

열수송관 파손빈도 추정을 위한 변수간 독립성 검정

Test of Independence Between Variables to Estimate the Frequency of Damage in Heat Pipe

공 명 식¹⁾ · 강 재 모[†] · 이 성 열²⁾
Myeongsik Kong · Jaemo Kang · Sungyeol Lee

Received: November 16th, 2023; Revised: November 20th, 2023; Accepted: November 28th, 2023

ABSTRACT : Heat pipes located underground in urban areas and operated under high temperature and pressure conditions can cause large-scale human and economic damage if damaged. In order to predict damage in advance, damage and construction information of heat pipe are analyzed to derive independent variables that have a correlation with frequency of damage, and a simple regression analysis modified model using each variable is applied to the field. However, as the correlation between independent variables applied to the model increases, the independence between variables is harmed and the reliability of the model decreases. In this study, the independence of the pipe diameter, burial depth, insulation level of monitoring system, and disconnection or short circuit of the detection line, which are judged to be interrelated, was tested to derive a method for combining variables and setting categories necessary to apply to the frequency of damage estimation model. For the test of independence, the continuous variables pipe diameter and burial depth were each converted into three categories, insulation level of monitoring system was converted into two categories, and the categorical variable disconnection or short circuit of the detection line status was kept as two categories. As a result of the test of independence, p-value between pipe diameter and burial depth, level of monitoring system and disconnection or short circuit of the detection line was lower than the significance level ($\alpha = 0.05$), indicating a large correlation between them. Therefore, the pipe diameter and burial depth were combined into one variable, and the categories of the combined variable were set to 9 considering the previously set categories. The insulation level of monitoring system and the disconnection or short circuit of the detection line were also combined into one variable. Since the insulation level is unreliable when the detection line status is disconnection or short circuit, the categories of the combined variable were set to 3.

Keywords : Heat pipe, Test of independence, Pipe diameter, Burial depth, Insulation level, Detection line

요 지 : 도심지 지하에 위치하며 고온, 고압조건에서 운영되는 열수송관은 파손 시 인적, 경제적으로 대규모 피해가 발생할 수 있다. 파손을 사전에 예측하기 위해 기존 파손이력과 설비이력을 분석하여 파손빈도와 상관관계를 가지는 독립변수를 도출하고, 각 변수를 활용한 단순회귀분석 변형모델이 현장에 적용되고 있다. 다만, 모델에 적용되는 독립변수간 상관관계가 클수록 변수간 독립성이 훼손되어 모델의 신뢰성이 낮아진다. 본 연구에서는 상호 연관성을 가지는 것으로 판단되는 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨, 감지선의 단선 또는 단락의 독립성을 검정하여 파손빈도 추정모델에 적용하기 위해 필요한 변수간 결합 및 범주 설정 방안을 도출하였다. 독립성 검정을 위해 연속형 변수인 관경과 매설깊이는 각각 3개의 범주, 감시시스템 절연레벨은 2개의 범주로 변환하였으며, 범주형 변수인 감시시스템 감지선 상태는 범주를 그대로 2개로 유지하였다. 독립성 검정 결과, 관경과 매설깊이간, 감시시스템 절연레벨과 감지선의 단선 또는 단락간 유의확률이 유의수준($\alpha = 0.05$)보다 작아 상호간 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 따라서 관경과 매설깊이를 하나의 변수로 결합하고 사전에 설정한 범주를 고려하여 결합 변수의 범주는 9개로 설정하였다. 감시시스템 절연레벨과 감지선의 단선 또는 단락 역시 하나의 변수로 결합하였으며, 감지선 상태가 단선 또는 단락인 경우 절연레벨값을 신뢰할 수 없으므로 결합 변수의 범주는 3개로 설정하였다.

주요어 : 열수송관, 독립성 검정, 관경, 매설깊이, 절연레벨, 감지선

1. 서 론

열수송관은 대규모 열생산시설에서 생산된 열에너지를 주거 및 상업용 건물에 공급하는 지역난방시스템의 핵심 시설물

이다. 열수송관은 주로 도심지에 거주하는 주민 또는 상업 시설로 열에너지를 공급하기 위해 도심지 지하에 매설되어야 하며, 열수송관 파손 발생 시 열에너지 생산에 투입된 비용의 손실뿐만 아니라, 2018년 발생한 백석역 사고(권혜림,

1) Research Specialist, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : jmkang@kict.re.kr)

2) Postdoctoral Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2018)과 같이 100°C 이상의 고온, 고압의 열수가 주거지역 또는 변화가 등 인구밀집지역에 노출될 경우 인명피해의 우려도 높다.

