

지역난방 열배관망 운영데이터 기반의 파손확률 모델 개발

김형석 · 김계범* · 김래현**†

서울과학기술대학교 신에너지공학과
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232
*서울과학기술대학교 에너지환경대학원
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232
**서울과학기술대학교 화공생명공학과
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232

(2016년 12월 5일 접수, 2016년 12월 28일 수정본 접수, 2017년 2월 22일 채택)

Development of a Failure Probability Model based on Operation Data of Thermal Piping Network in District Heating System

Hyoung Seok Kim, Gye Beom Kim* and Lae Hyun Kim**†

Department of Newly Energy Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

*Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

**Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

(Received 5 December 2016; Received in revised form 28 December 2016; accepted 22 February 2017)

요 약

지역난방은 국내에 1985년 처음 도입되었다. 지하 열배관망의 사용연한이 30년 이상 증가함에 따라, 지하에 매설된 열수송 배관 특성상 유지관리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 노후화가 진행된 열배관망 유지보수를 위한 정기적인 점검, 운영관리 시 다양한 복합 기술이 필요하다. 특히 현장에서 경제적 관점에서 최적 유지보수 및 교체시점을 도출하기 위하여 의사결정에 활용될 수 있는 모형개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 한국지역난방공사 수도권 5개 지사 열 배관망 운영 시 보수이력과 사고성 데이터를 바탕으로 분석하였다. 정성적 분석과 이항 로지스틱 회귀분석의 통계적 기법을 도입하여 파손확률 모델을 개발하였다. 보수이력 및 사고성 자료의 정성적 분석 결과, 파이프라인 손상의 가장 중요한 원인으로 건설 시공불량, 배관의 부식과 자재 불량이 전체의 약 82%를 차지했다. 통계 모델 분석에서는 분류의 분리 점을 0.25로 설정함으로써 열배관 파손 및 비 파손 분류의 정확도가 73.5%로 향상 되었다. 파손확률 모델 수립을 위해 Hosmer와 Lemeshow 검정과 독립변수의 유의성 검정, 모델의 Chi-Square 검정을 통해 모델의 적합성을 검증 하였다. 열배관망 파손의 위험순위 분석결과에 따르면 파손확률을 가장 높이는 경우는 겨울철 서울지역 자동차 도로에 있는 10년 이상 된 250mm이하 배관 Reducer에서 F 건설회사가 시공했던 열배관망으로 분석되었다. 본 연구 결과는 열배관망 시스템의 유지관리 및 예방점검, 교체 사업 우선순위를 정할 때 활용 가능하다. 또한 이를 통하여 점검·유지보수 등 사전에 사고예방 계획을 수립하여 대처함으로써 열배관 파손의 빈도를 감소시키고 보다 적극적인 열배관망 관리에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract – District heating was first introduced in Korea in 1985. As the service life of the underground thermal piping network has increased for more than 30 years, the maintenance of the underground thermal pipe has become an important issue. A variety of complex technologies are required for periodic inspection and operation management for the maintenance of the aged thermal piping network. Especially, it is required to develop a model that can be used for decision making in order to derive optimal maintenance and replacement point from the economic viewpoint in the field.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: lhkim@snut.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 한 춘 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, the analysis was carried out based on the repair history and accident data at the operation of the thermal pipe network of five districts in the Korea District Heating Corporation. A failure probability model was developed by introducing statistical techniques of qualitative analysis and binomial logistic regression analysis. As a result of qualitative analysis of maintenance history and accident data, the most important cause of pipeline damage was construction erosion, corrosion of pipe and bad material accounted for about 82%. In the statistical model analysis, by setting the separation point of the classification to 0.25, the accuracy of the thermal pipe breakage and non-breakage classification improved to 73.5%. In order to establish the failure probability model, the fitness of the model was verified through the Hosmer and Lemeshow test, the independent test of the independent variables, and the Chi-Square test of the model. According to the results of analysis of the risk of thermal pipe network damage, the highest probability of failure was analyzed as the thermal pipeline constructed by the F construction company in the reducer pipe of less than 250mm, which is more than 10 years on the Seoul area motorway in winter. The results of this study can be used to prioritize maintenance, preventive inspection, and replacement of thermal piping systems. In addition, it will be possible to reduce the frequency of thermal pipeline damage and to use it more aggressively to manage thermal piping network by establishing and coping with accident prevention plan in advance such as inspection and maintenance.

Key words: District heating pipeline network, Thermal pipeline failure probability model, Binary logistic regression analysis, Thermal pipeline network failure causes

1. 서 론

집단에너지란 1개소 이상의 집중된 에너지 생산시설(열병합발전설비, 열전용보일러, 자원회수시설 등)과 생산된 에너지(열 또는 열과 전기)를 주거, 상업지역 또는 산업단지 내의 다수 사용자에게 일괄적으로 공급하는 열수송시설로 나눌 수 있다[1]. 집단에너지 시설에서 생산된 열을 대규모로 공급하기 시작한 시점은 1985년 서울에서 목동신시가지에 최초 공급을 시작하였다. 제3차 집단에너지 기본계획에 의해 2013년 국내 총 주택 1,558만호 중 254만호 약 16.3% 주택에 지역난방을 공급하려는 계획이었으며, 국내 지역난방공급자는 한국지역난방공사, GS파워(주), 한국CES(주), (주)케너텍 등 많은 사업자가 참여하고 있고, 계속 증가 추세에 있다. 현재 전국적으로 매설되어 있는 열배관망 관로길이는 약 3,300 km 이며, 최초 설치 후 약 15년 이상 지난 관로가 약 50% 이상을 차지하고 있다[1].

집단에너지 생산시설은 다른 에너지 생산시설에 비해 에너지절감과 연료사용량이 낮아 이용효율과 온실가스 배출량 감소에도 효과가 매우 크다고 볼 수 있다. 2008년 1월 실시된 한국지역난방공사 화성 열병합 발전소 시험결과 일반 화력발전의 전력 생산 효율이 49.9%에 불과한 반면 열병합 발전은 전력생산 효율이 42.1%, 열 생산 효율이 38.6%로 총 80.7%의 효율을 나타낼 수 있게 된다[2]. 열배관 내부는 고온 고압으로 운영되고 있어 관로사고의 위험이 상존하고 있고, 대부분의 열배관은 지하에 매설되어 있어 유지관리가 매우 어렵다. 이들 사고예방을 위해 배관의 정기적인 점검, 운영관리, 유지보수 등 다양한 진단·점검 기술 등을 통해 지속적인 배관 개선과 교체가 진행되고 있다[3].

