

대안수자원시설의 음용수 단위생산비용 산출 - 청정지하저수지 경제성에 대한 고찰 -

최재호* · 심영규** · 박남식***

Choi, Jae-Ho*, Shim, Young-Gyoo**, Park, Nam-Sik***

Unit Water Production Cost Development for Alternative Water Resource Projects - Centered on the Economics of Aquifer Storage and Recovery (ASR) -

ABSTRACT

This paper intends to develop unit water production cost (UWPC) between alternative water resources including desalination, freshwater reservoirs, single-purpose dams, underground dams, and two indirect water in-take technologies - riverbank filtration and aquifer storage and recovery (ASR). The UWPCs of water supply schemes including each alternative are determined based on project cost, and operation and maintenance estimation models, which were developed based on real project cost data. The sensitivity analysis of UWPCs reveals that ASR is the lowest cost option in producing drinkable water among the alternatives, followed by riverbank filtration and underground dam. It is expected that economics related to the finding plays a critical role in supporting water resources planning and budget allocation for central and local water authority in Korea.

Key words : Alternative water resources, Aquifer storage and recovery, UWPC, Sensitivity analysis

초록

본 연구는 대체수자원시설 - 해수담수화, 식수용저수지, 우수전용댐, 지하댐, 그리고 두 개의 간접취수 방법인 강변여과와 청정지하저수지 - 을 고려한 다양한 용수공급시스템별 음용수 단위생산단가를 산정하기 위한 종합적인 방법과 분석결과를 제시한다. 대체수자원시설 건설부터 도수관리를 거쳐 후처리시설을 통한 음용수 생산 지점까지의 모든 건설비용과 운영관리를 반영하기 위하여 필요한 데이터를 취합하고 개별 총사업비와 운영관리비 추정모델을 개발하였다. 단위생산단가에 영향을 주는 후처리시설과 도수관리의 길이, 그리고 음용수 생산용량에 대한 민감도 분석결과 청정지하저수지가 가장 비용이 작은 대체수자원시설로 분석되었으며 개별 대체수자원시설과 다양한 용수공급시스템별 경제성 정보는 수자원시설 계획 및 예산 분배 의사결정을 지원할 것으로 예상된다.

검색어 : 대체수자원, 청정지하저수지, 단위생산단가, 민감도분석

* 종신회원 · 교신저자 · 동아대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · DongA University · jaechoi@dau.ac.kr)

** 동아대학교 법학전문대학교 부교수 (School of Law, DongA University · youngs@dau.ac.kr)

*** 종신회원 · 동아대학교 토목공학과 교수 (DongA University · nspark@dau.ac.kr)

Received February 23, 2017/ revised March 22, 2017/ accepted April 1, 2017

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

대체수자원시설은 주로 섬 또는 산악지형과 같이 댐, 하천수, 지하수 등의 전통적인 용수공급방식을 적용하기 어려운 조건하에서 사용되는 새로운 물공급방식으로 인식된다(Park, 2011). 대체수자원시설에 대한 정의가 명확히 수립되어 있지는 않지만 국내에서는 일반적으로 빗물이용, 해수담수화(Desalination, 이하 DES), 지하댐(Underground Dam, 이하 UGD), 강변여과(Riverbank Filtration, 이하 RBF), 식수용저수지(Freshwater Reservoir, 이하 FWR), 용수전용댐(Single-purpose Dam, 이하 SPD) 등이 대체수자원시설로 인식되고 있다. 이외에도 아직 국내에서는 시험시설 구축단계로서 실제로 시행되고 있지는 않은 청정지하저수지(Aquifer Storage and Recovery, 이하 ASR)도 그 중의 하나이다.

“청정지하저수지”란 일반적으로 “주입관정이나 함양지 등의 인공적인 방법을 이용하여 지표수를 대수층에 주입시키고 일정기간 저장시키거나 유하시킨 후 양수하여 사용하기 위한 목적으로 활용되는 대수층과 일련의 시설”을 말한다(Son et al., 2014). 특히, ASR은 수자원이 풍부한 시기에 그 잉여 수자원을 지하대수층에 저장하고, 이를 물이 부족한 시기에 양수하여 활용하는, 일종의 수자원 저장기술이며, 지하대수층에 수자원을 저장하는 기간 동안 자연정화의 효과를 기대할 수 있는 비교적 새로운 개념의 기술이다.

전 세계적으로 현재 운영 중에 있는 250여개 사례 가운데 미국에서만 세계 최대 규모의 라스베가스 시설(42개의 주입정, 일 594,245 m³/일 주입)을 포함하여 약 80% (204건)가 분포되어 있다. 미국내 ASR의 수자원 저장 및 정화 기능을 활용한 응용분야는 생활용수 및 관개용수 공급, 계절적 물 수요 불균형 문제 해결을 위한 수자원 저장, 하수방류수 처리, 제조시설 열 조절을 위한 주입 원수로 활용, 어류 보호, 생태계 보존, 운하 유지, 해수침투방지 등 총 24가지에 이른다(Pyne, 2014).

