

## 수자원 공급 사업의 경제성 평가: 실물옵션가치평가기법의 적용성 검토

유순영<sup>1\*</sup> · Andre J.A. Unger<sup>1</sup> · 김태희<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1

<sup>2</sup>한국지질자원연구원, 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

### Applicability of the Real Option Valuation Method to the Economic Analysis of Water Resources Supply Projects

Soonyoung Yu<sup>1\*</sup>, Andre J.A. Unger<sup>1</sup> and Taehee Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Gajeong-dong 30, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

Option pricing model in finance has been applied to price non-financial options, called real options. The real option valuation method is ideally suited to irreversible decision making under uncertainty, including the need to determine the optimal time to act and even change between alternative courses of action as information is collected. Therefore, the real option valuation method is expected to provide a superior and less subjective approach to determining optimal strategies for water resources supply projects, which have been reported to have huge risks due to uncertainties, and investors and policy makers need to build an optimal strategy - when and if to invest - with uncertainties and managerial flexibilities considered.

Key words : real option, real option valuation method, water resources supply projects, uncertainties, managerial flexibilities

금융시장에서 옵션과 같은 파생상품의 가격 결정에 이용되는 옵션가격결정모델의 기본개념이 비금융 사업의 옵션 가치 평가에 이용되고 있다. 본 논문에서는 실물옵션이라 불리는 이들 비금융 사업 옵션의 특성을 살펴보고, 실물옵션가치평가기법이 수자원 공급 사업의 경제성 평가에 이용되는 방안을 검토해 보고자 하였다. 수자원 공급 사업이 일반적으로 대규모 투자 비용이 소요되고, 사업 기간이 긴 이유로 말미암아 경영상의 유연성이 요구되며, 미래의 수익과 비용 흐름이 불확실하다는 것을 고려할 때, 실물옵션가치평가기법은 운영 옵션의 가치를 평가하고, 이를 수자원 공급 사업의 가치 평가 과정에 포함시키므로써, 기존 현금흐름할인법의 단점을 보완할 수 있는 경제적 가치 평가 기법으로 이용될 수 있을 것으로 보인다.

주요어 : 실물옵션, 실물옵션가치평가기법, 수자원공급사업, 불확실성, 경영유연성

### 1. 서 론

우리나라는 강수량의 편중 현상이 심하여, 계절별로 홍수와 가뭄을 겪는 등 수자원 수급 불균형으로 인한 많은 문제점을 안고 있으며, 유엔이 불부족국가로 지정할 만큼, 절대적인 수자원 공급량도 부족한 상태이다. 이에 한정된 수자원에도 불구하고 국내 수자원 수요량이 지속적으로 증가할 경우, 공공재인 수자원 공

급 사업의 경우에도 경제 논리가 적용되는 것을 피할 수 없으며, 현재 국내에서 폭넓게 활성화되고 있는 생수 시장은 이에 대한 단적인 예라 할 수 있다(조선일보 2007년 2월 14일자 '생수시장 성장성 철철 넘친다'). 경우에 따라서 생수는 휘발류보다도 높은 가격으로 거래되기도 한다. 이와 함께 요즘에는, 과거에 경제적 논리에서 벗어나 투자되던 연구개발과제 및 공공사업이, 그 규모가 대형화되고, 사업 기간이 증장기화되

\*Corresponding author: s7yu@sciborg.uwaterloo.ca

면서 이들 사업에의 투자가 정부 예산에 의해 제약을 받게 되었으며, 그 파급효과가 복잡해지고 불확실성이 증가되면서, 이들 사업 투자가 가지는 경제성이 평가되기 시작하였다. 수자원 공급 사업의 경우, 정부는 여전히 지자체의 적자를 메워주며, 저렴한 가격으로 상수를 공급하고 있으나, 수질에 대한 불신을 줄이고, 지역별 공급 및 수질 격차를 줄이기 위한 서비스 개선이 요구되며, 계절별 수자원 수급 불균형을 해소하고, 물 부족 위기를 대비할 수 있는 수자원 공급 사업에의 지속적인 투자가 필요하다(한겨레21 2008년 2월 24일자 물전쟁-상수도 민영화의 미래와 국민일보 2008년 5월 29일자 시·군 직영 지방상수도 권역별 광역화 수자원공사 등에 위탁 운영한다). 이에 중장기 대형 사업에의 투자가 필요한 시기에 놓여 있으며, 이러한 사업에 대한 적절한 경제성 평가가 요구되고 있다.

현재 대부분의 비영리 사업 평가에 현금흐름할인법(Discounted Cash Flow, 이하 DCF)이 이용되고 있다. DCF는 미래 예측치에 절대적으로 의존하며, 가치 평가 결과는 현금할인률에 의해 크게 지배된다. 그러나 미래 가치는 경제, 사회, 정치적 환경 등에 영향을 받아 정확하게 예측하기 힘들며, 특히 예측은 제한된 정보와 다양한 가정에 의존하게 마련이어서, 이들 예측치에의 절대적 의존은 신뢰할 만한 결과를 줄 수 없다. 또한 DCF는 투자 비용이 소모적이고, 사업기간 동안 경영상의 유연성이 존재할 수 있음을 고려하지 않으며, 할인율 선정의 어려움을 가지고 있다. 이에 실물 옵션가치평가기법(Real Option Valuation, 이하 ROV)이 벤처기업, 연구개발과제 등 불확실성이 높은 사업의 가치 평가에 이용되기 시작하였으며, 많은 논문들이 ROV와 DCF를 비교하고 ROV의 이점을 설명하고 있다(Heo, 2000; Seol and Yoo, 2002; Sung 2002; Yu and Sung, 2005; Dimitrakopoulos and Abdel Sabour, 2007). ROV는 금융시장에서 옵션과 같은 파생상품의 가격 결정에 이용되는 옵션가격결정모델(Option Pricing Model, 이하 OPM)의 기본개념을 실물자산에 연동하여 가치가 변화하는 비금융 사업 기회의 가치 평가에 적용한 것으로, 실물자산 가치의 불확실성을 사업 가치 평가 과정에 고려하고, 무차익거래(no-arbitrage) 원칙을 적용하여 DCF가 가지는 할인율 문제를 극복하고 있다.

중장기 연구개발과제 및 공공사업은 불확실한 미래 환경 여건에 따라 단계별 투자 성격을 가지게 되고, 사업 기간 동안 경영상의 유연성을 요구하며, 이에 주어진 정보에 따라 사업 투자를 연기 및 중도에 중단,

포기, 확장하는 등의 사업 옵션(실물옵션)을 가지게 된다. ROV는 이들 실물옵션의 가치를 평가한다. 실물옵션의 가치는 불확실성이 높은 사업의 가치 평가에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이에 연구개발과제 및 공공사업의 경우, 실물옵션의 적절한 시장 가치가 평가되어 사업의 경제성 평가에 포함되어야 한다.

본 논문은 ROV를 수자원 공급 사업의 경제적 가치 평가 및 최적의 사업 전략 수립에 적용하는 방안을 검토하고자 하였다. ROV의 적용 가능성을 검토하기 위해, ROV에서 요구하는 가정들을 정리하고, 대표적인 ROV 모델을 소개하였다. 이와 함께 ROV를 자원개발 및 환경문제에 적용한 사례를 정리하고, 이를 바탕으로 간단한 수자원 공급 사업을 가정하여 ROV를 적용, 연기옵션, 중단옵션 및 옵션행사시점의 유연성이 가지는 가치를 평가하였다.

