

지하매설물 중 도시가스 지하배관에 대한 위험성 서열화 분석 Risk Ranking Analysis for the City-Gas Pipelines in the Underground Laying Facilities

고재선[†] · 김 효

Jae-Sun Ko[†] · Hyo Kim

서울시립대학교 화학공학과
(2004. 2. 9. 접수/2004. 3. 24. 채택)

요 약

본 논문은 도시가스 지하배관의 위험관리체계를 유지하는데 필요한 요소들 중 배관의 위험성평가에 적절한 기법을 제안하고, 그 평가결과에 근거하여 가장 비용-효과가 큰 배관 유지관리방안을 찾아내는데 그 목적이 있다. 본 연구에서 제안된 지하배관의 위험성서열화의 접근방법은 세 가지 측면에서 행하여졌는데, 첫째는 RBI(Risk Based Inspection)으로서 배관의 위험도에 영향을 주는 주변인구조건, 관의 크기 및 두께, 사용시간 등을 기준으로 일차적 평가를 함으로서 노출위험도의 높고 낮음을 정성적으로 평가하였고, 둘째는 Scoring System으로서 매설된 배관의 환경적인 요소에 기초 하여 점수화하여 구체적으로 위험도를 서열화 하였다. 셋째로는 THOMAS 이론으로부터 대상배관의 누출빈도를 정량화 하였다. 그 결과 도시가스 대상배관의 노출위험도는 대략 중간이상의 값을 갖는 것으로 나타났으며, 제안된 SPC기법을 적용하여 위험성을 평가한 결과, 대상배관의 부식위험성 점수 값이 허용범위(30-70)에 골고루 분포하는 것으로 보아 설정된 평가기준이 실제배관에 대해 상대적인 부식위험성을 잘 서열화 됨을 알 수 있었다. 또한 THOMAS모델을 적용한 평가결과로서의 Score값은 배관의 길이를 포함한 여러 치수들에 무관한 환경요인에 관련된 값인 반면, 기본누출빈도는 배관의 길이를 포함해서 다른 치수들에 비례함을 보여주고 있다. 그 결과 점수 값이 상대적으로 적은 배관구간(상대적으로 위험성이 낮은 구간)도 배관길이가 훨씬 더 크다면 누출발생빈도가 더 높은 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한 대상 파이프라인의 허용위험수용범위는 전체 누출 빈도 값인 최대 $1.00E-01/yr$ 로 부터 최소 $2.50E-02$ 의 영역을 나타내고 있어 이에 상응되는 높은 Consequence를 수용 가능한 영역으로 낮추는 조치가 필요함을 보여주고 있고, 종합파손확률에 대해 사용시간을 회귀 분석법(Regression Analysis)으로 예측한 결과, 이에 대한 방정식을 유추할 수 있었고, 그에 대한 결과가 대상 파이프라인의 사용 년 수인 11년에서 13년으로 나타나 실제 대상배관들의 연령과 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 위험성 서열화 접근방법은 실제적으로 지하배관의 유지관리를 하는데 있어서 매우 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

ABSTRACT

In this article, we are to suggest the hazard-assessing method for the underground pipelines, and find out the pipeline-maintenance schemes of high efficiency in cost. Three kinds of methods are applied in order to refer to the approaching methods of listing the hazards for the underground pipelines: the first is RBI(Risk Based Inspection), which firstly assess the effect of the neighboring population, the dimension, thickness of pipe, and working time. It enables us to estimate quantitatively the risk exposure. The second is the scoring system which is based on the environmental factors of the buried pipelines. Last we quantify the frequency of the releases using the present THOMAS' theory. In this work, as a result of assessing the hazard of it using SPC scheme, the hazard score related to how the gas pipelines erodes indicate the numbers from 30 to 70, which means that the assessing criteria define well the relative hazards of actual pipelines. Therefore, even if one pipeline region is relatively low score, it can have the high frequency of leakage due to its longer length. The acceptable limit of the

[†] E-mail: 119kjs@hanmail.net

release frequency of pipeline shows 2.50E-2 to 1.00E-1/yr, from which we must take the appropriate actions to have the consequence to be less than the acceptable region. The prediction of total frequency using regression analysis shows the limit operating time of pipeline is the range of 11 to 13 years, which is well consistent with that of the actual pipeline. Concludingly, the hazard-listing scheme suggested in this research will be very effectively applied to maintaining the underground pipelines.

Keywords : Gas safety management, Risk based inspection, Scoring system, THOMAS model, Basic release frequency

1. 서 론

1.1 연구목적 및 배경

산업재해의 예방과 작업환경을 개선하고자 하는 노력에도 불구하고 전 세계의 산업체에서는 매년 약 5천 만건의 사고가 발생하고 하루에도 약 16만 건의 사고가 발생하고 있다. 더욱이 국제노동기구(ILO)의 보고에 의하면 근래에 들어서는 사고의 빈도는 점차 줄어들고 있으나 치명적인 중대사고는 매년 2배씩 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다. 우리나라에서도 아직까지도 위험물을 취급하고 있는 사고 취약부분이 도사리고 있다. 그 대표적인 예가 지하에 설치되어있는 위험물 수송배관, 전선 등 위험설비들인 것이다. 이런 설비는 주로 사업장 밖에 설치되어 있기 때문에 안전관리의 사각지대라 볼 수 있고 각종 안전감독도 실시하기 어려운 실정이다. 더욱이 지하에 설치되어 있어서 눈으로 확인하기 어렵기 때문에 체계적인 안전관리를 할 수 없어 방치되어 있는 경우가 많다. 미국의 경우^(2,9)를 보면 과거 10년 동안에 위험물 취급배관에서만 무려 3750건의 사고가 발생하여 최소한 2,030명이 사망하고 3,100명이 상해를 입은 것으로 보고 되고 있다. 더욱이 이와 같은 사고의 원인이 제3자에 의한 사고(타공사)와 노후배관(부식)이라는데 문제의 심각성이 제기 되고 있다. 또한 영국의 사고통계^(2,9)에서도 지하매설물에 대한 대소형의 사고가 연간 75,000여건인데 그 주요원인이 제3자가 지하매설물을 신중히 다루지 않기 때문이며 이로 인한 피해액도 년 간 천억 원이 넘고 있는 것으로 보고된 바 있다. 우리나라의 경우 아직까지 정확한 사고통계는 없으나 지하매설물에 대한 취급부주의로 인하여 매년 사고가 빈발하고 있으므로 보고되지 않은 사고수를 포함하면 그 숫자가 상당하리라 예상된다. 따라서 우리나라에서도 지하에 매설된 위험시설물들의 실태와 관리현황을 조사 분석하고 문제점을 도출하여 대책을 강구할 시점에 와 있다고 판단된다. 본 연구에서는 특히 지하에 매설돼 있는 지하 매설물 중 도시가스배관에 대해서 제 3공사 또는 배관의 부식에 의해 지하매설물을 손상시킴으로서 발생할 수 있는 화재 및 폭발 등의 대형사고를 예방하는데 그 목

적이 있다.

