



# 수량화Ⅱ류이론을 활용한 상수도관로의 안전성 평가 모델 개발 및 적용성 평가 연구

## A Study on the Development and Applicative Estimation of Safety Evaluation Model for Water Supply Pipelines using Quantification Theory Type Ⅱ

김기범·신희수·서지원·구자용\*  
Kibum Kim·Hwisu Shin·Jeewon Seo·Jayong Koo\*

서울시립대학교 환경공학과  
Department of Environmental Engineering, University of Seoul

### ABSTRACT

Owing to time and cost constraints, new methods that would make it possible to evaluate the safety of the water supply pipeline in a less time- and cost-consuming manner are urgently needed. In response to this exigency, the present study developed a new statistical model to assess the safety of the water supply pipeline using the quantification theory type II. In this research, the safety of the water supply pipeline was defined as 'a possibility of the pipeline failure'. Quantification analysis was conducted on the qualitative data, such as pipe material, coating, and buried condition. The results of analyses demonstrate that the hit ratio of the quantification function amounted to 77.8% of hit ratio, which was a fair value. In addition, all variables that were included in the quantification function were logically valid and demonstrated statistically significant. According to the results derived from the application of the safety evaluation model, the coefficient of determination ( $R^2$ ) between K-region's water supply pipeline safety and the safety inspection amounted to 0.80. Therefore, these findings provide meaningful insight for the measured values in real applications of the model. The results of the present study can also be meaningfully used in further research on safety evaluation of pipelines, establishing of renewal prioritization, as well as asset management planning of the water supply infrastructure.

**Key words:** Water supply pipelines, Quantification theory type II, Safety evaluation model, Asset management plan

**주제어:** 상수도관로, 수량화Ⅱ류 이론, 안전성 평가 모델, 자산관리 계획

## 1. 서 론

상수도관은 시간이 지남에 따라 다양한 원인에 의하여 상수도관 본연의 기능이 저하되며, 상수도관의 기능저하는 다양한 모습으로 상수도 시스템의 안전성 및 수도물 공급의 신뢰성 저하를 유발한다. 만약, 적

절한 대응없이 상수도관로의 노후화를 방치할 경우 누수량의 증가, 급수 수질 저하 또는 재해시 사고 위험이 증가하여 유지관리에 있어 중요 사항인 안전성이 저하될 수 있다. 수도물 공급과정의 중요한 역할을 담당하고 있는 상수도관로의 안전성은 곧 국민의 안전과 직결되는 사안이므로 한국의 수도법에서는 5년 주기로 상수도관로의 안전성 평가를 시행하도록 규정하고 있다. 그러나 이를 위해 소요되는 시간과 비용이

Received 13 January 2016, revised 22 January 2016, accepted 25 January 2016

\*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

pp. 001-008

pp. 009-017

pp. 019-031

pp. 033-040

pp. 041-049

pp. 051-058

pp. 059-067

pp. 069-075

pp. 077-085

pp. 087-097

pp. 099-104

pp. 105-111

막대하여, 적은 시간과 적은 비용으로 상수도관로의 안전성을 평가할 수 있는 방법론의 개발이 요구되고 있다.

현재 한국에서는 상수도관의 노후도 평가를 통해 상수도관의 안전성을 간접적으로 평가하고 있다. 그러나 노후도는 설명하기 곤란한 변수의 존재, 평가인자별 가중치 선정에 개입되는 임의성 등으로 평가의 신뢰성에 제한이 있는 실정이다. 상수도관의 안전성과 관련된 대다수의 연구들은 주로 상수도관의 열화 모델을 기반으로 하고 있으며, 열화모델에 포함되는 변수들은 대부분 설명하기 곤란한 정성적인 변수는 제외하고, 정량적인 변수를 위주로 구성되어 있다. Choi et al. (2014), Tee et al. (2014) 등은 상수도관망의 안전성을 평가하기 위하여 신뢰성 지표를 도입하였으며, Christodoulou and Fragiadakis (2014), Scholten et al. (2014) 등은 운영데이터를 기반으로 다기준의사결정 방법을 활용하여 상수도관망의 취약성, 즉 안전성을 분석하였다. Kim et al. (2013), Koo (2015), Kim (2015) 등은 상수도관의 부식을 기반으로 상수도관의 안전성 평가를 시행한 바 있다. 그러나 상기의 연구들은 매설 연도, 토양부식성점수 등과 같은 정량적 요인만을 고려하고, 관중, 지형조건 등과 같은 정성적인 요인은 고려하지 못하였다. 명확한 안전성 평가를 위해서는 정량적 요인 이외에 정성적인 요인도 고려할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 상수도관로를 대상으로, 상수도관로의 안전성을 “관로 사고 발생 위험도”로 정의하고, 관중, 관 코팅 재질, 지형조건 등의 정성적 데이터를 정량화하는 기법인 수량화Ⅱ류 이론을 활용하여 상수도관로의 안전성을 평가하는 통계적 모델을 개발하였다. 또한, 개발한 모델의 연구대상지역 적용을 통하여 상수도관로의 안전성 평가에 활용할 수 있는 적용성을 검토하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경(수량화Ⅱ류 이론)

수량화 이론은 1950년대 일본에서 전개된 다차원 데이터분석방법이며, 당초 주목받지 못하다가 최근 그 성과가 재평가되고 있는 이론이다. 수량화 분석은 인문사회분야 관련 연구, 심리 등 의학관련 조사연구 등과 같이 정성적인 범주를 갖는 자료의 분석에 다양하게 활용되고 있다 (Jiang et al. 2010).

