기술에 지속적으로 투자하고 있다[15].

기술 R&D 부분에 투자할 수 있는 예산과 시간적 제약 때문에 대한민국 정부는 선택과 집중이라는 투자전략을 추진하여 4차 산업혁명시대에 필요한 정보통신기술을 효율적으로 개발하는 것을 목표로 하고 있다[10]. 이러한 효율적인 기술개발을 위해, 계획단계에서부터 제한된 기술자금의 잠재적인 경제적 가치 평가가 이루어져야 하며, 이를 바탕으로 적정한 분야에 기술자금이 투자되어야 한다. 하지만, 이러한 중요성에도 불구하고 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있지 않은 실정이다.

기술가치 평가와 관련된 연구에서는 주로 현금흐름할인법이 사용되지만, 이는 기술가치 평가과정에서 불확실성을 반영하지 않는다는 단점을 가지고 있다[1]. 불확실성을

반영하여 더 정확한 기술가치 평가를 위하여 리얼 옵션(Real Option)에 기반한 평가방법이 새로운 기술가치 방법으로 사용되고 있다[17]. 이러한 이유 때문에, 이 연구에서는 리얼 옵션을 이용하여 정보통신 분야 기술투자금의 경제적 가치와 실패확률을 평가하고자 한다.

본 연구에서는 리얼옵션과 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 방법을 사용하여 정보통신 분야의 민간부분과 공공부분에 투자된 기술투자금의 가치를 평가하였다. 옵션가격결정모형에서 가장 기본이 되는 블랙-숄즈-멀튼(Black-Sholes-Merton)모형에 기반한 시스템 다이내믹스 기술가치 평가모형을 개발하여 기술가치 평가과정의 옵션민감도를 분석하였으며, 평가과정에서의 불확실성을 민감도 분석을 통하여 분석하였다.

## 2. 문헌 연구

R&D 투자금액의 가치평가와 관련한 연구는 다음과 같다. 불확실성 요인과 관련된 연구에서는 Huchzermeier and Loch는 5가지의 불확실성(시장 현금흐름 보상, 투자예산, 투자성과, 투자 필요요인, 투자 스케줄)이 기술 R&D의 가치에 어떤 영향을 미치는지에 관하여 분석하였으며, R&D 투자 관리의 유연성이 기술가치 투자 성과의 불확실성을 개선할 수 있다는 것을 보여주었다[5]. 또한, Loch와 Bode-Greuel은 의사결정 나무모형을 이용하여 제약관련 R&D 투자에서 조직, 규정, 시장, 기술분야에서의 주요 불확실성 요인들을 정량적으로 선정하였다[11].

Santiago와 Bifano는 다차원 의사결정 나무모형을 이용하여 시장, 비용, 기술과 관련된 다양한 불확실성 요인들을 분석한 후, 다차원 리얼 옵션 평가방법에 있어서 기술가치 평가의 우월성을 보여주었다[13]. 또한, Schneider 등은 다차원 의사결정 나무모형을 이용하여 혁신기술이 기업 운영에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였으며 적절한 할인 이자율이 기술가치 평가의 정확성 향상을 위하여 중요한 요인임을 보여주었다[14]. Cassimon 등은 신약 개발과 관련된 프로젝트에서 상업적 위험과 기술적 위험을 반영한 기술투자 가치를 평가하였다. 이 연구에서 이들은 제약 프로젝트의 초기단계에서는 리얼옵션 평가방법이 가장 좋은 방법임을 보여주었다[2].

Jang 등은 신재생에너지 분야에서의 R&D 투자액의 경제적 가치를 산출하기 위하여 의사결정 나무모형의 4가지의 옵션(계속, 연기, 전개, 포기)을 사용하여 화석연료 가격의 불확실성이 투자금액의 경제적 가치에 미치는 영향을 분석하였다. 이 연구에서는 R&D 투자의 성공을 결정하는 가장 중요한 요인인 투자 시점은 경제적 가치의 향상에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주었다[7].

Cozzi와 Girodani는 R&D 투자금액과 투자이익과의 관

계를 분석하기 위하여 이론적인 R&D 평가모형을 개발하였으며, 이 연구에서는 R&D 투자금액이 많아질수록 투자가치와 투자이익이 증가함을 보여주었다[3].