1.2 연구의 방법

본 연구에 적용된 평가기법으로는 Fig. 1과 같고 국내 가스 사고사례의 배관누출사고분석결과를 근거로 하여 지하배관의 서열화 분석을 수행 하였다. 본 연구는 RBI(Risk Based Inspection),³⁾ Scoring system⁴⁾과 THOMAS model⁴⁾를 근간으로 한 누출빈도 계산 시스템이라는 3개의 요소로 구성되어 있다. 첫째는 정성적인 방법인 노출위험도(RBI)로서 각 배관의 조건에 따라 여러 구간으로 나누어 분류한다. 즉 배관의 위험도에 영향을 주는 지반조건, 주변인구조건, 관의 크기 및 두께, 사용시간, 시공자의 기술 신뢰성 등을 고려하여 위험도를 평가하여 진단 우선순위 및 필요검사기법, 진단주기 등을 결정하는 것인데 위험도에 근거한 안전진단기법인 RBI(Risk Based Inspection)기법이다. 둘째로는 THOMAS모델로서 배관 또는 압력용기의 파손이 내적요인과 어떠한 관계가 있는가를 밝히는 경험적인 모델로 원자력 업계에서 사용되던 기법으로 최근에는

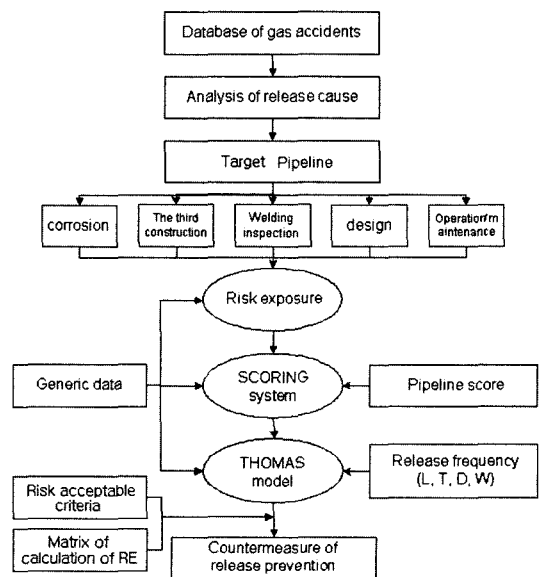


Fig. 1. Composition of scoring pipeline checklist.

화학공정기기에 대해서도 적용되고 있다. 이 모델은 용기 또는 배관의 모양, 크기, 재질, 두께(배관의 경우 용접부위의 숫자, 용접의 형식)등을 고려하고, 보수, 검사 효과도 모델의 일부로 포함된다. 셋째는 Scoring 시스템으로서 분석대상이 되는 배관의 특성을 반영하여 수정, 개발해야 하는 부분으로서, 이를 위해서는 배관이 처한 환경특성, 즉 외부요인을 결정해야 하는데, 이 외부요인은 적용하고자 하는 배관시스템의 특성에 따라 약간씩 달라질 수 있으나 부식, 제3자에 의한 손상(타공사), 용접/시험, 설계요인, 운전/보수와 같이 5가지로 분류하는 것이 일반적이다.

이들 각각의 외부요인들은 여러 개의 세부항목으로 구성된다. 5가지 외부요인과 세부항목들의 종류와 가중치는 누출사고 원인분석결과와 배관유지관리담당자의 경험을 바탕으로 결정된다. 이때 5가지 외부요인 가중치의 합은 100이 되도록 한다.

2. 본 론

2.1 지하매설물의 개요

지하매설물은 가스관(LNG, LPG), 송유관, 전기 배전관, 통신관, 상수도관, 하수도관, 지역난방관 등 종류가 아주 많다. 이들 매설물은 크기가 6 mm에서 2,800 mm 까지 아주 다양하고 사용하는 용도에 따라 관리부서(기관)도 다르다. 규모가 큰 지하배관현황은 관리기관에서 비교적 잘 파악하고 있으나 규모가 작은 매설물인 경우에는 이를 관리하는 기관에서도 정확한 현황을 파악하고 있지 못한 경우가 많다. 위와 같은 이유로 지하매설물 현황은 가스관, 송유관, 전기 배전관, 통신관, 상수도관, 하수도관, 지역난방관 등 규모가 크고 중점적으로 관리되고 있는 매설물을 중심으로 조사하였는 바, 도시가스에 관계된 현황은 Table 1과 같다.

Table 1. Layout of underground-laying pipe lines²⁾

Classification	Management Service	Length	Pipe type & Specification	Using pressure
Gas pipeline (LPG/LNG)	Korea Gas Corporation	1,045 km	steel pipe Ø(610-760 mm)	8.5-70 kg/cm ²
	City-Gas Companies (27EA)	13,000 km	steel pipe Ø(50-500 mm)	

Table 2. Cause analysis for domestic release accidents in pipeline¹⁾

Release detail causes	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	Total
Corrosion	20	24	26	235	161	147	51	58	48	32	802
The third accident	5	8	8	13	57	30	30	28	4	6	189

2.2 지하매설물 중 도시가스 사고의 발생 실태 및 문제점

대도시 땅 밑에는 도시가스관과 통신케이블, 전기, 전화, 상하수도 등 각종 지하매설물들이 혈관처럼 뻗어나고 있다. 하지만 이들 시설물이 각기 다른 기관의 자체계획에 의해 매설되고, 정확한 위치와 규격 등이 기록된 정확한 지하지도가 없어 각종 공사 때 매설물에 대한 대책은 사실상 전무하다. 또 오래전에 매설돼 파손위험이 큰 시설물일수록 매설위치가 도면과 다른 것이 많다. 특히 엄청난 폭발위험을 안고 있는 도시가스관은 도심의 경우 1.2 m 이상 묻고 반드시 모래로 다시 매우도록 규정하고 있으나 이를 어기는 경우가 많아 소규모 도로굴착공사에서도 쉽게 노출돼 가스 누출사고의 위험성이 큰 실정이다. 이는 도시가스 수요가 연간 44%씩 폭증하는 현 단계에서 큰 문제점으로 지적되고 있다. 가스사고의 원인은 사용자취급부주의, 취급자취급부주의(매설배관의 제 3자에 의한 사고포함), 불량제품사용, 시설미비 등 다양하다고 볼 수 있다.