특히 수량화Ⅱ류 이론은 정성적인 개념으로 측정된 종속변수를 잘 판별 또는 설명할 수 있는 독립변수들을 발견하여 판별함수를 도출하고, 이를 토대로 새로운 자료가 속할 종속변수의 집단을 예측해 내는 통계 기법으로 판별분석과 유사한 기법이다 (Hayashi and Komazawa. 1982). 특히, 상수도관로에서 발생하는 파손의 원인, 관중, 매설된 관로 주변의 환경 등과 같은 변수는 정량적 해석이 불가능하므로 정성적인 개념의 변수를 정량적인 개념으로 전환하는 수량화이론의 도입이 필요하다 (Arai et al. 2009).

$A$ 개의 설명특성(독립변수  $X$ )이 각각  $m$ 개의 카테고리리로 구분되어 목적값(종속변수  $Y$ )이 도출되는 경우 수량화Ⅱ류 이론의 이론식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 수량화Ⅱ류 이론을 활용하여 수량화함수식을 도출하는 것은 구간변동과 전체변동 사이 상관비가 최대가 되도록 하는 카테고리 점수를 구하는 것을 말한다. 식 (2)는 상관비( $\eta^2$ )를 도출하기 위한 식을, 식 (3)과 식 (4)는 카테고리가  $m$ 개, 군이  $k$ 개,  $i$ 번째 군의 개체수를  $n_i$  라고 할 때 구간변동( $S_B$ ) 및 전체변동( $S_T$ )을 구하기 위한 이론식을 나타낸다.

$$Y = \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^m \alpha_{an} \beta_{an} x_{an} + \epsilon \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_{an} = \begin{cases} 1 : \text{카테고리 } (C_a) \text{에 해당} \\ 0 : \text{카테고리 } (C_a) \text{에 해당하지 않음} \end{cases}$   
 $\beta_{an} : \text{카테고리 점수}$   
 $\epsilon : \text{오차항}$

$$\eta^2 = \frac{S_B}{S_T} \quad (0 \leq \eta^2 \leq 1) \quad (2)$$

$$S_B = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

여기서,  $\bar{y}_i : i$ 번째 군의 카테고리 점수 평균

$\bar{y} : \text{전체의 카테고리 점수 평균}$

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (4)$$

여기서,  $y_{ij} : i$ 번째 군의  $j$ 번 표본의 카테고리 점수



수량화II류 이론을 통해 도출되는 수량화함수는 평가대상이 어느 집단에 속하는가를 예측할 수 있으므로, 본 연구에서는 상수도관로의 안전성을 평가할 수 있는 모델의 개발에 수량화II류 이론을 활용하였다.

### 3. 연구방법

#### 3.1 안전성 평가 모델 개발

상수도관의 안전성에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하다. Kleiner and Rajani (2002), 캐나다의 NRC-CNRC (2003)와 Al-barqawi and Zayed (2006)는 상수도관의 안전성에 영향을 미치는 요인을 크게 물리적인 요인, 환경적인 요인 그리고 운영적 요인으로 구분하였다. Grigg (2005)도 상수도관로의 안전성에 영향을 주는 요인을 이와 유사하게 재료 및 시공 요인, 환경 요인, 운영 요인, 재해 등의 취약성으로 구분하고 있다. 여기서, 운영적 요인은 상수도관로 매설위치의 지역적 특성, 수도관리자의 업무 수행능력에 따라 달라질 수 있는 요인이다. 그러나 본 연구에서는 수도사업자의 운영 업무 수행능력 및 운영조건은 큰 틀에서 모두 유사할 것으로 전제하고, 상수도관의 안전성에 영향을 미치는 요인으로 물리적인 요인과 환경적인 요인을 고려하였다. 본 연구의 연구흐름도는 Fig. 1과 같다.

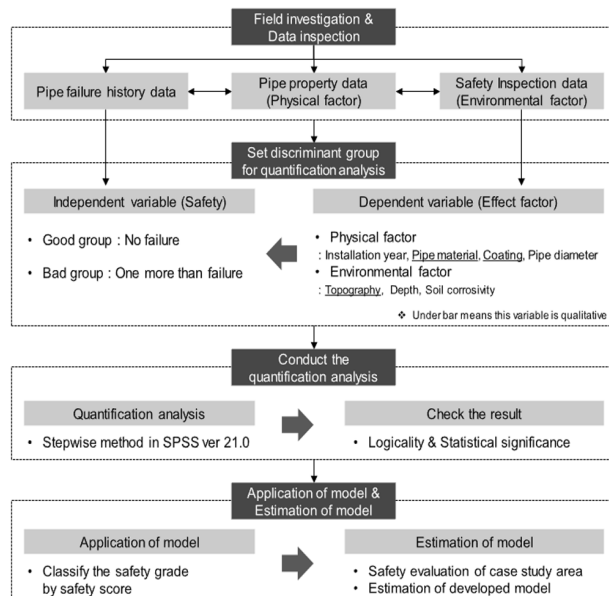


Fig. 1. Flow chart of the study.