지상에 설치된 건축물 또는 SOC 시설물의 경우 다양한 진단장비를 통해 파손 발생 징후를 선제적으로 파악하여 파손 전에 보수·보강공사를 진행할 수 있다. 반면 열수송관은 상하수도, 가스관 등 타 지하매설관로와 마찬가지로 지상에 노출되어 있지 않아 일정 규모 이상의 파손이 발생하지 않으면 파손여부를 파악하기 어렵다. 따라서 파손가능성이 높은 시설물을 선별하여 사전에 개선공사를 진행하는 선제적인 대응이 필요하다. 이를 위해서는 기존 설계, 시공, 유지관리 이력 정보를 정형화된 데이터로 변환한 후 열수송관의 파손에 직·간접적으로 영향을 미치는 속성정보를 열수송관 파손빈도 추정을 위한 독립변수로 추출하는 것이 필요하다.

열수송관을 포함한 대부분의 지하매설관로의 파손과 가장 직접적인 상관관계를 나타내는 변수는 사용기간이다. Kong & Kang(2021), Kerstin Sernhed & Mikael Jonsson(2016), Sernhed et al.(2012) 등의 기존 연구사례에서도 사용기간에 따라 파손빈도가 급격하게 증가하며, 밀접한 상관성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 독일 '3S Consult GmbH'사에서 제시한 지하매설배관의 유지관리 솔루션(Ingo Kropp, 2017)에서도 자산관리 과정에서 사용기간에 따른 파손빈도 증가는 지수(Exponential) 형태를 띠는 것으로 설명하고 있다. 또한 K.Wojdyga & M. Chorzelski(2017), Pawel Gilski et al.(2015)의 연구사례를 통해 소구경관의 파손빈도가 상대적으로 높게 확인된 바 있으며, Lee et al.(2014)의 연구사례와 산업통상자원부의 집단에너지시설의 기술기준(2019)에서는 관경 및 매설깊이가 지하매설관로의 구조적 안정성에 미치는 영향에 대해 설명하고 있다. Kong & Kwak(2021), Kim & Jeong(2019)의 국내 열수송관 유지관리 시스템 구축 사례를 보면 지역난방사업자들은 강관 외부의 보온재에 삽입된 감지선을 통해 수분변화에 따른 전류 및 저항값 변화를 절연레벨로 변환하여 열수송관 파손여부를 모니터링하는 감시시스템을 설치 및 운영하고 있다. 다만, 감지선의 단선, 단락 등으로 인해 정확한 모니터링 데이터 수집이 불가능한 구간도 다수 존재하여 감시시스템 절연레벨값 뿐만 아니라 감지선의 단선 또는 단락도 열수송관의 파손과 연관성이 있는 것으로 판단된다.

파손빈도와 상관성을 가지는 독립변수들을 활용하여 파손빈도 추정 모델을 개발하기 위해서는 각 독립변수간 상호연관성도 고려해야 한다. 각 독립변수간 상관관계가 클 경우 각 독립변수가 종속변수(파손빈도)에 미치는 개별적인 영향이 줄어들고 변수간 독립성이 훼손되어 모델의 신뢰성이 낮아지기 때문이다.

본 연구에서는 열수송관 파손빈도 추정에 활용 가능한

독립변수 중 상호 연관성이 있는 것으로 판단되는 변수들인 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨, 감지선의 단선 또는 단락 데이터를 기존 설비이력과 파손이력에서 수집 및 분석하였다. 독립성 검정(Test of Independence)을 통해 각 변수간 연관성을 확인하고, 파손빈도 추정모델에 적용하기 위해 필요한 변수간 결합 및 범주 설정 방안을 도출하였다.

2. 데이터 분석 방법

2.1 현장데이터 수집 및 분석

국내 지역난방사업자 중 규모가 가장 큰 한국지역난방공사로부터 열수송관 설비이력 및 보수이력 데이터를 수집하였다(한국지역난방공사, 2022). 수집된 데이터의 속성정보와 고유값에 대한 전처리를 통해 모델 개발에 필요한 정형 데이터를 확보하고, 데이터베이스를 구축하였다.

수집된 열수송관 데이터는 2022년 기준 설비이력 132,210건(4,830km)과 파손이력 2,806건, 감시시스템 데이터 9,753건이다. 전체 파손이력 중 2,358건이 독립성 검정을 위해 관경과 매설깊이 속성정보를 모두 포함하고 있으며, 감지성 상태와 절연레벨 속성정보를 모두 포함한 사례는 1,677건이다.

