**Journal of Korean Society of Water and Wastewater**
Vol.24, No.5, pp.617-628, October, 2010

**상하수도학회지**, 논문
24권 5호, pp.617-628, 10월, 2010

# 하수관거정비사업에서 침입수·유입수 성과지표 활용을 위한 통계적 방법론에 관한 연구

# Statistical Methods for the Use of Infiltration and Inflow as Performance Index in Sewer Rehabilitation Works

김형준·박규홍*

Kim, Hyung-Joon·Park, Kyoo-Hong*

중앙대학교 토목공학과

(2010년 9월 29일 접수 ; 2010년 10월 12일 수정 ; 2010년 10월 14일 채택)

## Abstract

The operation performance of sewer rehabilitation projects conducted with Build-Transfer- Lease contract in Korea will be evaluated using the index of infiltration and inflow (I/I). Though I/I obtained at the fourth year should be initially evaluated based on the I/I values observed for the previous three years after the completion of sewer construction, the concrete methodology have not been proposed to rely on the so called 'performance evaluation committee'. This study suggests two statistical methodology to evaluate the I/I performance; the confidence interval method and the hypothesis-testing method. Assumed ten I/I values in each year for 20 years are used in this study. Two cases are analyzed and compared; case I to use as control data all I/I values for all years obtained before the evaluation year and case II to use I/I values for only 3 years before the evaluation year. As a result, case II tends to have relatively higher scores than case I, reflecting the low mean I/I values at the initial years.

**Key words : infitration/inflow, sewer rehabilitation, statistical methods, confidence interval, hypothetical test**

**주제어 : 침입수/유입수, 하수관거정비, 통계적 방법론, 신뢰구간법, 가설검정**

## 1. 서 론

환경부는 2002년이후에 하수관거정비사업을 본격적으로 추진하게 되어, 설계기준대비 유입수질의 비를 성과지표로, 하수관거 연장을 보조성과지표로 활용하였다. 또한 "한강수계 하수관거정비 시범사업" 의 선시행사업인 양평군 강상·강하처리구역의 경우 성과보증지표로 선정된 침입수와 유입수(Infiltration & Inflow: I/I)에 대해서 설계시 계획 일최대 오수량의 20%, 유입 수질에 대해서는 설계시 계획 유입수질($BOD_5$)의 80%를 보증하도록 하였다. 이에 따라, 예를 들어 가평군 청평 처리구역의 경우 공사 완료 후 3개월 이내에 수밀검사를 실시하고, 처리장 유입부의 유량가중 수질평균값이 차집관거에 연결된 각 지선관거 토구의 유량가중 수질평균치의 85%를 보증값으로 제시하였다. 그러나 이 지역의 성과 보증조건과 성과 달성여부에 대해서는 발주처와 시공자의 의견차이가 발생함에 따라, 선시행사업에 대한 관거정비 후 성과보증조건 I/I량 산정방안에 관한 연구(현인환 등, 2005)가 수행되어 I/I량이 지역조건 등에 따라 현격한 차이가 발생할 수 있는 것으로 결론을 내렸고, 이에 따라 한강수계 하수관거정비 시범사업(1단계)의

* Corresponding author Tel:+82-2-820-5886, Fax:+82-2-812-4284, E-mail: kpark@cau.ac.kr(Park, K.)

대안준공지표 설정 연구(현인환 등, 2006)를 수행하여 기존의 I/I 성과지표를 대신하여 품질보증과 품질관리(QA/QC: Quality Assurance & Quality Control)의 방식을 사용하게 되었다.

한편, 2005년도에 BTL(Build, Transfer, Lease)방식의 민자유치를 통해 하수관거 정비사업에 적용하기로 함에 따라 2005~2007년에 약 5조 6140억원을 연차적으로 집행하게 되었다(환경부 2005). 하수관거 BTL사업은 시공과 시설 운영을 함께 책임지는 공사 관리방식을 적용하였다. 2005년에 협약이 완료된 BTL 하수관거 정비사업의 경우에도 성과요구수준에 모두 I/I량을 산정하여 제시하도록 계획되었다. 하지만, 2006년 BTL하수관거정비사업의 성과요구수준서에 관한 연구(한국개발연구원, 2006)에서는 I/I 성과지표를 준공지표가 아닌 운영지표로 사용하도록 함에 따라, 그 이전의 발주공사도 협약변경을 통하여 준공지표로는 I/I를 사용하지 않도록 변경하였다.

그리고, 운영지표로 사용되는 I/I 성과지표에 대하여 'BTL하수관거정비사업의 성과요구수준서 표준안' (한국개발연구원, 2006)에서는 관리, 운영, 유지, 서비스 만족도에 관한 성과지표의 평가방법과 표준 배점을 적용하여 평가가 이루어지되, 운영개시 3년 경과 후부터는 I/I에 관한 성과지표를 포함하도록 되어 있다.

우리나라의 하수관거정비사업은 전세계적으로 유례없이 과감하게 I/I를 준공시 성과지표로 삼음으로써 많은 시행착오를 겪어왔으며, 이를 개선해가면서 시행해왔다고 할 수 있다. 하지만, 2008년 충북 진천군을 시작으로 BTL하수관거사업이 준공되고 운영을 개시하게 됨에 따라, 2011년부터는 다시금 I/I에 대한 평가를 시작해야 한다.

운영단계에서 I/I 평가를 위하여 '하수관거정비 임대형 민자사업(BTL) 시설운영단계 유지관리체계 구축연구(환경부, 2008)' 에서 I/I를 성과지표로 활용시, 시설준공 후 3년간 I/I 발생량 등의 자료를 이용해 평가방안을 수립하고, 운영개시 4년차부터는 I/I를 운영시 평가지표로 활용하도록 제안하고 있다. 이 보고서에 I/I 성과지표 활용시 통계적인 가설검정방법론이 개념적으로 제시되었으나, 구체성 및 절차적·논리적 표현의 미숙과 결여로 인한 모호함으로 인해, 그 활용도가 저하될 것이 우려된다.

따라서, 본 연구에서는 BTL하수관거정비사업의 운영개시 3년 후 I/I값을 성과지표로 활용하기 위한 전제조건과 함께, I/I 측정값들이 정규분포를 가진다는 가정하에 표준화된 확률변수 Z를 이용한 신뢰구간법, 그리고 통계적인 가설 검정방법론을 구분하여 제안하고, 두 가지 방법론에 따른 결과를 비교, 검토하였다.

## 2. 전제 및 방법론

### 2.1 하수관거정비사업에 대한 I/I 성과지표 활용을 위한 전제

이론적으로 하수관거 정비사업의 효과가 I/I의 저감으로 집약적으로 나타나야 하는 것은 논란의 여지가 없다. 하지만 관거정비 사업 전·후의 유량관측으로 I/I 감소량을 정확히 결정하기에는 불확실성이 많이 내포되어 있으며, 미국과 영국, 일본의 사례(Conkline and Lewis, 1980; Steketee, 1981; WEF & ASCE, 1993; Zhang, 2005; Ashley and Hopkins, 2002; 國土交通省 國土技術政策綜合研究所, 2002; 月刊下水道, 1998~1999)에서도 I/I를 제거하기 위해 시행했던 기존의 사업들이 I/I지표를 통해 그 효과를 나타내기에는 기대만큼 효과적이지 않았고, 또한 처음 기대했던 것보다 더 많은 시간이 소모되며 비경제적으로 수행된 것을 알 수 있다.