도시가스의 타공사(제3공사) 배관손상 사고에서는 빠른 기간에 많은 실적을 올리기 위한 기계(포크레인, 굴착기 등)적 작업으로 인한 배관 파손사고가 가장 많고 배관수리작업에 따른 사고의 대부분은 안전수칙을 무시한 작업관행이 많은 것으로 나타나고 있다. Table 2 은 최근 10년간 배관의 세부적인 누출사고원인을 분석한 것으로, 누설된 1,052건 중 부식 및 제 3공사에 의한 발생건수는 각각 802건과 189건으로 나타나 가장 큰 위험요인임을 알 수 있다.

2.3 지하매설물 중 도시가스 배관계의 위험도

도시가스배관의 경우 주요 손상원인은 대개 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) 주위환경에 의한 파손 : 연약지반의 이동, 토양의 성분, 물의 성분 등이 원인
- 2) 사용 시간 및 부하조건에 의한 파손 : 부식, 피로, 응력부식균열 발생 등의 경우
- 3) 제3자에 의한 파손 : 부적절한 타공사에 의한 파손
- 4) 시공초기에 존재했던 결함에 의한 파손 : 용접결함, 재료결함 등이 존재

국내 및 국외의 경우 공통적으로 위의 원인 중 제 3자에 의한 손상 및 파손이 가장 빈발하게 발생하고 있으며, 그 다음으로 부식에 의한 파손이 문제시 되고 있다. 미국 및 유럽의 국외 통계에^(2,9) 의하면 인명손실을 수반하는 연간 가스배관 파손 확률은 약 1.6E-4/yr/km 정도로 추산되고 있다.

3. 도시가스배관의 위험도 평가 방법론

3.1 도시가스배관의 노출위험도

각 배관의 조건에 따라 여러 구간으로 나누어 분류한다. 즉 배관의 위험도에 영향을 주는 지반조건, 주변 인구조건, 관의 크기 및 두께, 사용시간, 시공자의 기술 신뢰성을 고려하여 유사조건의 배관부로 나누어 취급한다. 이와 같이 분류된 각 구간의 위험도를 평가하는 것이 위험도에 근거한 안전진단기법인 RBI(Risk Based Inspection)기법이다. 위험도는 파손확률(failure probability) 및 파손에 따른 손실(cost consequence due failure)로 구성되는데 위험도는 다음 식으로 나타낼 수 있으며, 이를 노출 위험도라 한다(RE : Risk Exposure)라 정의한다.

$$[\text{노출위험도(RE)}]=\text{파손확률(P)}\times\text{파손손실(C)}$$

3.2 노출위험산정에 관한 Matrix

Table 3은 가스배관의 파손확률 및 파손손실을 이용한 노출위험도 산정을 위한 Matrix로서, 용기의 사용시간이 길수록 파손확률이 높아지며, 급속가공품보다는 단조제품이 파손확률이 높고, 제작시 내압시험을 하지 않은 것이 내압시험을 실시한 용기보다 파손확률이 높다. 또한 사용가스의 압력이 낮으면 파손확률이 낮아진다. 파손에 따른 손실을 고려해 보면 가스의 저장에너지가 클수록, 배관의 크기가 클수록, 인구밀집지역일수록 파손에 따른 재산 및 인명손실이 크게 된다.

Table 3은 파손확률 및 파손손실의 크고 작음에 대해 점수화 하여 Matrix를 작성한 것이다. 이 Table 3에 근거하여 진단대상이 되는 각각의 대상배관에 대해 노출위험도 등급을 일차적(정성적)으로 평가해 보았다. Table 3에 나타난 점수에 따라 대상배관에 적용하기 위해 각 등급별 평가기준을 마련한 것이 Table 4이다. 여기서 각 진단 대상배관의 점수의 합이 100점 이상이면 높은 위험도를 갖는 것으로서 우선적으로 진단해야 할 대상으로 분류하였으며, 점수가 50점 이하이면 무시해도 좋은 위험도를 가지고 있는 것으로 분류하여 2단계 이상의 진단을 생략할 수도 있는 것으로 분류기준을 설정하였다.

3.3 Scoring Pipeline Checklist를 이용한 Weighting factor

앞서 언급한 것과 같이 가스관, 송유관 같은 위험물

Table 3. Matrix for calculation of risk exposure

Score	Damage Probability				Damage Loss					
	Time (yr)	Vessel Type	Water Test	Service pressure (kg/cm ²)	Storge Energy	Pipe Length (M)	Pipe Diameter (mm)	Pipe Thickness (mm)	Weld Number	Population Density
3	T>20 or unknown	B,G all cast	non-record	design pressure	300<E<600 or unknown	L>1500	400<D	2.5>t	250<W	City
2	10<T<20	B.: cutting G: cast	non-record	design pressure	150<E<300	1000<L<1000	200<D<400	2.5<t<5.0	100<W<150	outer city
1	5<T<10	B: cast G: cutting	record	design pressure	100<E<150	500<L<1000	100<D<200	5.0<t<7.5	50<W<100	Rural
0	5>T	B,G:all cutting	record	design pressure <	100<E	500>L	100>D	7.5<t<10	50>W	-

Table 4. Estimation criteria of gas pipeline

Score	Risk Exposure	Ranking	Description
100<S	Very-High	A	Instant countermeasure necessary
75<S<100	High	B	Management necessary
50<S<75	Midium	C	Management good
25<S<50	Low	D	Observation
25>S	Negligible	E	Neglect

질 수송배관은 대부분이 장거리에 걸쳐 다양한 환경조건과 접하게 되므로 확실적인 규제로는 효율적인 안전성확보가 힘들다. 최근 들어 이러한 현실을 반영하여 각 국의 규제기관들은 배관을 운영하는 회사가 각 사의 배관 특성을 가장 잘 반영한 위험관리체계를 갖추도록 유도하여 기존의 규제요건을 대체하는 경향을 보이고 있다. 즉 세부적인 시안별로 규제하기 보다는 최종적인 성과만을 규제하고 구체적인 수행방법은 배관 운영주체가 스스로 비용-효과 면에서 가장 효율성이 큰 방법을 선택하도록 허용하고 있다. 예를 들면 우리나라에서는 통상 산업부의 고압가스 안전관리법에 의한 Gas Safety Management(GSMS)을, 미국은 운수성(Department of Transportation)에서 적용하고 있는 Pipeline Risk Management Program을 들 수 있다. 이러한 위험관리체계를 적용할 때 가장 핵심이 되는 요소는 배관에 대한 적절한 위험성 평가방법을 적용하고, 그 결과에 근거하여 가장 효과적인 대책을 마련 시행하고 그 결과를 평가하여 다시 반영할 수 있도록 하는 폐회로를 구성하는 것이다. 그러나 현재의 적절한 안전성 평가 방법의 미비로 대부분의 위험성평가에서 모든 배관은 단위 길이 당 위험도가 동일하다고 가정하여 왔다. 따라서 기존의 Hazard and Operability, Failure Mode Effects Analysis, Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis 등과 같은 안전성평가 방법들은 화학 설비 물들의 공정조건에서 시설된 배관에 대해 적용하는 것은 적절치 않다. 왜냐하면 배관들은 두께, 직경 등과 같은 구조적인 차이가 있을 수 있고 운전조건, 부식 환경, 나이, 제 3공사(타 공사)에 의한 손상가능성과 같이 주변 환경이 다를 수 있기 때문에 당연히 위험성도 다르다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 전체배관을 특성에 따라 여러 구간으로 나누고 구간별로 위험성을 서열화할 수 있는 새로운 방법을 사용하였으며, 이를 "Scoring Pipeline Checklist"(SPC)라고 명명하였다. 그리고 도입한 평가방법의 적절성을 평가하기 위하여 도시가스사 배관 중에서 20개의 모델배관을 선정

