미래 가격변동성을 고려한 고준위방사성폐기물 처분장의 원가추정 및 원가효율성 분석

방 성 식* · 정 양 헌** · 천 동 필***

< 국문초록 >

현재 한국은 원전에서 발생된 사용후핵연료를 원전 부지 내의 저장수조나 저장시설에 임시적으로 보관하고 있으며, 현재의 저장량을 고려하면 2020년에서 2024년도 사이에 포화될 것으로 예상된다. 따라서 한국은 지금까지 CANDU형 사용후핵연료를 처분하기 위하여 4가지 처분대안(KRS-1, A-KRS-1, A-KRS-21, A-KRS-22)을 개발하였다.

본 연구는 이러한 대안들의 현재가격과 ARIMA 모형을 사용한 미래가격을 고려하여 각 대안들의 원가효율성을 비교 분석하였다.

분석결과, 첫째, 2015년 말 가격으로 A-KRS-1가 가장 효율적인 대안으로 분석되었다. 둘째, ARIMA 모형을 사용하여 2020년 원가를 추정한 결과, A-KRS-1, A-KRS-21, A-KRS-22는 2015년 대비 비용이 감소하였으며, KRS-1은 비용이 증가하였다. ARIMA 모형을 사용한 분석결과, 모든 대안들이 2.3%의 감소와 2.1% 증가를 기록한 것에 반해, 현재 원자력분야에서 사용되는 물가상승률을 고려한 방법을 사용한 경우 모든 대안이 약 7.2% 증가하였다. 이러한 결과는 현재 원자력분야에서 사용되는 방법의 경우 ARIMA모형과 비교하면 원가가 과대 계상되는 것으로 나타났다. 셋째, 시나리오 분석결과 A-KRS-1이 총 24,300점 중에서 8,610점을 받아, 7,980을 받은 A-KRS-22에 근소하게 앞서고 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과는 사용후핵연료 처분장 건설을 고려하는 나라에게 중요한 정책적 자료로 사용될 수 있을 것이다.

주제어 : 원가추정, 효율성분석, 처분대안, 고준위방사성폐기물, 가격변동, 가격예측, ARIMA

* 한국과학기술원 기술경영학과 박사 (제1저자)
** 한국과학기술원 기술경영학과 교수 (공동저자)
*** 부경대학교 기술경영전문대학원 조교수 (공동저자)

Cost Estimation and Efficiency Analysis of Korean High-level Waste Disposal Alternatives in Consideration of Future Price Volatility

Sungsig Bang* · Yanghon Chung · Dongphil Chun*****

< 국문초록 >

Spent fuel is temporarily stored in storage tanks or facilities at nuclear reactor sites in Korea and it is predicted to become saturated between 2020 and 2024. For this reason, in Korea, to this day four disposal alternatives (KRS-1, A-KRS-1, A-KRS-21, A-KRS-22) have been developed in order to carry out the direct disposal of the CANDU (CANada Deuterium Uranium) spent fuel. The objective of this study is to conduct cost efficiency analysis for the disposal alternatives in consideration of current price and price volatility to the construction cost of radioactive waste repository. To derive future price volatility, this study used the ARIMA model. As a result, A-KRS-1 is the most efficient in terms of price per bundle using 2015 price. The results using ARIMA model, except in the case of KRS-1, the cost per bundle of A-KRS-1, A-KRS-21, and A-KRS-22 is decreased. Cost estimates using ARIMA model show little change or decreases in cost while cost estimates using inflation rates for 2020 resulted in approximately 7.2% increases compared to 2015 for all options. As for the results of scenario analysis, A-KRS-1 earned 8,160 points for 35.4%, while A-KRS-22 followed closely behind with 7,980 points for 32.9% among the total 24,300 points. The results of this study provide invaluable policy data for any nation considering the construction of spent nuclear fuel repository.

Keywords: cost estimation, efficiency analysis, disposal alternative, high-level waste, price volatility, price forecasting, ARIMA

* Ph.D, Department of Business and Technology Management, Korea Advanced Institute of Science and Technology

** Professor, Department of Business and Technology Management, Korea Advanced Institute of Science and Technology

*** Assistant Professor, Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University

Ⅰ. 서 론

원전에서 발생된 사용후핵연료는 원전 부지 내의 저장수조나 저장시설에 임시적으로 보관하고 있다. 한국의 경우 이러한 사용후핵연료는 2011년 말 기준으로 약 12,000톤 정도가 임시로 저장 및 관리되고 있다. 한 해 동안 발생하는 사용후핵연료가 약 700-750톤이라고 가정할 경우, 곧 부지 내 지정시설 용량 16,500-17,000톤이 가득 찰 것이다(KAIF 2009 2010 2012).

현재 CANDU(Canadian Deuterium Uranium Reactor)형 원자로의 경우 월성 1,2,3,4호기가 가동 중에 있다. 한 해 발생하는 약 700-750톤 정도의 사용후핵연료 중에서, 약 390톤 정도가 CANDU형 원자로에서 발생한 사용후핵연료이다(KAIF 2010 2012). 월성 원전들의 경우 2009년 말 기준으로 저장 시설 용량은 508,752다발(9,372 tons)이며, 실제 저장량은 311,414다발(5,737 tons)로 2020년에서 2024년 사이에 포화될 것으로 예상된다(KAIF 2010; Kim et al. 2011).

CANDU형 원자로의 경우 농축우라늄이 아닌 천연우라늄을 사용한다. 따라서 재처리를 통해 얻어지는 경제적 효용이 작기 때문에 직접 처분을 고려하고 있다(Kim et al. 2012). 이에 따라 정부는 사용후핵연료에 대한 대책을 마련하기 위하여 현재 임시·중간저장 건설을 위한 시설 부지 선정 등 중·단기 현실적 대안을 모색하고 있다(KAIF 2012).

한국에서는 CANDU 사용후핵연료를 좀 더 효율적으로 직접처분하기 위하여 현재까지 4가지 처분대안을 개발하였다(Kim et al. 2011). 1997년부터 개발한 처분개념은 KRS(Korea Reference System)로부터 시작하여 현재 A-KRS-22 개념까지 개발한 상태이다(Kim et al. 2011).