유럽의 경우 물 문제 해결을 위해 대수층을 인공적으로 충전하는 방법으로 강변여과(142건)와 침윤연못(59건)을 주로 활용하며 물 스트레스가 높은 스페인, 독일 북부 지역, 네덜란드, 영국 등에서 ASR 방식(30건)이 종종 시험시설이나 연구목적으로 사용되고 있다(DEMEAU, 2012). 호주는 현재 타당성조사 단계인 8건을 포함하여 대략 15건 정도의 사례가 있는 것으로 조사되며, 최근 재생수를 주입원수로 활용한 ASR의 생산원수가 음용수 수질기준에 충족한다는 만족할 만한 결과를 보여 이 분야의 연구가 추가적으로 진행되고 있다(SKM and CSIRO, 2012). 최근에는 국내를 비롯하여 중국, 카타르, 아랍에미리트 등 중동국가에서 시험시설 구축 및 실증화를 위해 많은 연구 노력을 기울이고 있다.

전 세계 국가별 ASR 사례를 조사한 결과 ASR 프로젝트의

저장 용량은 점차 증가추이를 보이며 앞서 언급한 응용분야별 용수공급목적을 달성하는 차원에서 지역별 및 국가별 물 공급 안보의 신뢰성을 높이기 위한 방향으로 진행되고 있다. 그러나 국제적으로 가장 성숙한 ASR 시장인 미국에서는 대략 30% 가까이 가 기대수명이나 사용목적을 충족시키지 못하고 조기폐쇄 된 것으로 보아 대체수자원시설 가운데서도 운영상의 위험이 다소 높은 것으로 보여 사전 지리수질학적 지형의 특성에 대한 타당성 검토가 매우 중요한 것으로 사료된다(Bloetscher et al., 2014). ASR의 시장 활용 및 확산에 또 다른 저해요인은 여러 대안용수공급시설(Alternative Water Resources, 이하 AWR; 대체수자원시설과 동의어)간 경제성에 대한 연구가 미비한 점이다.

기존의 AWR간 경제성 비교 평가는 주로 실무 전문가들의 주관적인 비용의견에 근거한 경우가 대다수이다. 미국 남플로리다 수자원관리청(SFWMD)은 2007년도에 ASR을 포함하여 여러 대안시설들의 경제성을 전문가의 비용정보를 이용하여 비교하였으나 수질을 고려하지 않고 단순한 용수공급 가격에 제한되었으며(CDM, 2007), Carollo Engineers (2006)는 역삼투압 처리 전처리 방식으로 강변여과, 극여과 및 전통적 정수처리방식을 비용에 대한 의견정보를 근거로 분석하였다. 하지만 이러한 비용 정보에 근거한 예측 결과는 오차의 범위가 매우 넓어(예, ±30%) 그 결과를 수용하는데 어려움이 있다.

국내의 수자원 시설 경제성과 관련된 문헌의 경우도 전문가의 주관적 비용 정보를 사용하거나 단일 건설 프로젝트 사업계획 목적의 일환으로 전통적 용수공급시설과 1개 또는 2개의 대안사업을 매우 제한적인 사례를 근거로 비교 검토하는 경우가 주였다. 본 연구의 목적은 국내에서 적용되어 실제로 활용되고 있는 여러 대안용수공급시설(FWR, DES, SPD, UGD, RBF)과 ASR의 경제성을 음용수 생산 관점에서 실제 사업비와 운영비에 근거하여 비교·검토하고 비용효과적 측면에서 다양한 대체수자원시설 건설을 위한 지자체의 합리적 예산배정 및 용수공급계획 의사결정을 지원하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

ASR의 경제성은 AWR을 활용한 음용수공급시스템(Water Supply System)의 생산단가(Unit Water Production Cost, 이하 UWPC)를 비교함으로써 평가 할 수 있다. Fig. 1은 UWPC 산정에 포함되어야 하는 핵심구성요소와 음용수 생산프로세스를 보여준다. Fig. 1의 AWR은 ASR을 제외하고 현재 국내에서 사용된 실적이 있는 총 5개 시설을 선정하였으며 그중 두 개는 간접취수방법인 RBF와 ASR이다. 각 시설로부터 생산되는 원수는 수질이 상이하며 도수관로(Transmission pipeline)와 각 대안시설과 연계된 후처리시설 - 단순 후처리, 전통적 수처리, 고도처리(Fig. 1의

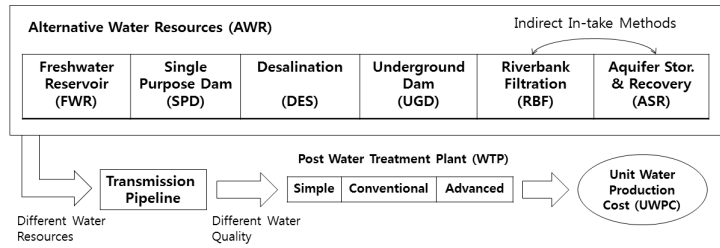


Fig. 1. UWPC Estimation of Water Supply Systems Using Different Alternative Water Resources

Post Water Treatment Plant, WTP) - 을 통해 최종적으로 음용수가 생산된다.

단순 후처리시설은 DES에서 사용되며 여과, 소독, 산성도 조절 프로세스 등이 포함된다. 전통적 정수처리시설은 응집, 침전 및 모래여과로 연결되는 기본적인 정수처리공정이며, 고도처리는 전통적 WTP에 오존, 활성탄, 막 등을 추가한 정수처리공정이다. 각각의 대안용수공급시설을 활용한 음용수생산시스템별 UWPC를 산정하기 위해서 Fig. 1에서 보이는 요소별 비용데이터를 취합하였으며 필요한 경우 관련 문헌에서 제시된 가정 조건을 사용하였다. ASR은 국내에서 아직 실적이 없으므로 미국의 사례로부터 확보한 실적데이터를 사용하였으며 산출된 UWPC의 신뢰성 확보를 위해 생산단가에 영향을 미치는 불확실성 변수에 대하여 민감도 분석을 실시하였다.