## 2. 실물옵션가치평가기법(Real Option Valuation, ROV)

### 2.1. 이론적 배경

옵션이란 투자자에게 만기시 또는 만기 이내에 기초 자산(매매의 대상)을 정해진 행사 가격에 살 수 있거나(콜옵션) 팔 수 있는(풋옵션) 권리를 주는 금융 파생상품으로써, 투자자는 옵션 거래를 통해 적은 금액으로 기초자산에 투자할 수 있을 뿐만 아니라, 기초자산에 투자하여 생길 수 있는 손해를 헷징(hedging)할 수 있다. 금융 시장의 옵션과 같이, 사업 투자 기회 또는 사업 도중 발생하는 운영옵션들이 미래 기초자산(실물 자산)의 가치 변동에 따라 임의로 선택될 수 있으며, 이들을 실물옵션(real option)이라 부른다. 신규 사업에의 투자 기회 자체가 실물옵션일 수 있으며, 운영상의 전략이 실물옵션으로 간주될 수 있다.

금융 시장의 OPM은 무차익거래시장을 가정하여 옵션가격을 평가한다. 즉 시장은 지속적으로 기초자산이나 옵션과 기초자산을 같이 하는 여타 금융 상품을 거래하면서, 옵션의 복제 포트폴리오(replicating portfolio)를 형성할 수 있으며, 옵션의 가치는 이 복제 포트폴리오의 가격과 일치한다. 그렇지 않은 경우, 차익이 발생하며, 발생한 차익은 활발한 시장 거래에 의하여 지속적으로 상쇄된다. 이러한 시장을 무차익거래시장이라고 하며, 무차익거래시장은 위험중립(risk-neutral)시장으로, 무위험할인율(risk free rate)이 이용된다. OPM이 기초자산의 직접 시장 거래가 가능하지 않는 사업의 가치 평가에 적용되기 위해서는 사업 기

회, 즉 실물옵션 가치의 시장 거래 가능한 복제 포트폴리오를 찾아 이 복제 포트폴리오의 가격을 결정하여야 하며, 무차익거래시장에서 이 복제 포트폴리오 가격은 사업 기회의 가치와 일치한다. 이와 함께 복제 포트폴리오는 사업의 위험도를 헷징할 수 있는 헷징 전략으로도 이용될 수 있다. 즉 사업자는 사업 착수와 함께 이들 복제 포트폴리오에 대해 매도포지션(short position, 가치가 올랐을 때 손실을 보고, 가치가 떨어지면 이익이 발생하는 상태)을 취함으로써 사업의 위험도를 헷징할 수 있다. 이에 ROV는 사업 기회의 시장 가치를 평가함은 물론, 사업 기회의 재정적 위험도를 헷징할 수 있는 재정 전략(hedging portfolio)도 제시할 수 있다.

수자원 공급 사업의 경우 물 자체는 공공재로 시장 거래가 자유롭지 않을 수 있으나, 사업의 가치는 사업 수익과 비용에 의해 결정되고, 수익과 비용 가치는 시장에서 거래가능하며, 복제할 수 있는 시장 거래 가능한 금융 상품도 찾아볼 수 있다. 우선 수익의 경우, 수자원 사업을 통해 얻는 다양한 이익들을 고려해 볼 수 있다. 공급업체가 지자체일 경우, 수자원 확보는 지역 발전의 기본 요소로서, 지자체는 수자원 이용료 뿐만 아니라 지역 개발에 따른 지가 상승 및 세수 증대 등의 이익을 얻을 수 있으며, 이들 현금흐름은 현실적으로 직접 거래 가능하다. 만약 공급업체가 기업이라면, 사업 이익은 수자원 판매 수익에 크게 의존하게 되며, 이러한 수익은 시장거래된다. 비용의 경우, 공사 비용 및 운영비용 등이 고려될 수 있으며, 공급업체는 이들 비용을 채권 등으로 조달할 수 있다. 이와 함께 현재 금융 시장에서는 물펀드가 거래되고 있는 등, 수자원 공급 사업 가치의 시장 거래 가능한 복제 포트폴리오는 충분히 찾아볼 수 있으며, 이에 수자원 관련 사업의 가치 평가에 ROV 적용이 가능한 것으로 판단된다.

**2.2. 블랙숄즈모델**

OPM은 블랙숄즈모델(Black and Sholes, 1973) 개발과 함께 크게 발전하였다. 블랙숄즈모델은 무차익거래원칙 이외에도 완전시장(complete market)을 가정하고, 무위험할인율( $r_f$ )과 변동성( $\sigma$ )이 만기( $T$ )시까지 고정되어 있으며, 기초자산의 확률과정은 기하브라운운동(Geometric Brownian Motion, 이하 GBM)으로 가정한다. 본 모델은 많은 제한을 가지고 있으나, 여전히 금융시장은 물론 비금융시장에서 벤치마킹의 대상이 되고 있다(Sung, 2005).

투자수익의 확률 과정  $S$ 와 투자비용  $K$ 를 가지는 사업의 투자 가치  $V$ 를 가정해보자. 이 경우 불확실성을 가지는 투자수익이 옵션(사업투자)의 기초자산에 해당한다. 만기( $T$ )시에만 투자 여부를 결정할 수 있는 유럽형의 투자 옵션을 가정할 때, ROV는 만기시 기대 가치를 무위험할인율( $r_f$ )로 할인하여 투자 기회의 현재(시간  $t=0$ ) 가치를 얻으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V^{ROV} = e^{-r_f T} \int_0^T \max[S(T)^0 - K(T), 0] f(S) dS \tag{1}$$

여기서  $S(T)^0$ 는 무위험(risk-neutral) 시장에서의 만기시 투자수익이고,  $f(S)$ 는  $S$ 의 확률분포이다. 이는 다음의 DCF에 의한 가치 평가와 비교될 수 있다.

$$V^{DCF} = (1+r)^{-T} S(T)^P - K(0) \tag{2}$$

여기서  $S(T)^P$ 는 실제(real world) 시장에서의 만기시 투자수익이고, 할인율  $r$ 은 무위험할인율  $r_f$ 와 다르다. 식 (1)은  $S$ 의 불확실성과 시간  $T$ 에 투자 여부 결정에 유연성이 있음을 고려하고 있으며, 이는 식 (2)와의 차이를 낳는다.

기초자산(투자수익)  $S$ 가 GBM을 따른다고 가정하자.

$$dS = \mu_S S dt + \sigma_S S dz \tag{3}$$

여기서  $\mu_S$ (drift)는 단기기간동안 투자수익가치의 평균 성장률을,  $\sigma_S$ (volatility)는 투자수익의 확률과정에서 불확실한 부분을 설명하는 변동성을,  $dz$ 는 위너확률과정을 나타낸다. 위너확률과정은  $dz = \epsilon \sqrt{dt}$ 로  $\epsilon$ 는 표준정규분포에서 추출된 임의의 값을 의미한다. 옵션( $V$ )이 다이내믹하게  $V_S$ (이하 델타)의 기초자산( $S$ )으로 헷징 가능하며, 다음의 무위험 포트폴리오( $\pi$ )를 형성할 수 있다고 하자.

$$\pi = V - V_S S \tag{4}$$

식 (3)과 (4)를 통해 유명한 블랙숄즈모델이 유도될 수 있다(식 5).

$$V_t + \frac{\sigma_S^2 S^2}{2} V_{SS} + r_f S V_S - r_f V = 0 \tag{5}$$

여기서  $V(S, t)$ 는 기초자산( $S$ )에 연동하는 옵션의 가격이며,  $V_a$ 와  $V_{aa}$ 는 각각  $V$ 의  $a$ 에 관한 일차 및 이차 미분 함수이다. 델타( $V_S$ )는 옵션( $V$ )의 위험도를 헷징하는데 필요한 기초자산( $S$ )의 양으로 지속적으로 변동한다. 식 (5)에 의하면 식 (3)의  $\mu_S$ 는 옵션 가치 결정에 영향을 미치지 않는다. 궁극적으로 식 (1)의 값이 식 (5)의 해이며, 식 (5)에서  $\mu_S$ 가 없는 것은 식 (1)의

$S(T)^{\alpha}$ 가 무위험시장에서의 투자수의 확률과정으로 언 어진다는 것과 일맥 상통한다. 무차익거래시장은 무위험시장이며, 무위험시장에서 식 (3)의  $\mu_S$ 는  $r_f$ 로 대체 되고,  $\alpha_S$ 는 영향을 받지 않는다.