Kuffman과 Li는 리얼옵션에 기반한 연속확률모형을 사용하여 R&D 투자가치 증가를 위한 최적의 R&D 투자시간을 계산하였다. 이 연구는 불완전한 시장에서 경쟁력 있는 기술의 도입을 위하여 기다리는 것도 한가지의 훌륭한 옵션임을 보여주었다[9]. Wang과 Yang은 리얼옵션 분석에 관리적 유연성을 도입하여 추가적인 투자금액이 혁신적 기술의 R&D 성공에 큰 영향을 미치는 요인임을 보여주었다[18]. Wang과 Hwang은 퍼지이론에 기반한 리얼 옵션을 이용하여 실패할 확률이 높은 과제들에서 효과적인 포트폴리오를 구성하기 위한 방법을 제시하였다[17].

R&D 투자가치 평가에 관한 문헌 연구에서는 불확실한 요인들의 동적인 변화를 고려한 투자가치 평가에 관한 연구가 많이 이루어지지 않았다는 것을 보여준다. 또한, 리얼옵션과 시스템 다이내믹스를 동시에 사용하여 R&D 투자의 경제적 가치와 실패확률을 구한 연구가 많이 이루어지지 않는다는 것을 알게 되었다. 그러므로 문헌연구를 통하여 리얼옵션 가격모형에 기반한 시스템 다이내믹스 기술가치 평가모형을 개발하는 것이 학문적 가치가 있는 연구임을 보여준다.

## 3. 연구방법

정보통신분야의 공공과 민간부분에서 투자된 기술 R&D의 경제적 가치와 실패확률을 구하기 위하여 리얼옵션과 시스템 다이내믹스를 이용한 기술투자 평가모형을 개발하였다. 또한 옵션의 민감도 분석을 통하여 불확실성들이 R&D 투자금의 경제적 가치와 실패확률에 미치는 영향을 분석하였다.

### 3.1 블랙-숄즈-멀튼 모델

옵션의 가치평가와 R&D 투자가치 평가의 유사성 때문에 옵션가치평가모형은 투자가치의 평가부분에서 많이 이용되고 있다[8]. 그러므로 본 연구에서는 정보통신분야에서 이루어진 기술투자의 경제적 가치와 실패확률을 구하기 위하여 리얼옵션 가격결정모형에서 가장 기본적인 블랙-숄즈-멀튼 모델을 이용하였다[1]. 블랙-숄즈-멀튼 모델은 기초자산의 현재가격과 행사가격의 현재가격의 차이를 이용하여 옵션의 가치를 결정하는 방법으로서 기초자산의 현재가격은 만기 시점까지 변동될 기초자산 가격의 기대값이라고 가정하며, 행사가격의 현재가격은 만기 시점에 옵션이 행사될 때의 가격임을 가정한다[12].

본 연구에서는 블랙-숄즈-멀튼 모형의 기본값으로, 우리나라의 신재생에너지 분야에서의 R&D 투자액의 경제적

가치를 구한 Jang 등의 연구에서 사용한 주식수익률의 표준편차로는 43.49%, 무위험 이자율은 2.8%, 잔존만기는 20년을 이용하였다[7]. 블랙-숄즈-멀튼 모형은 아래의 수식들로 나타내어지며 공식의 입력변수들은 콜옵션가격(C), 실패확률(DR), 옵션행사가격(S), 기초자산의 현재가치(K), 잔존만기(T), 변동성( $\sigma$ ), 무위험 이자율( $r$ ), 표준정규분포의 누적밀도함수( $N(d)$ ), 표준정규분포의 확률밀도 함수( $N'(d)$ )로 구성된다.