2. 대안수자원시설 총 사업비 및 운영 관리비 추정 모델 개발

2.1 대안수자원시설 프로젝트 데이터 수집

본 과제의 최종 목표는 총 6개의 AWR과 도수관로, 그리고 후처리시설을 통해 음용수를 생산하는 단계까지의 모든 프로젝트 총사업비와 운영관리비를 고려한 UWPC를 산정하는 것이다. 이를 위해서는 우선 시스템별 다양한 관점에서의 특성에 대해 조사할 필요가 있다. Table 1은 대안별 경제성 분석을 위해 확보된 실적 및 사업계획 데이터와 특성을 설명하며 구체적으로 각 대안별 최종 사용 목적(End-use), 주입 원수(Source water), 장·단점(Pros and cons), 국내에서의 적용 실적(Current situation in Korea), 본 연구를 위해 취합된 실제 샘플 데이터 수(Data sampled for this study), 샘플 데이터 용량 범위 및 중간값(Sample capacity range and median), 총사업비 포함 설계 요소(Total project cost components), 그리고 마지막으로 음용수 생산단가 산출에 추가적으로 포함되어야 할 총사업비 비용항목(Total project cost components not included for drinkable water supplies)에 대해서 상세히 설명하고 있다.

Table 1의 취합된 모든 AWR 샘플 데이터의 일 용수공급용량의 범위는 서로 상이하며 특히, FWR과 DES는 주로 도서지역 또는

산간지역의 소규모 용수개발을 위해 사용되고 있고 나머지 시설은 중규모 이상의 용수개발 목적으로 주로 사용된다. 단, ASR은 아직 국내에서 시행되지 않았기 때문에 미국 플로리다주 11건의 취합된 실적 데이터 가운데 지표수를 원수로 사용하며 공공용수 공급을 목적으로 하는 4건으로부터 본 과제에 필요한 데이터를 확보하였다.

2.2 총 사업비 및 운영관리비 추정 회귀모델 개발

앞에서 수집된 샘플 데이터를 사용하여 선형회기분석을 통해 대안용수공급시설을 포함하는 음용수공급시스템의 생산단가 산정에 필요한 총 사업비 및 운영관리비 추정 모델을 개발하였다. Table 2는 대안용수공급시설별 총 사업비 추정 모델과 결정계수, 그리고 개발모델의 적용 가능 범위를 보여준다. DES는 Table 1에 설명되어 있는 바와 같이 중간값이 매우 작으며(즉, 30 m³/d) 대다수의 프로젝트가 1,000톤 미만의 소규모시설이다. 1,000톤 이상의 국내 사례는 단 3건만 포함되었으므로 DES는 소규모와 대규모 Table 2와 같이 두 개의 모델로(DES-small, DES-large)구분하였다.

Table 2의 AWR은 DES를 제외하고 모두 후처리시설과 연결되어 음용수를 생산한다. AWR 사례조사결과 FWR, UGD, SPD는 일반적으로 원수의 수질이 양호하며 후처리시설로 대부분 급속처리방식의 WTP를 사용하고 있다. 완속방식과 막여과 방식도 종종 사용되고 있으나 사례가 매우 제한적이며 특히, 매우 적은 용량의 처리시설에서 주로 사용되므로 급속처리시설을 AWR의 주요 연계 후처리시설로 가정하여 총 사업비와 추정모델을 개발하였다. 총 24건의 급속처리방식의 WTP 실적 데이터를 수집하였으며 개발된 총 사업비 추정모델은 Eq. (1)과 같다. 여기서 사용된 24건의 WTP는 대부분 호소수를 사용하며 1건의 복류수, 1건의 표류수를 사용하고 있는 것으로 조사되었다.

$$Y_{WTP} = -0.2022x^2 + 621.76x + 5173.8, \quad (1)$$

$$R^2 = 99.4(\%)$$

x : 1,000 m³/d, y : 백만원 (2006년8월 기준)

Table 1. Alternative Water Resources Project Characteristics and a Summary of Data Collection