한국의 사용후핵연료 처분장 건설에 대한 연구는 Cho et al.(2007) 등의 연구가 있다(Cho et al. 2007; Kim and Choi 2006; Kim et al. 2009; Lee et al. 2007). 그러나 처분장 건설 대안들에 대한 경제성 분석은 Kim et al.(2011)의 연구를 제외하면 거의 이루어지지 않고 있다. Kim et al.(2011)의 연구에서는 한국에서 개발된 4가지 대안에 대하여 2010년 가격을 기준으로 원가효율성을 비교 분석하였다.

그렇지만, 실제 처분장 건설의 경우 향후 미래에 일어날 일이기 때문에 미래 원가 변동성 또한 중요한 문제이다. 한국의 경우 방사성폐기물관련 법령에 따라, 미래 원가는 물가상승률을 반영하여 계산한다. 따라서 미래원가는 매년 물가상승률만큼 지속적으로 증가하며, 지수형태로 증가하기 때문에 시간이 지날수록 가격은 급등하게 된다.

그러나 미래 가격의 경우 물가상승률만큼 지속적으로 증가하지 않을 가능성이 있으며, 또한 현재의 물가상승률 방법은 향후 먼 미래의 비용을 계산할 경우 그 비용이 기하급수적으로 증가한다.

이에 따라 본 연구는 물가상승률을 이용한 방법 이외에, 실제 과거 자료를 이용한 통계학적 방법을 사용하여 미래의 원가 변동성을 예측하고, 현재의 물가상승률을 사용한 방법과 비교 분석한다.

또한, 이렇게 예측된 데이터를 사용하여 여러 가지 시나리오를 만든 후, 각 대안들의 원가 효율성에 대해 비교 분석하였다. 결국, 본 연구는 현재 가격과 가격 변동성을 고려한 4가지 직접처분 방식의 효율성을 분석하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 본 연구에서 사용된 모형과 방법론에 대해 기술한다. 3장에서는 본 연구의 연구결과를 기술하고, 4장에서는 본 연구의 결론과 시사점에 대해서 기술한다.

II. 연구 방법

2.1. 사용후핵연료 처분장

한국은 현재까지 사용후핵연료 처분장 건설과 관련한 4가지 처분대안을 개발하였다(Kim et al. 2011). 1997년부터 개발한 처분개념은 KRS(Korea Reference System)로부터 시작하여 현재 A-KRS-22 개념까지 개발한 상태이다(Kim et al. 2011).

<표 1>은 각 처분 대안의 특징이다.

<표 1> 처분대안들의 특징

<table>
<tr><th></th><th>KRS-1</th><th>A-KRS-1</th><th>A-KRS-21</th><th>A-KRS-22</th></tr>
<tr><td>처분터널</td><td colspan="4">화강암 500 m 지하</td></tr>
<tr><td>처분공</td><td colspan="2">4 m</td><td colspan="2">5 m</td></tr>
<tr><td rowspan="2">처분용기</td><td>동판 5 cm</td><td colspan="3">동분 1 cm</td></tr>
<tr><td colspan="2">처분공 하나에 용기 1개</td><td colspan="2">처분공 하나에 용기 2개</td></tr>
<tr><td>벤토나이트</td><td>한 겹의 벤토나이트 50 cm</td><td colspan="2">한 겹의 벤토나이트 40 cm</td><td>두 겹의 벤토나이트 20 cm</td></tr>
<tr><td>뒷채움</td><td colspan="4">벤토나이트 30%</td></tr>
</table>

각 대안의 주요 특징을 살펴보면, KRS-1은 사용후핵연료를 지하 500m 화강암에 수직 처분하는 개념이며(Saanio and Kokko 2007; Kim et al. 2011), A-KRS-1은 KRS-1 개념에서 많은 비용을 차지하는 외부용기 구리두께를 동판 5cm에서 동분 1cm로 축소시킨 개념이다. 그리고 A-KRS-21과 A-KRS-22는 처분용기 내 사용후핵연료 수용량을 증가시키기 위해 처분용기의 높이를 적게 하여 하나의 처분공에 처분용기 2개를 수직 처분하는 개념이다(Kim et al. 2011). 이를 위하여, A-KRS-21과 A-KRS-22는 처분공 간격을 넓히고, 완충재인 벤토나이트도 한 겹의 50cm에서 최종적으로 벤토나이트 20 cm를 두 겹으로 사용하였다.

2.2. 처분대안의 원가효율성 분석 방법론

원가 효율성을 분석하기 위해서는 일반적으로 전부원가 계산을 사용하나, 본 연구에선 주요 원가동인 분석법을 사용하였다(Baek 2015; Kim et al. 2015; Mowen et al. 2015). 본 연구에서 전부원가 계산 대신에 주요 원가동인 분석법 사용하는 이유는 첫째, 주요 원가분석법이 시간과 비용이 적게 소모되며, 둘째, 주요 원가동인 이외의 원가동인에서 발행하는 비용은 매우 적고, 셋째, 실제 건설해본 시설이 아니기 때문에 개념설계에 의존해야하기 때문에 세세한 원가 동인을 모두 찾을 수 없다. 이러한 이유로 주요 원가동인 이외에 다른 원가동인을 알지 못하거나, 다른 원가동인들이 순위에 거의 영향을 미치지 못하기 때문이다. 따라서 주요 원가동인 분석법을 사용하기 위해서는 주요 원가동인을 도출하는 것이 매우 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 처분장의 원가효율성을 분석하기 위하여 처분터널 굴착비, 처분공 굴착비, 처분공 완충재로서의 벤토나이트, 처분 용기, 처분터널 뒷채움의 5가지의 주요 원가동인을 상정하였다(Kim et al. 2011).