한국지역난방공사에서 보유한 열수송관(강관)의 관경은 최소 20mm, 최대 1,100mm로 구성되어 있으며, 매설깊이는 노출배관의 경우 0m, 최대 깊이는 5m 이상이다.

Table 1. Equipment and damage data of heat pipe

Equipment	Detection line and insulation level	Damage		
		Total	Including diameter & depth	Including insulation level & detection line
132,210 (4,830 km)	9,753	2,806	2,358	1,677

감시시스템 데이터는 번호, 감지선 상태(단선 또는 단락 여부), 절연레벨값 등의 속성정보를 포함하고 있다. 감시시스템을 통해 1차적으로 감지선 주변 전류 및 저항값을 측정하며, 한국지역난방공사의 자체 기준에 따라 저항값별 관로의 절연레벨값을 설정한다(Table 2 참고). 감시시스템 데이터는 GIS 기반의 열수송관 설비이력과 별도로 위치정보 없이 정형데이터(i.g. csv)로 관리되며, 열수송관 설비이력의 속성정보 중 하나인 감시시스템 번호(NTMS_LOOP)와 감시시스템 정형데이터(csv)의 동일한 속성정보를 매칭하여 설비이력 각각의 감시시스템 정보(단선 또는 단락 여부, 절연레벨값)를 업데이트 하였다.

Table 2. Standard of electrical resistance and insulation level

Insulation level	Electrical resistance
1	100Ω ~ 500Ω
2	500Ω ~ 1.2KΩ
3	1.2KΩ ~ 5KΩ
4	5KΩ ~ 20KΩ
5	20KΩ ~ 65KΩ
6	65KΩ ~ 200KΩ
7	200KΩ ~ 300KΩ
8	300KΩ ~ 450KΩ
9	450KΩ ~ 1MΩ
10	1MΩ ~ 3MΩ
11	3MΩ ~ 10MΩ
12 or more	10MΩ ~ 50MΩ
0	50MΩ ~

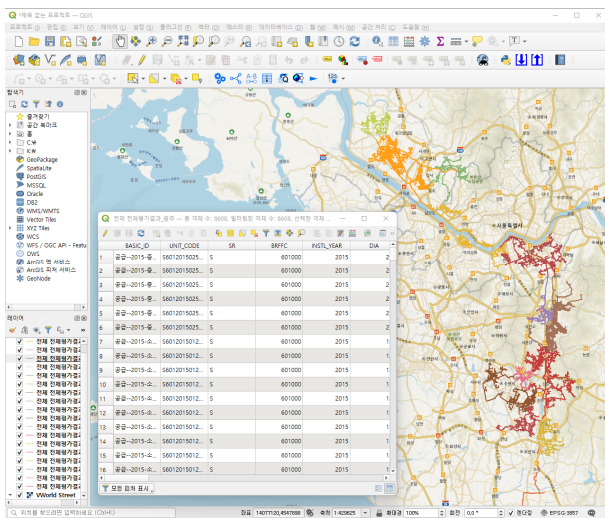


Fig. 1. Damage and construction information of heat pipe from Korea district heating corporation

2.2 파손빈도 추정 기본모델 및 독립변수 검토

파손빈도 추정 모델은 파손 등 열수송관의 구조적 안정성을 저해하는 요소(독립변수)들을 활용하여 열수송관의 안정성을 수치화하여 나타낼 수 있는 결과(종속변수)를 도출하는 것이 목적이다. 독립변수(Independent variable)는 사업자가 제공한 설비이력과 파손이력을 분석한 후, 관의 파손과 유의미한 인과관계를 나타내는 인자로 선정되어야 한다. 분석 결과물인 종속변수(Dependent variable)는 사업자(관리자)가 열수송관의 상태를 직관적으로 확인할 수 있으며, 유지관리 및 의사결정에 활용 가능한 인자로, 본 연구에서는 파손빈도(연간 km당 파손건수)를 종속변수로 제시하였다.