실물옵션의 경우, 기초자산(S)이 실물자산으로, 대부분의 경우 직접 거래가 가능하지 않기 때문에 옵션  $V(S, t)$ 를 기초자산(S)으로 직접 헷징하지 못할 경우가 있다. 이럴 경우,  $V(S, t)$ 는 같은 기초자산(S)에 연동하면서 거래가능한 옵션  $V_2(S, t)$ 를 통해 헷징할 수 있다. 이 경우 기초자산(S)의 시장위험가격(market price of risk,  $\lambda_S$ )을 찾아야하며, 식 (5)의  $r_f SV_S$ 는  $(\mu_S - \lambda_S \alpha_S) SV_S$ 로 대체될 수 있다. 또한 기초자산(S)이 비거래자산이라면, 기초자산의 성장률  $\mu_S S$ 는 동일위험요소를 거래하는  $V_2(S, t)$ 보다 낮을 수 있다. 거래자산과 비거래자산간의 이러한 차이는 보유편의(Convenience yield,  $\delta$ )라 불리며, 현물(Commodity)을 소유함으로써 미래 현물 공급부족시 가지는 이익을 나타낸다. 이 수익은 옵션 소유주에게는 나타나지 않고, 기초자산 소유주에게만 돌아가는 이익으로, 식 (5)의  $r_f SV_S$ 이  $(r_f - \delta) SV_S$ 로 대체된다.

### 2.3. 옵션행사시점의 유연성

중장기 사업에는 경영의 유연성이 절대적으로 요구되며, 이에 사업 가치 평가시 이러한 경영상의 유연성이 가지는 가치를 포함하여야 한다. 특히 실물옵션 행사 시점에 있어, 만기시에만 옵션을 행사할 수 있는 유럽형 옵션보다는, 만기 이내 어느 시점에서나 옵션의 행사 가치가 옵션 보유 가치보다 크면, 옵션을 행사할 수 있는 미국형 옵션이 경영 유연성을 가지는 사업 옵션과 더 비슷하다 하겠다. 미국형 옵션은 투자자에게 더 많은 유연성을 부여하며, 이에 그 가격이 최소 유럽형 옵션과 같거나 더 높고, 이와 함께 옵션의 가격 결정시 최적의 행사 시점을 찾는 것이 매우 중요하다. 사업 평가시, 사업 기회(의) 가치 결정은 물론 최적의 사업 시기를 찾는 것이 중요함을 고려할 때, 미국형 옵션을 자세히 관찰할 필요가 있다. 미국형 옵션 가격은 식 (6)의 부등식으로 평가되며,

$$V_t + \frac{\sigma_S^2 \alpha^2}{2} V_{SS} + r_f SV_S - r_f V \leq 0 \quad (6)$$

이와 함께 식 (7)의 경계조건을 만족시켜야한다.

$$V(S, t) \geq V^* \quad (7)$$

여기서  $V^*$ 는 사업 옵션 행사시 발생하는 이익이며, 식 (7)은 투자자가 자산 가치를 최대화하는 조건에서 행사

시점을 선택한다는 가정에서 발생한다. 식 (6) 또는 식 (7) 중 하나는 등호를 만족시켜야한다(Cvitanic and Zapatero, 2004).

위의 과정은 불확실한 금융 시장에서 이용되는 다이나믹 최적화 기법 중 하나로 조건부청구권분석(contingent claims analysis, 이하 CCA)이라 불린다. 또 다른 다이나믹 최적화 기법으로 다이나믹프로그래밍(dynamic programming, 이하 DP)이 있으며, 두 기법은 매우 유사하여, 많은 경우 같은 결과를 초래하나, 시장에 대해 각기 다른 가정을 하고 있으며, 특히 다른 할인률을 이용하고 있다(Dixit and Pindyck, 1994). Insley and Wirjanto(2008)는 기초자산의 확률과정이 평균회귀(mean revering, 이하 MR)일 경우, 두 분석 기법은 각기 다른 실물 옵션 가치를 초래할 수 있다고 밝히고 있으며, DP가 겪는 할인율 선정의 어려움으로 인해, 실물옵션평가에 CCA 사용을 권하고 있다. 본 논문은 수자원 공급 사업의 기초자산이 GBM 확률과정을 따른다고 가정하였고, 사업 시장이 무차익거래원칙이 적용될 수 있는 시장이므로, 할인율 선택의 어려움이 없는 CCA를 사용한다. 무위험할인률은 비교적 위험성이 적은 국가채권이율 등에서 얻을 수 있으나, DP에 이용되는 할인율 선택에는 주관적 판단이 개입된다.

### 2.4. 비금융사업에의 적용사례

Table 1은 ROV가 불확실한 비금융 사업 투자 기회 및 운영 옵션 평가에 적용된 사례를 기초자산(underlying), 기초자산 가치변화의 확률과정(stochastic process) 및 기초자산에 연동하는 옵션(options) 등을 중심으로 정리하고 있다. 국내의 실물옵션의 적용사례는 관개시설 관련 사업을 포함하여 자원 및 환경 관련 사업들의 가치 평가 등 다양하며, 이들은 ROV가 사업 투자 가치 및 사업 관련 옵션 평가에 적합함은 물론, 경영유연성을 고려함으로써, 사업 가치나 사업 투자 적기 평가에 있어, 기존 DCF보다 더 나은 가치 평가 방법임을 보이고 있다. 관개시설 사업 평가에 적용된 사례로, Seo et al.(2008)은 수자원 활용 효율이 높은 관개시설 투자옵션 및 투자포기옵션을 목화수확이익을 기초자산으로 하여 DP로 평가한 바 있으며, 투자 및 투자 포기의 임계값(threshold)을 산정해보았다. 할인율은 10%로 가정하였다. Michailidis and Mattas(2007)은 물가격을 기초자산으로 보고, 관개매 투자사업에 따른 투자의 연기, 확대, 포기 기회(옵션)의 가치를 ROV 모델 중 explicit한 이항옵션모델(binomial option pricing model)을 사용하여 평가하였으며, 이들 기회(연기, 확대,

**Table 1.** Applications of real option valuation method to valuating non-financial options.

Project	Underlying	Stochastic Process	Options
Investment in irrigation system (Seo <i>et al.</i> , 2008; Seo, 2006)	Cotton yield	GBM <sup>1</sup>	Option to entry, option to exit
Irrigation dam investment (Michailidis and Mattas, 2007)	Water value	MBP <sup>2</sup>	Option to delay, to enlarge, or to abandon, and multiple options
Natural resource development (Lee and Heo, 2004; Brennan and Schwartz, 1985)	Mineral price	GS <sup>3</sup> ; GBM <sup>1</sup>	Option to change extraction rate; mine value, closure option
Optimal utilization of natural resources (Park, 2004)	Pollution stock, fuel price, electricity price	GBM <sup>1</sup> , MR <sup>4</sup> , GBM <sup>1</sup>	Options to use a non-renewable resource, to switch resources, or to suspend generating electricity
Mine plans (Dimitrakopoulos and Abdel Sabour 2007)	Gold price, Foreign exchange rate	GBM <sup>1</sup> , MR <sup>4</sup>	Option to abandon
Exploration for deposits of non-renewable resources (Sunnevag, 1998)	Petroleum price	MBP <sup>2</sup>	Option to explore, option to develop
Power investment (Yang and Blyth, 2007)	Energy price, Carbon price	GBM <sup>1</sup> , JP <sup>5</sup>	Switching to efficient technologies, building a new power plant
Investments in hydropower (Kjaerland, 2007)	Forward prices of electricity	GBM <sup>1</sup>	Option to invest
Operational flexibility in complex power system (Marreco and Carpio, 2006)	Operational cost	MBP <sup>2</sup>	Option to switch
Withdrawing and reallocating analog radio broadcasting spectrum (Jeon <i>et al.</i> , 2005)	Cash flows	GBM <sup>1</sup>	Option to abandon
Firm's environmental investment (Park, 2005; Insley, 2003)	emission permit price	GBM <sup>1</sup>	Option to install the environmental facility
Environmental investment (Cortazar <i>et al.</i> , 1998; Isik, 2004)	Output price, Cost of pollution	GBM <sup>1</sup>	Option to invest in environmental technologies
Contaminated Real Estate (Lentz and Maurice TSE, 1995)	property cash flows, redevelopment cost	GBM <sup>1</sup>	Option to cleanup, to redevelop, and cost of regulation
Preserving a wilderness area (Forsyth, 2000)	Amenity value	LP <sup>6</sup>	Option to preserve
Farmland preservation program (Park and Hwang, 2003)	Agricultural income	GBM <sup>1</sup>	Investment option, divestment option
Entry and exit thresholds for apple production (Seo and Woo, 2007)	Apple price	GBM <sup>1</sup>	Option to entry, option to exit
Fishing resources (Murillas and Chamorro, 2006)	Fish price	GBM <sup>1</sup>	Option to exploit a fishery, Option to invest in a fishery
Tree harvesting (Insley, 2002)	Timber price	MR <sup>4</sup> , GBM <sup>1</sup>	Option to harvest, option to wait

