

## 국외 천연가스 배관 사고 빈도 비교 및 분석 모형에 관한 연구

†오신규

호서대학교 기계공학과

(2014년 5월 16일 접수, 2014년 6월 20일 수정, 2014년 6월 24일 채택)

### A Study on Failure Frequency Model for Risk Analysis of Natural Gas Pipeline with Comparison of Overseas Failure Data

†Shin-Kyu Oh

*Dept. of Mechanical Engineering, Hoseo University, Chungnam, Korea*

*(Received May 16, 2014; Revised June 20, 2014; Accepted June 24, 2014)*

#### 요 약

본 연구에서는 국내 매설 고압가스배관의 사고빈도 데이터 구축 시 활용할 수 있도록 국외에서 발표하고 있는 고압가스배관 사고빈도 데이터에 대해 고찰 하였다. 고압가스배관 사고빈도 데이터의 대표적인 것으로는 미국의 DOT, 유럽의 EGIG 및 영국의 UKOPA가 있다. 국외 사고빈도 데이터의 국내 적용 가능성을 확인하기 위하여 이들을 비교 분석한 결과 EGIG 데이터가 국내 실정에 더 적합하였다.

EGIG 8차 보고서의 사고빈도 데이터를 사용하여 비선형회귀분석을 수행한 결과 배관 설치 연도에 따른 지수형의 곡선을 얻었다. 향후 전체 사고빈도의 약 50%를 차지하고 있는 타공사 부분과 국내 데이터와 국외 데이터의 합성에 대한 집중적인 연구가 필요하다.

**Abstract** - In this study, the overseas failure frequency data of the high-pressure gas pipeline were investigated to apply QRA of high-pressure gas pipeline. The typical overseas failure frequency data of high-pressure gas pipeline are DOT of United States, EGIG of Europe, and UKOPA of United Kingdom (UK). Comparative analysis of these data was shown that EGIG data was suitable for the situation in Korea. In order to apply QRA of high-pressure gas pipeline, non-linear regression analysis using the failure frequency data in the report of EGIG 8th was performed. In the future, intensive researches are required for the external interference because about 50% of the failure frequency of all incidents is the external interference, and for combining of domestic and overseas data.

**Key words** : pipeline, natural gas, QRA, failure frequency, non-linear regression analysis

#### 1. 서 론

국내의 천연가스는 1986년부터 발전 및 도시가스 용으로 사용되기 시작하여 2013년에는 38,675천톤

을 소비 하였다. 우리나라는 2013년 말 현재 886만 kl의 LNG를 저장할 수 있는 3개의 인수기지, 약 4,065 km에 달하는 가스 수송 배관, 311개소의 공급 기지 및 블록밸브를 가지는 규모로 성장하였고 세계에서 두 번째 규모의 LNG 수입국이 되었다. 이런 고도 소비성장의 이면에는 다량의 LNG 저장량, 약 7 MPa로 운전되는 고압가스 배관 등 잠재적인 위험요

†Corresponding author:shinkyu@hoseo.edu

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

인이 존재하고 있다. 그러므로 이런 가스설비는 높은 안전설계 수준과 철저한 위험관리가 필요하다 [1]. 특히 전문 인력이 상주 관리하는 LNG 인수기지나 공급기지보다 상대적으로 관리가 미흡한 매설 고압가스 배관은 더 엄격하게 관리할 필요가 있다.

고압가스배관을 운용하고 있는 국가에서는 고압가스배관을 관리하기 위한 법과 표준 또는 코드가 있다[2~5]. 이런 법적 규제나 안전을 확인하는 절차가 있음에도 불구하고 위험의 수준을 정량적으로 평가하는 기법(Quantitative Risk Assessment : QRA)을 사용하여 고압가스배관의 안전성을 향상하는 방안을 적용하고 있고[6,7] 매설 고압가스배관용 QRA 소프트웨어도 개발되어 사용하고 있다[8]. 국내에서는 매설 고압가스 배관 주변의 인구밀도가 건설 당시와 달라지는 경우에는 QRA 결과에 따른 안전성 향상 조치를 강제하고 있다[9].