#### 3.1.1 자료의 수집 및 정리

본 연구에서는 상수도관로 안전성 평가 모델의 개발을 위한 기초데이터로서, 도·송수관로 현황자료 및 사고 이력자료, 상수도관로 안전진단 결과 자료를 활용하였다. 상수도관로의 매설 위치, 관종, 관경, 관 코팅 재질 등과 같은 관로현황 자료로는 해당지역의 수도사업자가 관리하고 있는 2014년 말 기준의 상수도관로 현황자료를 활용하였으며, 관로 매설 조건이 유사한 지역은 한 구간으로 설정하였다. 관로에서 발생한 사고건수를 산정하기 위한 관로사고 이력자료로는 1980년부터 2014년 말까지 35년간 발생한 사고 이력 자료를 활용하였으며, 현재 운휴중인 관로에서 발생한 사고 및 정확한 사고 위치를 파악할 수 없는 사고를 제외한 1,186건의 사고 이력자료를 활용하였다. 매설된 상수도관로 상부의 지형조건, 매설 심도, 매설된 관 주변의 토양부식성 등과 같은 자료는 36개 지역의 도·송수관로를 대상으로 1997년부터 2012년까지 실시한 안전진단 결과 자료를 활용하였으며, 상수도관로 현황자료와의 대조 및 사고 이력자료와의 대조를 통해 토양 성분을 포함한 모든 매설환경이 조사된 구간은 712개의 구간이었다. 따라서 본 연구에서는 수량화 분석의 표본으로서 712개의 표본을 활용하였다.

#### 3.1.2 변수의 설정

상수도관의 안전성을 나타내는 지표, 즉 종속변수는 각 관로에서 발생한 사고의 유무로 설정하였다. 표본으로 선정한 712개의 관로 구간 중 사고가 1건 이상 발생한 관로는 Bad군으로, 사고가 발생하지 않은 관로는 Good군으로 정의하였다. 그 결과 수량화분석 전 Bad군으로 설정된 관로는 142개 구간, Good군으로 설정된 관로는 570개의 구간으로 나타났다.

앞서 기술한 바와 같이 상수도관의 안전성에 영향을 주는 인자는 크게 물리적 요인과 환경적 요인으로 구분하고, 물리적 요인으로는 매설연도, 관종, 관 코팅 재질, 관경의 4가지를, 환경적 요인으로는 관 매설 상부의 지형조건, 매설 심도, 토양부식성의 3가지를 선정하였다. 토양의 부식성과 관련된 자료로는 토양비저항, 토양pH, 토양함수율, 염화물(Cl<sup>-</sup>)농도, 황화물(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)농도의 5가지 자료를 조사하였다. 여기서, 토양부식성을 평가하기 위한 방법으로는 대표적으로 미국 AWWA (1988)의 국가규격(ANSI/AWWA C 105/A 21.5-82)과 Baeckmann and Schwenk (1971), DIN(독일 표준)

(1988) 이 활용되고 있다. 이와 같은 방법을 활용하여 토양부식환경을 평가하는 것이 바람직하나, 조사한 자료의 한계로 인하여, 본 연구에서는 국외의 기준을 참조하여 점수평가 기준을 설정하였다. Table 1은 본 연구에서 활용한 토양부식성 평가점수 기준을 나타내며, 본 기준을 활용하여 토양부식성을 점수화하였다. 점수는 높을수록 부식성이 높음을 나타내며, 각 항목이 모두 최악조건

일 때의 최대점수를 16점으로 설정하였다.

Table 2는 수량화II류 이론의 적용을 위하여 구분한 독립변수의 카테고리 마다의 개수를 나타낸다. 각 독립변수는 통계적 유의성이 확보가 가능한 수준의 표본수를 고려하여 2개~4개의 카테고리들로 구분하였으며, 각 카테고리의 숫자가 현저한 차이가 발생하지 않도록 유의하였다.

