

연속형 변수 회귀분석을 통한 열수송관 파손빈도 분석

Continuous Variable Regression Analysis for Frequency of Damage Analysis in Heat Pipe

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

Received: November 13th, 2023; Revised: November 13th, 2023; Accepted: November 24th, 2023

ABSTRACT : In order to efficiently maintain heat pipes operated by district heating operators, the facility history and damage history data built by the operator are used to identify key independent variables that are related to the occurrence of damage. Afterwards, the correlation with the frequency of damage was analyzed, and a basic model for estimating the frequency of damage was derived. Considering the correlation with the estimation model based on the use time currently being used by domestic and foreign district heating operators, a simple regression analysis basic model was presented as the independent variable with the highest correlation between continuous variables such as the use time, pipe diameter, burial depth, and insulation level of monitoring system, and the frequency of damage. The remaining independent variables were reflected as factors that modify and supplement the basic model. As a result of the analysis, as in previous research cases, it was confirmed that the analysis model between use time and frequency of damage had the highest correlation between the two variables and could be used as a basic model. Pipe diameter, burial depth, and insulation level of monitoring system information have also been confirmed to have a correlation with the frequency of damage, so they can be used as factors to supplement the basic model.

Keywords : Heat pipe, Frequency of damage, Continuous variable, Use time, Pipe diameter, Burial depth, Insulation level

요 지 : 지역난방사업자가 운영하는 열수송관의 효율적인 유지관리를 위해 사업자가 구축한 설비이력 및 파손이력 데이터를 활용하여 파손발생과 연관성을 가지는 주요 독립변수를 확인한 후, 파손빈도와의 상관관계를 분석하고, 파손빈도 추정을 위한 기본모델을 도출하였다. 국내외 지역난방사업자가 기존에 활용 중인 사용기간 기반의 추정 모델과의 연관성을 고려하여 사용기간 뿐만 아니라 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨 등 연속형 변수와 파손빈도의 상관성이 가장 높은 독립변수로 단순회귀분석 기본모델을 제시하였으며, 나머지 독립변수는 기본모델을 수정, 보완하는 인자로 반영하였다. 분석 결과 기존 연구사례와 마찬가지로 사용기간과 파손빈도간 분석 모델의 적합성과 두 변수간 상관성이 가장 높은 것으로 확인되어 기본모델로 활용 가능하다. 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨 정보 역시 파손빈도와의 상관성이 확인되어 기본모델을 보완하기 위한 인자로 활용 가능하다.

주요어 : 열수송관, 파손빈도, 연속형 변수, 사용기간, 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨

1. 서 론

노후화된 기반시설의 파손에 의한 경제적, 사회적 피해가 확산됨에 따라 파손위험도가 높은 시설물을 선별하여 사전에 진단, 관리하기 위한 노력이 지속되고 있다. 열수송관은 타 기반시설보다 고온, 고압조건에서 운영되어 파손 시 발생하는 피해규모가 크다. 따라서 열수송관을 직접 설치, 운영하는 지역난방사업자와 관리감독기관인 중앙부처에서 자체적으로 유지관리 가이드라인 및 매뉴얼을 만들어 열수송관을 관리, 감독하고 있다.

유럽 등 선진국의 열수송관 파손빈도 추정 모델은 기본적

으로 사용기간을 통해 시설물 단위구간별 파손빈도값을 예측하고 있다. 독일 '3S Consult GmbH' 사에서는 열수송관 뿐만 아니라 상수도, 가스관에 공통적으로 적용 가능한 지하매설배관의 유지관리 솔루션을 제공하고 있으며, 사용기간에 따른 파손빈도 증가 추세를 설명하고 있다. 핀란드 'Fortum' 사에서는 기존 열수송관 운영자료를 바탕으로 사용기간을 5년 단위로 14단계(0~70년)로 구분하여 별도의 Table을 통해 사용기간별 파손가능성을 5단계로 구분하고 있다. 다만, 다양한 지하매설 조건에서 운영 중인 열수송관을 사용기간만으로 평가하는 것은 바람직하지 않으므로 파손빈도에 직·간접적으로 영향을 미치는 독립변수를 선별하여 파손빈도 추정

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

모델을 수정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 국내 최대규모 지역난방사업자인 한국지역난방공사가 열수송관 운영과정에서 자체적으로 수집한 이력정보를 분석하여 사용기간을 기반으로 한 파손빈도 추정 모델의 적합성과 상관성을 검토하였다. 사용기간 외 파손빈도와 연관성이 높은 독립변수 중 연속형 변수인 관경, 매설 깊이, 감시시스템 절연레벨에 대해서도 사용기간과 동일한 회귀분석을 진행하여 파손빈도 추정을 위한 기본모델을 제안하였다.