결국, I/I는 지하수수위와 강우패턴, 유량계 등의 기기에 대한 보정과 관리 및 분석, 시공시 사용 자재와 각 시공단계별 QA/QC, 수밀시험 또는 기밀시험 등 기술적으로 다양한 변수에 의해 좌우되므로 사업의 준공단계 성과지표로 사용하기엔 실용적 측면에서 무리가 있다.

하지만, BTL 하수관거사업의 경우 운영개시 3년이후부터 I/I성과지표를 부분적으로 사용하도록 결정되어 있는 만큼 확률적으로 가장 오류가 적은 방향으로 결정이 내려질 수 있는 방법론이 필요할 것이다. I/I평가의 경우 다양한 변수들에 의해 결과가 달라질 수 있으므로, 이를 최소화하기 위한 전제조건은 다음과 같다.

I/I를 성과지표로 적용할 경우의 주요 문제점은 유량계에 대한 검·교정의 미흡, 유량계 설치지점 선정 및 관측 개소수에 대한 불합리성 등을 포함한 I/I 발생량 산정을 위한 재현성있는 표준방법의 부재라고 할 수 있다. 환경부에서는 I/I 산정을 위한 표준방법을 제시하기 위한 연구(2008)를 수행하였다. 본 연구에서는 환경부(2008)의 결과인 I/I 산정의 방식보다는 그 I/I 산정값을 이용하여 어떻게 평가하여 배점을 줄 것인지에 대한 연구에 초점을 맞추었다. 따라서, 첫째 전제조건은 본 연구의 I/I산정을 위해 환경부에서 정한 공식적인 표준 I/I산정방안을 따라야 한다는 것이다.
둘째, I/I성과평가는 상대평가로 이루어지되, 준공시 성과요구수준에 대한 평가를 실시하는 과정에서 준공시점의 I/I는 최소화된 상태라는 전제가 필요하다. 운영 개시 후 3년간의 I/I값이 시공자나 운영자의 의도에 의해 큰 값으로 산정되는 일은 없도록 해야 한다.

셋째, 운영 개시 후 4차년의 I/I 성과평가는 운영 개시 후 3년간의 I/I값을 기준값으로 활용하여 평가하지만, 운영 개

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.617-628, 10월, 2010

시 후 5차년의 I/I 성과평가는 운영 개시 후 3년간의 I/I값 뿐 아니라 운영 개시 후 4차년의 I/I값도 기준값으로 활용할 수 있으며, 운영 개시 후 6차년 이후의 I/I 성과평가도 마찬가지이다. 따라서, 본 연구에서는 시나리오 1과 시나리오 2로 나누어 분석해 보았다. 시나리오 1의 경우 어떤 평가년차(y년차)를 평가하기 위한 대조군으로 1년차부터 평가년도 바로 전 년차까지를 모두 포함하였으며, 시나리오 2에서는 평가년차를 평가하기 위한 대조군으로 평가년 직전 3년간의 데이터만을 사용하였다.

상기의 세가지 전제를 바탕으로 본 연구에서는 통계학적인 방법론 중 신뢰구간법 및 통계적 가설검정 방법을 이용하여 I/I 평가를 하였다.

### 2.2 연간 I/I값의 비교를 위한 신뢰구간법

I/I는 지속적으로 발생하지만, 본 연구에서는 I/I 비를 매년에 10번씩 20년간 측정하는 것으로 가정하였다(Table 4 참조). I/I측정값(본 연구에서는 측정한 것으로 가정)들에 대한 표본평균과 표본표준편차(불편추정량 : S)의 표본통계량은 자유도 (n-1)의 t-분포를 이루기 때문에 t-분포를 이용하여 신뢰구간을 계산할 수 있다. 이때의 표본통계량을 t-통계량이라고 하며, t-통계량은 식 (1)과 같다.

$$t = \frac{\overline{X} - \mu}{S_{\overline{X}}} \tag{1}$$

여기서,

$\overline{X}$ : I/I비 측정값의 표본평균($=\sum_{i=1}^{n}\frac{X_i}{n}$)

$X_i$ : 각 I/I비의 측정값

$\mu$ : 신뢰구간에 존재하는 I/I비 값

$S_{\overline{X}}$ : I/I비의 표본표준오차($= S/\sqrt{n}$)

$S$ : I/I비의 표본표준편차($=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}{n-1}}$)

n : I/I비의 표본수

상기 t-통계량의 신뢰구간을 설정할 때에 유의수준 $\alpha$를 이용하여 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P(-t_{\alpha/2} \le \frac{\overline{X} - \mu}{S_{\overline{X}}} \le t_{\alpha/2}) = 1-\alpha \tag{2}$$

본 연구에서처럼 I/I비 모집단(발생하는 모든 I/I비)의 평균을 알 수 없는 경우 식(2)를 이용하여 미지수인 모집단의 평균이 분포할 수 있는 신뢰구간 $\mu$에 대해서 정리할 수 있다. 상기의 식(1)과 (2)를 이용하여 모집단의 평균값에 대한 신뢰구간 추정에 대한 식으로 정리하면 식(3)과 같다.

$$P(\overline{X} - t_{\alpha/2} \cdot S_{\overline{X}} \le \mu \le \overline{X} + t_{\alpha/2} \cdot S_{\overline{X}}) = 1-\alpha \tag{3}$$

이를 앞서 제시한 세 번째 전제조건에 따라 시나리오 1과 시나리오 2에 대해 분류하여 표현하면 각각 식(4), (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P(\overline{X}^{(1,y-1)} - t_{\alpha/2} \cdot S_{\overline{X}}^{(1,y-1)} \le \mu_y{}^{S1} \le \overline{X}^{(1,y-1)} + t_{\alpha/2} \cdot S_{\overline{X}}^{(1,y-1)}) = 1-\alpha \tag{4}$$

$$P(\overline{X}^{(y-3,y-1)} - t_{\alpha/2} \cdot S_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)} \le \mu_y{}^{S2} \le \overline{X}^{(y-3,y-1)} + t_{\alpha/2} \cdot S_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}) = 1-\alpha \tag{5}$$

여기서, $\mu_y{}^{S1}$, $\mu_y{}^{S2}$ : 시나리오 1과 2에 따라 추정된 y년차 모집단의 I/I비 값의 구간

$\overline{X}^{(1,y-1)}$, $S_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$ : 1년차부터 (y-1)년까지의 I/I비 표본평균과 표본표준오차

$\overline{X}^{(y-3,y-1)}$, $S_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$ : (y-3)년부터 (y-1)년까지의 I/I비 표본평균과 표본표준오차

식(3)~(5)는 $1-\alpha$의 신뢰도를 갖고 모집단의 모수를 포함하고 있을 가능성을 갖는 $\mu$의 신뢰구간을 나타낸 것이다. 따라서, 이를 활용하여 유의수준(신뢰도)에 따라 I/I성과평가기준과 배점을 예시하면 **Table 1**과 같다.

y년차 I/I비의 표본평균 $\overline{X}_y$가 시나리오 1과 2에 따라 계산된 I/I비 모집단의 모수를 포함하고 있을 가능성을 갖는 구간인 $\mu_y{}^{S1}$, 혹은 $\mu_y{}^{S2}$의 범위안에 포함이 된다면 I/I비의 증가가 일어나지 않았다고 판단할 수 있다. 즉, $\mu_y{}^{S1}$의 80% 신뢰구간 범위내에 있다면 80점의 배점으로 평가를 받게 됨을 예시하고 있다. 단, **Table 1**의 신뢰도(%)와 배점기준은 본 연구를 위한 예시이므로 실제 적용시 변경이 가능하다.