기존 연구사례를 통해 사용기간, 환경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨 및 감지선의 단선 또는 단락을 독립변수 후보군으로 제시할 수 있다. 독립변수들을 통해 종속변수인 파손빈도를 추정하기 위해서는 일반적인 통계분석방법인 다

중회귀분석(Multiple regression analysis)모델을 사용하거나 KNN(K-Nearest Neighbor), SVM(Support Vector Machines), GNB(Gaussian Naive Bayes) 등 AI 모델을 활용할 수 있다. 다만, 본 모델의 개발 목적은 지역난방사업자들이 자체적으로 보유한 데이터만으로 열수송관의 파손빈도를 추정하여 각 단위구간별 우선순위를 부여한 후 성능개선 대상구간 선정 등의 의사결정과정에 활용하기 위함이다. 각 사업자별 유지관리 인력의 역량과 구축된 데이터 차이를 고려하고, 사업자가 성능개선 대상구간 선정 결과를 기술적·정량적으로 외부에 설명할 필요가 있는 점을 고려할 때, 다소 단순하고 직관적으로 이해가 간단한 통계분석 모델이 현장에 더 적합하다. 이에, 파손빈도와 가장 연관성이 높은 사용기간에 따른 파손빈도 추정 결과를 분석한 단순회귀분석모델을 기본모델로 활용하되, 이를 보완하기 위한 추가적인 독립변수를 찾아내어 범주형 데이터로 변환한 후 각 범주별 가중치를 부여하는 방식이 더 적합하다.

국내 대규모 지역난방사업자가 열수송관의 건전성 평가 및 성능개선 대상구간 선정을 위해 활용중인 분석 모델은 사용기간을 기반으로 한 단순회귀분석 기본모델(Simple Regression Basic Model)에 나머지 범주형 독립변수별 가중치를 곱한 변형모델로서 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$F' = F \times W_A \times W_B \times W_C \times \dots \quad (1)$$

여기서, F' 는 파손빈도 보정값(#/km/year), F 는 기본모델을 통해 산출된 파손빈도(#/km/year), W_A , W_B , W_C 는 범주형 변수(A, B, C, ...)별 가중치를 나타낸다. 해당 모델에 적용된 범주형 변수는 모델 개발 당시 설비이력과 파손이력에서 모두 확인 가능했던 정보인 환경, 용도(공급관 또는 회수관), 관리주체(지사 또는 행정구역)이다.

본 연구에서는 이후 사업자들이 추가로 확보한 다양한 정형데이터와 국가공간정보포털에서 제공하는 데이터셋을 분석하여, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨, 감지선의 단선 또는 단락, 점용구간이 파손빈도와 연관성을 나타내어 변형모델에 적용 가능한 변수임을 확인하였다.

2.2.1 환경-매설깊이 연관성 검토

지하에 매설된 열수송관은 주변 매설흙에 의한 토압에 영향을 많이 받는다. 집단에너지시설의 기술기준(2023) 제17조(매설 열수송관의 두께)에 따르면 매설흙에 의한 연직토압(W_f)은 아래의 Marston 공식에 의해 산출 가능하다.

$$W_f = \gamma \times B \left\{ \frac{1 - e^{-2K(\tan\alpha) \frac{H}{B}}}{2K(\tan\alpha)} \right\} \quad (2)$$

$$= 0.00468 \times \left(1 - e^{-0.0358 \frac{H}{B}} \right) \times B$$

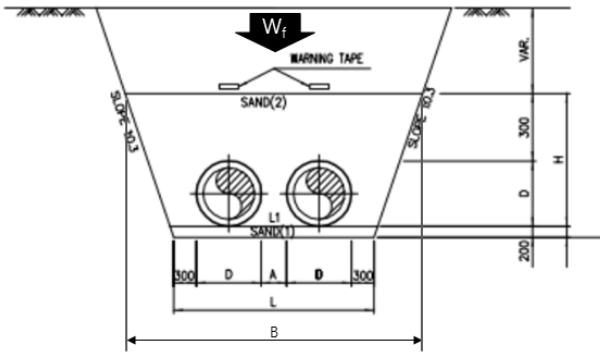


Fig. 2. Vertical earth pressure applied to heat pipes (W_f)

여기서, γ 는 토양의 비중량(0.0018kg/cm^3), K 는 수직토압의 랭킨계수 $[(1-\sin\alpha)/(1+\sin\alpha)]$, α 는 관저 지지각 또는 내부 마찰각(30°), H 는 매설깊이(cm), B 는 매설 시 파내려간 흙의 폭(cm)이다.