Types	ASR	UGD	FWR	DES	RBF
End-use	Source Water for WTP	Source Water for WTP	Source Water for WTP	Drinkable Water	Source Water for WTP
Source Water	Surface water/ Underground water/ Recycled water	Underground Water	Surface Water	Seawater/ Brackish water	Surface water/ Underground water
Pros	<ul style="list-style-type: none"> • Cost-effective water supplement • No water evapotranspiration losses • Less adverse environmental effects 	<ul style="list-style-type: none"> • No submerged area • Reduced evaporation • Less susceptibility to pollution • Less effects on ecosystems 	<ul style="list-style-type: none"> • Stable provision of clean water resources • Small effects on ecosystems • Low O&M costs • Less mineral content 	<ul style="list-style-type: none"> • Continuous supplies of large amounts of water • Continuous water production lowers the production costs 	<ul style="list-style-type: none"> • Year-round stable water supply • Prevention upstream pollution prevention • Simpler treatment process possible • Reduced sludge
Cons	<ul style="list-style-type: none"> • Low recoverability in unfavourable hydro-geological conditions • Greater risks in predicting production rates (vs. ground tanks) 	<ul style="list-style-type: none"> • Site selection difficulty • Relatively high mineral content • Relatively high O&M costs • Large water supplies at one time are impossible 	<ul style="list-style-type: none"> • Water evaporation loss • High land acquisition cost • Eutrophication and red tide problems • High water pollution possibility 	<ul style="list-style-type: none"> • High initial investment & water production costs • Occasional operation during drier or tourist seasons (small scale) • Low O&M skills in local Gov. (small scale) 	<ul style="list-style-type: none"> • High intake water costs • High initial construction costs (i.e., collector wells) • Initial operating cost is relatively high because of trial and error
Current Situation in Korea	No project track records	6 UGDs operational 5 for irrigation and 1 for residential water supply	113 FWRs operational Average storage capacity and water provision for living- 198,000m ³ ,746m ³ /d	101 (100 standard desalination processes or slight variations and 1 electro dialysis method)	6 (4 vertical wells, 1 horizontal collector well, 1 combined)
Data Sampled for this Study	4 (USA projects sourced from SFWMD, 2007)	1 from a real project, and 18 projects pending cost estimates	6 from detailed designs, 11 from projects pending cost estimates	84 from real projects and 2 from projects pending cost estimates	3 from real projects
Sample Capacity Range (m ³ /d)	10,000 ~ 45,000	5,000 ~ 77,000	200 ~ 15,000	Small scale : 100 ~ 1,000 Medium scale : 1,100 ~ 50,000	20,000 ~ 60,000
Median (m ³ /d)	25,000	13,000	1,300	30	22,000
Total Project Cost Components	Total project cost, including pre-treatment and/or post-treatment, injection wells, monitoring wells, surface facilities, etc.	Total project cost, including underground water impermeable barriers, water in-take facilities, etc.	Total project cost, including reservoir construction, , water in-take facilities, etc.	Total project cost, including water in-take facilities, desalination processes, operational buildings, etc.	Total project cost, including in-take facilities, water conveyance pipes, water treatment plants, etc.
Total Project Cost Components Not Included for Drinkable Water Supplies	Water conveyance pipeline construction to a WTP and the WTP itself	Water conveyance pipeline construction to a WTP and the WTP itself	Water conveyance pipeline construction to a WTP and the WTP itself	Not applicable	Water conveyance pipeline construction

Table 2. Project Cost Estimation Model for AWR Projects

No.	AWR	Project Cost Estimation Model	R ² (%)	Model Applicable Range (m ³)
1	FWR	$y = 5071.8x + 6881.2$	88.9	200 ~ 15,000
2	UGD	$y = 6267.1x^{0.4868}$	88	50 ~ 77,000
3	SPD	$y = 9328.2x^{0.7319}$	91.5	4,000 ~ 220,000
4-1	DES-small	$y = 4959.5x + 198.77$	90	100 ~ 1,000
4-2	DES-large	$y = 4801.9x^{0.7434}$	99.7	1,100 ~ 50,000
5	RBF	$y = -37.808x^2 + 5357.9x - 70626$	99	20,000 ~ 60,000
6	ASR	$y = 5462.7\ln(x) - 12136$	83.2	10,000 ~ 45,000

x: 1,000m³/d, y: Million Won (at 2006.08)

Table 3. Project O&M Cost Estimation Model for AWR Projects

No.	AWR	WTP O&M Estimation Model	R ² (%)	Model Applicable Range (m ³)
1	FWR	$Y_{FWR} = Construction\ Cost \times 0.3$	N.A	N.A
		$Y_{WTP} = -0.0049x^2 + 12.981x + 114.32$	99.4	1,000 ~ 100 million
2	UGD	$Y_{UGD} = Construction\ Cost \times 0.5$	N.A	N.A
		$Y_{WTP} = -0.0049x^2 + 12.981x + 114.32$	99.4	1,000 ~ 100 million
3	SPD	$Y_{SPD} = Construction\ Cost \times 0.5$	N.A	N.A
		$Y_{WTP} = -0.0049x^2 + 12.981x + 114.32$	99.4	1,000 ~ 100 million
4-1	DES-small	$y = -73.649x^2 + 320.57x + 60.344$	99	100 ~ 1,000
4-2	DES-large	$y = 4801.9x^{0.7434}$	99	1,100 ~ 50,000
5	RBF	$y = 707.53 \ln(x) - 1498.4$	99.5	20,000 ~ 60,000
6	ASR	$y = 50.368x - 1154.6$	100	38,000 ~ 45,000

x: 1,000m³/d, y: Million Won (at 2006.08)

Table 3은 대안시설별 운영관리비 추정 예측모델을 보여주고 있으며 총 사업비 추정모델과 동일하게 선형회기분석을 사용하였다. 아웃라이어 제거를 통해 결정계수가 매우 높게 도출되었으며, ASR의 경우 100%로 분석된 이유는 운영비데이터를 단 2건에서만 수집할 수 있었기 때문이다. Table 3의 가장 오른쪽에 보면 개발된 추정모델을 적용할 수 있는 음용수 생산량 범위가 제시되어 있다. Table 3에서는 FWR, UGD, SPD의 경우 개별 시설의 운영관리비 산출은 현재 기관의 회계방식 차이로 불가능하기 때문에 국토해양부 관련문헌에서 제시하고 있는공사비 * 0.5% (댐 종류의 경우 - UGD와 SPD) 기준을 사용하고 식수전용저수지는 댐 구조물에 비해 유지관리비용이 적은 것으로 가정하여 0.3%를 적용하였다.