Table 1. 신뢰구간법에 의한 I/I 지표의 성과 평가 기준과 배점의 예시

| 기준 | 배점 |
|---|---|
| $\overline{X_y}$가 , $\mu_y{}^{S1}$혹은 $\mu_y{}^{S2}$의 50% 신뢰구간 범위내에 있는 경우 | 100점 |
| $\overline{X_y}$가 , $\mu_y{}^{S1}$혹은 $\mu_y{}^{S2}$의 70% 신뢰구간 범위내에 있는 경우 | 90점 |
| $\overline{X_y}$가 , $\mu_y{}^{S1}$혹은 $\mu_y{}^{S2}$의 80% 신뢰구간 범위내에 있는 경우 | 80점 |
| $\overline{X_y}$가 , $\mu_y{}^{S1}$혹은 $\mu_y{}^{S2}$의 90% 신뢰구간 범위내에 있는 경우 | 70점 |
| $\overline{X_y}$가 , $\mu_y{}^{S1}$혹은 $\mu_y{}^{S2}$의 99% 신뢰구간 범위내에 있는 경우 | 60점 |
| 상기의 범위를 벗어나는 경우 | 50점 |

### 2.3 연간 I/I값의 비교를 위한 통계적 가설 검정 방법론

앞서 설명한 신뢰구간법은 신뢰구간의 범위를 추정하고 각 신뢰수준에 따라서 배점을 다르게 할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 신뢰구간의 범위가 표본표준편차에 의해 크게 좌우되는 성향을 가지고 있다. 일반적으로 I/I비 평균의 경우 편차가 크기 때문에 추정되는 구간의 범위가 넓어지며, 이로 인해 **Table 1**에서 예시한 기준과 배점을 고정화하기에 어려움이 있다.

이 절에서는 I/I를 하수관거정비사업의 성과지표로 활용할 경우의 통계적인 가설과 그 검증의 방법론과 절차를 설명하였다. 통계적 가설검정은 표본에서 얻은 사실을 근거로 하여, 모집단에 대한 가설이 맞는지 틀리는지 통계적으로 검정하는 분석이다. 가설은 두 가지 종류로 구분되며, 연구과정에서 검정의 대상이 되는 귀무가설($H_0$)과 이 가설이 받아들여질 수 없을 때 대신 받아들여지는 대립가설($H_a$)이 그것이다.

본 연구에서는 통계적 가설검증시 "y년차인 평가년도의 표본평균($\overline{X_y}$)이 대조군의 평균, 즉 1년차부터 (y−1)년차까지의 표본평균($\mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$), 혹은 (y−3)년차에서 (y−1)년차까지의 표본평균($\mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$)보다 작거나 같다" 를 귀무가설, 그 반대의 경우를 대립가설로 설정할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{귀무가설 } H_0 : \overline{X_y} \le \mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)} \text{ 또는 } \mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)} \\ &\text{대립가설 } H_a : \overline{X_y} > \mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)} \text{ 또는 } \mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)} \end{aligned} \quad (6)$$

유의수준의 결정은 연구자의 연구목적(또는 사용자의 사용목적), 주관적인 판단 등에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구에서는 0.5%, 1.0%, 2.5%, 5.0%, 10.0% 등 5가지 유의수준에 따라 검정을 실시하였다. 이렇게 결정된 유의수준을 충족시키는 임계값은 $\overline{X}$로 표현할 수 있으며, 또한 $\overline{X}$에 대응하는 Z값으로 표시할 수도 있다. 따라서, 유의수준이 $\alpha$일 때, 양측검정의 경우 오른쪽 임계값 Z는 $Z_{\alpha/2}$가 되며, 왼쪽 임계값은 $-Z_{\alpha/2}$가 된다. 예를 들어, 유의수준 $\alpha$가 0.05인 경우 임계값은 1.96과 −1.96이다. 임계값이 결정되면, 표본 통계량이 기각영역에 속하는지 채택영역에 속하는지를 결정한다. 이를 결정하기 위한 Z값의 일반식은 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z = \frac{\overline{X} - \mu}{\sigma_{\overline{X}}} \quad (7)$$

모집단의 평균과 표준편차를 알 수 있는 경우, 식 (6)을 이용하여 표본을 기초로 계산된 임계값을 비교하여, Z값이 기각영역 안에 있으면 $H_0$를 기각하고, 채택영역 안이 있으면 $H_0$를 채택한다.

하지만 I/I비 값의 경우 앞서 언급한 바와 같이 모집단이라고 할 수 있는 발생하는 모든 I/I비에 대한 평균과 표준편차를 알 수 없다고 보는 편이 맞을 것이다. 따라서 신뢰구간법의 경우와 마찬가지로 t−분포를 이용하여 가설검정을 한다. 이때 통계량 t는 자유도 (n−1)의 t−분포를 이룬다. t−통계량은 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$t = \frac{\overline{X} - \mu_{\overline{X}}}{S_{\overline{X}}} \quad (8)$$

여기서, $\mu_{\overline{X}}$ : 대조군의 평균

이를 신뢰구간법과 마찬가지로 시나리오 1과 시나리오 2에 대해 분류하여 표현하면 식(9), (10)과 같이 표현할 수 있다.

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.617-628, 10월, 2010

$$t_y^{S1} = \frac{\overline{X_y} - \mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)}}{S_y / \sqrt{n_y}} \quad (9)$$

$$t_y^{S2} = \frac{\overline{X_y} - \mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}}{S_y / \sqrt{n_y}} \quad (10)$$

단, $\overline{X_y}$, $S_y$ : 평가년차의 I/I비 표본평균과 표본표준편차

$\mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$, $\mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$ : 1년차부터 (y−1)년까지 및 (y−3)년부터 (y−1)년까지의 표본평균

$n_y$ : n년차의 표본개수(=10)

Table 2. 유의수준에 따른 $t_\alpha$값(박정식, 윤영선(2002))

| 유의수준($\alpha$) | $t_\alpha$(t-분포) |
|---|---|
| 0.5% | 3.250 |
| 1.0% | 2.821 |
| 2.5% | 2.262 |
| 5.0% | 1.833 |
| 10.0% | 1.383 |

유의수준이 $\alpha$인 경우, 기각역 C는 식(6)에서 제안한 귀무가설과 대립가설의 설정에 따라 식(11)과 같이 정리할 수 있다.

$$\text{기각역 } C = [x | t \geq t_\alpha(n-1)] \quad (11)$$

계산된 t값이 기각영역 안에 있으면 $H_0$를 기각하며, 채택영역 안에 있으면 $H_0$를 받아들인다. 즉, 귀무가설이 기각되지 않고 채택되면, y년차의 I/I비 표본평균값이 1년차에서 (y−1)년차까지의 I/I비 표본평균, 혹은 (y−3)년차에서 (y−1)년차까지의 I/I비 표본평균값과 같거나 작다고 할 수 있다.

본 연구에서는 각 년차별로 총 10회씩 측정한 것으로 가정하였으므로 표본수 n은 항상 10이며,자유도는 (n−1)=9이다. 자유도가 9일때 유의수준에 따른 $t_\alpha$값은 **Table 2**와 같다.