열배관 설계 및 시공기준(한국지역난방공사, 2017)에서는 노면하중과 매설흙에 의한 토압의 영향을 최소화할 수 있는 1.2m를 기준으로 관경별 매설폭 기준을 표준도로 제시하고 있다(Fig. 3 참고). 해당 표준도는 Marston 공식과 현장에서 경험적으로 습득한 사례를 바탕으로 토압에 의한 열수송관 변형 및 파손을 최소화할 수 있도록 설정된 것이다. 이를 종합해볼 때, 관경과 매설깊이간 상관관계가 존재하는 것을 추측할 수 있으며, 독립변수로서 상호간 독립성을 검증하는 과정이 필요하다.

DIA(mm)	O.D(mm)	A(mm)	영구점용(m)	일시점용(m)
850	1,050	400	2.50	-
800	1,000	400	2.40	-
750	950	400	2.30	-
700	900	400	2.20	-
650	850	300	2.00	-
600	800	300	1.90	-
550	710	300	1.82	-
500	710	300	1.72	-
450	630	300	1.56	-
400	560	300	1.42	-
350	500	300	1.30	-
300	450	300	1.20	-

Fig. 3. Standard chart of pipe diameter and burial depth of heat pipe

2.2.2 감시시스템 데이터 연관성 검토

감시시스템은 보온재 손상에 의한 외부 수분 유입과 강관 손상에 의한 내부 열수 누수를 모두 확인할 수 있는 장치로,

관 내외부의 파손여부를 즉각적으로 확인하는데 유용하게 활용될 수 있다. 다만, 관 파손 시 주변 수분함량 변화 뿐만 아니라 감시시스템 절연레벨을 측정하는 감지선도 함께 고장(단선 또는 단락)날 수 있으므로 감시시스템 절연레벨 변화와 감지선 단선 또는 단락간 상호 연관성을 검토해야 한다.

2.3 변수간 독립성 검정 방법

독립성 검정은 두 개의 범주형 변수(2 factors)가 서로 독립적인지를 카이제곱 검정(Chisquared Test)을 통해 통계적으로 판단하는 방법이다.

두 개의 범주형 변수를 각각 X와 Y로 가정하고, 변수 X는 m개, 변수 Y는 n개의 범주(Level)를 가진 것으로 확인될 때, $m \times n$ 분할표(Contingency Table)을 작성하여 관측도수(O_{ij} ; Observed Frequency)를 확인할 수 있다. 또한 관측도수를 기반으로 각 범주별 기대도수(E_{ij} ; Expected Frequency)를 아래와 같이 계산하여 분할표를 추가로 작성할 수 있다.

$$E_{ij} = \frac{O_{is} \times O_{sj}}{n} \quad (3)$$

여기서, E_{ij} 는 관측도수 O_{ij} 에 대한 기대도수, O_{is} 는 변수 X의 i번째 범주에 해당하는 모든 관측도수 합, O_{sj} 는 변수 Y의 j번째 범주에 해당하는 모든 관측도수 합, n은 모든 관측도수의 합을 의미한다.

귀무가설(H_0 : 두 변수는 서로 독립적이다)이 기각될 경우, 두 변수는 상관성을 가지며, 별도의 독립변수로서 종속

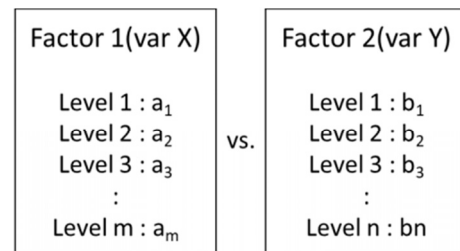


Fig. 4. Test for independence between categorical variables

X \ Y	Y						Sum
	b ₁	b ₂	b ₃	...	b _n		
a ₁	O_{11}	O_{12}	O_{13}		O_{1n}	O_{1s}	
a ₂	O_{21}	O_{22}	O_{23}		O_{2n}	O_{2s}	
a ₃	O_{31}	O_{32}	O_{33}		O_{3n}	O_{3s}	
⋮							
a _m	O_{m1}	O_{m2}	O_{m3}		O_{mn}	O_{ms}	
Sum	O_{s1}	O_{s2}	O_{s3}		O_{sn}	n	

Fig. 5. Creating a contingency table and organizing observation frequencies for test for independence

변수(파손빈도)를 추정하는데 활용하는 것이 부적절함을 의미한다. 귀무가설을 검증하기 위해 카이제곱 검정(X^2 -검정)을 이용하며, 카이제곱 검정통계량(X^2)과 자유도(df)는 아래와 같이 계산한다.