2. 데이터 수집 및 분석 방법

2.1 열수송관 데이터 구성 및 분석도구

한국지역난방공사에서 제공한 2022년 기준 열수송관 설비이력 132,210건(4,830km)과 파손이력 2,806건, 열수송관의 파손여부를 확인하기 위한 감시시스템 데이터 9,753건, 중점관리구간 데이터 591건을 분석하였다. 감시시스템 데이터와 중점관리구간 데이터에 포함된 설비이력 관리번호(No)를 확인하여 설비이력에 감시시스템과 중점관리구간 데이터를 추가하였다.

파손빈도 추정을 위한 속성정보(독립변수)는 설비이력과 파손이력에서 모두 포함되어야 하며, 한국지역난방공사의 데이터베이스 코드정의서에 따라 연속형 변수(중공년도, 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨)와 범주형 변수(용도, 관리주체, 감시시스템 작동여부, 중점관리구간 포함여부)로 구분하였다. 이 중 중공년도는 평가대상시점을 고려한 사용기간으로 변환하여 데이터를 구성하였다.

본 연구를 통해 확보된 데이터셋(설비이력, 파손이력)은 사용자가 별도로 구축한 열수송관 통합관리시스템과 연동

Fig. 1. Heat pipe dataset in csv format

을 위해 shp 파일 또는 csv 파일로 저장되어 있다(Fig. 1 참고). SPSS, Python, R 등의 분석 프로그램이나 Excel 함수, 데이터 분석도구 또는 추가기능(예; Real statistics 등)을 통해 해당 데이터를 활용한 통계분석을 진행할 수 있다. 단, 통계분석 결과와 데이터셋을 사용자에게 제공하는 경우 별도 분석 프로그램을 활용하면 지속적인 데이터 업데이트를 반영한 통계분석모델의 수정/보완이 어려우므로, 본 연구에서는 대다수 관리자들이 사용할 수 있는 Excel을 활용하여 통계분석을 진행하였다.

2.2 파손빈도 추정 모델

일반적으로 다수의 독립변수가 확보된 경우 다중회귀분석 모델을 통해 종속변수(파손빈도)를 추정해야 한다. 다만, 기존 유럽 및 국내 열수송관 또는 기타 지하매설관로 유지관리 주체들이 사용해진 평가기준이 단순회귀분석모델과 유사한 '경험식'을 기반으로 하고 있으므로(Kong & Kang, 2021; Wojdyga & Chorzelski, 2017), 사용자들이 평가결과에 대한 신뢰성이 낮다고 판단하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 국내의 열수송관 관리기준을 참고하여 열수송관 파손빈도를 가장 정확하게 추정할 수 있는 독립변수(연속형)를 중심으로 단순회귀분석 기본모델(Simple Regression Basic Model)을 제안하였다. 나머지 독립변수는 범주형 변수로 모두 변환한 후 추가 독립변수로서 가중치를 부여하여 Eq. (1)과 같이 단순회귀분석 변형 모델에 적용할 수 있다.

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

여기서, F' : 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. 기본모델을 통해 산출된 파손빈도에 추가 독립변수별 가중치를 곱하여 파손빈도 보정값을 산출하기 위해서는 각 독립변수별 가중치 평균값이 '1'이어야 하며, 기본모델에 적용된 독립변수와의 독립성을 고려하여 가중치를 산출해야 한다.

2.3 연속형 변수 파손빈도 분석 및 회귀분석

단순회귀분석 기본모델에 활용할 연속형 독립변수(사용기간, 관경, 매설깊이, 감시시스템 절연레벨)를 찾기 위해 각 변수의 고유값별 파손빈도를 분석하였다. 파손빈도는 설비이력에서 확인한 각 변수의 고유값별 관 길이(km)와 파손이력에서 확인한 연도별 파손건수(#/year)를 통해 산출할 수 있다.