**Table 2**에서 제시한 유의수준을 기준으로 귀무가설이 채택되는 유의수준의 구간을 분류하여 **Table 3**와 같이 평가 점수를 임의로 배분하였다.

Table 3. 유의수준을 이용한 점수배분(예시)

| 기준 | 점수 |
|---|---|
| 유의수준 10%일때, $H_0$채택(1.383>t) | 100점 |
| 유의수준 10%일때 $H_0$가 기각되지만, 유의수준 5%일때 $H_0$채택(1.833>t≥1.383) | 90점 |
| 유의수준 5%일때 $H_0$가 기각되지만, 유의수준 2.5%일때 $H_0$채택(2.262>t≥1.833) | 80점 |
| 유의수준 2.5%일때 $H_0$가 기각되지만, 유의수준 1%일때 $H_0$채택(2.821>t≥2.262) | 70점 |
| 유의수준 1%일때 $H_0$가 기각되지만, 유의수준 0.5%일때 $H_0$채택(3.250>t≥2.821) | 60점 |
| 유의수준 0.5%일때 $H_0$가 기각(t≥3.250) | 50점 |

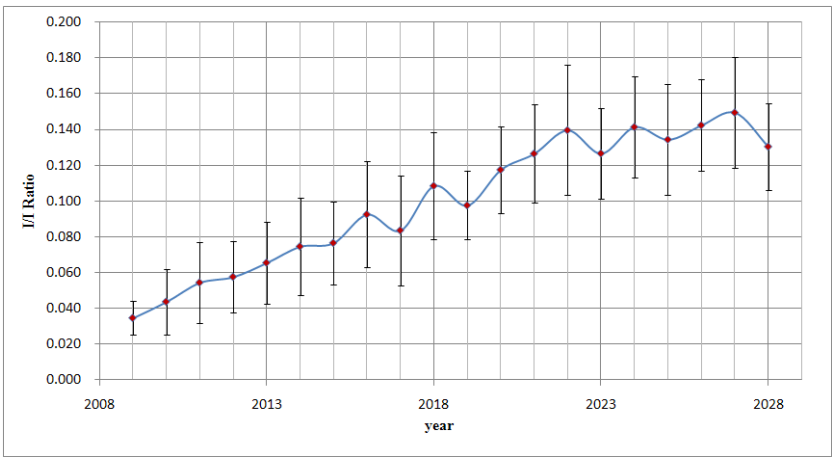


Fig. 1 각 년차별 I/I비 평균값 변화

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 제시한 신뢰구간법과 통계적 가설검정 방법을 사용한 결과 비교를 위해 **Table 4**와 같이 어떤 측정 지점에서 각 년도별로 10회, 총 20년간의 I/I비를 가정한 값을 이용하였다. 이러한 I/I비 가정값은 I/I비가 시설 준공 후 초기에는 빠르게 증가하다가 일정수준이 넘어서면 증가세가 둔화될 것으로 추정하여 설명하였다(**Figure 1** 참조).

**Table 4.** 성과평가대상지역의 I/I비의 예시

| 년도 | 1회차 | 2회차 | 3회차 | 4회차 | 5회차 | 6회차 | 7회차 | 8회차 | 9회차 | 10회차 | 년차별 표본평균 ($\overline{X_y}$) | 년차별 표본표준편차 ($S_y$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | 0.031 | 0.040 | 0.021 | 0.030 | 0.040 | 0.050 | 0.031 | 0.040 | 0.041 | 0.021 | 0.035 | 0.009 |
| 2010 | 0.030 | 0.051 | 0.031 | 0.061 | 0.081 | 0.051 | 0.031 | 0.051 | 0.031 | 0.020 | 0.044 | 0.018 |
| 2011 | 0.020 | 0.050 | 0.060 | 0.080 | 0.021 | 0.050 | 0.061 | 0.081 | 0.080 | 0.041 | 0.054 | 0.023 |
| 2012 | 0.061 | 0.050 | 0.050 | 0.041 | 0.031 | 0.080 | 0.041 | 0.051 | 0.091 | 0.081 | 0.058 | 0.020 |
| 2013 | 0.060 | 0.050 | 0.020 | 0.091 | 0.101 | 0.070 | 0.050 | 0.060 | 0.081 | 0.071 | 0.065 | 0.023 |
| 2014 | 0.051 | 0.030 | 0.071 | 0.071 | 0.051 | 0.080 | 0.110 | 0.081 | 0.121 | 0.081 | 0.075 | 0.027 |
| 2015 | 0.101 | 0.110 | 0.051 | 0.061 | 0.071 | 0.081 | 0.070 | 0.061 | 0.051 | 0.110 | 0.077 | 0.023 |
| 2016 | 0.121 | 0.101 | 0.051 | 0.060 | 0.150 | 0.111 | 0.091 | 0.080 | 0.070 | 0.091 | 0.093 | 0.030 |
| 2017 | 0.151 | 0.081 | 0.071 | 0.061 | 0.051 | 0.121 | 0.080 | 0.071 | 0.090 | 0.060 | 0.084 | 0.031 |
| 2018 | 0.091 | 0.090 | 0.071 | 0.121 | 0.131 | 0.151 | 0.070 | 0.120 | 0.151 | 0.090 | 0.109 | 0.030 |
| 2019 | 0.101 | 0.121 | 0.070 | 0.081 | 0.120 | 0.111 | 0.100 | 0.070 | 0.091 | 0.111 | 0.098 | 0.019 |
| 2020 | 0.111 | 0.121 | 0.110 | 0.071 | 0.120 | 0.091 | 0.120 | 0.131 | 0.150 | 0.150 | 0.118 | 0.024 |
| 2021 | 0.120 | 0.111 | 0.151 | 0.130 | 0.181 | 0.100 | 0.151 | 0.121 | 0.090 | 0.111 | 0.127 | 0.027 |
| 2022 | 0.150 | 0.111 | 0.191 | 0.191 | 0.111 | 0.121 | 0.121 | 0.130 | 0.091 | 0.180 | 0.140 | 0.036 |
| 2023 | 0.180 | 0.121 | 0.131 | 0.141 | 0.151 | 0.111 | 0.110 | 0.121 | 0.111 | 0.090 | 0.127 | 0.025 |
| 2024 | 0.111 | 0.150 | 0.121 | 0.180 | 0.191 | 0.150 | 0.120 | 0.130 | 0.150 | 0.110 | 0.141 | 0.028 |
| 2025 | 0.191 | 0.120 | 0.101 | 0.160 | 0.160 | 0.100 | 0.111 | 0.120 | 0.160 | 0.120 | 0.134 | 0.031 |
| 2026 | 0.100 | 0.150 | 0.130 | 0.131 | 0.141 | 0.150 | 0.110 | 0.180 | 0.161 | 0.171 | 0.142 | 0.025 |
| 2027 | 0.150 | 0.161 | 0.110 | 0.180 | 0.170 | 0.100 | 0.110 | 0.181 | 0.161 | 0.171 | 0.149 | 0.031 |
| 2028 | 0.110 | 0.121 | 0.120 | 0.111 | 0.150 | 0.180 | 0.150 | 0.140 | 0.120 | 0.101 | 0.130 | 0.024 |