FWR, UGD, SPD와 연계된 WTP는 앞서 설명한 바와 같이 급속처리방식이며 수집된 데이터 분석을 통해 운영비 추정모델 (Y_{WTP})을 개발하였으며 Table 3에 제시되어 있다. DES 운영비 산정기준은 “일자리 만들기 범용안 재정소요 추계(Joo et al. 2010)를 참조하였으며, DES-large 운영관리비 추정모델은 2건의 사업계획 보고서에서 제공하는 운영비 예측 데이터를 사용하였다. 강변여과시설의 운영관리비는 「낙동강 강변여과수 사업 타당성 재조사」(KDI, 2012) 제시하는 운영비 산정기준을 사용하였다. ASR은 4건의 사례 중 타 대안사업과 활용 목적이 동일한 2건의 실적 데이터를 사용하여 운영비를 추정하였다. 특히, Table 3에 제시된 회기모델의 결정계수가 높은 이유는 사전에 가정된 운영비 산정기준을 사용하거나 운영비 실적 데이터가 매우 제한적인 것에 기인한다.

3. 대안용수공급시스템간 UWPC 산출 방법 개발

3.1 음용수 생산단가 산정 방법

대안용수공급시스템별 UWPC를 산정하기 위해서는 총 사업비 추정모델, WTP 총 사업비 추정모델, 대안용수공급시설별 및 정수

처리시설 운영비 추정모델 값을 계산하여야 한다. 그 다음으로 경제성 분석기간, 할인율, 용수공급시스템별 내용연수, WTP의 내용연수 등의 변수값을 설정한 다음 시설물의 자본비와 연간 운영비의 합을 연간 음용수 생산량으로 나누어 대안용수공급시스템별 UWPC를 구할 수 있다. 음용수 생산단가를 산정하는데 있어서 DES의 경우 WTP가 불필요하므로 WTP의 사업비와 운영비를 고려할 필요가 없다. 그러나 대안별 취수시설부터 WTP까지의 송수관로의 길이와 사공환경에 따른 공사비는 대안용수공급시스템의 UWPC에 상당한 영향을 미치므로 최적의 프로젝트 대안 선정시 이 부분을 반드시 고려해야 할 것이다. 이 부분은 최근 환경부 연구로 수행된 “수도시설 표준운영비 및 공사비 산정 보고서”(DOE, 2015)에 정리되어 있는 표준공사비 산정공식을 활용하였다.

3.2 생산단가 영향 변수 결정

경제성 분석에 적용하는 분석기간은 일반적으로 시설물의 내용연수와 같거나 그보다 짧게 하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 제안하는 대안용수공급시스템별 내용연수는 현재 국내의에서 적용되고 있거나 관련 문헌의 내용을 참조하였다. FWR의 내용연수는 투자조사편람-농업부문(경제기획원, 1982)에 명시되어 있는 바와 같이 수명을 70년으로 고려하였다. SPD는 「댐설계기준·해설」(KWRA, 2011)에는 50년을 적용하는 것이 일반적이라고 제시하고 있고 기존 운영중인 댐과 현재 건설 및 계획중인 댐의 경제성 분석에 적용된 내용연수도 모두 50년을 적용한 점에서 50년을 적용하였다. UGD도 유사한 토목구조물로 판단하여 이와 동일하게 50년을 적용하였다(K-water, 2013).

RBF와 ASR의 경우, 「댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률 시행령」 제27조에서는 상수도사업의 경제성 분석을 완공 후 45년을 기준으로 적용하도록 하였고 「낙동강 강변여과수 사업 타당성 재조사」(KDI, 2012)에서도 45년을 적용하였으므로 본 연구에서

Table 4. Factors Affecting UWPC and its Values

Influencing Factor	Value (unit)	Durability life	Value (year)
Interest rate	5 ~ 6 (%)	FWR	70
RBF operation rate	90 (%)	UGD	50
DES operation rate	90 (%)	SPD	50
ASR operation rate	90 (%)	DES	20
Water transmission pipeline (Average)	6,777 (km)	RBF	45
Cost per unit pipeline construction	514,220 (won/m)	ASR	45
Material cost for pipeline	694,971 (Won/m)	Water transmission pipeline	30
Construction Cost Index	KICT Data		

*Water Transmission Pipeline Size : Steel pipe (900 mm), Soil Depth : 1.5 m

도 45년을 적용하였다. DES와 일반 WTP의 내용연수는 「중·대규모 해수담수화 기본조사 보고서」(K-water, 2005)의 경제적 타당성 검토의 내용을 참조하여 각각 20년, 30년으로 설정하였다.

대안용수공급시스템별 UWPC에 영향을 주는 요인과 내용연수는 Table 4에 정리되어 있다. 이자율은 보통 개발도상국 사회간접자본의 경우는 7~8% 이상, 선진국은 보통 5~6% 수준을 적용하고 있으며 본 연구에서는 6.0%로 가정하였다(KDI, 2001; KDI, 2012). 가동률은 시설별 경제성 평가 자료에서 일반적으로 사용되고 있는 90%를 사용하였으며 시설별 취수시설에서 음용수 생산을 위한 WTP까지의 송수관로 연장길이는 FWR의 총 19건 사례의 평균과 표준편차를 적용하였다. 송수관로 자체비와 공사비는 「수도시설 표준운영비 및 공사비 산정 보고서」(DOE, 2015)에서 제공하는 값을 사용하였다.