가격결정모형인 블랙-숄즈-멀튼 모형이 기술투자 가치 평가에 사용될 때에는 옵션평가모형에서 계산되어지는 콜옵션가격이 R&D 투자금의 경제적 가치를 나타내며 옵션실행의 실패확률이 R&D 기술투자의 실패확률을 나타낸다. 또한 옵션행사가격(S)은 기술투자를 통하여 얻을 수 있는 예상매출액으로 가정하며 기초자산의 현재가치(K)는 R&D 투자금액으로 가정한다. 그러므로 본 연구에서는 정보통신분야에서 이루어진 기술투자의 경제적 가치와 실패확률은 아래의 블랙-숄즈-멀튼 모형의 수식을 사용하여 계산한다.

$$C = S_n(d_1) - Ke^{-rT}N(d_2)$$

$$d_1 = \frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left\{ \ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)T \right\}$$

$$d_2 = \frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left\{ \ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)T \right\}$$

$$DR = N\left[-\frac{1}{\sigma\sqrt{T}} \left\{ \ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)T \right\}\right]$$

블랙-숄즈-멀튼 모형의 주어진 입력변수들의 옵션민감성을 분석하기 위하여 델타, 감마, 베가, 세타, 로의 다섯가지 민감도 지표를 이용하였다. 본 연구에서는 정보통신분야에서 이루어진 기술투자의 경제적 가치에 대한 옵션민감도 분석을 하기 위해서 블랙-숄즈-멀튼 모형에서 사용된 동일한 가정을 전제로 아래에 표현된 수식들을 이용하였다. 아래 수식에 표현된 바와 같이, 델타는 기초자산 가격의 변동을 반영한 옵션가치의 변동성을 나타내며, 감마는 기초자산 가격의 변동을 반영한 델타의 변동성을 나타낸다. 또한, 베가는 기초자산 가격 변동을 반영한 옵션가치 변동성을, 세타는 기간의 변동을 반영한 옵션가치의 변동성을 나타내며, 로는 금리의 변동을 반영한 옵션가치 변동성을 나타낸다.

$$\Delta = N(d_1)$$

$$\Gamma = \frac{N'(d_1)}{S\sigma\sqrt{T}}$$

$$\text{vega} = SN'(d_1)\sqrt{T}$$

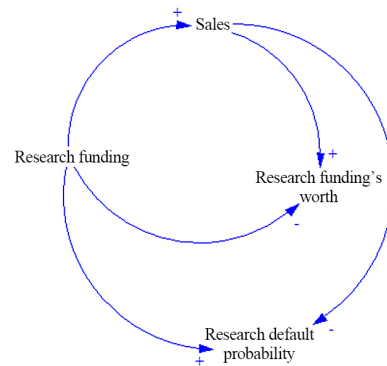
$$\text{Theta} = -\frac{SN'(d_1)\sigma}{2\sqrt{T}} - rKe^{-rT}N(d_2)$$

$$\text{Rho} = KTe^{-rT}N(d_2)$$

### 3.2 시스템 다이내믹스

리얼옵션가격결정모형은 불확실성 요인들이 정적으로 기술가치에 어떤 영향을 주는지를 분석하므로, 본 연구에서는 이러한 리얼옵션의 단점을 보완하기 위하여 시스템 다이내믹스 방법을 사용하여 블랙-숄즈-멀튼 모형을 구현하였다. 시스템 다이내믹스는 시스템 내에서 각 구성요소들의 순환적 인과관계와 피드백을 이용하여 각 구성요소들이 시스템에 동적으로 어떤 영향을 주는지를 분석하는 방법이다[14].

<Figure 1>의 기술가치 평가모델 인과지도에서 보여지는 바와 같이, 기술투자 금액은 긍정적으로 기술투자 가치에 영향을 주며, 부정적으로 기술투자 실패에 영향을 미친다. 기술투자의 경제적 가치는 투자된 기술투자금액에서 기술투자로부터 예상되는 수익의 차에 의하여 계산되어진다. 기술투자의 실패확률은 잔존만기기간 동안 기술연구의 실패가 일어날 확률로부터 계산된다. 옵션민감도는 델타, 감마, 베가, 세타, 로의 다섯가지 민감도 지표를 사용하여 계산된다.