그러나 3,300 km의 모든 관로에 대해 정량·정성적인 평가를 하는 불가능에 가깝다. 한정된 자원과 인력을 통해 관로파손의 모든 위험을 진단할 수 없기 때문에 관로파손의 위험의 서열화와 통계적 모형이 필요하다. 이들 모형을 통해 상대적 위험을 비교한 후 점검과 운영관리 등을 시행하면 보다 더 효과적인 위험관리를 실시할 수 있다.

본 연구에서는 지역난방공사 열배관망 대상지역 시설의 지열 및 누수 사고의 보수 이력자료를 이용하여 관 파손에 영향이 큰 인자를 추출하고 관의 파손과 비파손 유형별로 분석하여 통계적인 확률모형을 개발하고자 한다. 이를 통해 열배관망 파손확률 모델을 수립하고, 파손의 위험순위를 분석하여 관 파손에 영향을 주는 주요

변수를 추출함으로써, 현장에서 경제적 관점에서 최적 유지보수 및 교체시점을 도출하기 위하여 의사결정에 활용될 수 있는 모형개발하고자 한다.

2. 수도권 열배관망 현황 및 재질

2-1. 수도권 열배관 일반 현황

집단에너지 보급현황을 부문별로 살펴보면 지역난방은 2012년 말 기준 총 수도권 가구수(15,306천호)의 14.5%인 약 222만호에 공급되고 있고, 755개의 산업 공정용 스팀을 공급하고 있다[5]. 2012년 말 기준으로 지역난방 30개 사업장을 대상으로 허가를 득한 세대수는 3,090천 세대이나 실제 공급 중인 세대수는 2,154천 세대이고, 3개의 지역난방 및 산업단지 병행사업자가 111천 세대에 허가를 득하였으며 66천 세대에 지역난방을 공급하고 있다. 이 중 한국지역난방공사가 점유율 54.5%로 1,212천 세대에 열 공급을 하고 있다[6].

한국지역난방공사에서 전국에 설치한 열배관망 길이는 약 1,760 km (supply pipe·return pipe, 2열)로, 서울에서 부산까지 3회 왕복할 수 있는 길이이다. 이는 국내 열배관망의 약 67%에 해당한다. 특히, 파주에서 화성으로 이어지는 99 km (supply pipe·return pipe, 2열)의 연계라인을 기본으로 하는 수도권 지역 간 연계 열배관망 확충으로 열공급 효율과 안정성을 확보하였다.

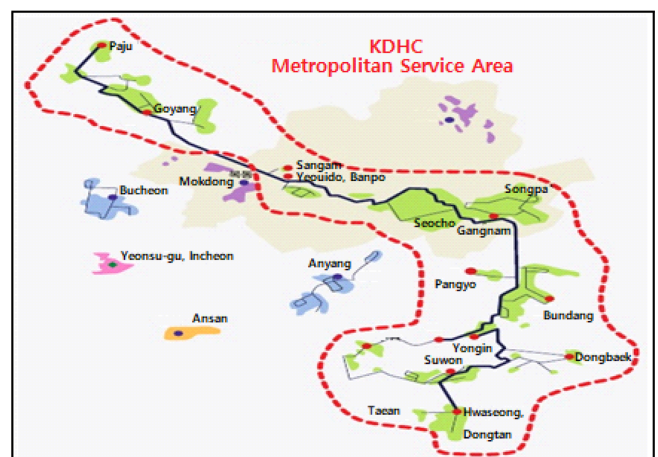


Fig. 1. Thermal pipeline network of KDHC Metropolitan area.

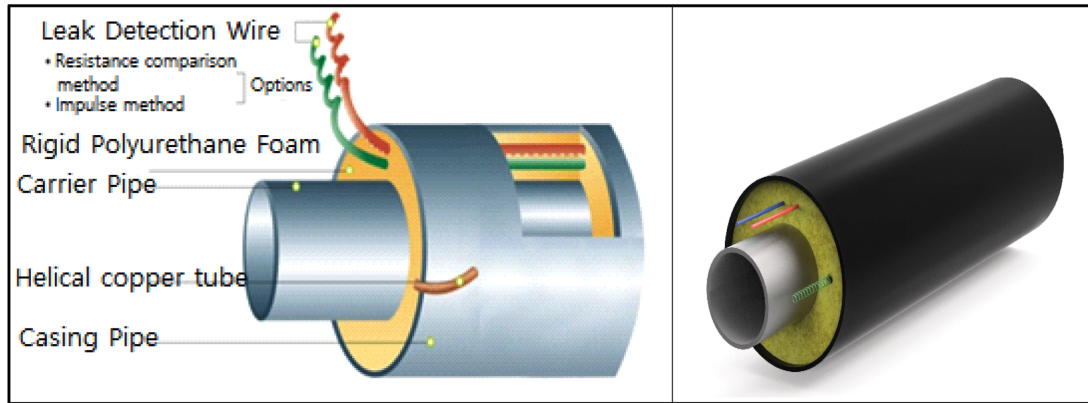


Fig. 2. Structure of thermal pipeline.

2-2. 열배관 재질 및 구조

2-2-1. 이중보온관의 구조

Fig. 2와 같이 지역난방용 이중보온관은 연강(mild steel) 재질의 운송용 내관(Carrier Pipe), 보온을 위한 폴리우레탄(polyurethane, PUR) 폼, 고밀도폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE) 재질의 외관(Casing Pipe), 외관파손으로 인한 외부 수 유입을 감지하는 누수 감지선(Leak Detection Wire)으로 구성되며, 내관은 강관, 수도용 PE관, 스테인리스관, 동관, 내면 에폭시코팅관 등이 사용된다. 보온재는 120 °C 이하용이며, 경질 폴리우레탄 폼이 주로 사용되며, 스티폼용으로는 경질 폴리우레탄 폼에 실리카(펄라이트)를 추가한 것이 주로 사용된다. 또한 외관은 고밀도 PE관, AL Spiral관 등이 사용되고 누수 감지선은 Brandes Type과 나동선 Type이 있다.

2-2-2. 내관(강관, Steel pipe, Carrier pipe)

이중보온관 내관은 재질 SPPS 370 (규격: 20A~500A), SPW 400 (규격: 600A~1200A)로 제작된 강관(Steel pipe)으로, Table 1과 같이 재질별로 KS D 3562 또는 KS D 3583의 기준에 따라 내관 재질별 검사항목에 따른 화학성분 및 기계적 성질 검사를 비롯하여 수압시험, 비파괴검사, 치수검사 등을 수행하여야 한다. 한편, Table 2에 나타낸 내관의 재질인 SPPS 370 및 SPW 400 강재에 대하여 지역난방 열배관의 최고 온도인 120 °C를 적용하면 각 강재에 대한 항복강도는 KS B 6733에 기초하여 계산하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

2-2-3. 외관(HDPE, High Densty Poly-Ethylene, Casing pipe)

외관은 내관 및 보온재를 안전하게 내장 보호하여야 하며, 열팽창 및 수축으로 인한 충격, 응력, 지중이동, 지중고정 등에 대한 마

찰력, 내마모성 등이 우수해야 한다. 또한, 외관은 정전기 절연성, 지중 및 수중 습기 유해물질의 침입 및 부식 저항성, 응력부하, 피로 파손, 되메우기 및 기타 외부 손상에 대한 내구성 등이 강해야 한다. 외관은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 제작되며, 외관의 치수 공차는 KS M 3407 또는 ISO 3607 규정에 따른다.