$$X^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (4)$$

$$df = (m-1)(n-1) \quad (5)$$

여기서, m은 변수 X의 범주 개수, n은 변수 Y의 범주 개수를 나타낸다. 카이제곱은 각 범주의 기대도수가 5 이상인 경우에 사용해야 신뢰성이 있으며, 만약 5보다 작을 경우 인접 범주와 합치거나 별도의 데이터 처리를 거쳐야 한다. 본 연구에서는 파손빈도 추정 시 각 변수간 독립성을 검정하는 것이 목적이므로 범주별 관측도수와 기대도수는 단순 파손건수(#)가 아닌 설비이력의 각 범주별 관 길이를 보정한 파손건수(#)가 되어야 한다. 단, 관 길이를 보정한 파손건수의 합계가 단순 파손건수의 합계와 동일하도록 계산하였다. 카이제곱 검정에서의 유의확률(p-value)은 앞서 계산된 자유도를 가진 카이제곱 분포곡선 아래의 면적 중 관측된 카이제곱값 오른쪽 면적을 의미한다. 만약 유의확률이 유의수준(α , 회색부분)보다 작을 경우 귀무가설이 기각된다.

본 연구의 독립성 검토 대상인 4개의 독립변수는 범주형 변수에 해당하거나(감시시스템 감지선 상태), 기존 연구사례 또는 관리기준에 따라 일정한 기준에 따라 범주형으로 변환하여(관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨) 상호간 카이제곱 검정을 진행할 수 있다. 따라서 사용기간을 제외한 기타 변수 중 상호 독립성이 떨어지는 변수들의 경우 하나의 독립변수로 결합하여 범주를 설정하였다.

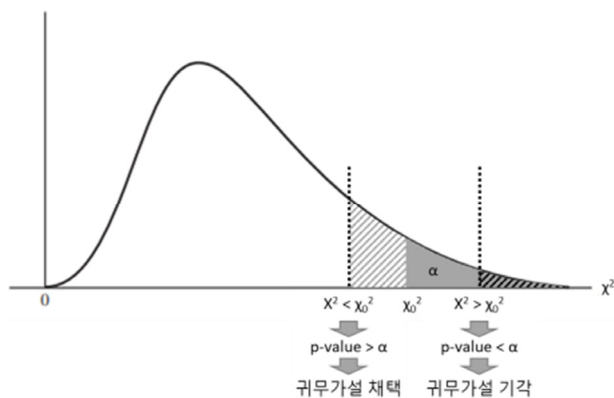


Fig. 6. Chi-square test method using the chi-square distribution curve

3. 변수간 독립성 검정 결과

3.1 관경-매설깊이 독립성 검정

두 변수의 독립성 검정을 위해 연속형 변수인 관경과 매설깊이의 범주를 구분하였다. 일반적으로 200mm 이하는 소구경관, 250~350mm는 중구경관, 400mm 이상은 대구경관으로 분류하므로 본 연구에서도 관경 범주를 3가지로 구분하였다. 매설깊이의 경우 한국지역난방공사 매설깊이 설계기준인 1.2m가 포함된 1.0~1.5m 구간을 중심으로 저심도(1.0m 이하)와 대심도(1.5m 초과) 구간으로 나누어 3가지의 매설깊이 범주를 설정하였다. 수집된 파손이력 데이터 2,806건 중 관경과 매설깊이 데이터를 모두 포함한 2,358건의 파손이력에 대해 9개 범주별 파손건수를 Table 3과 같이 산출하였다. 다만, 각 범주별 실제 관 길이(km)가 다르므로 이를 고려한 관측도수(파손건수 보정값)을 Table 4와 같이 제시하였다. 관 길이가 동일한 경우 가장 많은 파손이 확인된 것은 소구경-저심도 열수송관이며, 매설깊이 설계기준이 포함된 1.0~1.5m에 매설된 열수송관의 파손건수가 상대적으로 적게 나타났다.

Table 5는 카이제곱 검정을 위해 관측도수를 기반으로 기대도수 분할표를 산출한 결과이다. 카이제곱 검정 결과, 유의

Table 3. Number of damage by pipe diameter and burial depth category

Diameter \ Depth	Large (400~1,200 mm)	Medium (250~350 mm)	Small (20~200 mm)	Sum
0~1.0	35	64	418	517
1.0~1.5	148	74	380	602
1.5~	570	181	488	1,239
Sum	753	319	1,286	2,358

Table 4. Contingency table of pipe diameter and burial depth observation frequency considering pipe length