**Table 5.** t-분포표

| 자유도 | $t_{0.25}$ (50% 유의수준) | $t_{0.15}$ (70% 유의수준) | $t_{0.1}$ (80% 유의수준) | $t_{0.05}$ (90% 유의수준) | $t_{0.005}$ (99% 유의수준) |
|---|---|---|---|---|---|
| 29 | 0.6830 | 1.0553 | 1.3114 | 1.6991 | 2.7564 |
| 39 | 0.6808 | 1.0504 | 1.3036 | 1.6849 | 2.7079 |
| 49 | 0.6795 | 1.0475 | 1.2991 | 1.6766 | 2.6800 |
| 59 | 0.6787 | 1.0456 | 1.2961 | 1.6711 | 2.6618 |
| 69 | 0.6781 | 1.0443 | 1.2939 | 1.6672 | 2.6490 |
| 79 | 0.6776 | 1.0433 | 1.2924 | 1.6644 | 2.6395 |
| 89 | 0.6773 | 1.0425 | 1.2911 | 1.6622 | 2.6322 |
| 99 | 0.6770 | 1.0419 | 1.2902 | 1.6604 | 2.6264 |
| 109 | 0.6767 | 1.0414 | 1.2894 | 1.6590 | 2.6217 |
| 119 | 0.6766 | 1.0410 | 1.2887 | 1.6578 | 2.6178 |
| 129 | 0.6764 | 1.0406 | 1.2881 | 1.6568 | 2.6145 |
| 139 | 0.6763 | 1.0403 | 1.2877 | 1.6559 | 2.6117 |
| 149 | 0.6761 | 1.0401 | 1.2873 | 1.6551 | 2.6092 |
| 159 | 0.6760 | 1.0398 | 1.2869 | 1.6545 | 2.6071 |
| 169 | 0.6759 | 1.0396 | 1.2866 | 1.6539 | 2.6052 |
| 179 | 0.6759 | 1.0394 | 1.2863 | 1.6534 | 2.6036 |
| 189 | 0.6758 | 1.0393 | 1.2860 | 1.6530 | 2.6021 |

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.617-628, 10월, 2010

일반적으로 t-분포는 t-분포표를 이용하여 t값을 확인할 수 있지만, 본 연구에서는 일반적인 분포표 상에 언급되지 않은 유의수준을 사용하고 있으며, 표본수의 경우도 30~190개를 사용하므로 자유도가 29~189까지 필요하다. 따라서 별도로 필요한 t 값을 계산하여 **Table 5**에 제시하였다.

### 3.1 신뢰구간법을 활용한 평가결과

I/I비 데이터를 기초로 계산에 필요한 표본평균 및 표본표준오차를 년차별로 나타내면 **Table 6**과 같다.

예를 들어, 4년차에 평가하는 경우 1~3년차의 I/I비 표본평균값을 구하여 각 유의수준에 따른 신뢰구간에 4년차의 I/I비 모집단 평균값이 위치한다면 **Table 1**에서 제시한 바와 같이 그에 해당하는 점수를 부여한다. 즉, **Table 6**을 이용하여 4년차를 시나리오 1에 따라 평가하는 경우 1~3년차까지의 표본평균 $\overline{X}^{(1,3)}$은 0.04420, 1~3년차까지의 표본표준오차 $S_{\overline{X}}^{(1,3)}$은 0.00347이다. 그리고 3년간의 자료를 이용하므로 표본의 개수는 30개가 되며, 자유도는 (표본수-1)이므로 29이다. 따라서, 자유도가 29이며 유의수준이 50%인 경우 **Table 5**에서 t값을 찾으면 0.6830이다. 상기의 값들을 이용하여 4년차 50%의 신뢰도로 추정된 구간을 식(4)에 따라 계산하면 다음과 같다.

$$\overline{X}^{(1,3)} - t_{0.25} \cdot S_{\overline{X}}^{(1,3)} \le \mu_{4,0.25}{}^{S1} \le \overline{X}^{(1,3)} + t_{0.25} \cdot S_{\overline{X}}^{(1,3)} = 0.04420 - 0.6830 \times 0.00347 \le \mu_{4,0.25}{}^{S1} \le 0.04420 + 0.06830 \times 0.00347 = 0.0418 \le \mu_{4,0.25}{}^{S1} \le 0.0466$$

여기서, $\mu_{4,0.25}{}^{S1}$은 50% 신뢰구간의 범위에 드는 $\mu_n{}^{S1}$값을 의미한다.

4년차의 경우 I/I비의 표본평균값 $\overline{X_4}$가 0.058이므로 모든 유의수준에 대한 신뢰구간의 범위를 초과한다. 따라서 **Table 1**의 평가기준을 따르면 50점이 된다. 이와 같은 방법으로 시나리오 1의 각 유의수준별 최소값, 최대값 및 평가점수를 년차별로 구하면 **Table 7**과 같다.

**Table 6.** 년차별 표본평균값 및 표본표준오차값

| 년도 | 년차 | $\overline{X_y}$ | $\overline{X}^{(1,y-1)}$ | $\overline{X}^{(y-3,y-1)}$ | $S_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$ | $S_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | 1 | 0.03458 | - | - | - | - |
| 2010 | 2 | 0.04365 | - | - | - | - |
| 2011 | 3 | 0.05438 | - | - | - | - |
| 2012 | 4 | 0.05758 | 0.04420 | 0.04420 | 0.00347 | 0.00347 |
| 2013 | 5 | 0.06547 | 0.04755 | 0.05187 | 0.00314 | 0.00377 |
| 2014 | 6 | 0.07457 | 0.05113 | 0.05914 | 0.00305 | 0.00396 |
| 2015 | 7 | 0.07657 | 0.05504 | 0.06587 | 0.00310 | 0.00434 |
| 2016 | 8 | 0.09252 | 0.05811 | 0.07220 | 0.00297 | 0.00440 |
| 2017 | 9 | 0.08356 | 0.06242 | 0.08122 | 0.00311 | 0.00495 |
| 2018 | 10 | 0.10850 | 0.06477 | 0.08422 | 0.00303 | 0.00508 |
| 2019 | 11 | 0.09759 | 0.06914 | 0.09486 | 0.00316 | 0.00565 |
| 2020 | 12 | 0.11750 | 0.07173 | 0.09655 | 0.00302 | 0.00514 |
| 2021 | 13 | 0.12653 | 0.07554 | 0.10787 | 0.00306 | 0.00465 |
| 2022 | 14 | 0.13960 | 0.07946 | 0.11387 | 0.00313 | 0.00476 |
| 2023 | 15 | 0.12664 | 0.08376 | 0.12787 | 0.00329 | 0.00550 |
| 2024 | 16 | 0.14138 | 0.08662 | 0.13092 | 0.00323 | 0.00541 |
| 2025 | 17 | 0.13439 | 0.09004 | 0.13587 | 0.00325 | 0.00547 |
| 2026 | 18 | 0.14243 | 0.09265 | 0.13414 | 0.00321 | 0.00510 |
| 2027 | 19 | 0.14947 | 0.09541 | 0.13940 | 0.00317 | 0.00501 |
| 2028 | 20 | 0.13042 | 0.09826 | 0.14210 | 0.00317 | 0.00526 |

Table 7. 신뢰구간법을 이용한 평가 결과(시나리오 1)