파손빈도와 연속형 변수간 단순회귀분석 모델은 국외 연구자료(유럽 논문, 지하시설물 유지관리 시스템 매뉴얼 등)를

통해 지수형(Exponential) 또는 다항형(Polynomial)으로 제시하였다. 이 중 수집된 분산형 DB와 상관성이 높은 단순회귀분석 모델을 각 변수별 대표 모델로 선정하였으며, 각 모델별 분산분석 등 회귀분석 결과를 비교하여 단순회귀분석 기본모델에 활용할 변수를 선정하였다.

3. 연속형 변수 파손빈도 분석 결과

3.1 사용기간

전체 파손이력 중 사용기간 속성정보가 포함된 2,746건의 파손이력에 대해 사용기간별 파손건수를 분석하였다. 사용기간별 파손빈도(F_T)는 열수송관 설비이력(사용기간 및 시공년도별 관 길이)와 파손이력(사용기간 및 시공년도별 파손건수)를 분석하여 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$F_T = \frac{\sum_{i=1}^N D_{T,p-i}}{\sum_{i=1}^N L_{T,p-i}} \quad (2)$$

여기서, F_T 는 사용기간에 따른 파손빈도(#/km/year), $D_{T,p-i}$ 는 사용기간별 열수송관 파손건수(#), $L_{T,p-i}$ 는 사용기간별 열수송관 관 길이(km), p 는 당해연도(year), N 는 파손이력 수집기간(year)을 의미한다. 사용기간에 따른 파손빈도는 사용기간이 T년인 열수송관의 최근 N년간 누적 파손건수를 사용기간이 T년인 열수송관의 최근 N년간 누적 관 길이로 나누어 계산한다. 예를 들어 2023년 기준 사용기간이 15년 된 열수송관에 대한 파손빈도를 구하기 위해 12년간(2009~2020년) 파손이력 데이터를 확보한 경우, 2009년부터 각 점검년도별로 사용기간이 15년 된 관이 파손된 건수를 파악하여 합산하고, 관 연장 역시 2009년부터 각 점검년도별로 사용기간이 15년 된 관의 길이를 열수송관 설비이력을 통해 확인한 후 합산해야 한다. 파손이력이 충분히 확보된 2009~2020년 파손이력 데이터는 사용기간별 파손빈도 분석 시 활용 가능하나, 파손건수가 각 1건인 점검년도 2008년, 2021년 데이터는 해당년도에 발생한 전체 파손 및 보수이력으로 판단할 수 없으므로 분석대상에서 제외하였다. 따라서 사용기간 분석 시 사용한 파손이력 데이터 2,744건이다. Fig. 2는 사용기간별 파손건수 및 파손빈도를 산출한 결과로서, Sernhed et al.(2012)의 기존 연구사례와 동일하게 사용기간에 따라 파손빈도가 지수형으로 급격하게 증가하는 일반적인 경향을 확인할 수 있다.

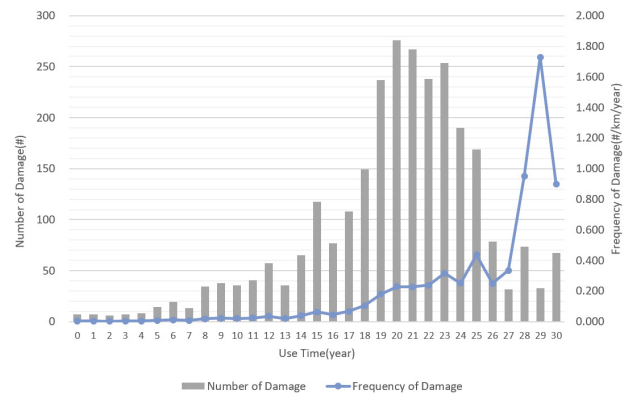


Fig. 2. Number of damage and frequency of damage by use time of heat pipe

3.2 관경

열수송관 관경별 파손가능성에 대한 Wojdyga & Chorzelski (2017), Pawel Gilski et al.(2015)의 연구사례에서 150mm 이하의 소구경관의 파손빈도가 평균을 초과하는 것으로 확인되었다. 2,806건의 전체 파손이력 중 관경 속성정보가 포함된 2,516건의 파손이력을 대상으로 관경별 파손건수를 분석하여 기존 연구사례와 비교하였다(Fig. 3 참고). 파손이력 분석결과 관 길이를 고려했을 경우 파손빈도는 25mm 관이 가장 높은 것으로 확인되었다(0.261 #/km/year). 또한 150mm 이하 소구경관의 파손빈도가 전반적으로 높게 확인되어 기존 연구와 유사성을 확인하였다.