Diameter \ Depth	Large (400~1,200 mm)	Medium (250~350 mm)	Small (20~200 mm)	Sum
0~1.0	185	267	428	879
1.0~1.5	212	125	256	593
1.5~	297	226	362	885
Sum	694	618	1,046	2,358

Table 5. Contingency table of pipe diameter and burial depth expected frequency

Diameter \ Depth	Large (400~1,200 mm)	Medium (250~350 mm)	Small (20~200 mm)	Sum
0~1.0	259	231	390	879
1.0~1.5	175	156	263	593
1.5~	260	232	393	885
Sum	694	618	1,046	2,358

확률(p-value)은 9.694×10^{-11} 로서 유의수준($\alpha = 0.05$)보다 작으므로 귀무가설은 기각되고, 관경과 매설깊이는 상호 연관성이 높은 것으로 확인하였다(Table 6 참고). 따라서, 두 변수는 하나의 변수로 고려되어야 하며, 기존 각 변수별 범주를 고려해 결합된 변수(관경 - 매설깊이)는 9개(3×3)의 범주로 구분할 수 있다.

Table 6. Test of independence result of pipe diameter and burial depth

Chi-square (X^2)	Degree of freedom (df)	P-value
52.73	4	9.694×10^{-11}

3.2 감시시스템 감지선 상태 - 절연레벨

감시시스템 감지선 상태는 정상 또는 단선/단락의 2가지 범주로 구분 가능하다. 연속형 변수인 절연레벨의 경우 한국지역난방공사의 기존 유지관리 기준(안전도 분류기준)에 따라 절연레벨 5 이하인 열수송관은 감지선 주변 수분함량이 높아 집중 또는 관찰대상에 포함된다. 따라서 내·외부를 통한 비정상적인 수분 유입이 의심되는 절연레벨 1~5에 해당하는 열수송관을 ‘주의’ 범주로 묶고, 나머지 절연레벨 6~13에 해당하는 열수송관은 ‘일반’ 범주로 설정하였다.

감시시스템 감지선 상태와 절연레벨 데이터를 포함한 1,677건의 파손이력 데이터 확인 결과는 Table 7과 같으며, 각 범주별 관로 길이를 보정한 관측도수 분석결과는 Table 8에 나타내었다. 감지선이 단선 또는 단락되거나 절연레벨이 5 이하인 구간의 파손건수가 훨씬 높게 나타났으며, 특히 관로 길이를 고려했을 때, 절연레벨값이 5 이하인 열수송관의 파손건수가 6 이상인 경우에 비해 18.5배 높게 확인되었다.

Table 7. Number of damage by insulation level and detection line category

Insulation level Detection line	Insulation level		Sum
	Normal (6~13)	Attention (1~5)	
Normal	327	152	479
Disconnection or short circuit	355	843	1,198
Sum	682	995	1,677

Table 8. Contingency table of insulation level and detection line observation frequency considering pipe length

Insulation level Detection line	Insulation level		Sum
	Normal (6~13)	Attention (1~5)	
Normal	16	500	516
Disconnection or short circuit	70	1,091	1,161
Sum	86	1,591	1,677

기대도수 분할표 및 독립성 검정 결과는 Table 9, 10에 각각 나타내었다. 카이제곱 검정 결과, 유의확률(p-value)은 6.073×10^{-4} 로서 유의수준($\alpha = 0.05$)보다 작으므로 귀무가설은 기각되고, 감지선 상태와 절연레벨은 상호 연관성이 높은 것으로 확인되었다. 따라서 감시시스템 감지선 상태와 절연레벨 역시 하나의 변수로 고려되어야 한다. 범주의 경우, 앞서 독립성 검정 시 변수의 범주를 4개(2×2)로 구분하였으나 감지선 상태가 단선 또는 단락일 경우 절연레벨 측정값을 신뢰할 수 없는 것을 고려해야 한다. 따라서 절연레벨 측정값과 무관하게 감지선 상태가 단선 또는 단락인 경우를 하나의 범주로 설정해야 하므로 결합된 변수(감시시스템 감지선 상태 - 절연레벨)는 감지선 단선 또는 단락인 경우 1개, 정상인 경우 2개 등 총 3개의 범주로 구분하였다.