| 구분 (n년차) | y년차 평균 | 50% 신뢰구간 | | 70% 신뢰구간 | | 80% 신뢰구간 | | 90% 신뢰구간 | | 99% 신뢰구간 | | 점수 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | |
| 2012년 (4년차) | 0.058 | 0.0418 | 0.0466 | 0.0405 | 0.0479 | 0.0397 | 0.0488 | 0.0383 | 0.0501 | 0.0346 | 0.0538 | 50점 |
| 2013년 (5년차) | 0.065 | 0.0454 | 0.0497 | 0.0442 | 0.0508 | 0.0435 | 0.0516 | 0.0423 | 0.0528 | 0.0390 | 0.0561 | 50점 |
| 2014년 (6년차) | 0.075 | 0.0491 | 0.0532 | 0.0479 | 0.0543 | 0.0472 | 0.0551 | 0.0460 | 0.0562 | 0.0430 | 0.0593 | 50점 |
| 2015년 (7년차) | 0.077 | 0.0529 | 0.0571 | 0.0518 | 0.0583 | 0.0510 | 0.0591 | 0.0499 | 0.0602 | 0.0468 | 0.0633 | 50점 |
| 2016년 (8년차) | 0.093 | 0.0561 | 0.0601 | 0.0550 | 0.0612 | 0.0543 | 0.0620 | 0.0532 | 0.0631 | 0.0502 | 0.0660 | 50점 |
| 2017년 (9년차) | 0.084 | 0.0603 | 0.0645 | 0.0592 | 0.0657 | 0.0584 | 0.0664 | 0.0572 | 0.0676 | 0.0542 | 0.0706 | 50점 |
| 2018 (10년차) | 0.109 | 0.0627 | 0.0668 | 0.0616 | 0.0679 | 0.0609 | 0.0687 | 0.0597 | 0.0698 | 0.0568 | 0.0727 | 50점 |
| 2019년 (11년차) | 0.098 | 0.0670 | 0.0713 | 0.0658 | 0.0724 | 0.0651 | 0.0732 | 0.0639 | 0.0744 | 0.0608 | 0.0774 | 50점 |
| 2020년 (12년차) | 0.118 | 0.0697 | 0.0738 | 0.0686 | 0.0749 | 0.0678 | 0.0756 | 0.0667 | 0.0767 | 0.0638 | 0.0796 | 50점 |
| 2021년 (13년차) | 0.127 | 0.0735 | 0.0776 | 0.0724 | 0.0787 | 0.0716 | 0.0795 | 0.0705 | 0.0806 | 0.0675 | 0.0836 | 50점 |
| 2022년 (14년차) | 0.140 | 0.0773 | 0.0816 | 0.0762 | 0.0827 | 0.0754 | 0.0835 | 0.0743 | 0.0847 | 0.0713 | 0.0877 | 50점 |
| 2023년 (15년차) | 0.127 | 0.0815 | 0.0860 | 0.0803 | 0.0872 | 0.0795 | 0.0880 | 0.0783 | 0.0892 | 0.0752 | 0.0923 | 50점 |
| 2024년 (16년차) | 0.141 | 0.0844 | 0.0888 | 0.0833 | 0.0900 | 0.0825 | 0.0908 | 0.0813 | 0.0920 | 0.0782 | 0.0950 | 50점 |
| 2025년 (17년차) | 0.134 | 0.0878 | 0.0922 | 0.0867 | 0.0934 | 0.0859 | 0.0942 | 0.0847 | 0.0954 | 0.0816 | 0.0985 | 50점 |
| 2026년 (18년차) | 0.142 | 0.0905 | 0.0948 | 0.0893 | 0.0960 | 0.0885 | 0.0968 | 0.0873 | 0.0980 | 0.0843 | 0.1010 | 50점 |
| 2027년 (19년차) | 0.149 | 0.0933 | 0.0976 | 0.0921 | 0.0987 | 0.0913 | 0.0995 | 0.0902 | 0.1007 | 0.0871 | 0.1037 | 50점 |
| 2028년 (20년차) | 0.130 | 0.0961 | 0.1004 | 0.0950 | 0.1016 | 0.0942 | 0.1023 | 0.0930 | 0.1035 | 0.0900 | 0.1065 | 50점 |

시나리오 2의 경우 시나리오 1과 달리 평가년 전의 3년간의 평균과 표본표준편차를 사용하므로 4년차의 경우는 시나리오 1과 2의 값이 같지만, 5년차부터는 다른 결과를 나타내게 된다. 시나리오 2에서는 식(5)를 이용하여 계산할 수 있으며, 전 3년차의 데이터만을 사용하므로 년차(y)가 증가하더라도 표본수는 일정하게 30개가 되므로, 자유도는 항상 29가 된다. 위와 같은 방법으로 시나리오 2에 대한 결과값을 표현하면 다음 **Table 8**과 같다. 시나리오 1의 경우 모든 평가년차에서 최하점인 50점을 받았지만, 시나리오의 2에서는 다른 결과를 나타내었다.

7년차의 경우 50%의 신뢰도를 가지고 추정된 구간을 식(5)에 따라 계산과정을 예시하면,

$$\overline{X}^{(4,6)} - t_{0.25} \cdot S_{\overline{X}}^{(4,6)} \le \mu_{7,0.25}{}^{S2} \le \overline{X}^{(4,6)} + t_{0.25} \cdot S_{\overline{X}}^{(4,6)} = 0.06587 - 0.6830 \times 0.00434 \le \mu_{7,0.25}{}^{S2} \le 0.06587 + 0.06830 \times 0.00434 = 0.0629 \le \mu_{7,0.25}{}^{S2} \le 0.0688$$

이 된다. 따라서, 7년차의 표본평균 $\overline{X_7}$은 0.077이므로 99% 신뢰구간의 범위안에 위치한다. 즉, **Table 1**에서 제시한 평가기준을 따르면 60점을 받게 된다.

한편, 9년차의 경우 표본평균값이 50% 유의수준의 신뢰구간의 범위부터 99% 신뢰구간의 범위까지 모든 유의수준에 따른 신뢰구간의 범위에 9년차 I/I비 표본평균값이 위치하게 되므로 100점을 받게 된다.

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.617-628, 10월, 2010

Table 8. 신뢰구간법을 이용한 평가 결과(시나리오 2)

| 구분 (n년차) | y년차 평균 | 50% 신뢰구간 | | 70% 신뢰구간 | | 80% 신뢰구간 | | 90% 신뢰구간 | | 99% 신뢰구간 | | 점수 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | 최소값 | 최대값 | |
| 2012년 (4년차) | 0.058 | 0.0418 | 0.0466 | 0.0405 | 0.0479 | 0.0397 | 0.0488 | 0.0383 | 0.0501 | 0.0346 | 0.0538 | 50점 |
| 2013년 (5년차) | 0.065 | 0.0493 | 0.0544 | 0.0479 | 0.0558 | 0.0469 | 0.0568 | 0.0455 | 0.0583 | 0.0415 | 0.0623 | 50점 |
| 2014년 (6년차) | 0.075 | 0.0564 | 0.0618 | 0.0550 | 0.0633 | 0.0540 | 0.0643 | 0.0524 | 0.0659 | 0.0482 | 0.0701 | 50점 |
| 2015년 (7년차) | 0.077 | 0.0629 | 0.0688 | 0.0613 | 0.0705 | 0.0602 | 0.0716 | 0.0585 | 0.0733 | 0.0539 | 0.0778 | 60점 |
| 2016년 (8년차) | 0.093 | 0.0692 | 0.0752 | 0.0676 | 0.0769 | 0.0664 | 0.0780 | 0.0647 | 0.0797 | 0.0601 | 0.0843 | 50점 |
| 2017년 (9년차) | 0.084 | 0.0778 | 0.0846 | 0.0760 | 0.0864 | 0.0747 | 0.0877 | 0.0728 | 0.0896 | 0.0676 | 0.0949 | 100점 |
| 2018 (10년차) | 0.109 | 0.0807 | 0.0877 | 0.0789 | 0.0896 | 0.0776 | 0.0909 | 0.0756 | 0.0929 | 0.0702 | 0.0982 | 50점 |
| 2019년 (11년차) | 0.098 | 0.0910 | 0.0987 | 0.0889 | 0.1008 | 0.0875 | 0.1023 | 0.0853 | 0.1045 | 0.0793 | 0.1104 | 100점 |
| 2020년 (12년차) | 0.118 | 0.0930 | 0.1001 | 0.0911 | 0.1020 | 0.0898 | 0.1033 | 0.0878 | 0.1053 | 0.0824 | 0.1107 | 50점 |
| 2021년 (13년차) | 0.127 | 0.1047 | 0.1110 | 0.1030 | 0.1128 | 0.1018 | 0.1140 | 0.1000 | 0.1158 | 0.0951 | 0.1207 | 50점 |
| 2022년 (14년차) | 0.140 | 0.1106 | 0.1171 | 0.1089 | 0.1189 | 0.1076 | 0.1201 | 0.1058 | 0.1220 | 0.1008 | 0.1270 | 50점 |
| 2023년 (15년차) | 0.127 | 0.1241 | 0.1316 | 0.1221 | 0.1337 | 0.1207 | 0.1351 | 0.1185 | 0.1372 | 0.1127 | 0.1430 | 100점 |
| 2024년 (16년차) | 0.141 | 0.1272 | 0.1346 | 0.1252 | 0.1366 | 0.1238 | 0.1380 | 0.1217 | 0.1401 | 0.1160 | 0.1458 | 60점 |
| 2025년 (17년차) | 0.134 | 0.1321 | 0.1396 | 0.1301 | 0.1416 | 0.1287 | 0.1430 | 0.1266 | 0.1452 | 0.1208 | 0.1509 | 100점 |
| 2026년 (18년차) | 0.142 | 0.1307 | 0.1376 | 0.1288 | 0.1395 | 0.1275 | 0.1408 | 0.1255 | 0.1428 | 0.1201 | 0.1482 | 70점 |
| 2027년 (19년차) | 0.149 | 0.1360 | 0.1428 | 0.1341 | 0.1447 | 0.1328 | 0.1460 | 0.1309 | 0.1479 | 0.1256 | 0.1532 | 60점 |
| 2028년 (20년차) | 0.130 | 0.1385 | 0.1457 | 0.1365 | 0.1477 | 0.1352 | 0.1490 | 0.1332 | 0.1510 | 0.1276 | 0.1566 | 100점 |