Table 5. Weighting factors based on gas accidents

Release accident factor	Applicate weighting value	Analysis results for gas release history record
Corrosion	50 ± 20	50 (Max: 72%, Min: 15%)
The third construction	25 ± 15	30 (Max: 60%, Min: 12%)
welding/inspection	15 ± 10	20 (Max: 25%, Min: 15%)
Design	4 ± 3	0
Operation/Maintenance	6 ± 4	0

하여 직접 적용하였다. Table 5은 1991년부터 2000년까지 가스사고사례를 누출사고를 일으킬 수 있는 요인인 5개의 항목(부식, 타공사, 용접, 설계, 유지보수)으로 분류한 각 항목별 가중치 결과이다. Table 5에서 부식요인을 예로 들어 살펴보면 누출사고 중에 부식에 의한 것이 전체의 50%정도를 차지함을 의미한다. 편차 값은 배관구간의 특성에 따라(예 코팅 층의 조건, 배관의 나이) 점수 값이 30에서 70까지 변할 수 있음을 보여주고 있다.

이 평가시스템에서는 점수의 값이 적을수록 배관의 상태가 양호함을 나타낸다. 그리고 5가지 외부요인의 점수 합이 100보다 크면, 전반적인 조건이 평균보다 열악한 상태를 100보다 작으면 평균보다 양호한 상태임을 의미한다.

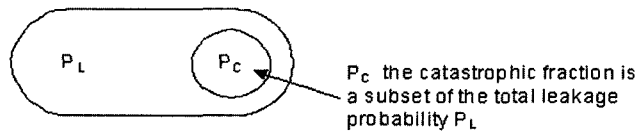
3.4 THOMAS model⁴⁾

Table 6과 Fig. 2에서와 같이 THOMAS는 내부적인 Mechanisms으로부터의 결과인 파이프 및 용기의 고장과 관련하여 경험적인 모델을 제한한 것으로 그가 만든 고장확률의 접근평가방법은 실제적인 기기고장통계의 분석에 기초하였다. 그 접근방법은 누설에 관한 고장빈도(P_L)와 그때 파열빈도(P_C)의 예측 치에 근거하였다. 누설에 관한 고장빈도 P_L 은 고장확률을 측정하기 위한 직접적인 도구로서 크기(size), 형태(shape), 용접수(weldments) 등의 기하학적 속성들과 관련하여 관찰된 것을 사용하여 누설고장에 관한 전반적인 통계와 함께 평가되었다. 이 평가는 설비의 나이 등과 같은 다른 요소들에 의해서도 규격화될 수 있다.

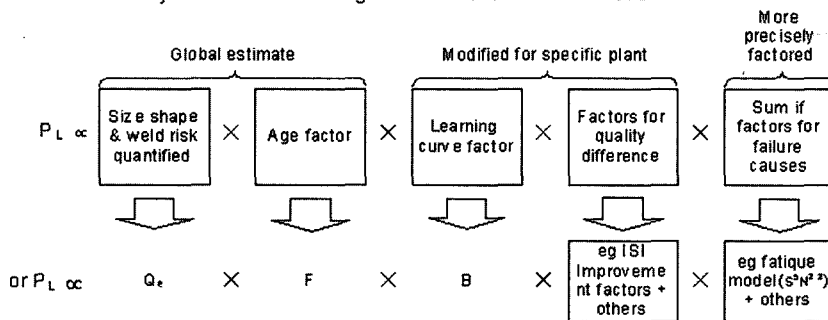
THOMAS model equation을 살펴보면 파열고장확률은 식 (1)과 같이 주어지며, 여기서 P_L 은 누설고장확률로서 식 (2)와 같이 주어진다. 여기서 P_C/P_L 은 잠정적인 파열확률이다. 형태와 속성요소인 Q_L 은 식 (3)과 같

Table 6. Equations & descriptions of THOMAS model⁴⁾

Equation	Descriptions
$P_C = (P_C / P_L) * P_L \dots\dots\dots(1)$	P_L = Leakage failure probability
$P_L = C * Q_L * F * B \dots\dots\dots(2)$	Q_L = a shape and quality factor F = the vessel age factor B = the learning factor C = an empirical scaling factor
$Q_L = (Q_P + A * Q_W) \dots\dots\dots(3)$	Q_P = the parent geometry factor A = the weld penalty factor Q_W = the weld penalty factor E = the quality factor
$Q_P = D * L/T^2 \dots\dots\dots(4)$	D = the diameter of the vessel L = the length material factor T = the thickness of the vessel
$Q_W = 1.75 * NC * D/T \dots\dots\dots(5)$	NC = the number of circular welds NL = the number longitudinal
$P_C = (P_C / P_L) * C * (Q_P + A * Q_W) * E * F * B \dots\dots\dots(6)$	



P_L may be estimated from global vessel statistics as follows :



P_C/P_L may be estimated from fracture mechanics and statistical data for roughness and crack proportional and rupture statistics

$$\text{Then, } P_C = P_L \times \frac{P_C}{P_L}$$

Fig. 2. The overall approximation strategy.

이 정의된다. 여기서 Q_P 는 근본적인 물질의 기하학적 요소로 식 (4)와 같이 나타낸다. 또한 Q_W 는 용접물질 요소로서 식 (5)로 나타내며 마지막으로 누설시 파열 빈도인 P_C 는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

Table 7은 THOMAS Model Equation에 사용되는 각각의 변수들을 요약한 것이다.