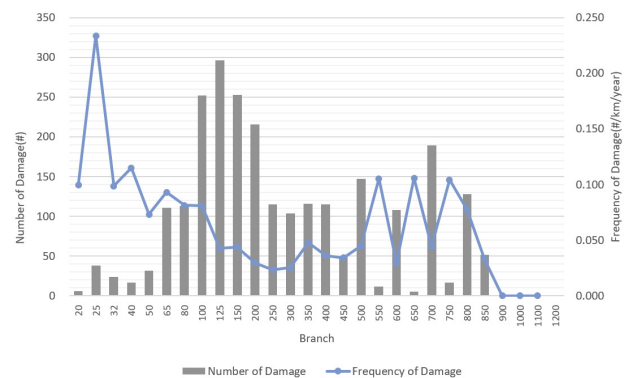


Fig. 3. Number of damage and frequency of damage by pipe diameter of heat pipe

3.3 매설깊이

저심도에 매설된 열수송관은 노면 하중에 의해 불규칙적으로 가해지는 진동으로 인한 파손이 우려되고, 대심도에 매설된 열수송관은 상부 또는 주변 매설흙에 의한 토압이 커져 관의 변형이 일어날 수 있다(산업통상자원부 고시, 2019). 따라서 한국지역난방공사는 노면 하중 및 매설흙에 의한 토압의 영향을 최소화하기 위해 열수송관 매설깊이(Depth)를 일반적으로 120cm 내외로 설정하고 있다. 다만, 주변 환경

이나 타 지하시설물과의 영향을 최소화하기 위해 저심도 또는 대심도에 매설되는 열수송관도 상당수 존재하므로, 각 매설심도별 파손빈도를 정량적으로 분석하였다.

매설깊이가 명기된 2,365건의 파손이력과 전체 설비이력 데이터 분석 결과를 Fig. 4의 그래프로 나타내었다. 설계기준 심도에 가까운 100~150cm 구간의 파손빈도가 낮은 것으로 분석되었으며, 매설깊이 설계기준이 적합하게 설정된 것을 확인할 수 있다.

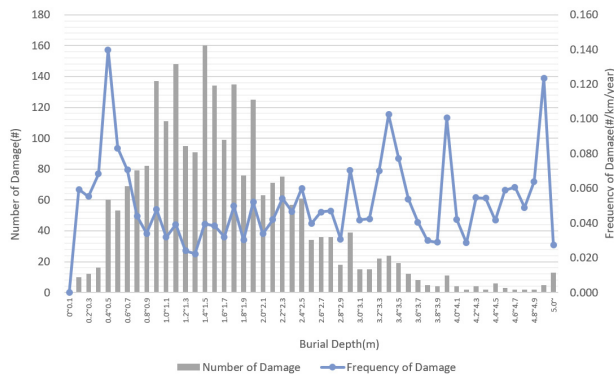


Fig. 4. Number of damage and frequency of damage by burial depth of heat pipe

3.4 감시시스템 절연레벨

감시시스템 절연레벨은 감지선이 정상적으로 작동하는 경우 데이터를 신뢰할 수 있으므로 감지선 상태가 ‘정상’인 경우에 한해 절연레벨 파손건수 분석이 가능하다. 파손이력 확인 결과 감지선 상태가 ‘정상’이며, 절연레벨 속성정보가 포함된 파손건수 294건으로 타 독립변수 대비 확보된 데이터 수가 부족하여 통계분석 결과의 신뢰성이 다소 떨어질 수 있다.

절연레벨이 낮은 것은 보온재 내부에 위치한 감지선 주변의 수분 함량이 정상수치보다 높아져 전류량이 증가하는 것을 의미한다. 이는 보온재 손상으로 인한 외부 지하수의 유입 또는 내부 강관의 손상으로 인한 누수가 진행되고 있음을

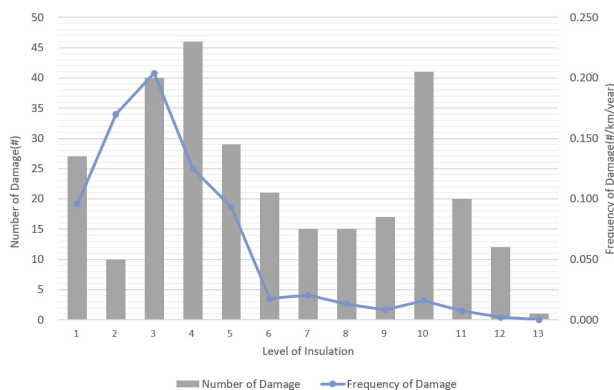


Fig. 5. Number of damage and frequency of damage by insulation level of heat pipe

나타낸다. 한국지역난방공사의 기존 유지관리 기준(안전도 분류기준 등)에서는 절연레벨 1~3인 경우 집중대상, 절연레벨 4~5인 경우 관찰대상으로 지정하고 있다.