<Figure 1> Causal-Loop Diagram of an Evaluation Model

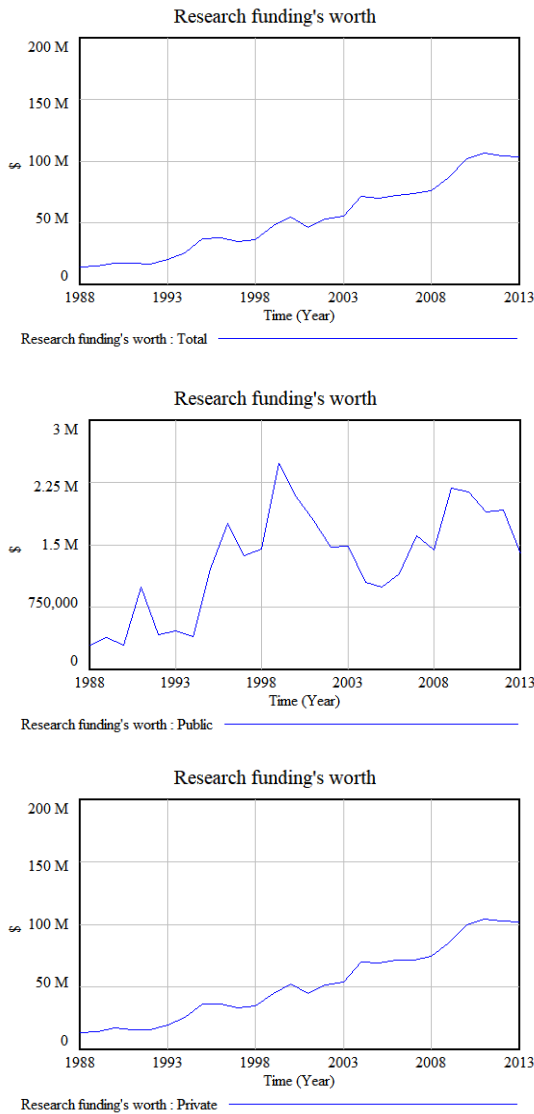
## 4. 연구결과

본 연구에서는 개발된 기술가치평가모델을 사용하여 정보통신분야의 공공부분과 민간부분에서 이루어진 R&D 투자의 경제적 가치와 투자 실패확률을 계산하였다. 또한 기술가치 평가과정에서의 불확실 요인인 기술가치 투자금액과 기술가치로부터의 수익에 대한 민감도 분석을 통하여 기술가치평가과정의 불확실성을 분석하였다.

### 4.1 기술투자금액의 경제적 가치

정보통신분야에 투자된 R&D 기술투자금에 대한 경제적 가치와 실패확률을 계산하기 위하여, 본 연구에서는 1998년부터 2013년까지 정보통신분야에 투자된 R&D 투자

금액과 경제성장의 인과관계를 연구한 Hong[6]의 연구에서 사용한 연도별 공공부분과 민간부분 R&D 기술투자금액 데이터를 이용한다. <Figure 2>에 나타난 것처럼, 정보통신 분야에 투자된 전체 R&D 투자금액의 경제적 가치는 1998년의 \$13.84 M에서 2013년의 103.4 M의 증가를 보이며 연평균적으로 9.22%의 증가를 보였다.



<Figure 2> Research Funding Worth

또한 공공부분에서의 R&D 투자금액의 경제적 가치는 1998년의 \$0.29 M에서 2013년의 \$1.39 M의 증가를 보이며 동일한 기간 동안 연평균적으로 18.4%의 증가를 보이고 있다. 또한 민간부분에서의 투자금의 경제적 가치는 1998년의 \$13.55 M에서 2013년 \$103 M의 증가를 보이며 연평균적으로 9.25%의 증가를 보여준다. 각 부분의 R&D 투자금액의 경제적 가치에 대한 기술통계는 다음의 <Table 1>에서 보여진다.