3.5 배관구간을 구분하는 기준

배관의 위험성을 평가하기 위해서는 전체배관을 여러 구간으로 나누는 방법이 중요한 사항이 된다.³⁾ 배관의 구간을 짧게 나누면 평가가 정확하지만, 자료의 수집과 분석에 많은 시간과 자원이 필요하다. 반면 배관구간을 길게 하면 적은 비용으로 쉽게 처리할 수 있

Table 7. Parameter values for Thomas model⁴⁾

Subjective distribution for P_C/P_L		Distribution for scaling factor C		Distribution for the weld penalty factor A		Distribution for quality factor E	
Value	Probability	Value	Probability	Value	Probability	Value	Probability
0.01	0.15	$1.0 * 10E-9$	0.2	45	0.35	0.01	0.25
0.02	0.25	$3.0 * 10E-9$	0.25	50	0.5	0.1	0.50
0.04	0.25	$1 * 10E-8$	0.25	65	0.1	1.0	0.25
0.06	0.2	$3.0 * 10E-8$	0.2	90	0.05		--
0.1	0.1	$1.0 * 10E-7$	0.1	-	-	-	-
0.2	0.05	-	-	-	-	-	-

지만 특성이 다른 부분이 섞여있는 경우 최악의 조건에 있는 것을 기준으로 판정해야 하므로 결과의 의미가 모호하고 정확도가 감소한다. 따라서 가장 좋은 방법은 어떤 형태로든 중요한 변화가 생기는 곳에서 나뉘어서 의미있는 구간으로 구분하는 것이다. 일반적으로 배관위험성에 영향을 미치는 조건으로는 인구밀도, 토양의 조건(진흙, 모래, 매립지) 전철과 같은 교란요인, 코팅의 종류, 상태, 배관의 치수(직경), 배관의 나이, 그리고 운전압력 등을 들 수 있다. 평가 담당자는 위에 열거한 것과 같은 요인들을 각 회사의 상황에 맞게 찾아내어 나열한 뒤 허용하는 한도 내에서 작은 구간으로 나누어야 한다.

3.6 배관 누출가능성 평가기법의 구성

앞서 기술한 것처럼 먼저 Scoring System은 배관이 처한 환경요인과 이력요소가 배관의 누출가능성에 미치는 영향력을 숫자로 환산해 준다. 물론 이 scoring system은 분석대상이 되는 배관의 특성을 반영하여 개발해야 한다. 평가하고자 하는 배관의 특성 즉 가스배관, 송유관, 상수도 혹은 증기 배관 등에 따라 Scoring System은 달라져야 한다. 이를 위해서는 배관이 처한 환경특성, 즉 외부적인 요인들을 결정해야 한다. 이 외부요인은 적용하고자 하는 배관시스템의 특성에 따라 약간씩 달라질 수 있지만 앞서 설명한 바와 같이 부식, 제 3자에 의한 손상, 용접/시험, 설계요인, 운전/보수와 같이 5가지로 분류하는 것이고, 이들 각각의 외부요인들은 다시 여러 개의 세부항목으로 구성된다. 5가지 외부요인과 세부항목들의 종류와 가중치는 누출사고의 원인분석결과와 배관 유지관리를 담당하는 Engineering Judgement의 경험을 바탕으로 결정해야 한다. 이때 5가지 외부요인의 가중치의 합은 100이 되도록 한다. Score값은 배관의 geometry에 무관하며 값이 적을수록 배관의 누출위험성이 적음을 의미한다. 그리고 5가지

외부요인의 score합이 100보다 크면 전반적인 조건이 평균보다 열악한 상태를, 100보다 작으면 평균보다 양호한 상태를 의미한다. 두 번째로 THOMAS model은 용기 또는 배관의 모양, 직경, 재질, 두께(배관의 경우에는 용접부위의 숫자, 용접의 형식 검사, 보수 등을 고려하는데 이 THOMAS model에 평가대상 배관의 치수자료인 직경, 두께, 길이 등을 사용하면 기준누출빈도(Baseline leak frequency)를 얻을 수 있다. 최종적으로 대상배관구간의 예상 누출빈도를 구하기 위해서는 Thomas model에서 구한 기준누출빈도에 score 값/100을 곱해야 한다.

4. 가스배관에 대한 위험도 분석 결과

4.1 도시가스배관에 대한 정성적 누출위험도 평가 결과

파손확률 및 파손손실의 크고 작음을 나타낸 Table 3 Matrix와 누출평가기준인 Table 4을 사용하여 본 연구의 대상 도시가스배관에 대입하여 개략적인 점수화 결과가 다음의 Table 8이다. 분석결과는 대상 배관에 있어서 즉시 조치가 필요한 매우 높은 누출 위험도를 가지는 것은 2번의 1개이며, 관리가 필요한 높은 누출 위험도를 가지는 것은 1, 5, 13번의 3개이며, 관리가 양호한 중간정도의 누출위험도를 가지는 것은 7, 9, 12번의 3개, 관찰이 필요한 낮은 누출위험도를 가지는 것은 15, 17번의 2개로 나타나 대체적으로 45% 정도의 대상배관들이 중간이상의 누출위험도를 가지는 것으로 나타났다.

4.2 부식 대상배관에 대한 적용결과

Scoring System을 설정할 때 5개 환경요인 가중치 평균과 편차는 국내외의 자료^(1,2,9)와 서울의 임의 모델사의 3년간 배관누출사고 분석결과를 근거로 하여 배

Table 8. Estimation results of quantitative risk exposure for city-gas pipeline

NO	Damage Probability				Damage Loss						Total Score	Ranking
	Time (yr)	Vessel Type	Water Test	Service Pressure (kg/cm ²)	Storge Energy (L)	Pipe Length (M)	Pipe Diameter (mm)	Pipe Thickness (mm)	Weld Number	Population Density		
1	12	B.: cutting G: cast	non-record	design pressure	600	500	200	5.8	55	city	99	B
	2	2	3	2	3	1	2	1	1	3		
2	15	B, G all cast	non-record	design pressure	300	1020	200	5.8	114	city	110	A
	2	3	3	2	2	2	1	1	2	3		
5	13	B, G all cast	non-record	design pressure	150	900	300	7	100	city	90	B
	2	3	3	2	1	1	2	0	2	3		
7	10	B: cast G: cutting	record	design pressure	600	1350	400	7.9	150	city	66	C
	1	1	2	2	3	2	2	0	2	3		
9	12	B: cast G: cutting	record	design pressure	300	1300	400	7.9	145	city	66	C
	2	2	1	1	2	2	2	0	2	3		
12	11	B.: cutting G: cast	record	design pressure	300	850	300	7	95	city	72	C
	2	3	1	2	2	1	1	1	1	3		
13	10	B: cast G: cutting	non-record	design pressure	150	2100	600	7.9	234	city	91	B
	1	2	2	2	1	3	3	0	3	3		
15	11	B, G all cutting	record	design pressure	un known	500	150	9.7	56	city	36	D
	2	0	1	1	3	1	1	0	1	3		
17	8	B: cast G:cutting	record	design pressure	600	1250	400	7.9	140	city	48	D
	1	1	1	1	3	2	2	0	2	3		

관담당 엔지니어와의 토의를 통해 결정하였다. 본 논문에서 적용한 누출위험성평가프로그램의 타당성을 확인할 수 있도록 하기 위해 가스 사고 사례 중 노후배관, 부식이 발생하여 누설경험이 있는 배관, 배관관리 담당자가 양호하다고 생각 하는 배관, 좋지 않은 상태라고 생각하는 배관, 그리고 현재 배관주변에서 공사가 진행 중인 배관이나(보수), 도심이 지역에 위치한 배관, 무작위로 추출한 배관 등 다양한 종류의 배관을 포함하였다.