**Table 1.** Criteria of soil corrosivity score in this study

Items	Criteria	Score	Items	Criteria	Score
Soil resistivity (Ω-cm)	< 5,000	3	Water content (%)	> 20	1
	5,000~10,000	2		≤ 20	0
	10,000~20,000	1	Cl <sup>-</sup> content (mg/L)	≥ 50	3
	> 20,000	0		30 ~ 50	2
Soil pH (-)	< 4	3	10 ~ 30	1	
	4~5.5	2	< 10	0	
	5.5~6.5	1	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> content (mg/L)	≥ 200	3
	≥ 6.5	0		100 ~ 200	2
			30 ~ 100	1	
			< 30	0	

**Table 2.** Variable and category for quantification type II analysis

Variable	Category	Range	Number of group	Ratio of group (%)	Length (km)	
Physical	Installation year	Installation 1	Before 1985	114	16.01	108.0
		Installation 2	1985 ~ 1995	221	31.04	260.0
		Installation 3	1995 ~ 2005	339	47.61	491.6
		Installation 4	After 2005	38	5.34	30.7
	Pipe material	Material 1	Steel pipe	523	73.46	682.4
		Material 2	Cast Iron pipe and Others	189	26.54	207.9
	Coating	Coating 1	Epoxy	349	49.02	491.0
		Coating 2	Enamel	178	25.00	194.3
		Coating 3	None	185	25.98	204.9
	Pipe diameter	Diameter 1	Below 500mm	80	11.24	67.8
		Diameter 2	500mm ~ 1,000mm	206	28.93	262.8
		Diameter 3	1,000mm ~ 1,500mm	190	26.69	240.0
Diameter 4		Above 1,500mm	236	33.15	319.7	
Environmental	Topography	Topography 1	Road	272	38.20	336.7
		Topography 2	Land	343	48.17	414.2
		Topography 3	River or others	97	13.62	139.4
	Depth	Depth 1	Below 1.5m	65	9.13	76.5
		Depth 2	1.5m ~ 2.0m	150	21.07	180.6
		Depth 3	2.0m ~ 2.5m	203	28.51	267.8
		Depth 4	Above 2.5m	294	41.29	365.3
	Soil corrosivity	Soil 1	Below 2.0 (point)	191	26.83	232.7
		Soil 2	2.0 ~ 4.0 (point)	291	40.87	348.1
Soil 3		Above 4.0 (point)	230	32.30	309.4	



### 3.1.3 수량화분석

수량화분석은 상용화된 SPSS ver 21.0을 사용하여 수행하였으며, 관로의 안전성을 분류하는 수량화Ⅱ류 이론의 결과를 도출하기 위한 독립변수는 단계선택법(Stepwise Method)을 통해 가장 통계적으로 유의한 변수만이 순차적으로 선택되도록 하였다. 단계선택법은 수량화함수에 포함되지 않은 변수들 중 F값이 진입값보다 큰 변수는 수량화함수에 포함을 하고, 이미 진입한 변수의 F값이 제거값보다 큰 변수는 제거하는 방법이다 (Kim et al. 2013). 변수를 포함하는 F값의 유의확률로는 0.05, 변수를 제거하는 F값의 유의확률로는 0.10을 사용하였다.

수량화Ⅱ류 이론의 적용은 다변량 정규분포를 가정하고 각 집단의 공분산이 동일하다는 전제하에 성립된다. 집단에 대한 공분산행렬의 동일성 검정은 Box's M검정을 사용하였다. 한편, 도출된 수량화함수가 통계적으로 유의한지 유의하지 않은지는 Wilk's lambda 검정법을 활용하여 검정하였다.

### 3.2 안전성 평가 모델의 적용성 평가

개발한 안전성 평가 모델은 굴착에 의한 직접진단에 의한 평가가 아닌 간접 평가 방법을 이용하는 것이라 할 수 있다. 실제 현장에서 개발한 모델을 직접적으로 활용하기 위해서는 직접진단에 의한 관로 안전성 평가 결과와의 비교가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 안전성 평가 모델의 적용성 평가를 위해 직접진단 결과와의 비교를 수행하였다. 한편, 도출된 수량화함수를 통하여 각 관로의 안전성 점수를 산출한 뒤 사용자의 편리성과 이해도 등을 고려하여, 안전성 평가 점수를 비율에 따라 Good군, Normal군, Bad군, Serious군으로 등급화하였다.

## 4. 연구결과

### 4.1 안전성 평가 모델 개발 결과

앞서 기술한 바와 같은 방법으로 Bad군에 해당하는 관 142개 구간과 Good군에 해당하는 관 570개 구간을 대상으로 수량화Ⅱ류 이론을 적용한 결과 Table 3과 같은 수량화함수를 도출하였다.