마지막으로 모든 시설물의 UWPC를 비교하기 위하여 동일시점의 생산단가를 구하여야 한다. 본 연구에서는 ASR의 사업비와 운영관리비 산정 시점인 2006년 8월을 기준으로 모든 추정모델과 UWPC를 결정하였다. 여기에서 사용되는 비용의 시간 조정을 위하여 한국건설기술연구원에서 제공하고 있는 건설공사비지수를 적용하였다. 건설공사비지수는 2000년도 1월부터 제공되기

때문에 그 이전의 데이터는 1999년 데이터만 고려하였으며 생산자물가지수와 공사비 지수를 동시에 활용하였다.

3.3 간접취수시 후속 수처리 공정 검토

직접 표류수를 정수하는 방법에 비해 강변 대수층을 통한 간접취수방식인 RBF나 ASR의 경제성은 취수가능 수량과 수질, 취수 위치 등에 영향을 받는다. 취수가능 수량은 목표 수량을 취수하기 위해 필요한 우물의 수량에 따라 결정되기 때문에 시설의 건설비에 직접적인 영향을 준다. 두 번째 취수 수질은 수질 상태에 따라 후속 수처리 공정이 선정되므로 약품비 및 운영비 등에 영향을 준다. 마지막 입지 조건에 따라 송수관로 등 추가되는 시설의 규모가 결정되므로 경제성에 영향을 준다. 따라서 이러한 간접취수시설 운영비는 연계 운영되는 정수장별 기존 운영비에 추가되는 시설비와 처리공정의 변화에 따른 운영비를 반영할 필요가 있다.

본 연구에서는 기존 국내의 사례를 바탕으로 하여 Table 5에서 제시된 바와 같이 RBF에 적용 가능한 후속 수처리 공정을 다음 아래 표와 같이 유형별로 분류하였다. 본 연구에서 RBF 운영비 산정에 사용된 3건의 데이터는 아래 표의 유형 3과 4에 해당하는 경우로 일반 표준정수처리시 보다 약 50% 이상의 운영비가 지출되

Table 5. Post Water Treatment Process Applicable to In-take Water Quality

Type	Water quality level after RBF process		Post Water Treatment Process	Cases in Korea
1.	High	Fe, Mn quality criteria met	Indirect in-take → Aeration → Sand filtration → Disinfection	None
2.	Good	Low turbidity	Indirect in-take → Mixing → Coagulation → Sedimentation → Sand filtration → Disinfection	Sokcho, Gapyeong
3.	Good	Fe, Mn rreha	Indirect in-take → Aeration → Mixing → Coagulation → Sedimentation → Sand filtration → Disinfection	Yonsan Military Base, Changwon Daesan and Bukmyeon
4.	Low	Odor, flavor	Indirect in-take → Mixing → Coagulation → Sedimentation → Sand filtration → Advanced Treatment → Disinfection	Haman Chiseo

*Updated and rewritten based on OWS (2005)

는 것으로 조사되었다. 그 이유는 포기과정을 추가하였을 경우와 고도정수처리를 추가로 할 경우 약품비에서는 다소 감소가 될 수 있으나 수선유지비와 전력비에서 더 많은 운영비가 소요되기 때문이다.

ASR을 포함한 다른 대안 시설의 경우도 마찬가지로 인근 WTP를 활용할 경우 생산단가는 더욱 낮아질 수 있다. 실제로도 본 연구과정에 사용된 공공용수 생산 목적의 ASR의 경우 자체적으로 여과-소독-pH 조정의 간략한 후처리 공정만을 거친 용수를 공급하고 있다. 그러나 타 대안시설과 동등한 비교 조건을 만족시키고 RBF와 ASR의 수질정화능력을 고려하여 Eq. (1)과 Table 3에 제시된 표준 WTP의 사업비와 운영비를 반영하여 RBF와 ASR의 UWPC를 산정하였다.

4. 대안용수공급시스템간 음용수 UWPC 비교

4.1 음용수 UWPC 산출

앞에 기술한 바와 같이 UWPC 영향변수의 값을 설정 후 각 음용수 대안공급시스템별 시공에서 후처리시설을 통한음용수 생산 단계까지에 이르는 모든 제반 비용을 합산하였다.

그리고 이 비용을 후처리시설에서의 연간 생산용량으로 나누어 음용수의 생산단가를 산정한 연간등가비용법(Equivalent Uniform Annual Cost : EUAC)을 이용하였다. 연가등가비용은 각 공급방안의 수명이 서로 상이할 경우 이를 상호 조정 및 보정함으로써 여러 대안간의 비용을 비교 평가하는데 가장 적절한 방법이다. Fig. 2는 각 대안별 일 음용수 생산량에 대한 UWPC의 변화를 도식화한 그림이다. 대안별 개발용량의 범위가 상이한 것은 운영비 추정모델 개발에 사용된 데이터의 범위가 서로 다르기 때문이다 (예, FWR 운영비 추정모델은 일 500톤에서 1.5만톤 음용수 생산량 범위에서 적용 가능).