2-2-4. 보온재(PUR, Polyurethane)

보온재는 내관 및 외관 사이에 충전재로 이중보온관의 요구 기능인 보온성을 확보하는 기능을 하며, 그 재질 특성 및 각종 보온재의 물성 및 성능은 소정의 요구 조건을 만족하여야 한다. 보온재로는 발포우레탄을 주로 사용하며, 원료를 잘 혼합하여 성층, 기공, 줄무늬 같은 모양이 생기지 않도록 한다.

2-2-5. 누수감지선(Leak, Detection Wire)

강관파손 또는 외부충격 등으로 외관이 파손 되었을 때 보온재에 침투되는 습기의 절연저항 값을 감지해서 누수정도 및 누수위치를 알려주는 전기선으로 센서와이어, 리턴와이어 두 가닥으로 구성되어 있다.

3. 자료수집 및 조사방법

3-1. 선행연구

통계적 분석을 하기 위해서는 양적·질적으로 충실한 데이터가 필요하다. 그러나 대부분의 지하매설배관은 사고 확인이 어렵고, 사고자료 자체의 체계적인 수집이 되어 있지 않거나, 수집된 자료라고 하더라도 데이터 자체가 불완전한 경우가 많아 사고의 인과관계를 명확히 정립하기 어려운 실정이다. 국내 연구로는 주로 상수도관의 파손확률모델 개발 연구가 진행되었다[6,7]. 이 연구에서는 로

Table 1. Chemical composition and mechanical property of steel pipe material

Steel pipe material	Chemical composition (%)					Mechanical property (MPa)	
	C	Si	Mn	P	S	Tensile stress	Yield point
SPPS 370	0.25 (below)	0.35 (below)	0.30~0.90	0.04 (below)	0.04 (below)	380 (more than)	220 (more than)
SPW 400	0.25 (below)	-	-	0.04 (below)	0.04 (below)	410 (more than)	230 (more than)

Table 2. Allowable axial stress of steel pipe material

Steel pipe material	Yield point (MPa)	Safety factor	Allowable stress (MPa)	Applied stress (MPa)
SPPS 370	185	1.2	154	154
SPW 400	198		165	

Table 3. Major inspection of thermal pipeline network [13]

Division	Check cycle	Major Checklist	Remarks	
Pipeline	All pipelines daily check	<ul style="list-style-type: none">◦ Whether surface temperature rises◦ Abnormality of soil buried in Thermal pipeline◦ Manhole (Hand hole) subsidence◦ Manhole (Hand hole) cover installation safety◦ Thermal pipeline marker damage, marker falling◦ Whether there is construction nearby	Maintenance Map 1~5 grade Differential application of inspection time	
	If necessary	<ul style="list-style-type: none">◦ Check for the occurrence of frost season / rainy season / winter season and other abnormalities◦ Holiday and nighttime on-demand inspection		
Manhole	A grade	1 time/6 months	<ul style="list-style-type: none">◦ Crack occurrence and status◦ Flooding and cleaning status◦ Foreign matter inflow◦ Whether the manhole cover facilities are loaded◦ Ladder Installation Status◦ Ventilation Installation Status◦ Crack occurrence and status◦ Flooding and cleaning status◦ Foreign matter inflow◦ Whether the manhole cover facilities are loaded◦ Ladder Installation Status◦ Ventilation Installation Status	Butterfly Valve usage Air Vent usage
	B grade	1 time/month		
Hand hole	A grade	1 time/6 months	<ul style="list-style-type: none">◦ Internal flooding and foreign matter inflow◦ Fast opening and closing of the inner lid for preventing foreign matter◦ Internal cable management status of hand hole for signal transmission line connection◦ Whether or not the hand hole is equipped with other facilities◦ Internal flooding and foreign matter inflow◦ Fast opening and closing of the inner lid for preventing foreign matter◦ Internal cable management status of hand hole for signal transmission line connection◦ Whether or not the hand hole is equipped with other facilities	Ball Valve usage signal transmission line connection usage
	B grade	1 time/month		
Valve	Same to manhole and handhole inspection cycle	<ul style="list-style-type: none">◦ Valve corrosion state◦ Heat insulation finish condition◦ Valve handle and connection pin, etc. Affiliated facility management status◦ Remove surface foreign matter		
	1 time/6 months	<ul style="list-style-type: none">◦ Check valve electrical opening / closing condition		
Air Vent	Same to manhole and manhole inspection cycle	<ul style="list-style-type: none">◦ Corrosion state of valve and steel pipe exposed part◦ Heat insulation finish condition◦ Valve Handle and Quick Coupling Accessory Facility management status		
By-pass	1 time/week	<ul style="list-style-type: none">◦ Foreign matter in the structure◦ By-pass external structure lid or cover maintenance status◦ Corrosion state of temporary connection steel pipe◦ Opening and operating state of valve installed in temporary connection pipe◦ Water penetration into the heat pipe connected to the city-connecting steel pipe		
Thermal pipeline in Utility-Pipe Conduit	2 time/months	<ul style="list-style-type: none">◦ Damage to the exterior of the thermal pipeline and insulation◦ Installation condition of various supports and corrosion◦ Expansion Joint Leaks◦ Thermal pipeline flooding◦ Access security system		
Exposed thermal pipeline	1 time/week	<ul style="list-style-type: none">◦ Thermal pipeline appearance damage◦ Structural stability of the support◦ Existence of thermal pipeline piping hazard◦ Deformation of thermal pipeline		
Key management section	If necessary	<ul style="list-style-type: none">◦ Soil subsidence status in the thermal pipeline◦ Location Indicator, Installation Area Indicator lost◦ Underground temperature measurement in buried section		
River section	If necessary (Summer season, Heavy rain)	<ul style="list-style-type: none">◦ Erosion due to water and safety◦ Depth change due to erosion◦ Pipe linear and structural deformation◦ Visual inspection, surveying, etc. check. Changes reflect drawing modifications	Erosion area interval measurement cycle 1 time/2 years	
Third Party Damage section	Inspect Thermal pipeline at the same time (A separate check at bed excavation and backfill)	<ul style="list-style-type: none">◦ Whether the thermal pipeline facility protection method was implemented according to the contents of the discussion◦ Damage to the exterior of the thermal pipeline and insulation◦ Exposed thermal pipeline suspension, suitability of support◦ Inspection of damaged facilities such as manhole, warning tape, pipe marker, heat pipe monitoring system equipment, etc. due to third party construction◦ Deformation of thermal pipe and displacements by measuring point◦ Possible damage due to external factors◦ Safety of thermal pipeline check passage		
Develop ground section	2 time/months	<ul style="list-style-type: none">◦ Thermal pipeline facility guide sign Installation state◦ Start of construction work◦ Damage to thermal pipeline due to construction work		