<Table 1> The Results of Descriptive Statistics(Unit : M)

	Total	Public	Private
Average	53.58	1.318	52.278
Standard Deviation	30.62	0.64	30.21
Variance	937.77	0.41	912.77
Minimum Value	13.84	0.29	13.55
Maximum Value	106.10	2.47	104.20
Median Value	50.08	1.41	48.10

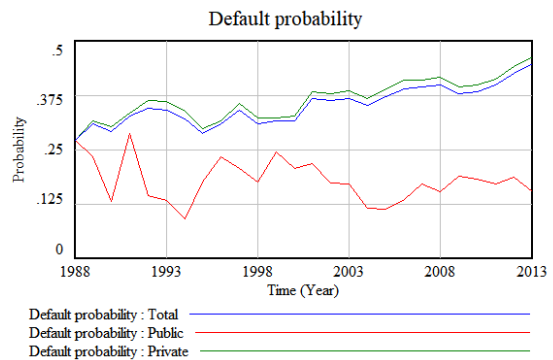
마지막으로 R&D 투자금액의 경제적 가치가 정규분포를 따르는 지를 검사하기 위하여 Jarque-Bera 검사를 실시하였다. 각 부분에 대한 정규성 검사의 결과는 <Table 2>에서 보여진다. 블랙-숄츠-멀튼 모형의 기초자산 수익률이 정규분포를 따른다는 가정하에서 각 부분의 p-value는 0.05보다 크므로 기술투자금액의 경제적 가치는 정규성 검정을 통하여 정규분포를 따른다고 말할 수 있다.

<Table 2> The Results of Jarque-Bera Test

	Total	Public	Private
X-squared	1.7554	1.1374	1.8215
p-value	0.4157	0.5663	0.4022

#### 4.2 기술투자금액의 실패확률

개발된 기술가치 평가모형을 이용하여 1998년부터 2013년까지 정보통신분야에 투자된 R&D 투자의 실패확률을 구하였다. <Figure 3>에서 나타난 바와 같이, 전체투자금은 연평균적으로 35%의 실패확률을, 공공부분에 사용된 투자금은 18%의 실패확률을, 민간부분에 사용된 투자금은 36%의 실패확률을 가짐을 보여주었다. 특히, 전체 R&D 기술투자금에 대한 실패확률은 1998년도부터 2013년 사이에 27%에서 44.8%로 증가됨을 보여주었다. 또한 공공부분과 민간부분에서의 R&D 투자는 실패확률이 상대적으로 높은 편이므로, 정보통신분야에서의 R&D 투자는 신중하게 진행되어야 함을 보여주었다.