<sup>1</sup>GBM: Geometric Brownian Motion; <sup>2</sup>MBP: Multiplicative binominal process; <sup>3</sup>GS: Gibson-Schwartz Two factor model; <sup>4</sup>MR: mean-reverting; <sup>5</sup>JP: Jump Process; <sup>6</sup>LP: Logistic Process

포기)를 모두 가질 수 있는 옵션도 평가하고 있다.

국내 실물옵션의 적용 시도는 항공우주사업, 생명공학연구개발사업, 에너지관련사업(Yun, 2001; Choi, 2002; Cho and Heo, 2005; Park and Seol, 2006)에서 국방철충교역(Lee, 2005) 가치 평가까지 다양하다. 또한 2003년 한국 기술가치평가 전문가그룹 24차 포럼은 “실물옵션을 이용한 기술가치평가 이론과 실무 적용”이라는 주제하에 실물옵션 워크숍을 개최하였다. 국내의 이러한 실물옵션 시장의 성장은 그동안 실물옵션의 확산을 저해했던 수학적 어려움이 많이 극복

되고 있음을 시사하고 있으며, 수자원 공급 사업에도 적용되어 더 나은 사업 가치 평가가 이루어져야 할 시기를 시사하고 있다.

### 3. 수자원 공급 사업에의 적용

#### 3.1. 투자연기옵션

투자연기옵션을 가지는 신규 수자원 공급 사업의 투자 가치를 평가해 보기 위해, 'A'지역에 물수요량 증가가 예상되어 새로운 지하수관정을 건설할 예정이라고

가정하자. 가치평가에 ROV를 이용하기 위해서는 먼저 사업가치( $V$ )를 좌우하는 기초자산을 찾아야 하며, 기초 자산의 가치 변화를 적절한 확률과정으로 표현해야 한다. 신규 지하수관정 건설 비용 및 운영 비용에는 비교적 불확실성이 없다고 볼 때, 새로운 수자원 확보로 인한 사업수익(revenue cash flow)이 옵션의 기초자산에 해당한다고 할 수 있으며, 사업수익은 관정 건설 주체에 따라 달리 정의될 수 있다. 만약 건설 주체가 생수 판매 회사라면, 사업수익은 대부분 생수 판매 수익에 의존하며, 생수 가격이 정부에 의해 규제된다면, 생수 판매량이 생수 판매 수익을 좌우할 것이다. 반면 건설 주체가 지자체인 경우, 지하수 이용 요금으로 인한 수익은 크지 않을 것이며, 새로운 수자원 확보로 인한 지가 상승 및 이에 따른 세수 증가 등이 지자체의 사업 수익으로 간주될 수 있다. 기초자산의 정의와 이의 확률과정 평가는 옵션 평가에 매우 중요한 요소이나, 사업수익 및 사업비용에 대한 구체적 연구는 방대한 연구 주제로 본 논문에서는 다루지 않기로 한다. 간단히 수자원 이용 요금으로 인한 수익과정만 고려하고, 비교적 안정적인 단위 수자원 이용 요금과 물수요량 확률 변화를 참고하여, 수자원 이용 요금으로 인한 수익과정을 나타내기 위해 식 (3)의 GBM 확률과정을 채택한다. 물수요량 변화는 GBM 확률과정으로 연구된 바 있으며(Bickerton, 2001), GBM은 물수요량이 0과 무한대 사이에 분포하게 하고, 하락의 경우는 최대 100%만 가능하나, 상승의 경우는 100% 이상 가능한 확률과정으로써, 물수요량 변화를 표현하기에 적절하다고 하겠다. 사업 'A'의 기초자산 확률과정에 사용된 변수는 Bickerton(2001)를 참조하였으며(Table 2), 이외의 값들은 임의로 가정하였다. 본 사업 'A'의 수익과 비용은 사업 투자 결정시에만 거래된다고 가정한다.

현시점에서 사업 투자 가치를 결정할 경우, 기존의 DCF는 예상수입과 투자비용을 고려하여 식 (8)과 같이 사업 가치를 평가한다(이하 단위는 생략한다).

$$V^{DCF} = S(0) - K(0) = 100 - 110 = -10 \tag{8}$$

$V_{DCF}$ 에 의하면 본 사업은 투자 가치가 없다. 그러나 본 사업이 투자 결정이 연기될 수 있는 경영상의 유연성을 가진다면, 사업의 가치는 투자연기옵션의 가치로 재평가될 수 있으며, ROV는 이 가치를 평가한다. 우선 2년( $T=2$ ) 후 투자 여부가 선택될 수 유럽형 옵션을 고려해보자. 투자연기옵션은 금융시장의 콜옵션 가격에 해당하며, 블랙숄즈모델은 다음의 해석해를 가진다.

**Table 2.** Parameters for hypothetical examples.

Parameters		value
$S(0)$	Revenue cash flow at present in the new project 'A'	100
$K(0)$	Investment cost at present in the new project 'A'	110
$i$	Annual rate of inflation in investment cost, $K$	0.03
$\sigma_S$	Volatility of revenue cash flow, $S$	0.07
$\mu_S$	Drift of revenue cash flow, $S$	0.04
$M$	Revenue cash flow in the current project 'B'	110
$C(0)$	Operational cost at present in the current project 'B'	100
$\sigma_C$	Volatility of operational cost, $C$	0.2
$\mu_C$	Drift of operational cost, $C$	0.3
$r$	Discount rate	0.1
$r_f$	Risk free rate	0.05

$$V^{ROV} = S(0)N(d_1) - K(T)e^{-rT}N(d_2) = 1.86 \tag{9}$$

여기서,

$$d_1 = \frac{\ln(S(0)/K(T)) + \left(r_f + \frac{\sigma_S^2}{2}\right)T}{\sigma_S \sqrt{T}};$$

$$d_2 = d_1 - \sigma_S \sqrt{T} \tag{10}$$

이고,  $N(d)$ 는 표준정규분포에서 그 값이  $d$  이하일 누적확률이며,  $K(T)$ 는 투자비용 인상율( $i$ ) 연 3%를 가정하여 얻어졌다. 즉 ROV는 사업 결정이 유보될 수 있는 사업의 가치를 투자유보옵션의 가치로 재평가하였으며, 2년 투자연기옵션의 가치가 위의  $V^{ROV}(1.86)$ 에 해당한다. 이에 DCF로만 가치평가가 이루어질 경우 투자 가치가 없는 것으로 판단되는 사업은 여전히 가치를 가지게 되며, 이는 경영상의 유연성으로 인한 가치로  $S(T)$ 의 불확실성이 고려되어 평가된 가치이다(Fig. 1(a)).