지스틱 회귀분석이라는 표준통계 분석을 통해 상수도관의 파손 확률을 분석하였고, 관중, 구경, 관연장, 매설연수, 평균수압, 매설환경의 7가지 독립변수를 통해 회귀모형을 개발하였다. 이 논문에서는 외국의 대표적 회귀모형을 미국 Iowa주 Des Moines 수도국 모델과 USEPA 모델, 그리고 MIT 모델이 있다고 소개하고 있다[6,7]. 이들 사례는 다중회귀분석이라는 통계기법을 이용하여 노후도 정도를 인자항목간의 관계식으로 나타낸 모델이다.

외국의 경우는 관 파손 확률모델연구가 활발히 진행되고 있다. Kleiner et al.[8]에 따르면 관 파손 및 파손에 이르는 시간(잔존수명)을 예측하기 위해 사용된 통계적 기법을 소개하고 있는데 Proportional hazard, Time dependent Poisson's model, Accelerated-life, Markovian approach, Bayesian diagnostics, Cohort survival 등 관 파손에 대한 확률모델 혹은 생존모델 활용했던 예를 제시하고 있다.

관 파손으로 인한 폭발·화재 위험성이 큰 고압가스 분야의 연구는 주로 배관의 건전성평가를 기반으로 한 연구가 진행되었다[9]. 이 방법은 관 파손의 사고확률과 사고피해 정도를 Risk matrixes 위험도를 결정하여 분석한다.

국내의 경우 열배관 파손확률을 주제로 한 연구사례는 없는 실정이다. 위 선행연구에서 제시된 방법들은 열배관 조건과 다소 상이하다. 열배관의 재질과 시공방법, 압력은 지역난방 전체에 대해 항상 일정하고, 외관이 HDPE관인 열배관은 토양의 부식성에 미치는 영향은 미비하다고 할 수 있어 파손에 미치는 인자로 사용하지 않아도 된다. 상수도관의 경우 설치 시작된 기간(1976년부터)이 지역난방공사 배관보다 오래 전에 설치되었고, 배관재질이 다르며 시공방법 또한 다르다. 무엇보다 배관 내 흐르는 유체 온도가 다르다. 고압가스 배관 내 물질은 폭발·화재 위험성이 큰 LNG이므로 시공, 설치, 검사가 모두 법적기준에 의해 엄격히 관리되고 있다.

열배관의 주요검점내용은 Table 3과 같다. 주요 검점내용은 중점관리구간을 선정하여 필요시 점검하고 있다. 본 연구결과를 통해 중점관리구간의 명확한 설정을 통해 관 파손 예방관리에 활용될 수 있으라 판단된다.

3-2. 조사 범위 및 연구절차

한국지역난방공사 수도권 공급지역(고양, 남부, 서울, 성남, 용인)

의 배관시설 현황 자료와 2004년도부터 2009년도까지 6년간 2,125개의 보수이력과 사고성 데이터를 분석하였다. 기본 자료는 보수이력 자료와 환경적 특성자료 등 다양한 수집 자료를 한국지역난방공사에서 공급하는 수도권에서 자료를 수집하였다. 이를 파손 관의 특성과 주변 환경적 특성을 유형별로 분석하였다. 이때 관의 특성에는 관경, 매설년도(사용연수), 매설깊이, 파손부위 등이 있고, 환경적 특성에는 매설 환경(포장, 비포장, 녹지, 하천, 농지, 보도)이 있는데, 각 환경에서의 열배관 파손확률 함수를 구하기 위해 각 영향요인을 독립변수로 하고 파손 유무를 종속변수로 하는 이항 로지스틱 회귀 모형을 사용하였다. 파손확률모형의 통계적 모델 검정을 검토하여 유의한 모형으로 판단되었다.

자료는 열배관망을 직접 유지관리 하면서 작성된 관의 파손 및 누수복구 이력자료와 시설현황, 매설환경, 지형 등 GIS (Geographic Information System) 자료를 조사 분석하였다. 기초 자료의 수집 대상은 한국지역난방공사 5개 지역으로 관로 연장은 총 1,118 km를 대상으로 하였다.

연구절차는 ①관로의 파손 및 누수보수 이력조사, ②사고 유형별 자료 분석, ③파손확률모형의 적합성 검토, ④파손확률 독립변수 결정, ⑤로지스틱 회귀 분석, ⑥로지스틱 회귀 계수의 결정, ⑦관 파손 확률의 모델 결정 순으로 연구를 진행하였다.

3-3. 모델 개발을 위한 특성분류

파손 가능성을 평가·검증하기 위해서는 데이터를 그룹화 해야 한다. 관경, 매설연수, 매설환경 등은 조사된 자료를 데이터로 활용하였다. 열배관은 외압에 의한 관 파손 영향이 비교적 적은 편이나 선행연구에 따르면 교통하중이나 토양 특성이 관 파손에 영향을 미친다[10]. 매설 현황의 경우 포장구간은 2차선 이하와 이상으로 구분하여 빈도분석을 하였고, 확률분석에서는 2개의 구분에 통계적 유의성이 없어 차도로 합쳐 분석하였다. 조사 항목으로는 주변 환경, 관 특성, 토양환경, 누수원인, 누수부위 등에 관련된 영향인자를 조사함으로써 관 파손 확률 모델을 개발할 수 있다.