<Figure 3> Default Risks of Research Funding

### 4.3 옵션민감도 분석

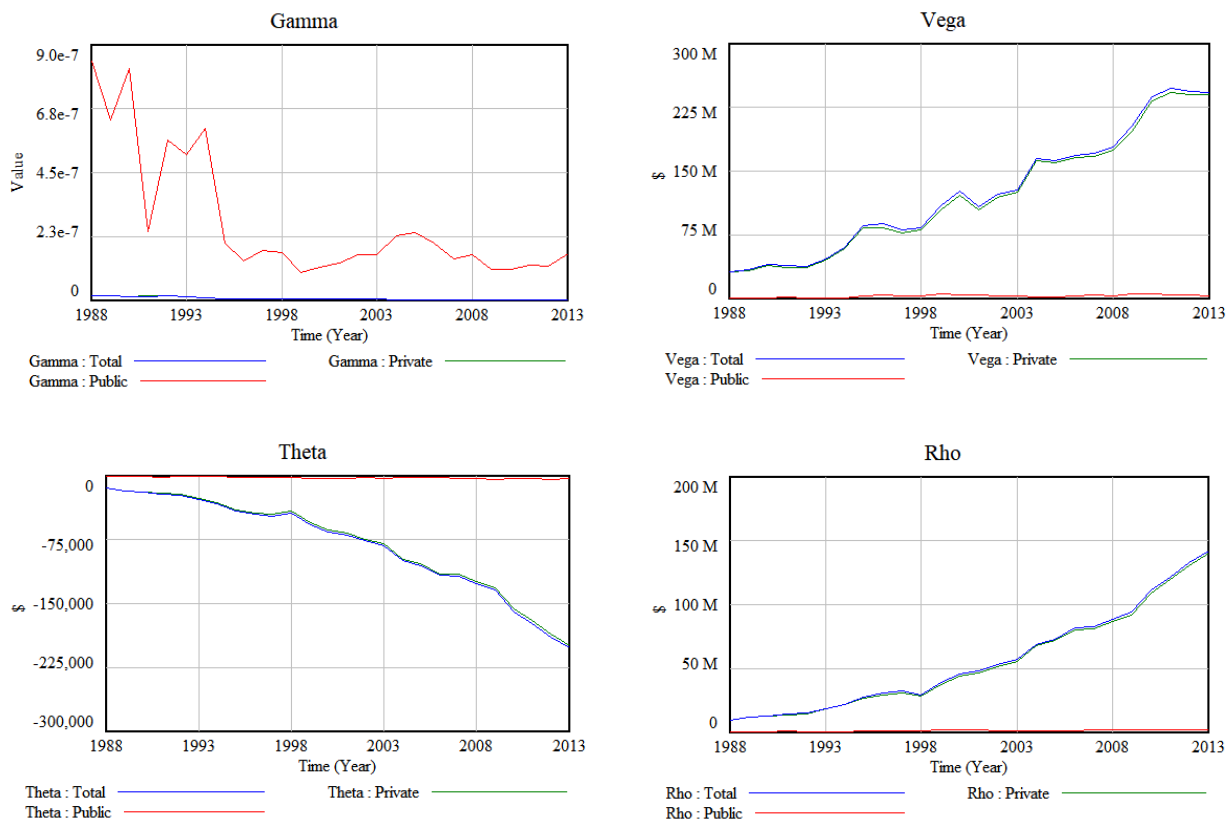
정보통신 분야 R&D 투자금액의 옵션민감도를 분석하기 위하여 <Figure 4>처럼 다섯 가지의 지표(델타, 감마, 베가, 세타, 로)를 사용하여 블랙-숄즈-멀튼의 기본 변수들이 R&D 투자금액의 경제적 가치에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 델타를 이용한 옵션민감도 분석에 따르면, 기본변수들의 변동이 기술투자금의 경제적가치에 유의미한 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 세타를 이용한 민감도 분석결과에 따르면, 시간의 변동에 따라서 R&D 투자금액의 경제적 가치는 전체 투자금 부분에서는 연평균적으로 \$81,066의 감소를, 공공부분에서는 연평균적으로 \$2,187의 감소를, 민간부분에서는 연평균적으로 \$79,193의 감소를 보였다. 시간의 흐름에 따라서 R&D 투자금액의 경제적 가치는 감소함을 알게 되었다.

한편, 베가를 이용한 옵션민감도 분석에 따르면, 기초자산가격의 변동에 따른 R&D 투자금액의 경제적 가치는 연평균적으로 전체투자금의 경우에는 \$124.62 M, 공공부분의 경우에는 \$3.04 M, 민간부분의 경우에는 \$121.58 M인 것으로 분석되었다. 또한, 로를 이용한 옵션민감도 분석결과 금리의 변동에 따라서 R&D 투자금액의 경제적 가치는

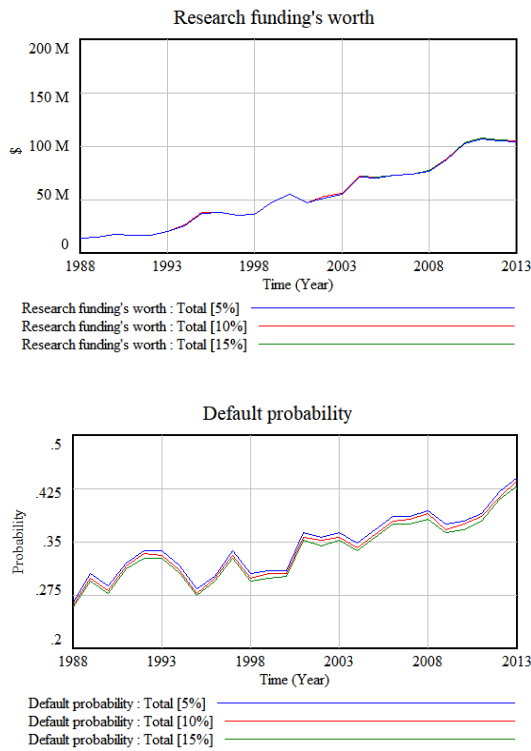
연평균적으로 전체 투자금 부분에서는 \$56.37 M의 증가를 보여주었으며, 공공부분에서는 연평균 \$1.32 M의 증가와 민간부분에서는 연평균 \$55.05 M의 증가를 보여주었다. 이를 바탕으로 R&D 투자금액의 경제적 가치는 금리의 변동에 긍정적인 영향을 받는다는 것을 알게 되었다.