도출한 수량화함수의 적용률(Hit ratio)은 77.8%로 나타나 적절한 분별력을 갖는 것으로 판단되었다. Table 4는 수량화분석을 통해 기존의 집단이 분류된

**Table 3.** Result of quantification type Ⅱ analysis

Dependent variable (Safety)	Independent variable
	$Y = + 1.667 \times \text{Installation 1} + 1.031 \times \text{Installation 2} - 0.336 \times \text{Type 2} - 0.644 \times \text{Coating 1} + 0.013 \times \text{Topography 1} - 0.555 \times \text{Topography 2} - 0.447 \times \text{Depth 4} + 0.210 \times \text{Soil 2} + 0.402 \times \text{Soil 3} - 0.352(\text{Constant})$

**Table 4.** Result of quantification type Ⅱ analysis

		Predicted group		Total
		Good	Bad	
Origin group	Good	446	124	570
	Bad	34	108	142
Total		480	232	712

결과를 나타낸다. 실제로는 Bad군에 속하나 Good군으로 잘못 분류된 것을 나타내는 2종 오류는 4.7%로 5.0% 미만으로 나타나 분류가 양호하게 된 것으로 판단되었다. 수량화함수의 적중점(Hit point)은 Y=0으로, 안전성 평가 점수가 음수, 즉, 적중점(Y=0)보다 작은 경우에는 Good군, 큰 경우에는 Bad군으로 결정된다. 이는 선정된 독립변수의 계수가 음수이면 안전성을 높이는 변수로 작용하고 계수가 양수이면 안전성을 떨어뜨리는 변수로 작용하고 있음을 나타낸다.

Table 3과 Fig. 2에서도 알 수 있듯이, 매설년도가 오래될수록, 도로에 매설되어 있는 경우, 토양 부식성이 증가할수록 안전성은 떨어지는 것으로 나타났다. 반대로, 코팅 재질로서 에폭시를 사용한 경우, 일반대지에 매설된 경우, 매설심도가 깊은 경우 안전성은 높아지는 것으로 나타났다. 선정된 각 독립변수의 계수들은 기존의 문헌에서 알려진 사실과 일치하는 경향을 나타냄으로서, 도출된 수량화함수가 논리적으로 타당한 것으로 판단되었다.

한편, 도출된 수량화함수의 통계적 유의성 검정을 수행한 결과는 다음과 같다. Box's M 검정 결과, Box's M에 대한 F값의 유의확률이 0.455로 일반적으로 사용하는 유의확률 기준 0.05에 비해 높은 값을 나타내었다. 공분산행렬이 동일하다는 귀무가설을 기각하지 못하므로 도출된 수량화함수는 각 집단의 공분산이 동일하다는 전제를 만족하였다고 할 수 있다. 다음 Table 5는

pp. 001-008  
pp. 009-017  
pp. 019-031  
pp. 033-040  
pp. 041-049  
pp. 051-058  
pp. 059-067  
pp. 069-075  
pp. 077-085  
pp. 087-097  
pp. 099-104  
pp. 105-111

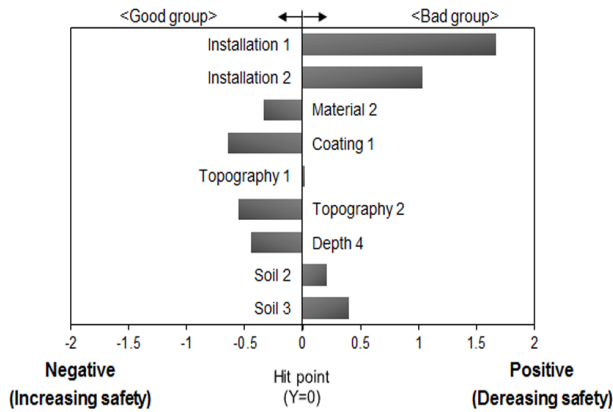


Fig. 2. Category score of quantification analysis.

Table 5 Result of Box's M test

	Box's M	0.102
F	Approximation	0.102
	Significant probability	0.455

Table 6. Result of Wilk's lambda test

Wilk's lambda	Chi-square	Degree of freedom	Significant probability
0.683	244.556	9	0.000

도출된 수량화함수에 대한 Box's M 검정 결과를 나타낸다. Wilk's lambda 검정을 수행한 결과는 Table 6과 같으며, Wilk's lambda에 대한 카이제곱값의 유의확률이 일반적으로 사용하는 유의확률 0.05에 비해 낮은 값을 나타내었으므로, 함수가 통계적으로 유의하지 않다는 귀무가설이 기각되어 도출된 수량화함수는 통계적으로 유의한 결과를 나타내었다.

## 4.2 안전성 평가 모델의 적용성 평가

### 4.2.1 안전성 등급 구분

수량화분석을 통해 개발한 안전성 평가 모델의 적용성을 높이기 위하여 안전성 평가 점수의 등급을 구분하였다. 분석에 활용하기 위해 표본으로 선정한 각 관로의 특성(카테고리 점수)을 반영하여 해당 관로의 안전성 평가점수를 산출한 뒤, 전체 관로 연장 대비 해당하는 점수를 획득한 관로의 연장 비율을 도출한 결과는 Fig. 3과 같다.