추가적으로 처분용기 비용은 각 대안에서 공통적으로 사용되는 주철과, KRS-1에서만 사용되는 동분, 나머지 대안에서 사용되는 순 동판으로 구분하였다. 이를 표현하면 식(1)과 같다.

$$UMC_{i,t} = \frac{C_{et} + C_{eh} + C_{bc} + C_{cc} + C_{bf}}{N_b} \quad (1)$$

여기에서, $UMC_{i,t}$=처분대안 i의 t시점에서의 번들 당 원가, N_b=번들 수, C_{et}=처분터널 굴착비용, C_{eh}=처분공 굴착비용, C_{bb}=처분공 완충재 비용, C_{cc}=처분용기 비용(주철 가격 + 구리가격), C_{bf}=뒷채움비용

처분효율의 기준을 번들로 설정한 이유는 하나의 처분용기에 수용할 수 있는 사용후핵연료 번들량이 각 대안마다 다르기 때문이다. 따라서 각 대안들의 원가 효율성을 비교 분석하려면 번들 기준으로 계산해야 한다. 처분장의 주요원가동인을 5가지로 설정한 이유는 지하 처분장에서 소요되는 비용의 비교를 통하여 각 대안의 경제성 비교분석이 가능하기 때문이다. 또한 주요 원가동인에 대한 비용을 비교 분석함으로써 각 처분대안의 주요 부문별 소요비용을 알 수 있고, 각 대안에서 경제적 장점이 있는 원가동인을 도출할 수 있기 때문이다. 원가 계산을 위한 각 처분대안의 조건은 <표 2>와 같다.

<표 2> 처분대안들의 건설 조건들

	KRS-1	A-KRS-1	A-KRS-21	A-KRS-22
처분량 (bundles)	297	420	240	240
처분터널 길이 [m]	40	40	40	40
처분공 사이즈 [cm]	D 224 x H 783	D 225 x H 663	D 208 x H 799	D 208 x H 799
처분공 거리 [m]	4	4	5	5
벤토나이트 두께 [cm]	50	40	40	20 (Sand 30%) 20
용기 사이즈 [cm]	D 102 x H 483	D 124.4 x H 412.9	D 128 x H 274.5	D 128 x H 274.5
뒷채움 [m^3]	114.76	114.76	71	71

2.3. 가격 예측을 위한 ARIMA model

ARIMA(Auto Regressive Integrated Moving Average) 모형은 타임시리즈 데이터를 사용하여 자료 예측을 할 경우에 가장 널리 사용되고 있는 모형의 하나이다.

ARIMA 모형은 AR(p), I(d), MA(q)로 구성되어 있다. 여기서 p 는 자기회귀 조건이며, d 는 차분, q 는 이동평균 조건이다. ARIMA 모형에서 백색잡음이란 오차를 말하며, 첫째, 평균은 0에 가깝고, 둘째, 분산은 상수인 정규분포를 하는 확률변수이고, 셋째, 서로 독립적이라고 가정한다. 자세한 ARIMA 모형은 다음과 같다(Greene 2003; Jeong 2009; No 2012).

AR모형이라 불리는 자기회귀모형의 시점 t의 변수는 시점 $t-1$부터 $t-p$까지 영향을 받고 있는 것이라고 가정한다.

$$y_t = \mu + \gamma_1 y_{t-1} + \gamma_2 y_{t-2} + \cdots + \gamma_p y_{t-p} + \epsilon_t \tag{2}$$

따라서 μ를 백색잡음(White noise)이라고 했을 때, $x(t)$가 $t-1$시점부터 $t-p$시점까지 영향을 받는다면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 실제로 $p=1$이라고 했을 경우, AR(1) 모형은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_t = \mu + \gamma_1 y_{t-1} + \epsilon_t \tag{3}$$

MA모형으로 불리는 이동평균모형은 시점t의 변동을 백색잡음을 이용하여 도출한다. 즉, 시점 t의 백색잡음이 μ라 가정할 경우 y_t가 $t-1$시점부터 $t-q$시점까지 영향을 받는다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_t = \mu - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \tag{4}$$

MA(1) 모형은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_t = \mu - \theta_1 \epsilon_{t-1} + \epsilon_t \tag{5}$$

ARMA모형은 위에서 살펴본 바와 같이 과서 시계열 데이터들의 설명변수인 AR모형과 과거 오차항들의 설명변수인 MA모형의 합성이다. ARMA 모형의 경우 정상시계열자료에 대한 분석 모형이다. 여기에 비정상시계열 자료를 사용하기 위한 차분 개념이 들어간 모형이 ARIMA모형이다. 따라서 ARIMA모형은 정상시계열모형뿐만 아니라, 비정상시계열모형까지 고려한 모형이다. 1 차분은 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\triangle y_t = y_t - y_{t-1} \tag{6}$$

따라서 ARIMA모형은 식(7)과 같이 표현된다.

$$\triangle^{d} y_t = \mu + \gamma_1 \triangle^{d} y_{t-1} + \cdots + \gamma_p \triangle^{d} y_{t-p} + \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \cdots - \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (7)$$

미래 가격 변동성을 도출하기 위하여, 본 연구에서는 Box and Jenkins(1970)에 의하여 개발된 ARIMA 모형을 사용한다. 모형 추정은 Box-Jenkins 추정방법을 이용하였는데, 먼저 데이터의 자기상관 및 부분상관을 분석하여 몇 가지 모형을 추정하고, 둘째, 이렇게 추정된 모형들의 계수들을 비교 분석하고, 마지막으로 최종 추정 모형의 적합도 등을 검정한다.

2.4 원자력분야의 원가 추정 방법

원자력분야의 미래 원가 추정은 산업통상자원부고시(Notification No. 2015-132: 방사성폐기물 관리비용 및 사용후핵연료관리부담금 등의 산정기준에 관한 규정)에 따른 물가상승률을 고려하여 미래 원가를 추정한다. 미래원가는 현재 원가에 물가상승률을 곱하여 계산된다. 결국 미래원가는 항상 현재 원가보다 높게 추정되며, 가격의 상승은 선형이 아닌 지수로 증가한다.

2015년 대비 물가변동률을 고려한 가격 도출은 식(8)과 같다.

$$UMC_{i,t} = UMC_{i,t_0}(1+r)^{t-t_0} \quad (8)$$

여기서, $UMC_{i,t}$=물가상승률을 고려한 각 대안들의 번들 당 비용, t_0=기준년도(여기서는 2015년), r=방사성폐기물 관리비용에 관한 법령에서 정한 물가상승률

2.5. ARIMA 모형을 사용한 시나리오 분석

본 연구에서의 자료 분석 기준년도는 2015년 말이다.