본 투자연기옵션의 가치는 2년 후 사업 투자 여부가 결정되었을 때 얻어지는 예상 이익의 현재 가치로, 사업 주체가 투자 연기에 따라 발생하는 비용 중 기꺼이 지불할 의사가 있는 최고 비용에 해당한다. 또한 투자는 2년 후에도 선택 사항이므로 옵션의 가치는 항상 0보다 크다(Fig. 2(a)).  $K$ (투자비용)가 일정하다고 할 때, 본 사업의 투자연기옵션 가치는  $T$ (투자유보기간)가 커질수록 증가한다. 이는 사업 수익의 현금 흐름이 시간이 지나면서 증가하기 때문이며, 이에 미국형 옵션과 같이 투자 결정 시점의 유연성이 있더라도 합리적인 사

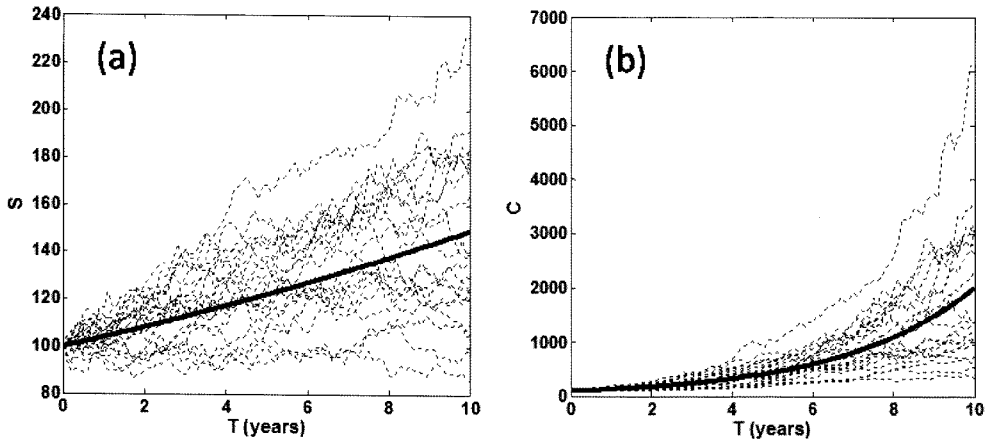


Fig. 1. 20 realizations of cash flow following a geometric Brownian motion: (a) Revenue cash flow ( $S$ ) related to the project 'A' which is to invest in a new water resources supply well ( $S(0)=100, \sigma_S=0.07, \mu_S=0.04$ ). (b) Cost cash flow ( $C$ ) related to the project 'B' which is to suspend a current water resources supply well ( $C(0)=100, \sigma_C=0.2, \mu_C=0.3$ ). The solid lines represent the average of cash flow in the real world to be used at the Discounted Cash Flow.

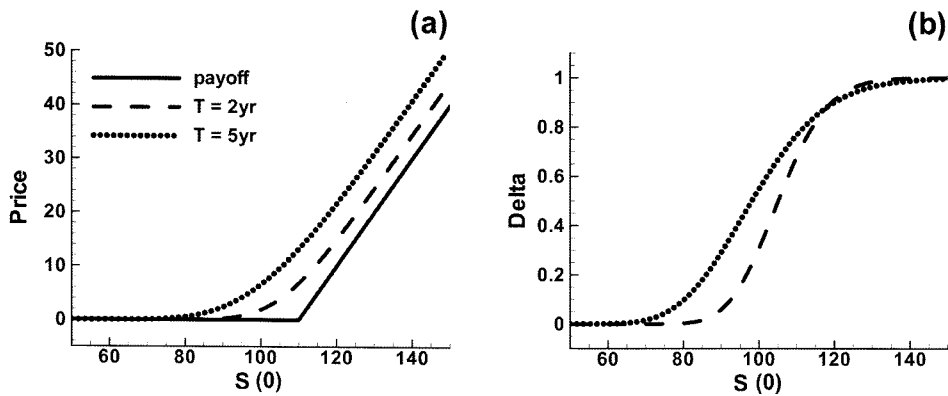


Fig. 2. (a) Investment option price ( $V$ ) valued by the Black-Sholes model, (b) option delta ( $V_S$ ) which is the quantity of  $S$  needed to hedge the investment risk from the uncertainty in  $S$ . In (a), the solid line is the payoff when the investment option is exercised at present with  $K(0)=110$ . Given that  $S(0)$  is 100, the price of the investment opportunity in  $T=2$  years is 1.86 with  $K(2)=116.7$ , while the price of the investment opportunity in  $T=5$  years is 6.57 with  $K(5)=127.5$ . Option delta is 0.31 when  $T=2$  years, and 0.55 when  $T=5$  years, respectively.

업 결정자라면 최대  $T$ 까지 투자를 미루게 된다. 즉 옵션 행사 시점의 유연성에 따른 추가 이익이 없으며, 같은 이유로 주식 가격의 확률 과정이 GBM일 경우, 미국형 콜옵션의 가격은 유럽형 콜옵션의 가격과 같다. 본 사업의 경우  $K$ 는 일정하지 않으나 그 인상률(3%)이 작아 여전히  $T$ 가 길어질수록 유보가치가 큰 것으로 나타났다(Fig. 2(a)). Fig. 2(b)는 본 사업의 위험도를 헷정할 수 있는  $S$ 의 매도포지션 델타( $V_S$ )를 보여주고 있다. 현재 예상수익률( $S(0)$ )을 100으로 가정했을 때  $T=2$ 이면 델타는 0.31이고,  $T=5$ 이면 델타는 0.55이다.

### 3.2. 운영중단옵션

운영중단옵션을 가지는 기존 수자원 사업의 가치를 평가해보기 위해, 'B' 지역의 기존 수자원 공급 시설이 노후화 및 지하수오염취약 등으로 유지비용 (operational cost)이 증가하면서, 운영중단이 고려된다고 하자. 수익과 비용은 사업 평가 시기 및 옵션 만기시에만 동시에 거래된다고 가정하고, 기존 사업의 수익( $M$ )은 일반적으로 일정하므로, 운영 비용( $C$ )이 식 (11)의 확률과정을 가진다고 가정한다.

$$dC = \mu_C C dt + \sigma_C C dz \tag{11}$$

기존의 DCF는 현시점에서 사업의 가치를 식 (12)와

같이 운영 가치가 있는 것으로 평가하나,

$$V^{DCF} = M - C(0) = 10 \tag{12}$$

2년 후 수입과 투자 비용을 예측하면 식 (13)과 같고,

$$V^{DCF} = (1+r)^{-T} [M - C(T)^P] = -59.68 \tag{13}$$

이는 현 시점에서, 기존 사업을 2년 후 지속하는 것은 가치가 없다고 판단, 2년 후 운영이 중단되어 있어야 하는 것으로 확정한다. 여기는  $C(T)^P$ 는 식 (14)와 같이 실제 시장에서 예측되는 확률과정의 평균값을 활용하였으며,

$$C(T)^P = C(0) \exp(\mu_c T) \tag{14}$$

Fig. 1(b)의 실선에 해당한다.