절연레벨의 파손빈도 분석 결과, 감지선 상태가 정상이며 절연레벨이 5 이하인 경우 파손빈도가 6 이상인 경우에 비해 높게 나타나 감지선이 정상적으로 작동할 경우 측정된 절연레벨을 통해 열수송관의 파손 여부를 예측할 수 있음을 확인하였다.

4. 연속형 변수 회귀분석 결과

4.1 사용기간

사용기간과 파손빈도 단순회귀분석 모델은 Fig. 2의 사용기간별 파손빈도 분포형태를 고려하여 지수형 단순회귀분석 모델로 Eq. (3)과 같이 제시하였다.

$$F_T = a + b \times e^{(c \times T)} \quad (3)$$

여기서, F_T 는 사용기간에 따른 파손빈도(#/km/year), T 는 사용기간(year), a , b , c 는 상수를 나타낸다. 설비이력과 파손이력을 분석하여 산출된 사용기간-파손빈도 지수형 단순회귀분석모델의 회귀방정식은 Eq. (4)와 같다.

$$F_T = -(1.426 \times 10^{-3}) + (2.672 \times 10^{-3}) \times e^{(0.1924 \times T)} \quad (4)$$

Table 1. Results of one-way analysis of variance of simple linear regression analysis model between use time and frequency of damage

	df	SS	MS	F-value	p-value
Regression	1	100.975	100.975	946.815	2.990×10-24
Residual	29	3.199	0.107	-	-
Sum	30	104.175	-	-	-

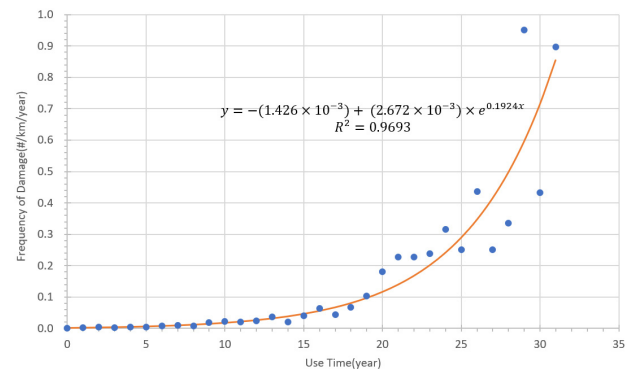


Fig. 6. Correlation analysis between use time and frequency of damage

해당모델의 적합성(결정계수)과 변수간 상관성(유의확률)을 검토하기 위해 상기 모델을 단순선형회귀분석모델($\ln(F-a) = \ln(b) + c \times T$)로 변형한 후, 분석을 진행하였다. 그 결과, 결정계수는 0.9693으로 모델의 적합성이 매우 높은 것으로 확인되었다. 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 결과, F값은 946.815, 유의확률은 2.990×10^{-24} 으로 사용기간과 파손빈도간 상관성도 충분한 것으로 확인되었다.

4.2 관경

200~350mm 부근에서 가장 낮은 파손빈도값을 나타내는 관경의 경우 U자형 그래프를 가지는 2차 또는 4차 다항함수를 회귀분석모델로 제시할 수 있다. Excel 내 추가기능 중 'Real Statistics'을 활용하여 1~4차 함수를 회귀방정식으로 선정하여 회귀분석을 진행한 후, Table 2와 같이 결정계수와 회귀방정식 내 각 최고차항들의 유의확률을 비교하여 적합한 회귀분석모델을 선정하였다.