그러나 실제 처분장 건설의 경우 향후 미래에 일어날 일이기 때문에 미래 원가 변동성은 중요한 문제이다. 이에 따라 본 연구는 실제 과거 자료를 이용하여, 미래의 원가 변동성을 예측하고, 이렇게 예측된 데이터를 사용하여 여러 가지 시나리오를 만든 후, 각 대안들의 원가 효율성에 대해 비교 분석하였다.

본 연구에서는 이러한 변동 가능성을 통계학적인 방법인 ARIMA 방법과 신뢰구간을 이용하여 도출한다. 본 연구에서 사용된 신뢰구간의 의미는 실제 데이터를 분석해 본 결과 향후 변동폭이 신뢰구간 안에 있을 확률을 의미한다.

변동폭의 신뢰구간에 대한 설정에 있어, 본 연구에서는 기본적으로 변동폭에 대한 위험도로 68% 신뢰구간을 설정한다. 68%는 식(7)을 의미한다. 신뢰구간을 68%로 설정한 이유는 너무 높은 신뢰구간의 경우 그 변동폭이 너무 넓어 의미 없는 결과를 가져올 수도 있기 때문이다.

$$FP-1\frac{\sigma}{\sqrt{n}} < FP < FP+1\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

여기서, FP=예측값, σ=표준편차, n=샘플 수

예측기간 설정의 경우, 영구처분장 건설에 대한 논의는 2016년 이후, 중간 저장 시설 논의와 함께 이루어질 가능성이 높으며, 중간저장시설의 경우 영구적인 보관을 위한 시설이 아니라는 것을 가정할 때, 적어도 그 결정이 5년 안에 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 2015년까지의 자료를 이용하여 5년 후인 2020년의 가격변동을 고려하여, 원가효율성 분석을 실시한다.

시나리오 설정은 다음과 같다. 먼저 처분터널과 처분공, 벤토나이트와 뒷채움, 주철, 동판, 구리분말 원가의 5가지에 대해 분석한다. 이러한 5가지 원가 동인은 ARIMA 분석을 통한 예측치, 상한(Upper Confidence Limit, UCL), 하한 (Lower Confidence Limit, LCL)의 3가지 가격 변동 값을 가지게 되어, 3의 5승(3^5)의 시나리오인 243개의 시나리오를 가지게 된다.

2.6. 자료 수집

본 연구에서 사용된 데이터는 2000년부터 2015년 말까지의 가격 자료이다.

본 연구에서는 미래 가격 변동 예측을 위하여 벤토나이트는 2004년부터 2015년까지, 나머지는 2000년도부터 2015년까지의 자료를 수집하였다. 처분터널과 처분공 굴착원가는 핀란드의 2010년도 외국단가를 기초로, 한국의 원자력직종 평균 노임 증감률을 대입하여 계산하였으며, 다른 단가들은 물가정보지 자료를 사용하였다. 모든 자료의 경우 반기 자료를 사용하였다. <표 3>은 원가효율성 분석을 위한 자료의 특성을 나타낸 것이다.

자료는 (사)한국물가협회와 (사)한국물가정보의 자료를 사용하였다. (사)한국물가협회와 (사)한국물가정보의 물가정보는 기획재정부가 허가한 기관의 정보지이기 때문에, 정보의 질에 대해서는 문제가 없었다. 추출된 원가 정보들은 달러로 변환되었다.

터널굴착과 처분공의 경우 2000년 대비 138%, 동판은 110%의 증가율을 기록하였으며, 벤토나이트의 경우 비교적 적은 27%의 증가율을 기록하였다.

<표 3> 수집된 자료의 특성

원가동인		자료 특성			기간	자료 종류
		2000(2004)	2015	증가율		
터널굴착 [USD/m^3]		22.74	54.18	138%	2000-2015	Half-yearly
처분공 [USD/m^3]		561.45	1,337.62	138%	2000-2015	Half-yearly
벤토나이트 [USD/ton]		432.94	551.78	27%	2004-2015	Half-yearly
처분용기 [USD/kg]	주철	1.44	2.55	76%	2000-2015	Half-yearly
	동판	3.48	7.31	110%	2000-2015	Half-yearly
	동분	22.07	45.84	108%	2000-2015	Half-yearly
뒷채움 [USD/kg]		148.44	189.18	27%	2004-2015	Half-yearly

Ⅲ. 연구 결과

3.1. 각 대안의 2015년 원가효율성 분석

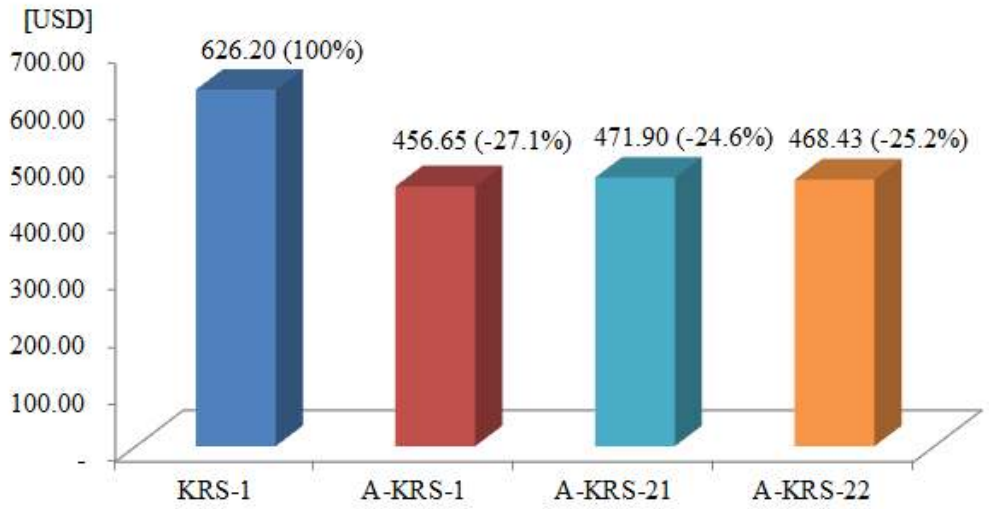
<표 4>와 [그림 1]은 4가지 처분대안의 원가추정과 효율성결과분석이다. 각 대안들의 번들 당 가격은 KRS-1의 경우 626.20 USD이고, A-KRS-1의 경우 456.65 USD, A-KRS-21의 경우 471.90 USD, A-KRS-22의 경우 468.43 USD이었다.