대안별 UWPC를 비교한 결과 개발용량이 5천톤 미만에서는

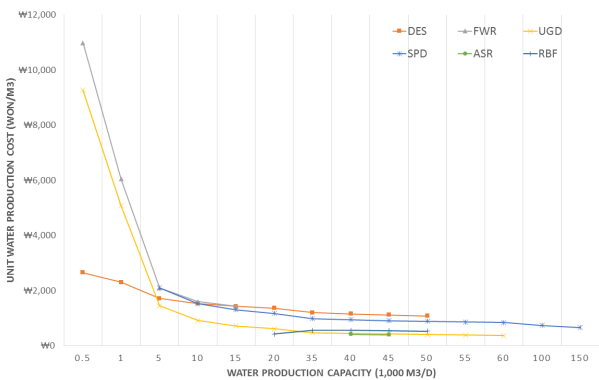


Fig. 2. UWPCs for Each Water Supply System Incorporating Different Water Resources Project

Table 6. Relative Cost of Each Alternative Water Resources Based on DES

Pipeline AWSS	30,000 ton	35,000 ton	40,000 ton	45,000 ton	Average
DES	100%	100%	100%	100%	100%
SPD	81.6%	78.3%	78.3%	78.7%	79.2%
RBF	27%	43.5%	45.5%	46.6%	40.7%
UGD	36.4%	36.4%	34.9%	34.6%	35.6%
ASR	N.A	N.A	28.5%	29.6%	29.1%

대체로 FWR와 UGD, DES의 순서대로 생산단가가 높다. 현재 국내 도서지역과 산간지역에서 주로 활용되고 있는 소규모 FWR와 DES는 매우 생산단가가 높은 시설임을 알 수 있다. 개발용량이 일 일만톤에서 1.5만톤 구간은 FWR, DES, SPD의 UWPC 차이가 매우 미미한 구간이며, 개발용량이 1.5만톤 이상인 경우와 DES 운영비 추정모델을 적용할 수 있는 5만톤까지는 DES의 UWPC가 가장 높다. 개발용량이 1.5만톤 미만인 경우 해안가 인근의 물 부족지역으로 FWR과 UGD과 같은 대규모 사업부지 마련이 여의치 않은 경우 DES가 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

반면에 5천톤 이후부터는 UGD, RBF, ASR은 UWPC가 매우 낮으며 특히, ASR은 타 대안용수공급시설 가운데 가장 낮은 UWPC를 보인다. RBF의 UWPC가 2~4만톤 범위에서 증가하는 이유는 사업비 추정모델에 사용된 데이터중 소규모(2만톤 수준)에서는 수직정을 설치하기 때문에 사업비가 매우 적으나 대규모(5만톤)에서는 방사형집수정을 설치하여 사업비가 급격히 증가한데 기인한다. Table 6은 생산용량 3~4.5만톤까지의 상대적 생산단가를 퍼센트로 보여준다. SPD의 경우 DES 생산단가의 약 79% 수준이며 RBF는 약 41% 수준임을 짐작할 수 있다. 반면에 UGD는 약 36% 수준이고 특히, ASR은 개발용량 4만톤과 4.5만톤 범위에서 DES 생산단가의 약 29% 수준인 것으로 분석되었다.

4.2 민감도 분석

앞서 도출된 대체용수공급시스템별로 UWPC의 신뢰성을 확보하기 위하여 가장 영향력이 높다고 판단되는 후속 수처리 공정과 상수관로 연장길이에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 특히, ASR, RBF와 연계된 후처리 정수처리방법을 Table 6의 결과에 사용된 표준정수처리방법과는 다르게 고도 정수처리와 관련된 추가 시설 비용과 운영비를 반영한 후 상수관로 연장을 각각 15 km, 25 km, 35 km별로 변경시키면서 UWPC의 변화를 조사하였다. 고도 정수처리시설의 사업비 증액과 운영비 증가분을 반영하여 FWR을 제외한 나머지 모든 대안시설의 생산단가 산정이 가능한 4만톤과 4.5만톤에 대해서 UWPC를 재 산정하였으며, 분석 결과 ASR은 고도정수처리 운영비를 반영하였을 경우에도 앞서 표준정수처리방

Table 7. Sensitivity Analysis on UWPCs Varying Pipeline Extension and Water Treatment Capacity

AWSS \ Pipeline	15 km		25 km		35 km	
	40,000 ton/d	45,000 ton/d	40,000 ton/d	45,000 ton/d	40,000 ton/d	45,000 ton/d
DES	1,155 won (100%)	1,114 won (100%)	1,155 won (100%)	1,114 won (100%)	1,155 won (100%)	1,114 won (100%)
UGD	439 won (26.3%)	417 won (37.4%)	482 won (41.7%)	456 won (41%)	525 won (45.5%)	494 won (44.3%)
SPD	941 won (81.5%)	908 won (81.5%)	984 won (85.2%)	947 won (85%)	1,027 won (88.9%)	985 won (88.4%)
RBF	563 won (48.7%)	553 won (49.6%)	609 won (52.7%)	594 won (53.3%)	654 won (56.6%)	634 won (56.9%)
ASR	400 won (34.6%)	389 won (34.9%)	444 won (38.4%)	427 won (38.3%)	487 won (42.2%)	466 won (41.8%)