### 4.4 민감도 분석

본 연구는 <Figure 5>에서 나타난 바와 같이, 기술평가모형과 관련된 옵션민감도분석 이외에도 기술투자금액, 기술 투자로부터의 수익, 기술 개발 후 운영기간, 무위험 이자율, 변동성에 관한 불확실성이 5%에서 15%까지 5%씩 증가할 때 R&D 투자금액의 가치와 실패확률에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 본 연구는 중요한 불확실한 요인으로서 기술투자금액, 기술투자수익, 운영기간, 무위험이자율, 변동성으로 가정하였으며, 하나의 불확실성의 변화에 의한 기술가치와 실패확률을 평가할 때에는 나머지 네 가지의 불확실성 요인은 변화지 않는 요인으로 가정하였다. 예를 들어서, <Figure5>는 무위험이자율이 5%에서 15%까지 5%씩 증가할 때의 기술가치와 실패확률이 어떻게 변화하는 지를 보여주고 있다.



<Figure 4> Sensitivity of Research Funding



<Figure 5> The Sensitivity Analysis

민감도 분석의 결과는 <Table 3>에서 보여진다. 예를 들어서, 기술투자금액의 변동성이 5%에서 15%까지 5%씩 증가될 때, 기술가치는 기술투자금액이 5% 증가하면 평균적으로 -0.43% 감소하며, 기술투자금액이 10% 증가하면 평균적으로 -0.85% 감소하며, 기술투자금액이 15% 증가하면 평균적으로 기술가치는 -1.48%로 감소한다. 또한, 기술투자금액이 5%씩 15%까지 증가하면 실패확률은 평균적으로 4.24%, 8.07%, 11.95% 각각 증가한다. 기술투자변동성이 증가할수록 R&D 투자금액의 경제적 기술가치는 감소하며, 실패확률은 증가하는 것으로 나타난다.

<Table 3> The Results of Sensitivity Analysis

Uncertain Variables	Research Funding Worth			Default Rate		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Research Funding	-0.43	-0.85	-1.48	4.24	8.07	11.95
Sales Amount	6.05	11.98	18.50	-2.79	-5.50	-8.16
Operation Period	0.28	0.52	0.78	4.92	8.52	13.15
Risk-free Interest Rate	0.13	0.27	0.40	-1.44	-3.06	-4.42
Volatility	0.17	0.56	0.85	12.60	22.81	35.43

또한, 기술투자수익이 증가하면 R&D 투자금액의 경제적 기술가치는 증가하며, 실패확률은 감소하는 것으로 나타난다. <Table 3>에서처럼, 운영기간의 증가는 R&D 투

자금액의 경제적 기술가치를 증가시키며, 실패확률 또한 증가시키는 것으로 나타났다. 무위험 이자율의 증가는 R&D 투자금액의 가치를 증가시키는 반면 실패확률은 감소시키는 것으로 나타났다. 변동성이 증가할 때에는 R&D 투자금액의 경제적 기술가치와 실패확률을 증가시키는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구는 4차 산업혁명시대에 중요시 되고 있는 정보통신기술 분야에서의 제한된 기술투자금과 제약된 시간의 조건에서 R&D 투자로부터 최대한의 성과를 얻기 위하여 투자된 기술투자금의 경제적 가치와 실패확률을 계산할 수 있는 기술가치 평가모델이 개발하였다. 개발된 기술가치 평가모델은 기술가치 평가과정에서의 불확실한 요소들의 동적인 변동성이 경제적 기술가치와 실패확률이 어떠한 영향을 주는지를 분석하기 위하여 리업옵션 가격모형인 블랙-숄즈-멀튼 모델에 기반한 시스템 다이내믹스 방법을 사용하여 개발하였다.