4가지 대안의 원가분석 결과 가장 효율적인 대안은 A-KRS-1으로 도출되었으며, 두 번째는 A-KRS-22, 가장 효율성이 나쁜 대안은 KRS-1이었다. 이러한 차이는 A-KRS-1이 2번째로 효율적인 대안인 A-KRS-22와 주철, 구리 가격에서 27.86 USD, 36.01USD의 원가 차이를 보이고 있기 때문이며, 결국 주요원가동인에서 가장 높은 비율의 원가를 차지하는 처분용기에서 가장 적은 직접재료비가 투입되기 때문이다. 그러나 두 대안의 차이는 처분터널, 처분공, 벤토나이트, 뒷채움의 가격이 상쇄하여 다만 11.78 USD의 차이만을 보일 뿐이다. 이러한 결과는 향후 처분터널이나 벤토나이트의 가격이 상승하고, 주철이나 구리의 가격이 하락한다면 두 대안의 순위가 바뀔 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

KRS-1의 원가를 100%로 가정할 경우 A-KRS-1은 약 27.1%의 원가를, A-KRS-21은 약 24.6%의 원가를, A-KRS-22는 25.2%의 원가를 절감하는 것으로 나타났다. 따라서 A-KRS-1이 A-KRS-22에 비하여 약 1.9%더 효율적인 대안으로 나타났다.

<표 4> 4가지 처분대안의 각 원가동인별 원가 추정 결과 – 2015년 가격

	처분터널	처분공	벤토나이트	처분용기		뒷채움
				주철	구리	
KRS-1	20.94	138.99	79.37	135.87	177.93	73.10
A-KRS-1	14.80	83.95	55.24	51.24	199.73	51.69
A-KRS-21	8.02	75.52	45.52	79.10	235.74	28.00
A-KRS-22	8.02	75.52	42.05	79.10	235.74	28.00



[그림 1] 4가지 처분 대안의 원가 추정 결과 비교 – 2015년 가격

3.2. 가격변동성을 고려한 각 대안의 원가효율성 분석

<표 5>는 이러한 단계를 거쳐 추정된 ARIMA 모형에 대한 결과이다. 주철을 제외한 모든 계수들의 추정 값은 유의 수준 0.05로 유의하였으며, 주철도 유의수준 0.059로 크게 문제가 되지는 않았다. 모형의 적합도인 Ljung-Box Q 값의 유의 수준은 0.05이상으로 나와 모형의 적합성은 문제가 없는 것으로 나타났다. <표 5>에서 예측된 모형과 2014년도까지의 자료를 사용하여 2015년도 가격을 예측한 결과, 터널굴착은 -3.2%, 처분공은 -3.2%, 벤토나이트는 0.1%, 주철은 0%, 동판은 -9.8%, 동분은 2.9%, 뒷채움은 0.1%의 차이를 보여 양호한 예측치를 제공하는 것으로 분석되었다. 2000년에서 2014년도 반기까지의 자료를 가지

고, 실제 2015년 말 결과를 예측한 결과 실제 값은 모두 95%에서 예측한 변동폭 안에 존재하였다.

<표 5> 원가 동인들의 가격 예측을 위한 ARIMA 추정 모형

		Model type	Model parameters			Ljung-Box Q		
			Coefficients		t-value (Sig.)	Statistics	DF	Sig.
처분터널		ARIMA(1,1,1)	AR Lag 1	0.984	10.669 (0.000)	17.380	16	0.361
			MA Lag 1	0.862	3.194 (0.003)			
처분공		ARIMA(1,1,1)	AR Lag 1	0.984	10.669 (0.000)	17.380	16	0.361
			MA Lag 1	0.862	3.194 (0.003)			
벤토나이트		ARIMA(1,0,0)	AR Lag 1	0.999	337.68 (0.000)	3.848	17	1.000
처분용기	주철	ARIMA(0,1,1)	MA Lag 1	-0.338	-1.961 (0.059)	5.479	17	0.996
	동판	ARIMA(1,0,0)	Constant	7,299.22	3.405 (0.002)	7.765	17	0.971
			AR Lag 1	0.946	19.069 (0.000)			
	동분	ARIMA(1,0,0)	Constant	43,434.73	4.479 (0.000)	9.616	17	0.919
			AR Lag 1	0.929	14.854 (0.000)			
뒷채움		ARIMA(1,0,0)	AR Lag 1	0.999	337.68 (0.000)	3.848	17	1.000

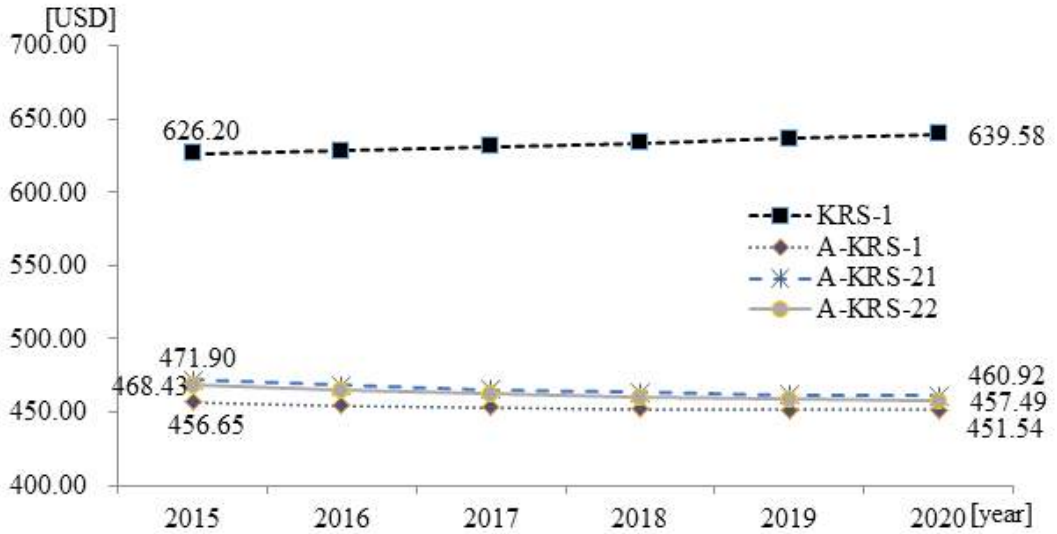
<표 6>은 ARIMA 모형을 예측된 결과이다. 2020년 처분터널 원가의 추정치는 63.32 USD이며, 신뢰 구간을 68%로 설정하였을 경우 상한은 69.62 USD, 하한은 57.02 USD이었다. 가장 큰 변동폭을 가지는 순 동판은 원가 추정치는 2.55 USD이며, 신뢰 구간을 68%로 설정하였을 경우 상한은 3.03 USD, 하한은 2.06 USD이었다.