3-4. 자료 전처리

수도권 5개 지사의 열배관 보수이력 2,125개 데이터 중 1,291개

Table 4. Target pipe length investigated area (unit:km)

Metropolitan area	Nambu	Seongnam	Seoul	Goyang	Yongin
Thermal pipeline extension	201	244	124	329	220

*Korea District Heating Corporation data by 2015

Table 5. Variables of regression analysis input data contents

Variable symbol	Variable Description	Data type	Classification hierarchy
P	Damage or Not	Binary	Dependent variable, 1=Damage, 0=No damage occurred
X1 _(j)	Seasonal factors in Korea	Category	1=spring (3~5 month), 2=summer (6~8 month), 3=autumn (9~11 month), 4=winter (12~2 month)
X2 _(j)	Burial period	Category	1=0~4yr, 2=5~9yr, 3=10~14yr, 4=15~19yr, 5=20yr (more than)
X3 _(j)	Jurisdiction city	Category	1=Goyang, 2=Nambu, 3=Seoul, 4=Seongnam, 5=Yongin
X4 _(j)	Buried position	Category	1=driveway, 2=off-road (green space), 3=river, 4=the terrace land on the river, 5=others (sidewalk)
X5 _(j)	Equipment name (Damaged point)	Category	1=pipeline, 2=Tee, 3=bend, 4=reducer, 5=Anchor, 6=Vent, 7=Valve, 8=others (Bypass, end cap, etc..)
X6 _(j)	Pipe size	Category	1=250 mm (below), 2=300~500 mm, 3=550~700 mm, 4=750 mm (more)
X7 _(j)	Depth of burial	Category	1=1 m (below), 2=2 m (below), 3=3 m (below), 4=4 m (below), 5=4 m (excess)
X8 _(j)	Constructor	Category	1=S Construction company, 2=B Construction company... etc. Classified into 11 groups

사고성 데이터만을 분석대상으로 선정하였다. 793개의 자료는 분석대상에서 제외하였고, 제외 조건은 다음과 같다.

- ① 각종 신설공사 데이터
- ② 개인 사유지로 인한 이설, 다른 공공시설물과의 간섭으로 인한 공사
- ③ 배관 간섭으로 인해 이설, 전력케이블 보수, 신호선 관련 보수
- ④ 열수송 배관이 아닌 환기구 재설치, 맨홀뚜껑 재설치, Test Point 설치, 타시설물 복구
- ⑤ 분석대상인 수도권 5개 지역 외 지역

3-5. 일반적인 로지스틱 회귀분석 모형

로지스틱 회귀분석은 종속변수가 셋 이상의 범주를 가질 때 이항 회귀모형을 확장시킨 다항로지스틱 회귀모형을 사용할 수 있고, 종속변수가 순서적으로 측정되면 순서형 로지스틱 회귀모형을 사용할 수 있다. 본 연구 대상인 열배관의 파손확률 예측은 파손과 비파손의 확률모형을 개발하기 위해 이항 로지스틱 회귀분석을 사용하였다. 이항 로지스틱 회귀분석은 독립변수가 연속형 혹은 범주형 자료 모두 분석할 수 있다. 로지스틱 회귀분석은 정규분포를 따르는 것이 아니라 이항분포를 따른다. 분석결과 종속변수 값의 확률이 0.5보다 크면 그 사건이 일어나며 0.5보다 작으면 그 사건이 일어나지 않는다는 것을 예측하게 된다. 분석에는 상용화된 통계패키지 SPSS version 23을 사용하였다.

관의 파손이 일어날 경우를 1, 파손이 일어나지 않은 경우를 0으로 하고 파손이 일어날 확률을 P 이라 하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{P}{1-P} = e^Z = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (1)$$

여기서 X_n 는 관 파손에 영향을 주는 인자로 독립변수이며 b_n 는 모델의 회귀에 의해 추정되는 계수이다.

4. 연구결과 및 고찰

4-1. 관 파손 사고사례 분석

조사된 자료의 특성을 분류한 결과 사고 발생건수가 환경이 작을수록 파손이 일어날 확률이 큰 것으로 나타났다. 환경이 커질수록 관의 두께도 증가하므로 내·외력에 견디는 능력이 높아지기 때문이다. 환경별 파손특성을 살펴보면, 전체적으로 환경이 작을수록 파

손율이 크고 환경이 커질수록 파손율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 250A이하의 경우 340건으로 전체 사고건의 70%이상을 차지하고 있다. 열배관의 특징으로 모든 환경이 용접접합으로 되어 있어 외부하중이나 온도신축, 관 압력 등 저항에 강하다.

4-2. 매설환경별 관 파손 특성 분석

매설환경별 관 파손특성은 대부분의 관이 포장구간에 매설되어 있으며 기타(보도) 구간에 매설되어 있는 작은 환경에서 사고발생건수가 많이 발생하고 있음을 나타내고 있다. 또한 포장 2차선 이하 구간에서 km 당 43%이상 높게 나타났으며 하천, 농지의 경우 매설된 배관 길이가 짧아 사고건수도 낮게 나타나고 있다. 매설환경에 따른 파손율은 대체적으로 포장2차선 및 포장 4차선에서 크게 나타났으며, 차량하중 등 외부적 영향이 많이 미치는 것으로 분석된다.

4-3. 경과년수별 관 파손 특성 분석

장기사용 배관이 증가함에 따라 관의 매설연수는 늘어나고 있으며 파손을 예측하기 위한 중요한 인자로 이용될 수 있다. 과거보다 관의 자재 성능과 시공 방법 등 기술의 발달로 매설연수와 관 파손과의 명확한 관계 규명은 쉽지 않고 다양한 원인 즉 외부적 환경적 요인도 관에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 정확한 파손확률을 구하기 위하여 매설한 후 사고가 발생한 경과 년수를 파악하여 파손빈도를 분석하였다. 분석결과를 보면 환경별 연장대비 경과 년수가 오래 될수록 관 파손이 높게 나타났으며, 노후의 정도가 경과 년수에 비례한다고 단정적으로 볼 수는 없지만 여러 인자와 복합적인 상호작용에 의해 비례한다고 볼 수 있다.

343건 파손건수 중 10년이하 열배관에서는 10.8%, 10년 초과에서는 89.2% 사고빈도를 나타내고 있다. 이는 당시 보온자재의 시공 불량이 많아 반복된 파손으로 인한 결과로 해석할 수 있으며, 경과 년수가 높을수록 파손건수도 늘어나고 있다. 개량사업시 우선 검토할 지역으로 판단된다.