판별 적중점에서 멀어질수록, 즉 수량화점수(안전성 평가 점수)의 절대값이 커질수록 각 군에 속하는

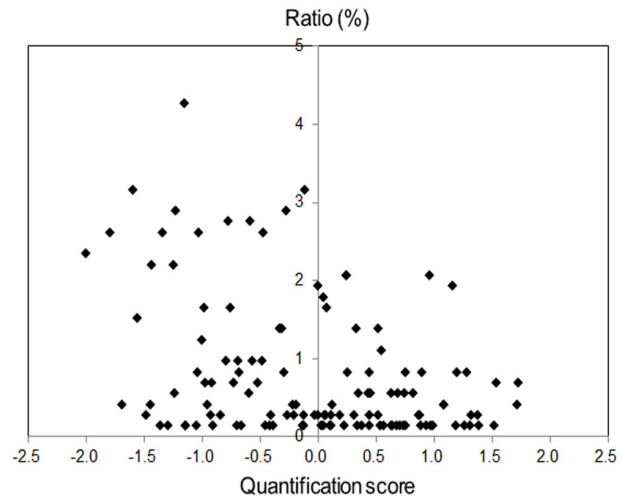


Fig. 3. Ratio of quantification score of selected samples.

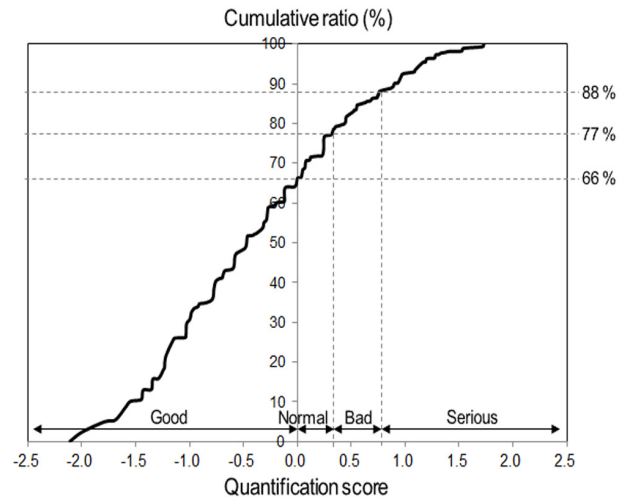


Fig. 4. Cumulative distribution of quantification score.

Table. 7 Result of classified grade by quantification score

Grade	Discriminant score	Ratio of length (%)
Good	$-2.110 \leq \chi \leq 0$	66.2
Normal	$0 < \chi \leq 0.313$	11.2
Bad	$0.313 < \chi \leq 0.826$	10.8
Serious	$0.826 < \chi \leq 1.730$	11.8

경향이 강해진다. Good군에 해당하는 관로는 상대적으로 안전한 관로라 판단할 수 있다. Bad군으로의 안전성 평가 점수가 커지는 것은 안전성이 취약해짐을 의미하며, 유지관리의 우선순위가 증가하는 것을 의미한다.

본 연구에서는 안전성 등급을 표현하는 것이 유지관리업무에 더 효율적일 것으로 판단하여, 전체 표본 중



안전하다고 판단되는 Good군을 제외하고 34%(295.6km)에 해당하는 Bad군의 관로를 관로연장비율에 따라 3등급으로 더욱 세분화하여 구분하였다. 모든 관로에서 산출된 안전성 평가 점수를 오름차순 정렬한 뒤 표본 전체의 관로 연장에 대비하여 누적분포도를 도시한 결과는 Fig. 4와 같다.

Table 7은 표본으로 선정한 관로 구간의 안전성 평가 점수에 따라 안전성 등급을 구분한 것과, 각 등급에 해당하는 관로 연장의 비율을 나타낸다.

#### 4.2.2 안전성 평가 모델의 적용

개발한 안전성 평가 모델의 검증 및 적용성을 평가하기 위하여 1개의 연구대상지역을 선정하였다. 연구대상관로의 선정에 있어서는 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 노후가 진행되어 관로 파손횟수가 많다고 판단되는 관로, 둘째, 단선으로 구성되어 있어 관로 파손에 따른 물 공급 안전성이 취약한 관로 등이다. 이러한 조건에 부합하는 지역으로 K 지역 상수도를 선정하였다.

K 지역 상수도는 약 73%의 관이 도복장강관(SP)으로 구성되어 있으며, 매설된 이후 2014년 말까지 총 73건의 관로사고가 발생하여 타 지역 상수도에 비하여 높은 사고율(사고건수/매설관로연장)을 나타내고 있다. 또한 대다수의 구간이 단선으로 이루어져 있어 안전성이 취약한 관로로 평가되고 있다.

안전성 평가 모델의 적용 대상 지역인 K 지역 상수도의 현황은 Table 8과 같다.

개발한 안전성 평가 모델을 적용하여 K 지역 상수도 관로의 안전성 평가 등급을 도시한 결과는 Fig. 5와 같다. 여기서, 토양 특성이 조사되지 못한 구간 경우에는 K 지역 상수도관로의 평균 토양 특성을 대입하여 등급을 산출하였다. 안전성 평가 결과, 각 시 및 배수지로 유입하는 관로는 대체로 안전한 것으로 나타났으나, S정수장 ~ H가압장, H가압장 ~ K분기점 구간과 K분기점 ~ K시관말 구간은 전반적으로 안전성이 나쁘거나(Bad), 심각한 상태(Serious)인 것으로 나타났다.