처분터널과 처분공의 경우 가장 작은 변동폭인 9.9%의 변동폭을 가지고 있으며, 동판의 경우 29.5%의 변동폭으로 가장 큰 변동폭을 가지고 있는 것으로 나타났다.

<표 6> 신뢰구간 68%인 가격 예측 결과 – 2020년 가격

		CI(confidence interval) 68%			변동폭 (%)
		UCL	Forecasting	LCL	
처분터널 [USD/m^3]		69.62	63.32	57.02	9.9
처분공 [USD/m^3]		1,718.77	1,563.28	1,407.79	9.9
벤토나이트 [USD/ton]		625.80	544.91	464.02	14.8
처분용기 [USD/kg]	주철	3.03	2.55	2.06	18.8
	동판	8.86	6.84	4.81	29.5
	동분	51.56	41.16	30.76	25.3
뒷채움 [USD/kg]		214.56	186.83	159.09	14.8

[그림 2]는 ARIMA 모형을 사용하여 예측된 값을 사용한, 각 대안들의 원가 추정 결과이다. KRS-1의 경우 626.20 USD에서 639.58 USD로 2.136%가 증가하였으며, A-KRS-1은 1.119%, A-KRS-21은 2.326%, A-KRS-22는 2.335% 감소하였다. 가격이 작게나마 감소하는 이유는 ARIMA 모형에서 동분과 동판, 벤토나이트, 뒷채움의 경우, 가격이 감소하는 것으로 예측되었기 때문이다.



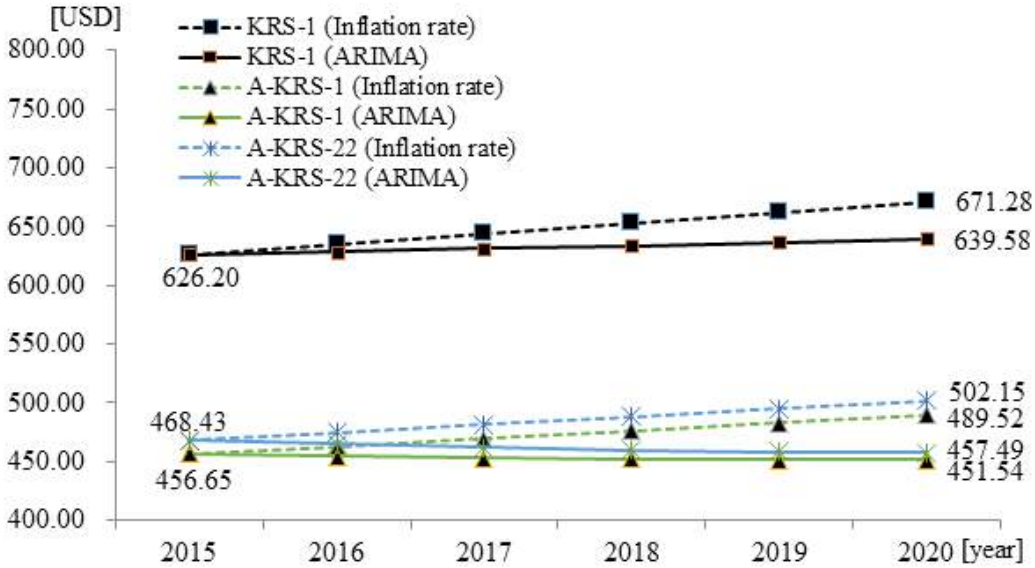
[그림 2] ARIMA 결과를 이용한 각 처분대안들의 원가 추정 결과

[그림 3]은 산업통상자원부고시(Notification No. 2015-132)에 따른 물가상승률 1.40%를

고려한 원가 추정치와 ARIMA 추정치를 사용한 처분대안들의 원가 추정치를 비교한 것이다.