**Table 4**를 참조하여 **Table 7**과 비교하여 시나리오 2의 점수를 살펴보면 I/I비가 전년 대비 감소한 2017년, 2019년, 2023년, 2025년, 2028년의 경우 모두 100점의 점수를 받았으므로 전년도 대비 I/I비 평균값이 낮아지는 경우 높은 점수를 받은 것을 확인할 수 있다. 전년도 대비 I/I비의 평균값이 거의 증가하지 않은 2015년의 경우 60점을 받았으며, 2022년 이후에는 I/I비 평균값의 증가추세가 이전에 비해 둔화되었으므로 2023년부터는 60점 이상의 점수를 받았다.

### 3.2 통계적 가설검정 방법을 이용한 평가 결과

2.3절에서 제시한 바와 같이 I/I 평가시 평가하고자 하는 년차인 y년차의 표본평균($\overline{X_y}$)이 1년차부터 (y−1)년차까지의 표본평균($\mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$)과 같거나 전 3개년의 표본평균($\mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$)보다 크지 않을 경우 I/I비 평균값이 y년차에 증가하지 않았다고 판단할 수 있다. 즉, 귀무가설이 기각되지 않고, 채택되는 경우 I/I비가 증가하지 않았다고 할 수 있다. 따라서, **Table 9**에는 기각역을 구하기 위한 표본평균 및 표본표준오차를 각 년차별로 나타내었다.

시나리오 1의 4년차의 경우 t값을 구하기 위하여 식(9)에 따라 계산을 하면 다음과 같다.

$$t_4^{S1} = \frac{\overline{X_4} - \mu_{\overline{X}}^{(1,3)}}{S_4/\sqrt{10}}$$
$$= \frac{0.05758 - 0.04420}{0.00632}$$
$$= 2.117$$

Table 9. 년차별 표본평균값 및 표본표준편차값

| 년도 | 년차 | $\overline{X_y}$ | $\mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$ | $\mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$ | $S_y$ | $S_y/\sqrt{10}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | 1 | 0.03458 | - | - | - | - |
| 2010 | 2 | 0.04365 | - | - | - | - |
| 2011 | 3 | 0.05438 | - | - | - | - |
| 2012 | 4 | 0.05758 | 0.04420 | 0.04420 | 0.01999 | 0.00632 |
| 2013 | 5 | 0.06547 | 0.04755 | 0.05187 | 0.02299 | 0.00727 |
| 2014 | 6 | 0.07457 | 0.05113 | 0.05914 | 0.02711 | 0.00857 |
| 2015 | 7 | 0.07657 | 0.05504 | 0.06587 | 0.02307 | 0.00730 |
| 2016 | 8 | 0.09252 | 0.05811 | 0.07220 | 0.02975 | 0.00941 |
| 2017 | 9 | 0.08356 | 0.06242 | 0.08122 | 0.03062 | 0.00968 |
| 2018 | 10 | 0.10850 | 0.06477 | 0.08422 | 0.03015 | 0.00954 |
| 2019 | 11 | 0.09759 | 0.06914 | 0.09486 | 0.01902 | 0.00602 |
| 2020 | 12 | 0.11750 | 0.07173 | 0.09655 | 0.02439 | 0.00771 |
| 2021 | 13 | 0.12653 | 0.07554 | 0.10787 | 0.02729 | 0.00863 |
| 2022 | 14 | 0.13960 | 0.07946 | 0.11387 | 0.03626 | 0.01147 |
| 2023 | 15 | 0.12664 | 0.08376 | 0.12787 | 0.02539 | 0.00803 |
| 2024 | 16 | 0.14138 | 0.08662 | 0.13092 | 0.02805 | 0.00887 |
| 2025 | 17 | 0.13439 | 0.09004 | 0.13587 | 0.03095 | 0.00979 |
| 2026 | 18 | 0.14243 | 0.09265 | 0.13414 | 0.02535 | 0.00802 |
| 2027 | 19 | 0.14947 | 0.09541 | 0.13940 | 0.03085 | 0.00976 |
| 2028 | 20 | 0.13042 | 0.09826 | 0.14210 | 0.02434 | 0.00770 |

따라서, **Table 3**에 제시한 점수배점에 따르면 시나리오 1의 4년차 점수는 80점이다.

시나리오 2의 경우 대조군의 표본평균을 (y−3)년차에서 (y−1)년차까지의 I/I비 표본평균값을 이용하여 평가하므로, $\mu_{\overline{X}}^{(1,y-1)}$대신 $\mu_{\overline{X}}^{(y-3,y-1)}$을 이용하여 계산하게 된다. 따라서 4년차의 경우 점수가 시나리오 1과 같지만, 5년차부터는 다른 양상을 보이게 된다. 예를 들어, 시나리오 2의 5년차의 t값을 구하기 위하여 식(10)에 따라 계산을 하면 다음과 같다.

$$t_5^{S2} = \frac{\overline{X_5} - \mu_{\overline{X}}^{(2,4)}}{S_5/\sqrt{10}} = \frac{0.06547 - 0.05187}{0.00727} = 1.870$$

시나리오 1과 마찬가지로 **Table 3**에서 제시한 점수배점을 따르면 시나리오 2의 5년차 점수는 80점이 된다. 이와 같은 방법으로 시나리오 1과 2에 대해서 각 년차별로 평가한 결과를 다음 **Table 10**에 나타내었다.

시나리오 1의 경우 기준값으로 1년차부터 (y−1)년차까지의 표본평균값을 사용하므로 년차가 증가할수록 y년차의 I/I비 표본평균값이 (y−1)년차까지의 I/I비 표본평균값보다 커지는 양상을 보인다. **Table 4**에 의하면 전년도 대비 I/I비 표본평균값이 낮아지는 경우가 있음에도 불구하고 2018년부터는 가장 낮은 점수들을 받았다. 또한 준공 후 초기에는 I/I비 표본평균값이 지속적으로 커지고 있는 양상을 보이므로 높은 점수를 받지 못하였다.