회귀방정식이 2차항 이상의 다항함수로 표현되는 단순회귀분석모델의 경우, 독립변수(x, x^2, x^3, \dots)가 포함된 각 항들이 별도의 독립변수(x_1, x_2, x_3, \dots)를 포함한 다중회귀분석모델과 동일하다고 볼 수 있고, 종속변수 추정 결과의 신뢰성이 확보되기 위해서는 각 독립변수 항들이 독립적이어야 한다. 이때, 최고차항은 다른 항들의 영향을 가장 크게 받으므로

Table 2. Coefficient of determination and p-value of highest order term of polynomial simple regression analysis model between pipe diameter and frequency of damage

Degree	Coefficient of determination (R^2)	P-value	Interpretation
1	0.2390	-	Low-fit model
2	0.2492	0.5743	Mutually dependent variables (p-value > 0.05) and low-fit model
3	0.5264	0.0013	Mutually independent variables and average-fit model
4	0.6393	0.0155	Mutually independent variables and high-fit model

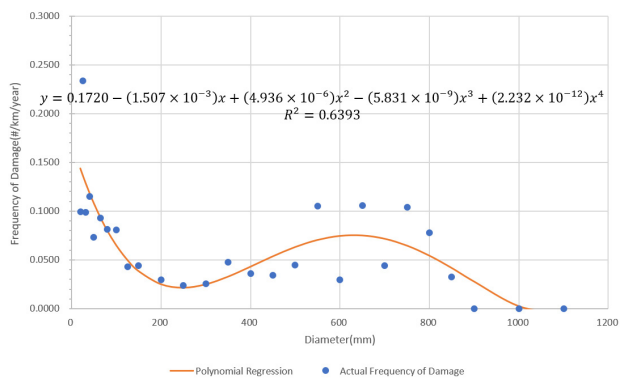


Fig. 7. Correlation analysis between diameter and frequency of damage

다항함수로 표현된 단순회귀분석모델의 각 독립변수(x, x^2, x^3, \dots)별 독립성은 최고차항의 유의확률을 확인하여 판단할 수 있다. 관경과 파손빈도 단순회귀분석모델 분석 결과, 4차 함수일 때 회귀분석모델의 적합도가 큰 것으로 확인되었다.

4.3 매설깊이

매설깊이의 경우 1.0~1.5m 구간의 파손빈도가 다소 낮으나 전반적으로 일정한 패턴을 찾기 어렵다. 관경과 동일하게 다항형 단순회귀분석 모델을 적용한 결과, 모델의 적합도는 모든 회귀분석모델에서 낮게 확인되며, 독립변수간 독립성은 확인되지 않는다. Fig. 8은 독립변수(x, x^2, x^3, \dots)별 독립성을 고려할 필요가 없는 1차함수로 단순회귀분석 모델을 제시한 결과이나, 모델의 신뢰성은 매우 낮다. 단, 집단 에너지시설의 기술기준 등에 따르면 매설깊이와 관경은 토압 계산 시 유의미한 상관성을 가질 수 있다. 따라서 매설깊이를 단독으로 독립변수로 활용하기는 어려울 수 있으나, 관경과 상관성을 분석한 후 매설깊이 정보를 파손빈도 추정 시 일부 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Coefficient of determination and p-value of highest order term of polynomial simple regression analysis model between burial depth and frequency of damage

Degree	Coefficient of determination (R^2)	P-value	Interpretation
1	0.0210	-	Very low-fit model
2	0.0888	0.0677	Mutually dependent variables (p-value > 0.05) and very low-fit model
3	0.0888	0.9789	
4	0.0929	0.6569	

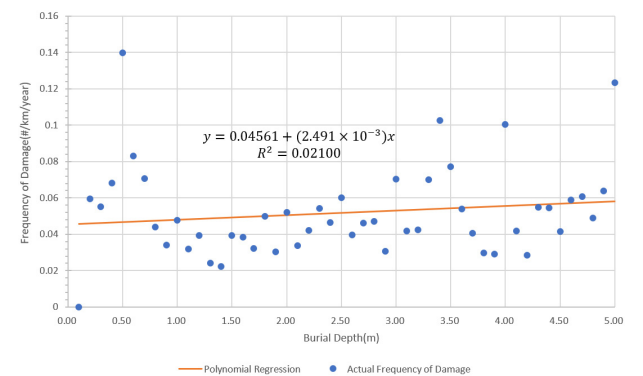


Fig. 8. Correlation analysis between burial depth and frequency of damage

4.4 감시시스템 절연레벨

감시시스템의 감지선 상태가 정상인 경우, 절연레벨값이 증가할수록 파손빈도가 낮아지며, 기울기 또한 감소하는 감시시스템 절연레벨의 경우 지수함수를 회귀분석모델로 제시할 수 있다. 사용기간-파손빈도간 회귀분석모델과 동일하게

단순선형회귀분석모델로 변형한 후 해당 모델의 적합성과 유의확률을 확인하였으며, 회귀방정식은 Eq. (5)와 같다.

$$F_I = (2.196 \times 10^{-3}) + 0.3210 \times e^{(-0.3518 \times I)} \quad (5)$$

여기서, F_I 는 절연레벨에 따른 파손빈도(#/km/year), I 는 절연레벨값(무차원)을 나타낸다.