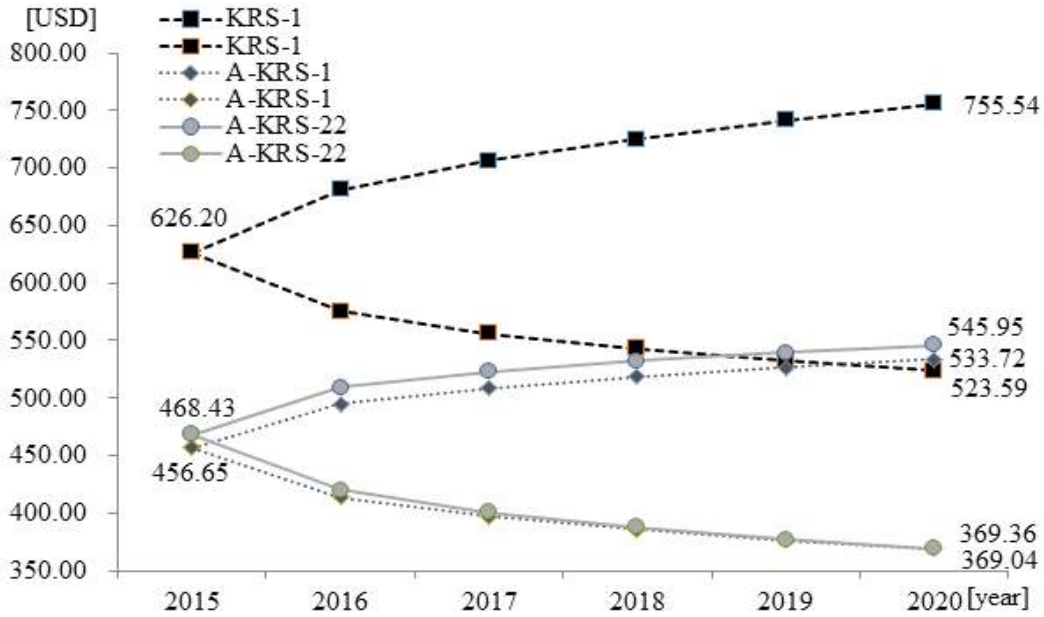
[그림 3]에서 A-KRS-21은 A-KRS-22와 거의 차이가 없고, A-KRS-22보다 원가가 항상 높게 기록되기 때문에 분석에서 제외하였다. 분석결과, ARIMA를 사용한 원가 추정치의 경우 -2.335%에서 2.136%의 변동을 가지는 반면, 할인율을 고려한 2020년의 원가추정치의 경우 모든 대안들이 2015년 대비 약 7.199%가 증가하여, ARIMA 모형대비 최대 9.95%의 원가 차이가 나는 것으로 나타났다. 따라서 기존의 물가변동률을 사용할 경우, ARIMA 모형에 비해 원가가 과대 계산되는 것으로 나타났다.

[그림 4]는 ARIMA 모형에서 도출된 신뢰구간을 이용하여 연도별 각 대안들의 원가효율성을 분석하였다. KRS-1은 2020년 최대 값 755.54 USD, 최저 값 523.59 USD로 2015년 가격에 비하여 20.7%, -16.4%의 변화가 있었다. A-KRS-1은 16.9%, -19.1%, A-KRS-22는 16.5%, -21.2%의 변동폭을 가지는 것으로 분석되었다.



[그림 3] ARIMA모형과 물가상승률을 고려한 처분대안들의 원가 추정 결과

[그림 4]에서 보는 것처럼 ARIMA 모형에서 도출된 신뢰구간을 이용하여 변동폭을 분석하면 가장 효율성이 높은 A-KRS-1과 두 번째로 높은 효율성을 갖는 A-KRS-22의 많은 부분이 겹치는 것으로 나타나고 있다. 2020년에는 A-KRS-22의 가장 낮은 값이 369.04 USD로 A-KRS-1의 값 369.36 USD를 역전하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 각 대안들의 원가 변동성을 보여주어 시나리오에 따라 원가 효율성 순위가 바뀔 수 있음을 보여준다.



[그림 4] ARIMA 모형의 신뢰구간을 이용한 원가의 변동폭 추정

3.3. 처분대안들의 시나리오 분석 결과

<표 7>은 시나리오 분석결과이다. 시나리오는 5개의 원가동인이 최저, 예측, 최고의 3가지 값을 가지기 때문에 3^5으로 구해진다. 따라서 243개의 자료를 사용하여 시나리오 분석을 실시하였다. 실제 4가지 대안 중에서 가장 효율적인 대안인 1 순위의 비율은 A-KRS-1이 72%로 가장 높게 나타났으며, 다음으로는 A-KRS-22가 28%이었다.

<표 7> 각 처분대안들의 효율성 순위 결과 – 68%의 신뢰구간 시나리오 분석

	시나리오 분석결과							
	1 순위		2 순위		3 순위		4 순위	
	사례 수	%	사례 수	%	사례 수	%	사례 수	%
KRS-1	-	-	-	-	-	-	243	100
A-KRS-1	174	72	27	11	42	17	-	-
A-KRS-21	-	-	42	17	201	83	-	-
A-KRS-22	69	28	174	72	-	-	-	-
합계	243	100	243	100	243	100	243	100

<표 8>은 각 시나리오를 100점이라 할 때, 가장 효율적인 대안에게 40점, 그 다음으로 효율적인 대안은 30점, 3번째는 20점, 마지막은 10점으로 계산하여, 총 243개 시나리오에 대한 분석결과이다.

<표 8> 각 처분 대안들의 효율성 점수

	모든 사례들의 점수				총 점수*	비율 (%)	순위
	1 순위	2 순위	3 순위	4 순위			
KRS-1	-	-	-	2,430	2,430	10.0	4
A-KRS-1	6,960	810	840	-	8,610	35.4	1
A-KRS-21	-	1,260	4,020	-	5,280	21.7	3
A-KRS-22	2,760	5,220	-	-	7,980	32.9	2
합계	9,720	7,290	4,860	2,430	24,300	100	

*: 1 순위 = 40점, 2 순위 = 30점, 3 순위 = 20점, 4 순위 = 10점

분석결과 A-KBS-1이 8,160점으로 7,980을 받은 A-KRS-22에 근소하게 앞서고 있는 것으로 분석되었다. 이는, A-KRS-22의 방법이 2 순위에서 높은 비율을 차지하여, A-KRS-1방법과의 점수 차이가 좁혀졌기 때문이다. 이러한 결과는 향후 가격 이외의 변수인 안정성이나, 가격이 실제로 예상된 변동폭을 벗어나 움직일 경우, 두 대안의 순위가 바뀔 수 있음을 암시해 준다.

또한, 이러한 결과는 실제 어느 대안이 가장 효율적인가에 대한 결과를 확률적으로 보여주는 것이다. 현재 원가를 기준으로 의사 결정을 할 경우, 단지 하나만의 선택 방법이 존재하는 것에 비해, 미래 변동성을 고려한 시나리오 분석의 경우, 변동성에 대하여 시나리오를 만들 수 있다. 이러한 시나리오 방법은 분석결과를 확률로 보여주어, 정책 결정자들에게 선택에 대한 위험도 정보를 제공하여 준다.

Ⅳ. 결 론

본 연구는 방사성폐기물 처분장 건설을 위해 필요한 재료비의 현재 가격과 미래의 가격 변동성을 고려하여 4가지 처분대안의 원가효율성을 분석하였다. 원가효율성을 비교하기 위하여 유닛모듈의 비교 분석을 실시하였다.