그러나 ROV는 DCF가 고려하지 못한 C의 불확실성을 고려하여, 운영중단의 옵션 가치를 평가할 수 있다. T=2에만 운영중단 여부가 결정될 수 있다고 가정하면, 운영중단옵션의 가치는 만기시 현금 흐름을 무위험 할인률로 할인하여 얻어질 수 있으며, 식 (15)에 의해 평가될 수 있다.

$$V^{ROV} = e^{-rT} \int_0^\infty \max[M - C(T)^Q, 0] f(C) dC \tag{15}$$

여기서  $C(T)^Q$ 는 무위험시장에서의 만기시 운영비용이다. 식 (15)는 금융시장의 풋옵션 가격에 해당하며, 블랙숄즈모델은 다음과 같이 그 가치를 평가한다.

$$V^{ROV} = Me^{-rT} N(-d_2) - C(0)N(-d_1) = 10.99 \tag{16}$$

이 가치는 사업 운영자가 2년 후 사업 중단을 결정할 경우 얻게 되는 이익의 현재 시장가치로, 사업 운영자가 기존 사업을 2년 후까지 유지하는데 기꺼이 지불할 최대

비용이라 할 수 있다. 즉 DCF가 기존 사업의 가치를 10으로 평가하는 반면, ROV는 운영중단옵션을 가지는 기존 사업의 가치를 20.99로 평가하게 된다. DCF는 예측치의 불확실성과 경영의 유연성을 무시하고, 현시점에서 기존 사업은 2년 후 반드시 운영이 중단되어 있어야 하는 것으로 확정하나, ROV는 2년 후 다시 한번 운영 중단 여부를 결정할 수 있는 운영상의 유연성을 고려하고 운영중단옵션의 가치를 평가하므로써, 운영중단옵션을 가지는 기존 사업의 가치를 더 높여 평가하고 있다.

M이 110으로 일정하고 C(0)이 100일때, 식 (13)의  $V^{DCF}$ 는 T가 증가하면서 지속적으로 감소하나 식 (16)의  $V^{ROV}$ 는 증가하다 감소한다. 이는  $V^{DCF}$ 가 T의 증가와 함께 지속적으로 증가하는  $C(T)^P$ 의 예측치(평균값)에 의존한 결과이며,  $C(T)^P$  평균값의 증가율이 커 상대적으로 할인율(r)의 영향이 적기 때문이다. 반면  $V^{ROV}$ 는  $C(T)^Q$ 의 불확실성을 고려하므로, 일정시간까지는 운영중단옵션의 가치가 증가하나, 이후는 감소한다. Fig. 3(a)는 T=5일 경우,  $V^{ROV}$ 가 10.21임을 보여주고 있으며, Fig. 4는 본 사업 'B'의 경우, T=2일 경우 운영중단옵션의 가치가 가장 큼을 보여주고 있다. 이윤을 극대화하려는 사업가라면, T=2 이후의 운영중단옵션은 고려하지 않을 것이다. 이와 함께 Fig. 3(b)는 옵션 헷징에 필요한 C의 매도포지션 델타( $V_C$ )를 보여주고 있다. 현재 운영비용 C(0)이 100일 때, T=2이면 델타는 -0.44이고, T=5이면 델타는 -0.28이다.

운영 중단 옵션의 가치는 C(0)에 의해서도 달라진다. Fig. 4에서 T=2의 경우, C(0)가 L에서의 C보다 크면, 운영중단옵션은 보유 가치가 있으나, 그 가치가 C(0)의 증가와 함께 감소하고, C(0)가 L에서의 C보다 작

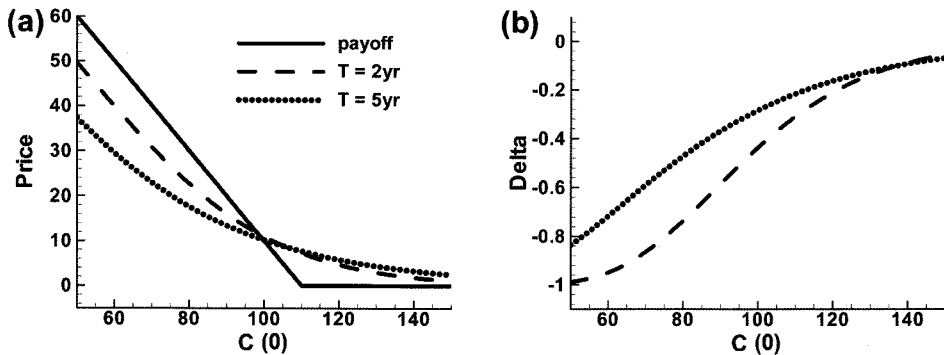


Fig. 3. (a) Suspension option price (V) valued by the Black-Sholes model, (b) option delta ( $V_C$ ) which is the quantity of C needed to hedge the suspension risk from the uncertainty in C. In (a), the solid line is the payoff when the suspension option is exercised at present with M=110. Given that C(0) is 100 and that M is the constant of 110, the price of the suspension opportunity in T=2 years is 10.99, while the price of the suspension opportunity in T=5 years is 10.21. Option delta is -0.44 when T=2 years, and -0.28 when T=5 years, respectively.



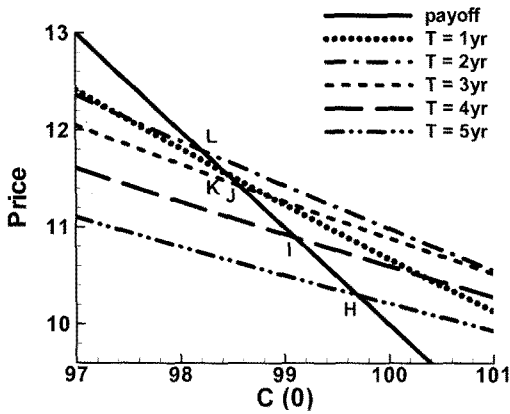


Fig. 4. The threshold,  $C^*$  to hold the suspension option (or to exit the project) at time zero. At  $C(0) > C^*$ , the option is worth of holding. At the points  $K, L, J, I,$  and  $H$  which have  $C^*$  for the option with  $T=1, 2, 3, 4,$  and  $5$  years respectively, the payoff and the suspension option value are the same.

으면, 기존 사업은 지금 중단되는 것이 합리적이다. 즉 ROV는 운영중단옵션이 지금 행사되어야 하는  $C$ 의 임계점,  $C^*$ 을 찾아준다. 이 임계점에서 옵션 보유 가치와 행사 가치는 무차별해지며(value-matching condition), 수학적으로 임계점에서는 두 가치의 일차 미분 값이 같다(smooth-pasting condition) (Dixit and Pindyck, 1994). 또한 Fig. 4는 만기기간  $T$ 와 함께 달라지는  $C^*$ 를 보여주며,  $K, L, J, I, H$ 가 각각 만기시점( $T$ )이 1, 2, 3, 4, 5년인 운영중단옵션이 보유 가치를 가지는 최소의  $C(0)$ , 즉  $C^*$ 를 가진다. 본 사업 'B'의 경우,  $C(0)$ 가 100일때 운영중단옵션의 가치가 가장 큰 만기 2년 운영중단옵션이 가장 작은  $C^*$ 를 가진다.

### 3.3. 운영중단시점의 유연성

또 다른 경영의 유연성, 즉 옵션 행사 가치가 보유 가치보다 크면, 만기  $T$  이전이라도 옵션이 행사될 수 있는 옵션행사시점의 유연성이 가지는 가치를 평가하기 위해, 위 사업 'B'의 운영중단옵션이  $T$  이전 어느 시점에서나 행사될 수 있다고 가정하였다. 수익과 비용은 옵션 행사시 동시에 거래된다고 가정한다. 이런 경우, 우리는 지속적으로 운영 중단 결정의 선택에 놓이게 되며, 앞서 설명한 미국형 옵션이 이에 해당한다. 미국형 옵션의 가치는 위의 식 (6)와 (7)을 통해 평가될 수 있으며, 이는 해석해를 가지지 않으므로 수치 모델을 이용하여 풀이된다. 여러가지 수치적 풀이 방법이 알려져 있으며, 본 논문에서는 penalty 방법을 이용하여 편미분방정식을 풀었다(Forsyth and Vetzal,

2002). penalty 방법은 미국형 옵션의 조건, 식 (6)와 (7)을 식 (17)의 비선형 편미분방정식으로 재구성하며,

$$V_\tau = \frac{\sigma_c^2 C^2}{2} V_{CC} + r_f C V_C - r_f V + Q(V, V^*) \quad (17)$$

여기서 penalty,  $Q(V, V^*)$ 는 식 (18)을 만족시킨다.