4.2.1 SCORE 평가결과

대상배관에 대해 SPC기법을 적용하여 위험성을 평

가한 결과 중요요인인 부식과 5개 요인의 합은 Figs. 3, 4과 같다.

먼저 Fig. 3에서 대상배관의 부식위험성 점수 값이 허용범위(30-70)에 골고루 분포하는 것으로 보아 설정한 평가기준이 실제배관의 상대적인 부식위험성을 잘 서열화 해서 나타낼 수 있도록 설계되었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4에서 5개 요인을 합한 종합적인 위험성의 서열이 Fig. 3의 부식과 비슷한 Trend를 보이는 것은 배관의 위험성이 부식에 의한 것임을 알 수 있다.

4.2.2 THOMAS모델을 적용한 SPC법에 의한 평가결과 Score값은 배관의 길이를 포함한 여러 치수들에 무

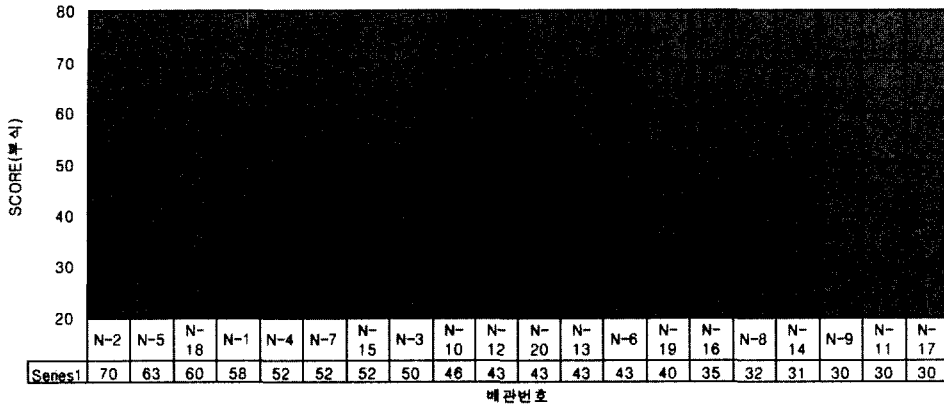


Fig. 3. Results for risk assessment to target corrosion pipeline.

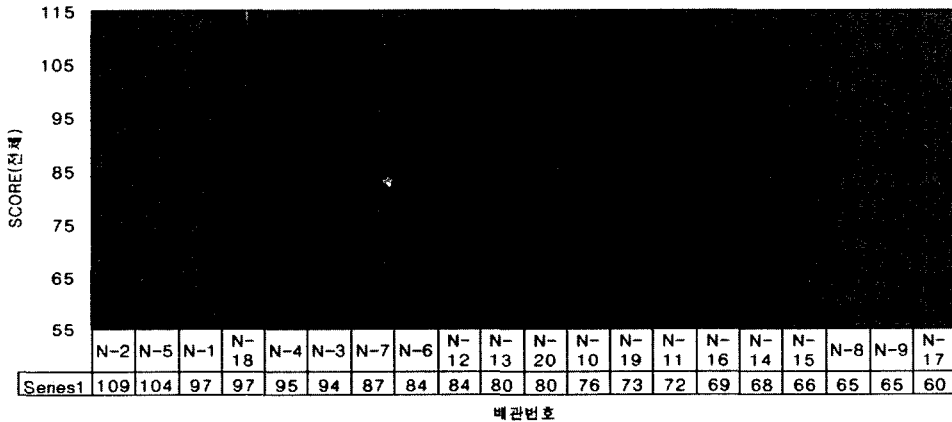


Fig. 4. Results for risk assessment to target total pipeline.

관한 환경요인에 관련된 값인 반면 기본누출빈도는 배관의 길이를 포함한 다른 치수들에 비례한다. 따라서 점수 값이 상대적으로 낮은 배관구간(상대적으로 위험성이 낮은 구간)도 배관길이가 훨씬 더 크다면 누출발생빈도가 더 높은 값을 가질 수 있다. Table 9는 앞서 설명한 SPC기법과 Thomas model을 사용하여 주어진 배관구간에서 정량적인 누출 빈도 값을 계산한 결과이다. 여기서 기본누출빈도를 계산할 때 필요한 자료는 Generic data인 5.5E-5/yr/km^(7,10)를 사용하였다. 배관구간의 위험도를 서열화 하기 위해서는 앞에서 구한 누출빈도 뿐만 아니라 누출발생시 피해의 심각도에 대한 분석이 필요하다. 도시가스의 경우 중요 피해는 화재 및 폭발에 의한 재산 및 인명피해이다. 그러나 본 연구에서 대상으로 한 서울시내의 도시가스배관은 모두 인구밀집지역에 위치하고 있기 때문에 구간별 피해의 심각도 차이가 크지 않다고 판단하였다. 단지 가스의 압력 차이에 의해 피해의 규모가 다를 수 있지만, 본

연구에서는 단순화를 위해 그 차이 또한 고려하지 않았다. 여기서 총 점수 값이 100보다 크면 기본누출빈도보다 실제(환경요인을 고려한) 누출빈도가 더 크다는 것을 의미하며, 100보다 작으면 실제 누출빈도가 기본누출빈도보다 작다는 것을 의미한다.

정량적 분석결과인 Table 9을 분석해 보면 기본누출빈도보다 실제 누출빈도가 높은 95점 이상의 누출빈도는 1,2,3번의 3개이며, 기본누출빈도보다 실제 누출빈도가 낮은 80점대의 누출빈도를 갖는 것은 7번의 1개, 60점대는 9, 12, 17번의 3개로 나타나 실제 누출빈도가 기본 누출빈도보다 높은 경우는 약 44%로서 Table 8의 일차적인 분석결과와 거의 비슷한 추세를 보이고 있음을 알 수 있다.