4-4. 사고원인별 관 파손 특성 분석

열배관망에서 가장 큰 사고원인으로는 시공불량과 자재 불량, 부식이 전체 파손건수 343건 중 282건으로 전체 약 82%를 차지하며 다음으로는 타공사(11%), 설계잘못(4%) 유지보수잘못(3%)등으로

Table 6. Damage characteristics by pipe size

Division	Total	250A (below)	300A ~ 500A	550A ~ 700A	750A (more)
Pipe length (km)	2258	1298	465	342	153
%	100	57.5	20.6	15.1	6.8
Number of pipe breaks	482	340	57	55	30
%	100	70.5	11.8	11.4	6.3
Number of pipe breaks per km	0.10	0.26	0.12	0.16	0.19

Table 7. Damage characteristics by buried environment

Classification	Total	Two-lane pavement below	Four-lane pavement more	off-road (green space)	River	Farmland	others (sidewalk)
Pipe length (km)	2258	976	752	185	63	29	253
%	100	43.2	33.3	8.2	2.8	1.3	11.2
Number of pipe breaks	482	134	68	93	38	3	146
%	100	27.8	14.1	19.3	7.9	0.6	30.3
Number of pipe breaks per km	0.10	0.13	0.09	0.50	0.60	0.10	0.57

Table 8. Frequency of breakage by pipe size according to period

Burial period	5	5~10	11~15	16~20	21~25	Etc.
Pipe size						
250mm (below)	6	25	179	44	17	
300~500 mm	0	3	19	14	2	
550~700 mm	0	3	16	4	1	(unit: number)
750 mm (more)	0	0	6	2	2	
	37(10.8%)			306(89.2%)		

Table 9. Frequency of breakage by pipe size according to cause of accident

Damaged cause pipe size	Poor construction	Corrosion	Design miss	Maintenance error	Material failure	Third-party accidents
250 mm (below)	108	60	13	5	54	31
300~500 mm	18	1	2	0	12	5
550~700 mm	9	6	0	2	7	0
75 mm (more)	3	1	0	2	3	1
Sum	138	68	15	9	76	37

Table 10. Frequency of breakage on according to pipe size of accident location

Damaged point pipe size	Straight pipe	Tee	Bend	Reducer	Anchor	Vent	Valve	Others
250 mm (below)	130	23	29	0	6	2	77	4
300~500 mm	15	10	3	0	0	3	7	0
550~700 mm	7	2	3	2	1	6	3	0
75 mm (more)	9	1	0	0	0	0	0	0
Sum (%)	161 (47%)	36 (10%)	35 (10%)	2 (1%)	7 (2%)	11 (3%)	87 (25%)	4 (1%)

나타나고 있다. 특히 시공불량은 이중보온관 자재와 현장시공관리 등 복합적인 문제로 판단된다.

4.5. 사고부위별 관 파손 특성 분석

관 파손의 부위별로는 직관, 밸브, 티, 밴드, 벤트 순으로 파손 특성이 나타나고 있으며, 밸브의 경우 당시 자재 결함에 의한 교체 등으로 사고발생 건수가 높게 나타나고 있다. 사고 부위별 관경에 따른 사고발생빈도는 직관(47%), 밸브(25%), 티(10%), 밴드(10%), 벤트(3%), 앵커(2%) 등으로 나타났다. 열배관이 오래될수록 노후로 인한 부식, 관두께 감소, 편홀 등이 많았다.

4.6. 통계적 모델 검증

모형의 최적화를 위해 단계적(stepwise) 로지스틱 회귀분석 방법의 전진선택법을 사용하였다. 이 분석법은 하나의 종속변수를 설명할 수 있는 많은 독립변수 중에서 회귀모형에 사용할 변수를 축차적으로 하나씩 선택하거나 제거하여 가장 좋은 회귀모형을 선택하는 방법이다. 본 분석에서는 7단계에서 종료하였다.

통계적 모델 검증을 위해 상수항에 대한 검정, 최종모형 검정, Hosmer and Lemeshow 검정을 실시하였고, 검정결과 귀무가설(H0:모형은 유용하지 않다)은 기각된다. 따라서 모형에 포함된 상수와 독립변수들의 영향력이 0이라고 할 수 없으며 모형은 유용하다. 모델에 대한 각 검정 요약은 Table 11과 같다.

단계적 로지스틱 회귀분석 결과 $X_{7(j)}$ 의 매설깊이는 $p\text{-value}=0.747$ 로 유의하지 않아 제거되었다.

4.7. 파손과 비파손 분류의 정확도

이항 로지스틱 회귀분석에서는 확률이 0.5를 넘으면 파손 사건(1=파손, 0=비파손)이 일어난다고 분류하고 있다. 사건의 분류 분

Table 11. The fitness of the model verified

Overall test of model coefficient							
		chi-square	df	p-value			
7 stepwise	step	16.137	3	.001			
	block	425.000	35	.000			
	model	425.000	35	.000			
Hosmer & Lemeshow Test							
		chi-square	df	p-value			
7 stepwise		12.830	8	.118			
Independent variable of equation							
		B	S.E.	Wald	df	p-value	Exp(B)
7 stepwise	X1 _(j)			15.633	3	.001	
	X2 _(j)			26.000	4	.000	
	X3 _(j)			42.264	4	.000	
	X4 _(j)			24.287	4	.000	
	X5 _(j)			150.917	7	.000	
	X6 _(j)			21.605	3	.000	
	X8 _(j)			48.093	10	.000	
	constant	-1.913	.964	3.939	1	.047	.148

*B: Logistic regression coefficient, S.E: standard error, Wald: Wald statistics, df: Degree of Freedom

리점을 0.5로 하면 전체 분류 정확도는 91.9%로 가장 좋지만 실제 파손을 파손으로 분류하는 정확도는 55.7%로 낮다. 위험관리 측면에 파손의 분류 정확도를 좀 더 높일 필요가 있다. 전체와 파손의 분류 정확도는 일정부분 trade-off 상황이 발생하는데 분리점별 정확도를 표현하면 Fig. 3과 같다. 본 논문에서는 분류의 분리점을 0.25하는 것이 가장 최적의 분류 방법으로 분석되었다.

Table 12에서 분류의 분리점을 0.25로 할 경우 실제 파손을 파손으로 예측하는 비율은 0.5에 비해 정확도가 55.7%→73.5%로 17.8% 개