분석결과는 다음과 같다,

첫째, 4가지 대안의 원가분석 결과 가장 효율적인 대안은 A-KRS-1으로 도출되었으며, 두 번째는 A-KRS-22, 가장 효율성이 나쁜 대안은 KRS-1이었다. 이러한 차이는 A-KRS-1가 주요원가동인에서 가장 높은 비율의 원가를 차지하는 처분용기에서 가장 적은 직접재료비가 투입되기 때문이다. 그러나 전체 번들 당 원가의 경우 다른 원가 구성 변수들인 터널 굴착비용, 벤토나이트의 가격 등의 상쇄로 인하여 11.78 USD의 차이만을 보이고 있을 뿐이다.

둘째, ARIMA 모형을 사용하여 예측된 값을 사용한 각 대안들의 원가효율성 분석 결과, KRS-1의 경우를 제외하고, 나머지 3가지 대안은 가격이 감소하였다. 가격이 작게나마 감소하는 이유는 ARIMA 모형에서 동분과 동판, 벤토나이트, 뒷채움의 경우, 가격이 감소하는 것으로 예측되었기 때문이다.

셋째, ARIMA를 사용한 원가 추정치의 경우 원가 변동이 거의 없거나 감소하는 반면, 물가상승률을 고려한 현행 방법의 경우 2020년의 원가추정치의 경우 모든 대안들이 2015년 대비 약 7.2%가 증가한 것으로 나타났다. 따라서 기존의 물가상승률을 사용할 경우, ARIMA 모형에 비해 원가가 과다 계산되는 것으로 나타났다.

넷째, 243개 시나리오 분석결과, A-KRS-1이 8,610점으로 7,980을 받은 A-KRS-22에 근소하게 앞서고 있는 것으로 분석되었다. 이는, A-KRS-22의 방법이 2 순위에서 높은 비율을 차지하여, A-KRS-1방법과의 점수 차이가 좁혀졌기 때문이다. 이러한 결과는 실제 어느 대안이 가장 효율적인가에 대한 결과를 확률적으로 보여주는 것이다. 현재 원가로 의사 결정을 할 경우, 단지 하나만의 선택대안이 존재하는 것에 비해, 미래 변동성을 고려한 시나리오 분석의 경우, 변동성에 대하여 시나리오를 만들 수 있다. 이러한 시나리오 방법은 분석결과를 확률로 보여주어, 정책 결정자들에게 선택에 대한 위험도 정보를 제공하여 준다.

처분 대안에 대한 원가효율성 분석의 경우, 기존 연구가 거의 이루어지지 않은 점을 감안할 때, 향후 의미 있는 결과로 활용될 수 있을 것이다. 특히, 실제 사용후핵연료 처분에 관한 문제는 한국뿐만이 아니라 세계적으로도 심각한 문제 직면하게 될 것이라 예상되기 때문에, 본 연구 결과는 한국의 산업계나 정부뿐만 아니라, 사용후핵연료 처분장 건설을 고려하는 나라에게 중요한 정책적 자료로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

노형진. 2010. SPSS/Excel을 활용한 알기쉬운 시계열분석. 학현사.

백태영. 2012. 원가관리회계. 신영사.

정동빈. 2009. 시계열 수요예측. 한나래아카데미.

Box, G., and G. Jenkins. 1970. Time Series Analysis: Forecasting and Control; Holden Day: San Francisco, CA, USA.

Cho, D. K., Y. Lee, J. Y. Lee, and J., Choi. 2007. Characteristics of a geological disposal system for the increasing burn-up of spent nuclear fuel in Korea. *J. Nucl. Sci. Technol.* 44: 1306-1316.

Greene, W. H. 2003. Econometric analysis. Pearson Education: New Jersey, USA.

Kim, S. K., and J. W. Choi. 2006. Assessment of the cost of underground facilities of a high-level waste repository in Korea. *Nucl. Eng. Technol.* 38: 561-574.

Kim, S. K., M. S. Lee, H. J. Choi, J. W. Choi, and S. T. Revankar. 2009. Availability of a probabilistic cost estimation for the price effect of Cu powder and bentonite on an HLW disposal cost in Korea. *Prog. Nucl. Energ.* 51: 649-657.

Kim, S. K.; M. S. Lee, W. I. Ko, Y. Chung, and S. Bang. 2011. Cost efficiency analysis of disposal alternatives in Korea. *Prog. Nucl. Energ.* 53: 722-728.

Kim, S. K. M. S. Lee, H. J. Choi, W. I. Ko, Y. Chung, S. Bang, and K. Eun-ha. 2012. The role of pyro-processing in decreasing disposal cost in Korea. *Prog. Nucl. Energ.* 56: 7-14.

Kim, S. W. Ko, and S. Bang. 2015. Analysis of Unit Process Cost for an Engineering-Scale Pyroprocess Facility Using a Process Costing Method in Korea. *Energies* 8: 8775-8797.

Korea Atomic Industrial Forum. 2009. Nuclear Energy Yearbook. KAIF Press.

Korea Atomic Industrial Forum. 2010. Nuclear Energy Yearbook. KAIF Press.

Korea Atomic Industrial Forum. 2012. Nuclear Energy Yearbook; KAIF Press.

Korea Price Information, Corp. 2000 - 2015. Price Information of Korea. KPI Press.

Korea Price Research Center, Corp. 2000 - 2015. The Information on Commodity Prices. KPRC press.

Korea Specialty Contractors Association. 2000 - 2015. Construction Industry Wages Survey Report. Korea Specialty Contractors Association.

Lee, J. D. Cho, H. Choi, and J. Choi. 2007. Concept of a Korean reference disposal

system for spent fuels. *J. Nucl. Sci. Technol.* 44: 1565-1573.

Mowen, M. M. D. R. Hansen, and D. L. Heitger. 2014. Cornerstones of managerial accounting. Cengage Learning.

Notification No. 2015-132. 2015. Regulations for calculating radioactive waste management costs and spent fuel management fees. Ministry of Trade, Industry and Energy.

Saanio, T., and M. Kokko. 2007. KRS-1 Cost Estimation for the Underground Facilities of Korean Reference HLW Disposal System.