Table 9. Contingency table of insulation level and detection line expected frequency

Insulation level Detection line	Insulation level		Sum
	Normal (6~13)	Attention (1~5)	
Normal	26	490	516
Disconnection or short circuit	59	1,101	1,161
Sum	86	1,591	1,677

Table 10. Test of independence result of insulation level and detection line

Chi-square (X^2)	Degree of freedom (df)	P-value
11.75	1	6.073×10^{-4}

4. 결 론

본 연구에서는 기존 연구사례와 지역난방사업자로부터 제공받은 설비이력, 보수이력 데이터를 수집, 분석하여 열수송관 파손빈도 추정 모델에 사용할 수 있는 독립변수 후보군으로 관경, 매설깊이, 감시시스템 감지선 상태와 절연레벨을 도출하였다. 또한 파손빈도 추정 모델의 정확성 향상을 위해 변수간 결합을 고려하여 독립변수 후보군간 독립성 검정을 진행하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

- (1) 독립변수 중 관경과 매설깊이의 독립성을 카이제곱 검정(Chisquared Test)을 통해 분석한 결과, 유의확률(p-value)은 9.694×10^{-11} 로 유의수준($\alpha = 0.05$)보다 작은 것으로 확인되었다. 따라서 두 변수간 상관관계가 매우 뚜렷하게 나타나므로 단일 독립변수로 파손빈도 추정 모델에 적용할 경우 추정결과의 신뢰성이 낮을 것으로 판단된다.
- (2) 감시시스템 감지선 상태와 절연레벨간 독립성을 분석한

결과 역시 유의확률(p-value)이 6.073×10^{-4} 로서 관경과 매설깊이의 독립성 검정 결과 대비 변수간 상호 연관성이 다소 낮은 것으로 보인다. 다만 유의확률이 변수간 독립성 여부 판단기준인 유의수준($\alpha = 0.05$)보다는 작으므로, 2개의 변수를 각각 결합하여 범주를 설정한 후 추가 독립변수로 모델에 적용하는 것이 바람직하다.

- (3) 관경과 매설깊이를 결합한 변수는 9개(3×3) 범주로 구분할 수 있으며, 감시시스템 감지선 상태와 절연레벨을 결합한 변수는 감지선 상태가 단선 또는 단락인 경우 절연레벨값을 신뢰할 수 없으므로 3개 범주로 구분할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 (23주요-대1-임무)지하 공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발(4/5) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. 산업통상자원부 (2019), 집단에너지시설의 기술기준, 산업통상자원부고시 제2019-25호.
2. 권혜림 (2018), '백석역 사고' 원인인 노후 배관, 전국 32%·성남·분당 77%, 중앙일보.
3. 한국지역난방공사 (2022), 지사별 열수송관 구축, 보수 현황.

4. 한국지역난방공사 (2017), 한국지역난방공사 열배관 설계 및 시공기준.
5. Ingo Kropp (2017), KANEW 3S 6.3 Training, Report, 3S Consult GmbH, Dresden, pp. 1~54.
6. Kerstin Sernhed and Mikael Jonsson (2016), Risk management for maintenance of district heating networks, The 15th International Symposium on District Heating and Cooling, Seoul, South Korea, pp. 381~393.
7. Kim, J. Y. and Jeong J. C. (2019) Diagnosis Techniques for District Heating Pipelines and Future Direction of R&D, Winter Conference of Korea Society for Fluid Machinery, Jeju, South Korea, p. 60 (In Korean).
8. Kong, M. S. and Kang, J. M. (2021), Methodology for estimating the probability of damage to a heat transmission pipe, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 22, No. 11, pp. 15~21 (In Korean).
9. Kong, M. S. and Kwak P. J. (2021), Case of decision-making system establishment for heat transfer pipeline management, Special Feature, Korea Society of Civil Engineers, Vol. 69, No. 1, pp. 34~41 (In Korean).
10. Lee, J. G., Cho, J. Y., Kim, M. W. and Kim, K. H. (2014), The Structural Analysis of Pipeline According to the Depth of Laying, Autumn Conference of Korea Concrete Institute 2014, Jeju, South Korea, pp. 97~98 (In Korean).
11. Pawel Gilski, Ewa Krecielewska, Jean-Marc Lucatelli, Bertrand Bouttier and Yannick Gourbeyre (2015), Probability of Failure Assessment in District Heating Network, The 14th International Symposium on District Heating and Cooling, Power and Energy Engineering, Stockholm, Sweden, pp. 517~525.
12. Sernhed, K., Ekdahl, E. and Skoglund, P. (2012), Statusbedömning av betongkulvertar (In English: Status assessments of concrete culverts). Fjärrsyn report, Vol. 9, p. 2012.
13. Wojdyga, K. and Chorzelski, M. (2017), Chances for polish district heating systems, Energy Procedia, Vol. 116, pp. 106~118.