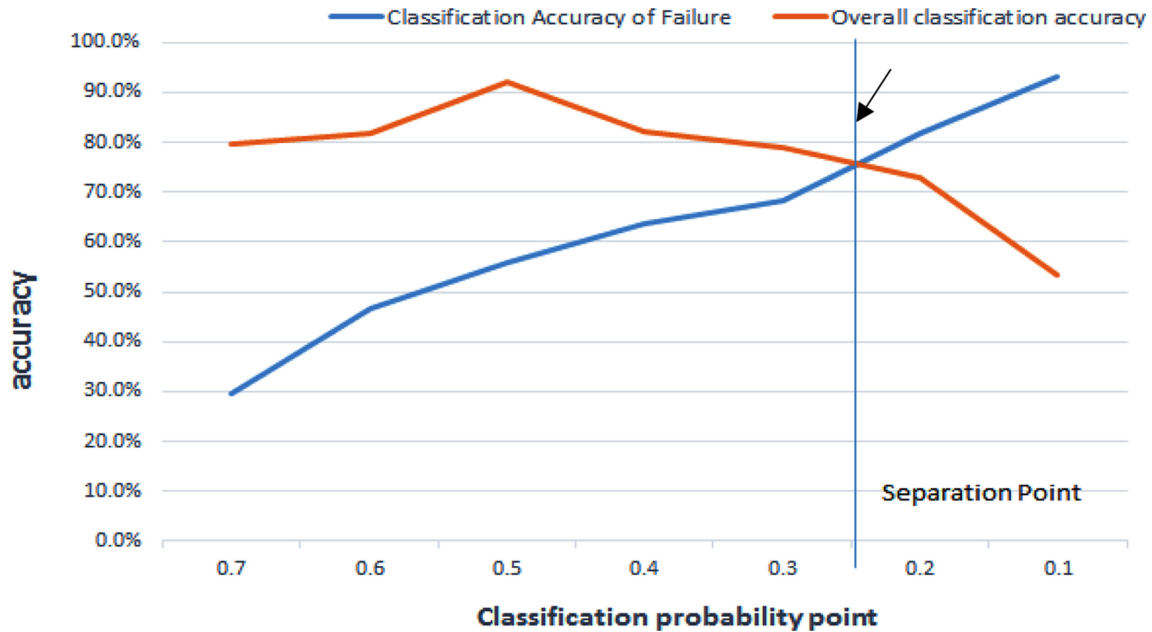


Fig. 3. Classification probability point vs. accuracy.

Table 12. Accuracy of breakage and non-breakage classification

Separation point of Classification = 0.25(0.5)		Prediction		
		non-breakage	breakage	Classification accuracy (%)
Actual	non-breakage	745 (871)	203 (77)	78.6 (91.9)
	breakage	91 (152)	252 (191)	73.5 (55.7)
Total percent				77.2 (82.3)

선되는 것을 볼 수 있다. 그러나 전체 분류의 정확도는 82.3%→77.2%로 5.1% 낮아 졌다. 위험관리 측면에서 전체의 분류 정확도 보다는 열배관 파손의 위험성에 중점을 두고 분석하는 것이 중요하다.

4.8. 열배관망 파손확률 모델

열배관망 보수이력 비정형데이터를 정리하여 각 독립변수를 범주형 데이터로 변환 후 이항 로지스틱 회귀분석을 하였다. 식 1과 같이 교차비(odds ratio = $\frac{p}{1-p}$, p: 파손 혹은 비파손 이벤트가 발생할 확률)를 통해 확률을 구할 수 있다.

결과적으로 본 논문의 열배관 파손과 비파손의 예측모델은

$$\frac{p}{1-p} = 0.148 \times \exp(X1_{(j)}) \times \exp(X2_{(j)}) \times \exp(X3_{(j)}) \times \exp(X4_{(j)}) \times \exp(X5_{(j)}) \times \exp(X6_{(j)}) \times \exp(X8_{(j)}) \quad (2)$$

where, j is the categorical value of the X variable (See Table 5)로 예측된다. 각 X값에 대한 각 범주의 Exp(B) 값은 Table 13과 같다.

4.9. 열배관 파손의 위험순위 분석

본 연구에서는 파손이 발생하는 경우를 ‘1’로, 발생하지 않는 경우를 ‘0’으로 설정하였고, 식 (2)와 같이 7개의 독립변수를 설정하여 분석하였다. 열배관 파손의 위험순위를 파악하고자 회귀계수의 부호와 Exp(B) 값을 분석하여 7개 독립변수 범주별 위험순위를 분석하면

① X1_(j): 계절적 요인은 “여름 < 봄 < 가을 < 겨울” 순으로 파손 확률이 높고, 봄을 기준으로 겨울의 파손확률은 1.4배 더 높다.

② X2_(j): 매설 년수는 “0~4년 < 5~9년 < 15~19년 < 20년이상 < 10~14년” 순으로 파손확률이 높고 0~4년을 기준으로 10~14년 배관의 파손확률은 4.4배 더 높다.

③ X3_(j): 관할시의 수도권 5개 지역은 “용인 < 고양 < 남부 < 성남 < 서울” 순으로 파손확률이 높고 고양시를 기준으로 서울의 파손확률은 3.97배 더 높다.

④ X4_(j): 매설위치는 “기타(보도)지역 < 비포장(녹지) < 하천 < 고수부지 < 차도” 순이며 차도지역의 파손확률이 가장 높다.

⑤ X5_(j): 설비명(파손부위)는 “기타(Bypass, end cap등) < Valve < Vent < 배관 < Tee < Anchor < Bend < Reducer” 순으로 배관을 기준으로 Bend의 파손확률은 1.6배, Reducer의 파손확률은 4.1배 파손확률이 더 높인다.

⑥ X6_(j): 관경은 “300~500 mm < 550~700 mm < 750 mm이하 < 250 mm이하” 순으로 250 mm이하 배관의 파손확률이 가장 높다.

⑦ X8_(j): 시공사는 특히 파손확률의 큰 차이를 보이고 있다. 시공사별로 파손확률에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 회사명을 생략하고 A사~J사, 기타로 명칭을 붙여 분석해 보면 “I < G < H < A < D < E < B < C < 기타 < J < F사” 순으로 파손확률이 높다. A사를 기준으로 J사의 파손확률은 20.8배 더 높이고, F사는 21.6배 파손확률을 더 높인다.

파손확률을 가장 높이는 경우는 “겨울철 서울지역 자동차 도로에 있는 10년 이상 된 250 mm이하 배관 Reducer에서 F 건설회사가 시공했던 열배관망”으로 분석되었다. 이 때 식 (2)에서 제시한 바와 같이 파손확률은 99.7%이다.