시나리오 2의 경우 기준값으로 평가 직전 3년간의 표본평균값을 사용하므로 시나리오 1과는 다른 형태의 결과를 보여주었다. 초기에는 100점을 받지 못하였으나, 처음으로 표본평균값이 낮아지는 2017년에는 100점을 받았다. 2017년 뿐만 아니라 신뢰구간법의 시나리오 2와 마찬가지로 I/I비 표본평균값이 감소하는 년차인 2019년, 2023년, 2025년, 2028년 모두 100점을 받았다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 I/I비 표본평균값의 증가세가 둔화된 2023년부터는 모두 100점을 받았다.

상하수도학회지, 논문
24권 5호, pp.617-628, 10월, 2010

Table 10. 통계적 가설검증 기법에 따른 평가 결과

| 년도 | 년차(y) | 시나리오 1 | | 시나리오 2 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $t_y^{s1}$값 | 점수 | $t_y^{s2}$값 | 점수 |
| 2012 | 4 | 2.117 | 80점 | 2.117 | 80점 |
| 2013 | 5 | 2.465 | 70점 | 1.870 | 80점 |
| 2014 | 6 | 2.733 | 70점 | 1.799 | 90점 |
| 2015 | 7 | 2.951 | 60점 | 1.466 | 90점 |
| 2016 | 8 | 3.657 | 50점 | 2.159 | 80점 |
| 2017 | 9 | 2.184 | 80점 | 0.242 | 100점 |
| 2018 | 10 | 4.587 | 50점 | 2.547 | 70점 |
| 2019 | 11 | 4.730 | 50점 | 0.454 | 100점 |
| 2020 | 12 | 5.935 | 50점 | 2.716 | 70점 |
| 2021 | 13 | 5.909 | 50점 | 2.163 | 80점 |
| 2022 | 14 | 5.244 | 50점 | 2.243 | 80점 |
| 2023 | 15 | 5.340 | 50점 | -0.154 | 100점 |
| 2024 | 16 | 6.173 | 50점 | 1.179 | 100점 |
| 2025 | 17 | 4.532 | 50점 | -0.151 | 100점 |
| 2026 | 18 | 6.210 | 50점 | 1.034 | 100점 |
| 2027 | 19 | 5.541 | 50점 | 1.032 | 100점 |
| 2028 | 20 | 4.179 | 50점 | -1.517 | 100점 |

시나리오 1의 신뢰구간법 및 통계적가설검정기법 두가지 방법론 모두 기준값으로 1년차부터의 모든 값을 사용하므로 초기의 낮은 I/I비 표본평균값이 모두 포함되어 전반적으로 낮은 점수를 받았다. 즉, 시간의 흐름에 따라 노후도가 증가하는 관거 특성상 변별력 있는 평가라고 보기는 힘들다.

통계적 가설검정기법의 시나리오 2의 경우 I/I비 표본평균값이 감소하는 년차에는 높은 점수를 부여받게 되며, 이는 각 년차별 I/I비 평균값 변화에 맞추어 합리적인 점수를 받았다고 판단된다. 또한, 통계적 가설검정기법의 경우 I/I비 표본평균값의 증가세가 둔화되는 2023년부터는 일관되게 높은 점수를 받은데 반해, 신뢰구간법의 경우 I/I비 표본평균값의 증가세가 둔화되었더라도 전년도 대비 증가된 2024년, 2026년, 2027년에는 상대적으로 낮은 점수(각각 60점, 70점, 60점)를 받아 통계적 가설검정기법에 비하여 I/I비 표본평균값의 변화에 민감하게 점수가 반영되는 것을 알 수 있다.

하지만, 본 연구를 통해 신뢰구간법, 통계적가설검정기법을 시나리오별 분석에 의해 구한 결과는 **Table 4**에서 가정하여 사용한 I/I비의 측정값에 기초한 것이라서 실제 I/I비 측정값의 추세에 따라 방법론별 결과의 차이가 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 통계학적인 접근방법으로 신뢰구간법 및 통계적 가설검정 기법을 활용한 I/I평가 방법론을 제시하고 있다. 각 방법론 및 시나리오에 따라 같은 측정치를 갖는 경우에도 결과가 매우 크게 달라지는 경향을 보였다. 평가기법에 상관없이 1년차부터 평가년차까지 모두를 대조군으로 사용하는 시나리오 1의 경우 초기의 낮은 I/I 비 평균값이 모두 반영이 되어 상대적으로 평가년 전 3년차만을 대조군으로 사용하는 시나리오 2(신뢰구간법 평균 : 67.65점, 통계적가설검정기법 평균 : 89.41점)가 시나리오 1(신뢰구간법 평균 : 50점, 통계적가설검정기법 평균 : 56.47점)에 비해서 높은 점수를 받는 경향이 나타났다. 신뢰구간법의 경우 년차별 I/I비 표본평균값 변화에 따라 점수가 상대적으로 더 민감하게 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 통계적 가설검정 기법의 경우, 증가세가 둔화됨에 따라 전반적으로 높은 점수를 받는 경향을 보여주었다. 하지만, 본 연구에서는 I/I 비를 모두 가정하여 사용하였으므로, 실제상황에 완벽하게 적용될 수 있다고 판단하기는 힘들며, 실제 데이터가 없는 상황속에서 가장 타당한 방법론을 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한, 본 연구에서 제시하고 있는 점수의 배점과 유의수준은 모두 임의로 선정한 것이므로 실

제 적용시에는 실제 데이터에 근거하여 유의수준을 선정하고 평가 배점을 달리 선정할 필요가 있을 것이다.

## 참고문헌

박정식, 윤영선(2002) *현대통계학. 제4판,* 다산출판사, 서울.

현인환, 오재일, 김영란, 독고석(2005) *관거정비후 성과보증조건 I/I량 산정방안 연구,* 대한상하수도학회.

현인환, 구자용, 김영란, 오재일, 독고석(2006) *한강수계 하수관거 정비 시범사업(1단계)의 대안준공지표 설정*, 대한상하수도학회.

한국개발연구원(2006) *BTL 하수관거 정비사업 성과요구수준서 표준안 연구.*

환경관리공단(2005) *2005년 하수관거정비 BTL 민간투자사업 시설사업기본계획.*

환경관리공단(2008) *하수관거정비 임대형 민자사업(BTL) 시설 운영단계 유지관리체계 구축연구(안).*

환경부(2008) *국내 실정에 맞는 하수관거 침입수/유입수 산정방법 및 적용방안 연구.*

환경부 (2005) *2006년 하수관거 BTL사업 추진계획.*

國土交通省 (2002) *國土技術政策綜合研究所.*

後藤淸 (1998-1999) *불명수 대책강좌*, 月刊下水道, 1998.11.~1999.10.

Ashley, R. and Hopkinson, P.(2002), Sewer systems and performance indicators into the 21st century, *Urban Water*, 4, pp. 123-135.

Conklin, G.F. and Lewis, P.W.(1980) *Evaluation of Infiltration/Inflow Program*. Project 68-01-4913, U.S. EPA, Washington, D.C.

Steketee, C.H.(1981) *Demonstration of Service Lateral Testing and Rehabilitation Techniques*, Prepared for the U.S. EPA-600/2-85-131, U.S. EPA, Washington, D.C.

Zhang, Z(2005) Flow data, inflow/infiltration ratio, and autoregressive error models, *Journal of Environmental Engineering*, **131**(3), pp. 343-349.