고압가스배관의 QRA에 사용되는 사고빈도는 타공사, 부식, 재료/시공, 지반이동 등에 기인한 배관 누출사고 빈도를 말한다. 하지만 국내에는 배관 운영길이와 운영기간이 짧아 고압가스배관의 사고원인들에 대해 유효한 사고빈도 데이터 추출이 불가능한 실정이다.

이에 본 연구에서는 국내 매설 배관의 사고빈도 데이터 구축 시 활용할 수 있도록 해외 고압배관의 사고빈도 데이터들에 대한 비교와 이들 사고빈도 데이터의 국내 적용 가능성을 확인하기 위하여 데이터의 비선형 회귀분석을 수행하였다.

## II. 국외 천연가스 매설배관의 사고빈도 분석

매설 고압가스배관에 대한 QRA를 수행하기 위해서는 사고빈도 데이터가 필요하다. 국내의 경우 사용 가능한 사고빈도데이터의 추출이 불가능하기 때문에 DOT, EGIG 및 UKOPA 등 국외 사고빈도 데이터를 사용하여야 한다. 미국의 DOT는 해상부터 가스설비까지 모든 구간의 사고 데이터이다. 그러나 EGIG와 UKOPA는 지상 구간의 배관사고 데이터이고 매설 고압가스 배관용 QRA 소프트웨어도 EGIG 데이터나 UKOPA 데이터를 사용하고 있기 때문에 EGIG와 UKOPA 데이터가 국내 실정에 더 적합할 것으로 판단되어 이들 데이터를 비교대상으로 선정하였다. Table 1은 EGIG와 UKOPA의 매설 배관 사고빈도 데이터에 대한 개요이다.

### 2.1. EGIG의 사고빈도 데이터

EGIG(European Gas Pipeline Incident Data Group)

**Table 1.** Summary of pipeline failure frequency data

구분	EGIG	UKOPA
기간	1970년 ~ 2010년	1962년 ~ 2010년
관찰 범위	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유럽 16개 천연가스 운송사의 배관</li> <li>• 유럽 전체의 50% 이상</li> <li>• 가스관련 시설 밖의 배관(On shore)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 영국내의 위험배관</li> <li>• 천연가스(LNG포함), 에틸렌, Crude oil, 에탄, 프로필렌, Condensate, 프로판, 부탄 등</li> <li>• 가스시설 밖의 배관</li> <li>• 파이프 자체만 관찰</li> </ul>
관찰 구간	3,550,000km-yr	775,385km-yr
사고 건수	1,249건	184건
사고 빈도	0.35(per 1,000km-yr)	0.234(per 1000km-yr)
고장 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 타공사</li> <li>• 부식</li> <li>• 시공/재료 결함</li> <li>• Hot tap made by error</li> <li>• 지반이동</li> <li>• 기타</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 타공사</li> <li>• 부식</li> <li>• 시공/재료 결함</li> <li>• 지각변동</li> <li>• 기타</li> </ul>

는 1970년부터 유럽 내의 15bar 이상의 압력으로 운전되는 15개 가스운송사의 가스 배관 사고에 대한 자료를 수집하여 데이터베이스화 하였으며 안전성 입증을 위한 사고빈도 데이터를 제공하고 있다[10].

EGIG 데이터베이스의 목적은 예기치 않게 발생한 가스사고 데이터를 수집 제공하여 유럽의 가스운송배관의 안전성을 높이고 통계의 기초자료로서 활용하기 위한 것이다.

EGIG의 사고빈도 데이터의 경우 세부사고원인에 대한 빈도데이터는 그래프로만 제공하고 있기 때문에 정확한 데이터를 수집하는데 어려움이 있어 그래프의 수치를 읽어 내기 위해 Acrobat의 거리측정도구를 활용하여 각 사고원인들에 대한 사고빈도 데이터를 수집하였다.