식 (2) 모델식을 통해 열배관망의 중점 점검구역 설정, 위험관리

Table 13. Each variable in the prediction Exp(B) value

Independent variable of equation				
X	B	df	Exp (B)	Classification hierarchy
X1_Seasonal factors		3		
X1 ₍₁₎		-	1	Spring (3~5 month)
X1 ₍₂₎	-.521	1	.594	Summer (6~8 month)
X1 ₍₃₎	.184	1	1.202	Autumn (9~11 month)
X1 ₍₄₎	.358	1	1.431	Winter (12~2 month)
X2_Burial period		4		
X2 ₍₁₎			1	0~4yr
X2 ₍₂₎	.140	1	1.150	5~9yr
X2 ₍₃₎	1.479	1	4.387	10~14yr
X2 ₍₄₎	1.302	1	3.675	15~19yr
X2 ₍₅₎	1.416	1	4.121	20yr (more than)
X3_Jurisdiction city		4		
X3 ₍₁₎			1	Goyang
X3 ₍₂₎	.556	1	1.744	Nambu
X3 ₍₃₎	1.380	1	3.973	Seoul
X3 ₍₄₎	1.261	1	3.528	Seongnam
X3 ₍₅₎	-1.072	1	.342	Yongin
X4_Buried position		4		
X4 ₍₁₎			1	driveway
X4 ₍₂₎	-.397	1	.672	off-road (green space)
X4 ₍₃₎	-2.116	1	.120	river
X4 ₍₄₎	-2.583	1	.076	the terrace land on the river
X4 ₍₅₎	-.033	1	.968	others (sidewalk)
X5_Equipment name (Damaged point)		7		
X5 ₍₁₎			1	pipeline
X5 ₍₂₎	.272	1	1.313	Tee
X5 ₍₃₎	.439	1	1.551	Bend
X5 ₍₄₎	1.399	1	4.052	Reducer
X5 ₍₅₎	.287	1	1.333	Anchor
X5 ₍₆₎	-2.113	1	.121	Vent
X5 ₍₇₎	-1.925	1	.146	Valve
X5 ₍₈₎	-1.005	1	.366	others (Bypass, end cap, etc..)
X6_Pipe size		3		
X6 ₍₁₎			1	250 mm (below)
X6 ₍₂₎	-.614	1	.541	300~500 mm
X6 ₍₃₎	-1.060	1	.347	550~700 mm
X6 ₍₄₎	-1.230	1	.292	750 mm (more)
X8_Constructor		10		
X8 ₍₁₎			1	A Construction company
X8 ₍₂₎	1.392	1	4.021	B Construction company
X8 ₍₃₎	1.593	1	4.921	C Construction company
X8 ₍₄₎	.293	1	1.341	D Construction company
X8 ₍₅₎	.830	1	2.294	E Construction company
X8 ₍₆₎	3.075	1	21.640	F Construction company
X8 ₍₇₎	-.591	1	.554	G Construction company
X8 ₍₈₎	-20.124	1	.000	H Construction company
X8 ₍₉₎	-.304	1	.738	I Construction company
X8 ₍₁₀₎	3.036	1	20.819	J Construction company
X8 ₍₁₁₎	1.713	1	5.547	etc.
Constant	-1.913	1	.148	

사업의 투자 우선순위 선정, 지리정보시스템을 활용한 관 파손 확률의 위험지도 작성 등에 활용할 수 있다. 본 모델의 파손 예측 분류의 정확도는 73.5%이지만 몇 가지의 변수 발굴과 더 많은 빅데

이터를 수집하여 지속적으로 본 모델을 개선해 나간다면 향후 파손의 정확도는 좀 더 높일 수 있으리라 기대한다.

5. 결 론

열배관망의 유지관리 및 개선, 교체할 때 우선순위를 정하기 위해 과거의 관 파손 및 누수사고의 유형을 분석하였고, 8개의 독립변수를 선정하여 통계적 파손확률을 분석하였다. 연구 대상 관로인 수도권 5개 지사 열배관의 보수이력 2,125개 데이터 중 1,291개(파손사고 343개, 비파손 948개) 사고성 데이터만을 분석대상으로 선정하여 분석하였다. 통계적 기법은 이항 로지스틱 회귀분석을 통해 파손확률모델을 구하였다.

보수이력 및 사고성 자료의 정성적 분석 결과, 파이프라인 손상의 가장 중요한 원인으로 건설 시공불량, 배관의 부식과 자재 불량이 전체의 약 82%를 차지했다. 통계 모델 분석에서는 분류의 분리 점을 0.25로 설정함으로써 열배관 파손 및 비 파손 분류의 정확도가 73.5%로 향상 되었다. 파손확률 모델 수립을 위해 Hosmer와 Lemeshow 검정과 독립변수의 유의성 검정, 모델의 Chi-Square 검정을 통해 모델의 적합성을 검증 하였다. 열배관망 파손의 위험순위 분석결과에 따르면 파손확률을 가장 높이는 경우는 “겨울철 서울지역 자동차도로에 있는 10년 이상 된 250 mm이하 배관 Reducer에서 F 건설회사가 시공했던 열배관망”으로 분석되었다.

향후 열배관 파손 예측의 정확도를 높이기 위해 배관 검사데이터, 체계적인 관 파손 사고조사 데이터 수립, 토양환경 등 다양한 인자들을 사용하여 예측의 정확도를 높일 필요가 있다. 본 연구의 결과는 한정된 자료로 효과적인 열배관망의 유지관리 및 개선, 교체사업 수행 시 우선순위를 정하는데 참고자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 관 파손에 대한 사전적 예방관리 계획 수립으로 관 파손사고를 미연에 방지하여 효율적인 배관망 관리에 활용될 것으로 보인다.

감 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. KDHC, “Business Manual of Group Energy Enterprise,” *Korea District Heating Corporation Manual*, 1(3), 22-43(2010).
2. KDHC, “Thermal Piping Facility Construction Work Guide,” *Korea District Heating Corporation Manual*, 2(1), 40-60(2010).
3. KDHC, “Thermal Piping Facility Maintenance Management Guide Book,” *Korea District Heating Corporation*, 2(1), 141-180(2010).
4. KDHC, “Thermal Piping Equipment Technical Manual (Dual insulated pipeline),” *Korea District Heating Corporation Manual*, 2(1), 202-213(2010).
5. <https://www.kdhc.co.kr/content.do?srp=S22&siteCmsCd=CM3654&topCmsCd=CM3692&cmsCd=CM3702&pnum=1&cnum=0>.
6. Park, S. B., “Development of a Probability Model for Water Main Burst Risks Using the Leakage Type Analysis Methods,” *University of Seoul, Department of Environmental Engineering Graduate School*, 5-9(2008).
7. Kim, M. J., “A Probability model for burst risks of water pipes using statistic methods”, *University of Seoul, Department of Environmental Engineering Graduate School*, 2004.
8. Kleiner, Y. and Rajani, B., 2001, “Comprehensive Review of Structural Deterioration of Water Mains : Statistical Models,” *Urban Water*, 3, pp131-150.
9. Kim, B. S., “A Study on Management of Gas Transportation Pipelines Based on Integrity Assessment System,” *Dept. of Chemical Engineering The Graduate School of Kwangwoon University*, 38-62(2012).
10. KOSHA Guide, “Technical Guidelines for Pipeline Major Accident Emergency Planning,” *Korea Occupational Safety & Health Agency*, M-157-2012.
11. Lee, H. S. and Lim, J.-H., “SPSS 22 Manual,” *Jyphyunjae Publishing Co.*, ISBN 978-89-97304-42-4, pp366~386(2015).
12. Korea District Heating Corporation, <http://www.kdhc.co.kr>
13. Kim, G. B., “Analysis of Accident Cause and Statistical Accident Probability Model of District Heating Pipeline,” *Seoul National University of Science & Technology, Department of Energy& Environment Graduate School*, 29-30(2017).