K 지역 상수도의 개량 우선순위를 안전성에 기반하여 판단한다면 S정수장 ~ K분기점, K분기점 ~ K시구간의 개량 우선순위가 가장 높다고 판단할 수 있다. 또한, K 지역 상수도는 단선으로 이루어져 있어 시급히 비상연계시설 및 복선화(이중화)가 필요하다고 판단된다.

Table 8. Water supply of K region

Content	Description
Installation year	1981 ~ 2012 (About 60% of pipe had been buried before 1990)
Pipe type	Steel pipe, Ductile cast iron pipe
Pipe diameter	250mm ~ 1,500mm
Break history	73 (from 1981 to 2014)
Pipe length	151.305km
Supply area	B city, N city, K city, I city, J city

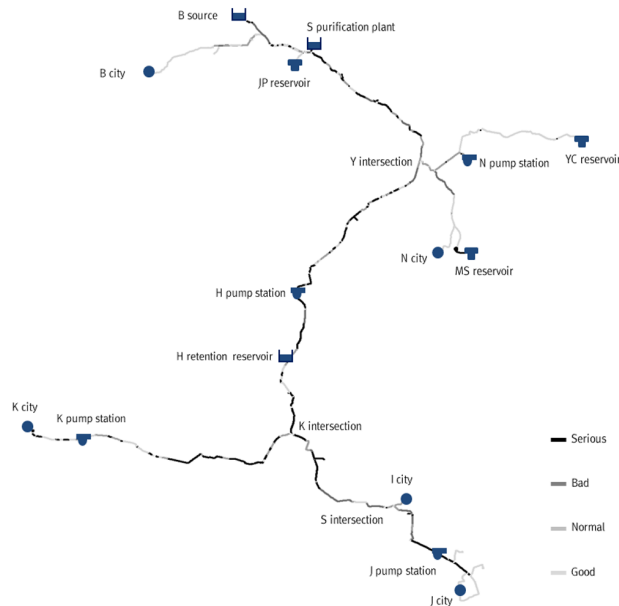


Fig. 5. Result of safety evaluation of water supply of K region.

Table 9는 K 지역 상수도 개별 관로의 정밀안전진단 평가점수와 본 연구에서 개발한 안전성 평가 모델을 적용하여 도출한 안전성 평가 점수를 나타낸다. 안전성 평가 점수는 각 구간 내 개별관로의 안전성 평가 점수를 관로연장에 따라 가중평균하여 구한 점수이며, 양의 값이 클수록 안전성이 낮음을 나타낸다. 정밀안전진단 평가점수는 5년단위로 측정하고 있는 K 지역 상수도의 정밀안전진단 결과이며, 5점에 가까울수록 안전성이 높음을 나타낸다.

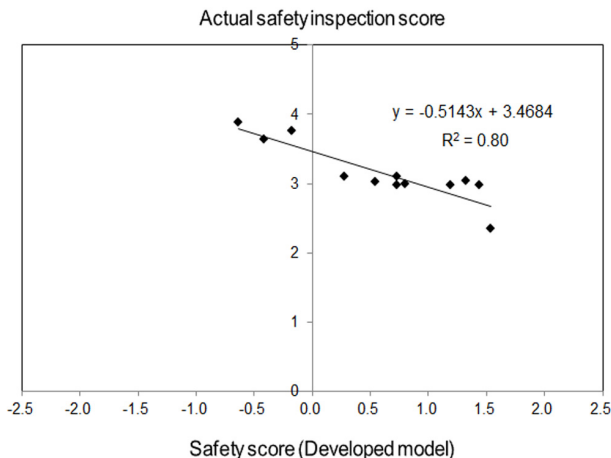
Fig. 6에 나타난 바와 같이 본 연구에서 개발한 안전성 평가 모델을 활용하여 K 지역 상수도의 안전성을 평가한 결과와 정밀안전진단 결과와의 결정계수( $R^2$ )는 0.80으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발한 안전성 평가 모델을 통해 도출되는 결과는 실제 현장 측정을 통해 안전성을 진단한 결과와 상당한 상관성을 갖고 있다고 판단된다.

pp. 001-008  
pp. 009-017  
pp. 019-031  
pp. 033-040  
pp. 041-049  
pp. 051-058  
pp. 059-067  
pp. 069-075  
pp. 077-085  
pp. 087-097  
pp. 099-104  
pp. 105-111



**Table 9.** Result of actual safety inspection and model application

Section	Safety inspection score	Safety score (Developed model application)	Safety degree (Developed model application)
B source - S purification plant	3.10	0.2786	Normal
S purification plant - B city (Original line)	3.88	-0.6340	Good
S purification plant - B city (Double line)	3.64	-0.4153	Good
S purification plant - Y intersection	2.98	0.7260	Bad
Y intersection - N city	3.03	0.5424	Bad
Y intersection - H pump station	2.98	1.4410	Serious
H pump station - K intersection	2.35	1.5412	Serious
K intersection - J pump station	3.00	0.7969	Bad
J pump station - J city	3.04	1.3229	Serious
S intersection - I city	3.76	-0.1724	Good
K intersection - K pump station	2.98	1.1957	Serious
K pump station - K city	3.10	0.7292	Bad



**Fig. 6.** Comparison between actual safety inspection score and safety score by developed model.

## 5. 결론

본 연구에서는 상수도관의 안전성을 “관로 사고 발생 위험도”로 정의하고, 관종, 관 코팅 재질, 지형조건 등의 정성적 요인을 정량화하는 수량화II류 이론을 도입하여 상수도관로의 안전성을 평가하기 위한 모델을 개발하였다.