개발된 기술가치 평가모델을 이용하여, 공공부분과 민간부분에 투자된 R&D 기술가치는 공공부분이 민간부분에 비하여 더욱 나은 경제적 기술가치를 가지고 있다는 것을 보여주었다. 또한, 공공부분과 민간부분에서의 기술 R&D 투자는 상대적으로 높은 실패확률을 보이고 있으므로 정보통신기술분야에서의 R&D는 선택과 집중의 전략에 의하여 진행되는 것이 가장 좋은 효과를 얻을 것으로 기대된다. 옵션민감도 분석결과에서는 금리의 변동이 R&D 투자금액의 경제적 가치에 영향을 주는 중요한 변동요인임을 알게 되었다.

## Acknowledgement

This research was supported by Changwon National University in 2019~2020.

## References

- [1] Black, F. and Scholes, M., The pricing of options and corporate liabilities, *Journal of Political Economy*, 1973, Vol. 81, No. 3, pp. 637-654.
- [2] Cassimon, D., De Backer, M., Engelen, P.J., Van Wouwe, M., and Yordanov, V., Incorporating technical risk in compound real option models to value a pharmaceutical R&D licensing opportunity, *Research Policy*, 2011, Vol. 40, No. 9, pp. 1200-1216.

- [3] Cozzi, G. and Giordani, P.E., Ambiguity Attitude, R&D Investments and Economic Growth, *Journal of Evolutionary Economics*, 2011, Vol. 21, No. 2, pp. 303-319.
- [4] De Reyck, B., Degraeve, Z., and Vandenborre, R., Project options valuation with net present value and decision tree analysis, *European Journal of Operations Research*, 2008, Vol. 184, No. 1, pp. 341-355.
- [5] Huchzermeier, A. and Loch, C.H., Project management under risk : using the real options approach to evaluate flexibility in R&D, *Management Science*, 2001, Vol. 47, No. 1, pp. 85-101.
- [6] Hong, J.P., Causal relationship between ICT R&D investment and economic growth in Korea, *Technological Forecasting & Social Change*, 2017, Vol. 116, pp. 70-75.
- [7] Jang, Y.S., Lee, D.J., and Oh, H.S., Evaluation of new and renewable energy technologies in Korea using real options, *International Journal of Energy Research*, 2013, Vol. 37, No. 13, pp. 1645-1656.
- [8] Jeon, C., Lee, J., and Shin, J., Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model : Photovoltaic technology case, *Applied Energy*, 2015, Vol. 142, pp. 33-43.
- [9] Kauffman, R.J. and Li, X., Technology competition and optimal investment timing : a real options perspective, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2005, Vol. 52, No. 1, pp. 15-29.
- [10] Korea Information Society Development Institute(KISDI), 2013 Modularization of Korea's development experience : ICT R&D system and policy, 2014.
- [11] Loch, C.H. and Bode-Greuel, K., Evaluating growth options as sources of value for pharmaceutical research projects, *R&D Management*, 2001, Vol. 31, No. 2, pp. 231-248.
- [12] Merton, C., On the pricing of corporate debt : The risk structure of interest rates, *The Journal of Finance*, 1974, Vol. 29, No. 2, pp. 449-470.
- [13] Santiago, L.P. and Bifano, T.G., Management of R&D projects under uncertainty : a multidimensional approach to managerial flexibility, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2005, Vol. 52, No. 2, pp. 269-280.
- [14] Schneider, M., Tejada, M., Dondi, G., Herzog, F., Keel, S., and Geering, H., Making real options work for practitioners : a generic model for valuing R&D projects, *R&D Management*, 2008, Vol. 38, No. 1, pp. 85-106.
- [15] Sterman, J., *Business dynamics : System thinking and modeling for a complex world*, Irwin McGraw-Hill, New York, USA, 2000.
- [16] Sung, T.K., Industry 4.0 : A Korea perspective, *Technological Forecasting & Social Change*, 2018, Vol. 132, pp. 40-45.
- [17] Wang, J. and Hwang, W.L., A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real options valuation model, *The International Journal of Management Science*, 2007, Vol. 35, No. 3, pp. 247-257.
- [18] Wang, J. and Yang, C.Y., Flexibility planning for managing R&D projects under risk, *International Journal of Production Economics*, 2012, Vol. 135, No. 2, pp. 823-831.

**ORCID**

Jaehun Sim | <http://orcid.org/0000-0003-3519-8136>

<Appendix>