4.3 도시가스배관의 허용위험도

일반적인 사고의 발생확률과 사고결과를 고려한 위험도 수준과 Table 9의 누출빈도결과를 병행하여 시각

Table 9. Estimated results for release frequencies to gas pipelines

NO	Dimension			Corrosion		The third construction		weld + design + operation		Total		
	Diameter/Thickness (gm)	No. weld	Pipe length (m)	Release frequency No./yr	Score	Release frequency No./yr	Score	Release frequency No./yr	Score	Release frequency No./yr	Score	Release frequency No./yr
1	200/5.8	55	500	2.7×10^{-2}	60	1.6×10^{-2}	19	5.0×10^{-3}	20	5.3×10^{-3}	98	2.6×10^{-2}
2	200/5.8	114	1020	5.5×10^{-2}	70	3.9×10^{-2}	21	1.2×10^{-2}	17	9.4×10^{-3}	108	6.0×10^{-2}
5	300/7	100	900	4.6×10^{-2}	63	2.9×10^{-2}	19	8.8×10^{-3}	20	9.3×10^{-3}	102	4.7×10^{-2}
7	400/7.9	150	1350	7.0×10^{-2}	44	3.1×10^{-2}	21	1.5×10^{-2}	17	1.2×10^{-2}	82	5.7×10^{-2}
9	400/7.9	145	1300	6.7×10^{-2}	32	2.1×10^{-2}	20	1.3×10^{-2}	17	1.1×10^{-2}	69	4.6×10^{-2}
12	300/7	95	850	4.3×10^{-2}	30	1.3×10^{-2}	21	9.1×10^{-3}	18	7.6×10^{-3}	69	3.0×10^{-2}
13	500/7.9	234	2100	1.3×10^{-1}	47	5.7×10^{-2}	19	2.4×10^{-2}	18	2.2×10^{-2}	84	1.0×10^{-1}
15	150/9.7	56	500	3.1×10^{-2}	46	1.4×10^{-2}	20	6.1×10^{-3}	17	5.1×10^{-3}	83	2.5×10^{-2}
17	400/7.9	140	1250	6.4×10^{-2}	30	1.9×10^{-2}	14	9.0×10^{-3}	17	1.1×10^{-2}	61	3.9×10^{-2}

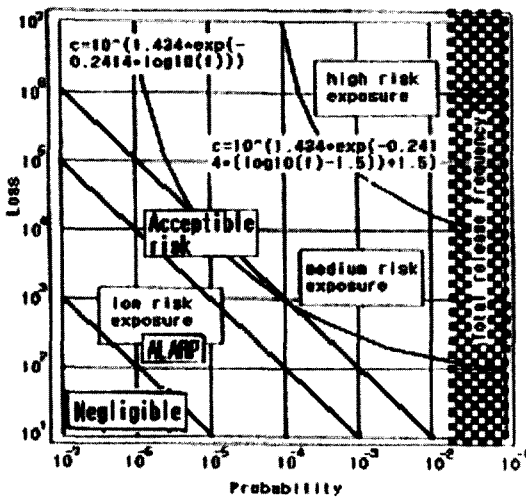


Fig. 5. Risk level & consequence by release frequency values.

적으로 표현한 것이 Fig. 5이다.

여기서 각각의 대상 도시가스배관들의 빈도를 살펴 보면 허용가능 위험도를 초과하는 매우 높은 빈도를 가지고 있음을 보여주고 있다. 따라서 이것을 수용 가능한 범위 내에 존재하도록 관리하기 위해서는 각각의 누출빈도에 상응되는 Consequence를 줄이는 조치가 필요하다. 만약 위험도가 수용가능 영역 이상이 되면 배관지역의 감시, 현장진단, 자재관리, 누설검사, 지질검사, 코팅검사, 수압시험 등의 조치를 배관계 시공 전후에 적절하게 실시하여 결함/손상의 각 원인별

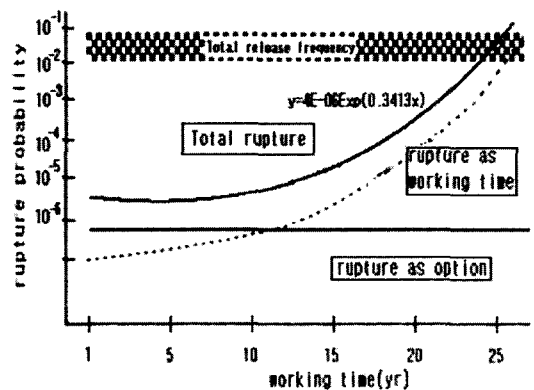


Fig. 6. Rupture probability of pipeline working times.

로 위험도 감소를 위한 조치를 취하여야 할 것이다. 각각 손상에 대한 조치시기 및 방법을 Table 10에 나타내었다.

또한 Fig. 5에서는 노출위험도(RE)에 따른 손실(Loss)을 허용가능 위험도와 함께 표현하였으며, 높고 낮은 노출위험도의 한계를 구분하고자 회귀분석법(Regression Analysis)을 적용한 결과 Low Exposure Risk는 $C = 10^{1.434 * \exp(-0.2414 * \log_{10}(f))}$ 및 High Exposure Risk는 $C = 10^{1.434 * \exp[-0.2414 * \log_{10}(f) - 1.5] + 1.5}$ 를 나타내는 방정식을 유추할 수 있었다. 이에 대해 각각의 대상(Target) 도시가스배관에 대해 누출빈도 값을 입력함으로써 얻어진 결과가 Table 11이다. 그 결과를 살펴보면 이 또한 High Frequency와 상응되게 High Consequence(Fatalities) 값을 가지는 것을 볼 수 있어

Table 10. Prevention method for defect & damage in city-gas pipeline

Defect/Damage	Risk Management Method						
	Local Observation	Site Diagnosis	Manufacture/ Production Management	Release Inspection	Geological Investigation	Coating Inspection	Water Testing
the third damage	premeasure	postmeasure	-	-	-	-	postmeasure
outside corrosion	-	postmeasure	-	-	-	premeasure	postmeasure
inside corrosion	-	postmeasure	premeasure	-	-	-	postmeasure
fatigue/crack	-	postmeasure	-	-	-	-	postmeasure
coating damage	-	-	-	-	-	premeasure	-
material/production defect	-	postmeasure	-	-	-	-	postmeasure
feeble ground	-	-	-	-	post-measure	-	-
gas release	postmeasure	premeasure	-	postmeasure	-	-	postmeasure
intention	premeasure	-	-	-	-	-	-

Table 11. Estimation of conseqency using exponential regression from Table 5(total frequency)

Low Risk Exposure									
Equation	$c=10^{(1.434 * \exp(-0.2414 * \log_{10}(\text{frequency})))}$								
Frequency	2.60E-02	6.00E-02	4.70E-02	5.70E-02	4.60E-02	3.00E-02	1.00E-01	3.90E-02	2.50E-02
Consequence (fatalities)	1.27E+02	8.44E+01	9.47E+01	8.64E+01	9.56E+01	1.18E+02	6.70E+01	1.04E+02	1.29E+02
High Risk Exposure									
Equation	$c=10^{(1.434 * \exp(-0.2414 * \log_{10}(\text{frequency}) - 1.5) + 1.5)}$								
Frequency	2.60E-02	6.00E-02	4.70E-02	5.70E-02	4.60E-02	3.00E-02	1.00E-01	2.50E-02	3.90E-02
Consequence (fatalities)	3.31E+04	1.85E+04	2.18E+04	1.91E+04	2.21E+04	2.99E+04	1.33E +04	3.41E+04	2.48E+04