$$\begin{aligned} Q(V, V^*) &= 0; \text{ if } V > V^* \\ Q(V, V^*) &> 0; \text{ if } V = V^* \end{aligned} \quad (18)$$

또한 식 (17)은  $t$  대신  $\tau = T - t$ 를 사용하여, 옵션 가격 결정 편미분방정식이 만기일( $T$ )의 현금흐름을 초기 값으로 역산 추정됨을 보여준다. 다음의 초기 조건 식 (19)와 경계조건 식 (20)을 가정하면,

$$V^*(C, \tau=0) = V(C, \tau=0) = \max(M - C(\tau=0), 0) \quad (19)$$

$$V_\tau \geq r_f V; V^* \leq V \text{ as } C \rightarrow 0$$

$$V(C, \tau) = 0; \text{ as } C \rightarrow \infty \quad (20)$$

$C(0)$ 이 100일때,  $T=2$ 년 이내 어느 시점에서나 운영중단이 이루어질 수 있는 기존 사업의 운영중단옵션의 가치는 13.26이다(Fig. 5(a)). 이 값은 운영중단이 만기시에만 이루어지는 경우의 운영중단옵션가치(10.99)보다 높다. 즉 ROV는 옵션 행사 시점에 있어 유연성이 있다면, 운영중단옵션을 가지는 기존 사업의 가치를 (23.26), 옵션 행사 시점에 있어 유연성이 없는 운영중단옵션 보유 사업의 가치(20.99)보다 높게 평가한다. ROV가 경영의 유연성이 높은 사업일수록 가치를 더 높게 평가함을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 기존 사업 'B'의 운영이  $T$  이내 어느 시점에서나 중단될 수 있을 때, 기존 사업의 운영중단옵션이 가지는 가치를 보여주고 있으며, Fig. 5(b)는 중단 시점의 유연성이 있을 때(미국형)와 유연성이 없을 때(유럽형)의 사업중단옵션의 가치를 비교하고 있다. 중단 시점의 유연성이 있을 때 운영중단옵션의 가치는  $T$ 가 증가할수록 증가하며, 이는 운영중단이 만기시만에 이루어질 수 있는 경우, 옵션 가치가 일정  $T$  이후 감소하는 것과 다르다. 즉 옵션 행사 시점에 있어 유연성이 발휘될 수 있다면, 옵션의 가치는  $T$ 가 길수록 커진다.

## 4. 토 의

ROV를 실제 사업 가치 평가에 이용하기 위해서는 미래의 시장 환경 예측을 위한 정보가 요구되며, 특히 기초자산 가치의 변동율( $\sigma$ )에 대한 연구가 선행되어야

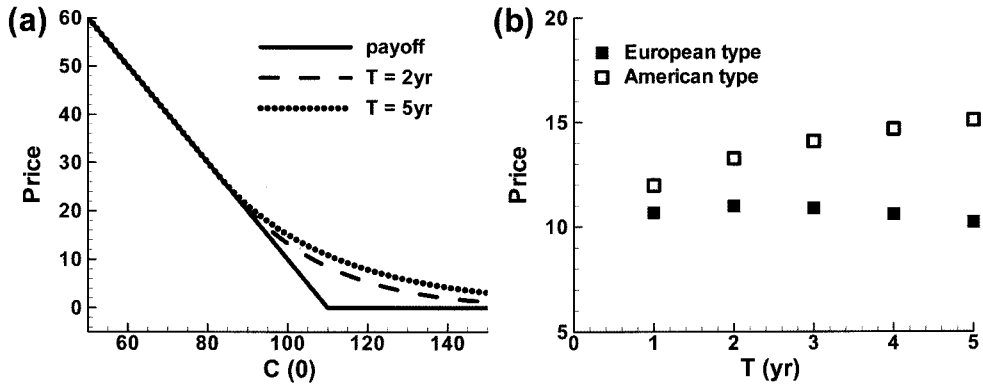


Fig. 5. (a) Suspension option price ( $V$ ) when the suspension option can be exercised anytime within  $T$ ; (b) Comparison of the suspension option price when the suspension option can be exercised only at time  $T$  (closed square titled as European type) with the suspension option price when the suspension option can be exercised anytime within  $T$  (open square titled as American type).

한다. 최근, 고정변동을 대신 확률변동율이 사용되기도 하고, 과거 자료에 의존하기보다는 시장에서 변동율을 구하려고도 하는 등 이에 대한 연구가 활발하다 (Chernov and Ghysels, 1999; Sung, 2004; Costa Lima and Suslick, 2006). 또한 기초자산의 확률과정 선택이 옵션 가치 결정에 영향을 미치므로, 확률과정 선택에도 신중하여야 한다. Insley(2002)는 목재 가격의 확률과정을 GBM으로 가정할 경우와 MR으로 가정할 경우, 벌목 사업의 가치와 최적의 사업 투자 시기가 각각 다르게 평가됨을 보이고 있다. 이와 함께, 실물옵션의 경우, 금융옵션과 달리 기초자산이 직접 거래 가능하지 않을 수 있으며, 이에 기초자산의 시장위험가격( $\lambda$ )에 대한 연구가 필요하며, 보유편의( $\delta$ )도 평가되어야 한다. Wang and de Neufville (2004)은 실물옵션이 금융옵션과 달리 쉽게 정의되지 않으며, 경로의존성 (path-dependency)과 사업간의 의존성으로 인해, 표준화된 옵션 평가 기법이 존재할 수 없음을 시사한 바 있다.

그러나 비록 간단한 확률과정이더라도, 여전히 미래 예측에 유용한 기초자산의 확률과정이, 증가율 및 변동율 등의 통계 인자를 통해 표현될 수 있으며, 일반적으로 이들 확률과정은 기초자산의 불확실성을 설명하기에 충분하다. 또한 금융상품의 다양화로 금융수학에서는 실물옵션만큼 복잡한 금융상품도 수학적으로 계산 가능해지고 있으며(Cortazar *et al.*, 2008), 금융시장과 비금융시장의 경계가 희미해지면서 이들 금융수학 기법이 실물옵션가치평가에 직접 응용될 수 있다. 무엇보다 ROV는 기존 가치 평가 방법이 다룰 수 없었던 불확실성 및 경영상의 유연성을 고려하여, 불확실성이 높은 사업의 경제적 가치를 평가하고 최적의

사업 전략을 수립할 수 있는데, 이런 장점으로 인해 여러 어려움에도 불구하고 현재 활발히 연구되고 있으며, 수자원 공급 사업의 경제성 평가에도 이용되어야 할 때이다.

## 5. 결 론

불확실성이 높은 중장기 대형 투자사업 및 연구개발 과제의 가치 평가에 사용되고 있는 ROV 기법을 수자원 공급 사업의 경제성 평가에 적용해 보고자 하였다. ROV 사용을 제한하는 가정들과 수자원 공급 사업의 특성을 살펴본 결과, ROV는 수자원 공급 사업의 경제성 평가에 적용 가능한 것으로 판단되며, 비교적 간단한 사업의 예를 사용하여, ROV가 DCF의 단점을 보완할 수 있는 경제적 가치 평가 기법으로 이용될 수 있음을 확인하였다. ROV는 기존의 DCF가 다루지 못한 사업수의 및 비용의 불확실성과 경영상의 유연성을 가치평가에 포함시켜, 사업투자가치는 물론 사업운영옵션들의 가치를 평가할 수 있으며, 본 논문에서 사용한 예제의 경우, ROV는 경영상의 유연성이 포함된 사업의 가치를 그렇지 않은 사업의 가치보다 높게 평가하고 있다. 중장기 대형 수자원 공급 사업이 불확실성은 물론 경영상의 유연성을 가지고 있음을 고려할 때, 기존의 DCF와 함께 ROV가 사업 가치 평가에 사용되어야 할 것으로 보인다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '청정 대

용량 지하수자원 확보 기술개발(08-3211)' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 국문 교정 맡아주신 한국지질자원연구원의 채기탁 박사님에게 감사드리며, 아울러 대한자원환경지질학회 심사위원님들에게도 감사드립니다.