도출된 수량화함수는 적중률이 77.8%로 선택된 변수들은 모두 논리적으로 타당한 것으로, 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다. 개발한 모델은 사용자의 편리성과 이해도 등을 고려하여, 수량화점수에 따라 안전성을 4개의 등급(Good, Normal, Bad, Serious)으로 구분하여 제안하였다. 개발한 안전성 평가 모델의 적

용성을 검토하기 위하여 연구대상지역으로 선정한 K 지역 상수도에 모델을 적용한 결과, 실제 정밀안전진단 결과 점수와의 상관성이 결정계수(R<sup>2</sup>) 0.80으로 높게 나타나 본 연구에서 개발한 안전성 평가 모델의 현장 적용성이 충분히 인정될 수 있는 것으로 판단된다.

향후 본 연구의 결과는 관로의 안전성 평가, 개량의 우선순위 선정, 상수도시설의 자산관리 계획 수립 등에 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 더욱 효율적이고 정확한 결론을 도출하기 위해서는 본 연구에서 활용한 요인 이외에 상수도관의 안전성과 관계하는 다양한 요인을 고려해야할 필요성이 있으며, 안전성 평가를 위한 관련 자료의 국가차원에서의 데이터베이스를 구축할 필요성이 있다고 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “환경정책기반 공공기술개발사업 - 상수도시설의 운영 및 자산관리 통합시스템 개발 (2014000700001)” 으로부터 지원 받았습니다.

## References

Al-barqawi, H. and Zayed, T. (2006), Condition rating model for underground infrastructure sustainable water mains, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20 (2), 126-135.

Arai, Y., Koizumi, A., Umamo, H., Ashida, H., Ozaki, M. and





- Yoshida, E. (2009), Statistical analysis of the corrosion of water distribution pipes under their environmental factors, *J. Jpn. Soc. Civ. Eng. Environ. Syst. Res*, 37 (37), 9-17.
- AWWA, (1988), Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Piping for Water and Other Liquids, ANSI/AWWA C105/A21.5-88.
- Baekmann, W. and Schwenk, W. (1971), Handbuch des Kathodischer Korrosion Schutze, 55, Verlag Chemie GmbH.
- Christodoulou, S. E. and Fragiadakis, M. (2014), Reliability assessment of lifeline systems, In : *Computing in Civil and Building Engineering*, ASCE, 1812-1819.
- Choi, T, Lee, S., Kim, D., Kim, M. and Koo, J. (2014), Application of management reliability index for water distribution system assessment, *Environmental Engineering Research*, 19 (2), 117-122.
- DIN, (1988), Soil classification for civil engineering purposes, DIN 18196.
- Grigg, N. S. (2005), Assessment and renewal of water distribution systems, *Journal of American Water Works Association*, 97 (2), 58-68.
- Hayashi, C. and Komazawa, T. (1982), *Quantification theory and data processing*, Asakura, Tokyo, Japan.
- Jiang, Y., Wang, C. and Zhao, X. (2010), Damage assessment of tunnels caused by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake using hayashi's quantification theory type II, *Natural Hazards*, 53 (3), 425-441.
- Kim, K. (2015), The optimal renewal planning using dynamic programming in water pipelines, Master's Thesis, University of Seoul, pp.193.
- Kim, M., Inakazu, T., Koizumi, A. and Koo, J. (2013), Statistical approach for corrosion prediction under fuzzy soil environment, *Environmental Engineering Research*, 18 (1), 1-7.
- Kleiner, Y. and Rajani, B. (2002), Forecasting variations and trends in water-main breaks, *Journal of Infrastructure Systems*, 8 (4), 122-131.
- Koo, M, (2015), A study on strategic risk assessment model for water suspension accident alternative in water supply network, Master's Thesis, University of Seoul, pp.170.
- NRC-CNRC, (2003), *Deterioration and inspection of water distribution systems*, Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, pp.34.
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M., and Lienert, J. (2014), Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis, *Water Research*, 49, 124-143.
- Tee, K. F., Khan, L. R., Chen, H. P. and Alani, A. M. (2014), Reliability based life cycle cost optimization for underground pipeline networks, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 32-40.

pp. 001-008

pp. 009-017

pp. 019-031

pp. 033-040

pp. 041-049

pp. 051-058

pp. 059-067

pp. 069-075

pp. 077-085

pp. 087-097

pp. 099-104

pp. 105-111