본 연구의 대상 도시가스배관들은 신중한 관리가 필요함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 사용시간에 대한 배관의 파손확률을 나타내는 그래프로서 이 또한 회기분석법(Regression Analysis)을 이용하여 종합파손확률에 대해 사용시간을 예측할 수 있는 함수 값 즉 $y = 4E-06 \exp(0.3413x)$ 의 방정식을 유추할 수 있었고, 구해진 Total Rupture의 함수 값에 각각의 누출빈도 값을 입력하므로써 배관운용 시간(pipeline working time)을 구할 수 있었고 그것을 Table 12에 나타내었다. 살펴보면 대상배관들의 사용 년 수는 11년에서 13년으로 나타나 Table 8의 실제 대상배관들의 연령과 거의 일치함을 보여주고 있다.

4.4 배관위험성 서열화 결과의 응용

배관 위험성 서열화 분석결과 중 하나인 점수 값을

이용하여 효과적인 배관관리 전략을 수립할 수 있다. 만약 배관을 관리하는 업체가 모든 배관에 대해 부식 점수 값을 50점 이하로 관리하고자 한다면 Fig. 3에서 NO-2부터 NO-3까지 8개 배관 구간의 점수를 낮출 수 있는 조치를 취해야 한다. 예를 들어 NO-2배관구간의 점수 값을 원하는 값 이하로 낮추기 위해 가능한 조치 방법들은 Table 13과 같다. 가능한 모든 방법이 밝혀지면 각각의 방법의 효과를 평가해야 한다. 평가의 기준은 투입해야 하는 비용과 그에 따른 Score값(누출위험성)의 감소이다. 비용을 추정할 때에는 반드시 Life Cycle Cost를 고려해야 한다. 가능한 방법들 중에서 현재의 예산 상태나 법적적 제약요인(도로굴착허가)등을 고려하여 가장 적절한 방법을 적용할 수 있다.그리고 필요한 경우는 2가지 이상을 조합함으로써 훨씬 더 효과적인 결과를 얻을 수 있다.

Table 12. Assume of working time as rupture probability

Equation	$c = 4E-06\exp(0.3413x)$								
Frequency	2.60E-02	6.00E-02	4.70E-02	5.70E-02	4.60E-02	3.00E-02	1.00E-01	2.50E-02	3.90E-02
Working Time(yr)	11.2	12.2	11.9	12.2	11.9	11.4	12.9	11.1	11.7

Table 13. Examples for management countermeasures for corrosible pipelines

Item	Maxium limit value	Present condition	Countermeasure			
			Forced drain installation	Alternative pipeline	Coating inspection	Pipeline corrosion inspection
Environmental	3	3	3	3	3	3
Soil property	10	10	10	10	10	10
laying time	15	7	7	15	7	7
Other material pipeline	5	5	5	5	5	5
AC	5	5	5	5	5	5
DC	10	0	8	0	0	0
Coating condition	20	0	0	20	15	9
Coating inspection	4	0	0	0	4	0
Cathode corrosion	20	0	20	0	0	0
Pig	10	0	0	0	0	10
Patrol	4	4	4	4	4	4
Total score		70	44	46	53	53

5. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 첫째도시가스 대상배관의 THOMAS model을 활용한 수치적 정량화^(4,5,6,10) 및 우선순위화로(Table 8) 동종사고의 절감 및 관리차원의 효율화를 기할 수 있으며, 둘째 가스에 대한 국가적 관리차원의 효율화 및 가스 사고를 예방하고 대응계획을 세우는 정책적 측면에서 기본 자료로서 활용될 수 있다. 셋째 각 도시 가스사들이 정보를 공유할 수 있는 기술적 Tool의 완성에 대한 기초 자료로서 활용이 가능하고, 넷째 기술적 측면에서는 가스사고 중 배관누출사고를 분석한 결과를 토대로 배관의 위험성을 정량화함으로써 감으로 판단하던 배관의 위험성을 일정한 기준에 근거하여 숫자로 비교 평가할 수 있었고(Table 9, Figs. 3, 4), 이에 대해 적절한 배관의 위험에 대한 관리 및 대응방안(Table 10)을 설정할 수 있었다. 향후 가스의 누출에 따른 빈도 및 결과 영향을 가장 적절하게 평가할 수 있는 수치적 이론 및 software model들을 더욱 더 검토하여 누출에 대한 결과 모델링(Consequence Model)을 발전시킴으로서, 인간의 건강, 환경, 안전에

미치는 영향을 평가하기 위한 세분화된 정량적인 유해 위험성 평가기술을 마련해야 할 것이다. 또한 이러한 것들은 기업이나 기타 사회적으로 포괄되는 위험목표와 비교할 수 있고(Figs. 5, 6), 사고의 결과나 발생의 빈도를 감소시킬 수 있는 위험감소 수단으로서 활용 및 유해, 위험 시설물의 위치 같은 보다 근본적인 설계변수도 모두 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서 각 시설의 옵션에 대한 비용효과가 밝혀지고 위험 감소 수단을 고려하면 합리적인 기준이 보장될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 가스안전공사, "가스 사고 연감", 가스안전공사 사고 조사처(1991-2001).
2. 산업안전관리공단, "On call system연구 타당성 검토 보고서", 산업안전관리공단 위험 설비 센터(2001).
3. 윤기봉, "가스배관의 위험관리 및 진단", 한국가스안전공사(1999).
4. H. M. Thomas, "Pipe and Vessel Failure Probabilistic Reliability Engineering", Applied Science Publishers, Ltd., England(1981).

5. System Reliability Directorate, UKAEA, "Canvey-an Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/thurrock Area", London, HMSO (1978).
6. T. A. Smith and R. G. Warwick, "The Secondary Survey of Defects in Pressure Vessels", SRD R 30, (1974).
7. H. G. Arnold, "Pressure Vessel Reliability as a Function of Allowable Stress", ORNL ASME 73-WA/NE-15(1973).
8. W. S. Gibbon and B. D. Hackney, "Survey of Piping Failures for the Reactor Primary Coolant Pipe Rupture Study", GEAP-4574(1974).
9. P. Hopkins, "Risk Management and Operation of a Gas Transportation Network", International Conference on Pressure System : operation and Management (1995).
10. D. O. Harris, "Probabilistic Fracture Mechanics Probabilistic Structural Mec Handbook : Theory and Industrial Applications", C. Sundararajan(1995).