### 참고문헌

- Bickerton, G.S. (2001) Optimal decision analysis for investments in municipal water-service infrastructure. Master's Thesis, University of Waterloo.
- Black, F and Sholes, M. (1973) The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, v. 81, p. 637-654.
- Brennan, M.J. and Schwartz, E.S. (1985) Evaluating natural resource investments. *Journal of business*, v. 58, p. 135-157.
- Chernov, M. and Ghysels, E. (1999) Estimation of stochastic volatility models for the purpose of option pricing. *Proceedings of the Sixth International Conference on Computational Finance*, Leonard N. Stern School of Business, January 6-8, 1999.
- Cho, S. and Heo, E. (2005) Real options valuation method for new and renewable energies: an empirical study of wind power. *Proceedings of the Korean Society for New and Renewable Energy Conference*, p. 604.
- Choi, S.M. (2002) Try to Use a New Valuation Approach: Application of the Real Options Pricing Method to an Aerospace Project. *Proceedings of the Korea Technology Innovation Society Conference*, p. 181-198.
- Cortazar, G., Gravet, M., and Urzua, J. (2008) The valuation of multidimensional American real options using the LSM simulation method. *Computers & operations research*, v. 35, p. 113-129.
- Cortazar, G., Schwartz, E., and Salinas, M. (1998) Evaluating Environmental Investments: A Real Options Approach. *Management science*, v. 44, p. 1059-1070.
- Costa Lima, G.A. and Suslick, S.B. (2006) Estimation of volatility of selected oil production projects. *Journal of petroleum science & engineering*, v. 54, p. 129-139.
- Cvitanic, J. and Zapatero, F. (2004) *Economics and Mathematics of Financial Markets*. The MIT Press, London, p. 228-235.
- Dimitrakopoulos, R.G. and Abdel Sabour, S.A. (2007) Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?. *Resources policy*, v. 32, p. 116-125.
- Dixit, A.K. and Pindyck, R.S. (1994) *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, New Jersey, p. 93-132.
- Forsyth, M. (2000) On estimating the Option Value of Preserving a Wilderness Area. *Canadian Journal of Economics*, v. 33, p. 413-434.
- Forsyth, P.A. and Vetzal, K.R. (2002) Quadratic convergence of a penalty method for valuating American options. *SIAM Journal on Scientific Computation*, v. 23, p. 2096-2123.
- Heo, E. (2000) Recent Developments on Economic Valuation Method - CVM, MAUA and Real Option Pricing. *Journal of Korea Technology Innovation Society*, v. 3, p. 37-54.
- Insley, M. (2002) A Real Options Approach to the Valuation of a Forestry Investment. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 44, p. 471-492.
- Insley, M. (2003) On the option to invest in pollution control under a regime of tradable emissions allowances. *Canadian Journal of Economics*, v. 35, p. 860-883.
- Insley, M. and Wirjanto, T. (2008) Contrasting two approaches in real options valuations: contingent claims versus dynamic programming. discussion paper, University of Waterloo, <http://www.arts.uwaterloo.ca/~minsley/cclaims.pdf>.
- Isik, M. (2004) Incentives for Technology Adoption Under Environmental Policy Uncertainty: Implications for Green Payment Programs. *Environmental & resource economics*, v.27, p.247-263.
- Jeon, I.H., Lee, J.D., and Jeong, J.W. (2005) Evaluation of Withdrawing and Reallocating the Existing Analog Radio Broadcasting Spectrum by Using Real Option Valuation Method. *Proceeding of the Korean Society for Innovation Management and Economics Conference*, p. 124-139.
- Kjaerland, F. (2007) A real option analysis of investments in hydropower-The case of Norway. *Energy policy*, v. 35, p. 5901-5908.
- Lee, I.-S. and Heo, E. (2004) An Option Pricing Model for the Natural Resource Development Projects. *Environmental and Resource Economics Review*, v. 13, p. 735-761.
- Lee, J.-D. (2005) The Application of Real Options Theory in Defense Offset Contract. *Journal of Military Operations Research Society of Korea*, v. 31, p. 14-25.
- Lentz, G.H. and Maurice Tse, K.S. (1995) An Option Pricing Approach to the Valuation of Real Estate Contaminated with Hazardous Materials. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, v. 10, p. 121-144.
- Marreco, J.d.M. and Carpio, L.G.T. (2006) Flexibility valuation in the Brazilian power system: A real options approach. *Energy policy*, v. 34, p. 3749-3756.
- Michailidis, A. and Mattas, K. (2007) Using Real Options Theory to Irrigation Dam Investment Analysis: An Application of Binomial Option Pricing Model. *Water resources management*, v. 21, p. 1717-1733.
- Murillas, A. and Chamorro, J.M. (2006) Valuation and Management of Fishing Resources Under Price Uncertainty. *Environmental & resource economics*, v. 33, p. 39-71.
- Park, H. (2004) A Real Option Approach to Optimal Use of Natural Resource: Revisiting the Least Cost Principle. *Korean Energy Economic Review*, v. 3, p. 47-69.
- Park, H. (2005) Real Options on Firms' Environmental Investment in the Presence of Uncertainty on Tradable Emission Permit Price. *Korean Economic Review*, v. 53, p. 173-199.
- Park, H. and Hwang, E.-S. (2003) Real option analysis for irreversible investment effect of farmland preservation programs. *Journal of Agricultural Economics*, v. 44, p. 121-139.
- Park, J.M. and Seol, S.S. (2006) A Comparative Study on

- the Real Options Valuation of Biotechnology R&D. *Journal of Korea Technology Innovation Society*, v. 9, p. 84-102.
- Seo, S., Segarra, E., and Mitchell, P.D. (2008) Irrigation technology adoption and its implication for water conservation in the Texas High Plains: a real options approach. *Agricultural economics*, v. 38, p. 47-55.
- Seo, S. and W.S. (2007) Analysis of entry and exit thresholds for apple production: a real options approach. *Journal of Agricultural Economics*, v. 48, p. 93-113.
- Seo, S.-T. (2006) A real options approach to the investment analysis of irrigation systems. *Journal of Agricultural Economics*, v. 47, p. 31-50.
- Seol, S.S. and Yoo, C.S. (2002) Real Options for Practitioners on the Valuation of Technology and Investment. *Journal of Korea Technology Innovation Society*, v. 5, p. 44-58.
- Sung, O.-H. (2002) Valuation of Two-Stage Technology Investment Using Double Real Option. *Journal of Korea Technology Innovation Society*, v. 5, p. 141-151.
- Sung, O.-H. (2004) A study on Real option valuation for technology investment using the Monte Carlo simulation. *Journal of Korea Technology Innovation Society*, v. 7, p. 533-554.
- Sung, O.-H. (2005) A Study on Interval Estimation of Technology R&D Investment Value using Black-Scholes Model. *Journal of Korea Technology Innovation Society*, v. 8, p. 29-50.
- Sunnevag, K. (1998) An option pricing approach to exploration licensing strategy. *Resources policy*, v. 24, p. 25-38.
- Wang, T. and de Neufville, R. (2004) Building real options into physical systems with stochastic mixed-integer programming. 8th Real Options Annual International Conference, Montreal, Canada, June 2004.
- Yang, M. and Blyth, W. (2007) Modeling Investment Risks and Uncertainties with Real Options Approach - A Working Paper for an IEA Book: Climate Policy Uncertainty and Investment Risk.
- Yu, S.-H. and Sung, W.-H. (2005) Real Option and Analysis of R&D Projects. *Korea Institute of Science and Technology Information*, 2005-12.
- Yun, W.-C. (2001) Evaluation of Capital Investment in Energy-related Business by using Real Option Pricing Method. *Korea Energy Economics Institute*. 2001-06.

---

2008년 8월 28일 원고접수, 2008년 10월 19일 게재승인.