분석 결과, 결정계수가 0.8855로 회귀분석모델의 적합도가 크고, 유의확률도 1.648×10^{-6} 로 절연레벨과 파손빈도간 상관성은 충분한 것으로 확인되었다.

Table 4. Results of one-way analysis of variance of simple linear regression analysis model between insulation level and frequency of damage

	df	SS	MS	F-value	p-value
Regression	1	100.975	100.975	946.815	2.990×10^{-24}
Residual	29	3.199	0.107	-	-
Sum	30	104.175	-	-	-

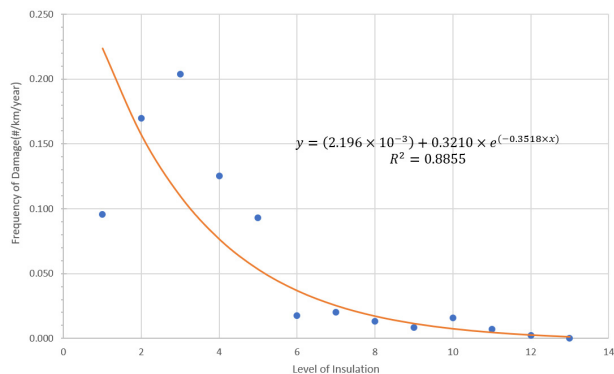


Fig. 9. Correlation analysis between insulation level and frequency of damage

4.5 연속형 변수별 모델 적합도 및 상관성 검토 결과

각 변수와 파손빈도간 단순회귀분석 모델의 결정계수(적합도) 확인 결과 사용기간과 파손빈도간 회귀분석모델의 적합도가 가장 높은 것으로 확인되었다($R^2 = 0.9693$). 감시시스템 절연레벨과 파손빈도간 회귀분석모델 역시 높은 적합도와 낮은 유의확률을 보였으나, 상대적으로 적합도와 상관성이 더 높은 사용기간-파손빈도간 지수형 회귀분석 모델을 기존 연구사례와 마찬가지로 파손빈도 추정을 위한 기본모델로 설정하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

열수송관의 파손빈도를 정량적으로 정확하게 추정하기 위해 기존 국내외 연구사례를 기반으로 단순회귀분석 변형

모델을 제안하였다. 변형 모델의 중심이 되는 파손빈도 추정 기본모델에 사용할 연속형 변수를 찾기 위해 한국지역난방공사에서 제공한 열수송관 설비이력 및 파손이력을 회귀분석하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

- (1) 사용기간에 따른 파손빈도가 지수형으로 급격하게 증가하고, 소구경관의 파손빈도가 상대적으로 높게 측정된 결과는 기존 연구사례와 유사한 것으로 확인되었다.
- (2) 사용기간과 파손빈도간 지수형 모델의 적합성과 두 변수간 상관성은 매우 높은 것으로 확인되어 기본모델로 활용 가능하다.
- (3) 관경, 매설깊이는 사용기간에 비해 상대적으로 파손빈도와의 상관성이 다소 낮은 것으로 확인되었다. 다만, 관경 및 매설깊이별로 평균사용기간이 다를 수 있어 사용기간에 의한 오차를 최소화하는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

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. 한국지역난방공사 (2022), 지사별 열수송관 설비이력, 파손이력 (In Korean).
3. Ingo Kropp (2017), KANEW 3S 6.3 Training, Report, 3S Consult GmbH, Dresden, pp. 1~54.
4. 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).
5. 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.
6. Sernhed, K. and Jönsson, M. (2017), Risk management for maintenance of district heating networks, Energy Procedia, Vol. 116, pp. 381~393 (2017).
7. Sernhed, K., Ekdahl, E. and Skoglund, P. (2012), Statusbedömning av betongkulvertar (In English: Status assessments of concrete culverts). Fjärrsyn report, Vol. 9, p. 2012.
8. Wojdyga, K. and Chorzelski, M. (2017), Chances for polish district heating systems, Energy Procedia, Vol. 116, pp. 106~118.