*AWSS : Alternative Water Supply System

법보다는 UWPC가 증가하였지만 여전히 타 대안보다는 낮으며, DES에 비하여 34.6~42.2% 수준임을 알 수 있다(Table 7). 또한 연장길이가 증가하면서도 UWPC가 증가함을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 지금까지 도서 및 산간지역 위주로 국내에서 적용되어온 다양한 대체수자원시설과 이를 활용한 음용수 공급시스템의 경제성을 종합적으로 비교·분석하였다. 그 과정에서 각 대안별 차이점, 다양한 시공방법, 사업주체의 다양성, 데이터 취합 등 여러 가지 면에서 애로사항들이 적지 않았다. 기존의 유사한 연구들은 2~3개의 대안들을 전문가의 비용데이터에 대한 의견을 근거로 경제성을 비교 평가하였다는 점에 비해, 본 연구는 현재 시점에서 실제 사용되고 있는 대부분의 대안용수공급시스템을 모두 분석, 비교, 평가의 대상으로 고려하였으며, 특히 비용데이터에 대한 전문가의 의견이 아닌, 실제 기본설계 및 실시설계 수준의 비용데이터를 활용하여 단위생산단가의 예측 정확성을 높이고자 한데 가장 커다란 차별점이 있다고 할 수 있다.

지금까지의 연구 분석 결과, 총 6개 대체수자원 공급방안들 가운데 ASR, UGD, RBF의 UWPC 비용이 다른 공급방안들에 비해서 절반 이하로 낮은 수준이며 특히, ASR의 비용이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 앞서 도출된 대체용수공급시스템별로 UWPC의 신뢰성을 확보하기 위하여 가장 영향력이 높다고 판단되는 후속 수처리 공정과 상수관로 연장길이에 대해 민감도 분석을 실시하였으며, 민감도 분석 결과 ASR은 포기시설이 추가된 고도정수처리 운영비를 반영하였을 경우에도 타 대안보다 생산단가가 가장 낮으며 가장 높은 DES에 비하여 약 40% 수준임을 알 수 있었다.

다만 ASR과 RBF의 경우 사업비와 운영관리비 추정모델 개발에

사용된 프로젝트의 개수가 매우 제한적이므로 추가적인 비용데이터를 통해 모델의 신뢰성을 높일 필요가 있다. 또한 RBF와 ASR은 기후변화에 따른 강물의 부족 현상이 발생할 수 있어 물 용수의 확보측면과 앞서 설명한 운영상의 리스크(다양한 클로킹 현상)로 인해 타 대안에 비해 취약할 수 있다는 한계점이 있다. 앞으로 이러한 다양한 대체수자원공급시스템의 UWPC 산출을 위한 체계적인 비용데이터 관리방식과 업무절차가 더욱 체계적으로 수립 구축될 필요가 있으며, 이를 통해 국가수자원 정부부서의 효율적인 예산 확보·편성 및 집행, 수자원시설 구축을 위한 중장기 계획의 수립·시행 등에도 상당한 도움이 될 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 국토연구부 물관리연구개발사업의 연구비지원(과제번호 16AWMP-B066761-04)에 의해 수행된 것으로, 이에 대하여 연구비를 지원한 국토교통과학기술진흥원에 깊은 감사를 드립니다.

References

Bloetscher, F., Sham, C., Danko, J. and Ratick, S. (2014). "Lesson learned from Aquifer Storage and Recovery (ASR) systems in the United States." *Journal of Water Resource and Protection. Scientific Research*, Vol. 6, No. 17, pp.1603-1629.

Carollo Engineers. (2006). *The role of riverbank filtration in reducing the costs of impaired water desalination*. Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 122, U.S. Dept of the Interior Bureau of Reclamation. Available at: <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report122.pdf>. (Accessed : June 23, 2016).

CDM (2007). "Water supply cost estimation study : SFWMD." Available at : <http://www.sfwmd.gov/portal/page/portal/xrepository/>

- sfwmd_repository_pdf/water%20supply%20cost%20estimation%20study%202-2007_cdm.pdf. (Accessed : Feb 15, 2015).
- DEMEAU (2012). "Development of a catalogue on european MAR sites - Documentation." Available at : http://demeau-fp7.eu/WA1_poster_ISMAR8 (Accessed : Jan 7, 2017).
- Department of Environment (DOE) (2015). *Water supply system standard operation and management cost and construction cost calculation report* (in Korean).
- Joo, S. H., Kim, A. S., Moon, J. E., Lee, J. W. and Yoon, H. H. (2010). "Budget estimation for law establishment for job creation." 7th, NABO (in Korean).
- Korea Development Institute (KDI) 2001. *Guideline for preliminary feasibility study*. PIMAC (in Korean).
- Korea Development Institute (KDI) 2012. *Nakdong river bank filtration project feasibility report*. PIMAC (in Korean).
- K-Water (2005). *Mid- and large scale desalination basic design examination report*. DOCT (in Korean).
- K-Water (2013). *Island and coastal area (first phase) ground water resources secure feasibility study* (in Korean).
- KWRA (2011). *Dam design criteria and explanation* (in Korean).
- OWS. (2005). *A basic investigation report for adopting indirect in-take method*. The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government.
- Park, J. H. (2011). "Trend of alternative water resources securitization." *The Korean Spatial Planning Review*, Vol. 357, pp. 102-109.
- Pyne, R. D. G. (2014). "The economics of aquifer storage recovery technology." *Boletin Geologico y Minero*, Vol. 125, No. 2, pp. 219-225.
- SKM and CSIRO. (2012). *Progress in managed aquifer recharge in Australia*. Waterlines Report Series No. 73, National water Commission.
- Son, J. E., Shim, Y. G. and Choi, J. H. (2014). "A review on the land ownership for development and use of clean underground storage of water." *The Journal of Law and Politics Research*, Vol. 14, No. 4, pp.1553-1580.