소누출은 배관 손상이 직경 2cm이하, 중누출은 배관 손상이 직경 2cm ~ 배관직경, 대누출은 배관 손상이 직경보다 큰 것을 의미한다.

### 2.2. UKOPA의 사고빈도 데이터

UKOPA(United Kingdom Onshore Pipeline Operator's Association)는 National Grid사 등 영국의 10개 가스배관 운용회사와 영국 정부기관인 HSE

**Table 2.** Total failure frequency of EGIG data for exposure period

기간	관찰기간	사고건수	관찰구간 거리 [km-yr]	사고빈도 (/1000 km-yr)
1970 ~ 2007	7th report 38 years	1173	$3.15 \times 10^6$	0.372
1970 ~ 2010	8th report 41 years	1249	$3.55 \times 10^6$	0.351
1971 ~ 2010	40 years	1222	$3.52 \times 10^6$	0.347
1981 ~ 2010	30 years	860	$3.01 \times 10^6$	0.286
1991 ~ 2010	20 years	460	$2.25 \times 10^6$	0.204
2001 ~ 2010	10 years	207	$1.24 \times 10^6$	0.167
2006 ~ 2010	5 years	106	$0.654 \times 10^6$	0.162

**Table 3.** Failure frequency UKOPA data of incident causes for total exposure period

Cause	Primary failure frequency	
	1970~2010 per 1000km-yr	5 year moving average per 1000km-yr
External interference	0.170	0.057
Corrosion	0.057	0.040
Construction defect / Material failure	0.059	0.031
Hot tap made by error	0.017	0.011
Ground movement	0.026	0.015

가 포함된 그룹에서 배포하는 배관 사고 데이터이다 [11]. UKOPA 데이터는 지상의 배관을 대상으로 하고 있다. 배관을 통해 운송되는 물질들은 천연가스 뿐만 아니라 다른 가연물질도 포함되어 있다.

UKOPA 역시 사고빈도 데이터의 세부사고원인에 대한 빈도데이터는 그래프로만 제공하고 있기 때

**Table 4.** Failure frequency data of EGIG [1000km-yr]

구분	EGIG 5th	EGIG 6th	EGIG 7th	EGIG 8th	
관찰기간 (year)	1970~2001	1970~2004	1970~2007	1970~2010	
관찰거리 (km-yr)	2,410,000	2,770,000	3,150,000	3,550,000	
타공사	소	0.0571	0.0532	0.0500	0.0462
	중	0.1187	0.1097	0.0966	0.0903
	대	0.0418	0.0377	0.0364	0.0331
부식	소	0.0637	0.0584	0.0545	0.0542
	중	0.0022	0.0026	0.0023	0.0021
	대	-	-	-	0.0004
시공/재료결함	소	0.0505	0.0468	0.0420	0.0411
	중	0.0176	0.0156	0.0136	0.0127
	대	0.0055	0.0052	0.0045	0.0042
지반이동	소	0.0066	0.0065	0.0080	0.0064
	중	0.0077	0.0078	0.0068	0.0076
	대	0.0121	0.0117	0.0114	0.0106

**Table 5.** Transported product of UKOPA

운송 물질	거리 (km)	운송물질	거리 (km)
Natural Gas(Dry)	21,053	Propylene	36.3
Ethylene	1,153	Condensate	24.0
Natural Gas Liquids	225.8	Propane	19.5
Crude Oil(Spiked)	212.6	Butane	19.5
Ethane	38.1	TOTAL	22,370

문에 EGIG 사고빈도 데이터 수집과 같은 방법을 사용하였다.

### 2.3. 데이터 비교 분석

EGIG 및 UKOPA 모두 40년 이상 축적된 자료를 바탕으로 사고빈도 자료를 발표하고 있다. 하지만 UKOPA는 천연가스를 포함한 다른 가연성 물질의 운송 배관을 포함하고 있으며, 데이터는 영국내에

**Table 6.** Failure frequency data of UKOPA  
[1000km·yr]

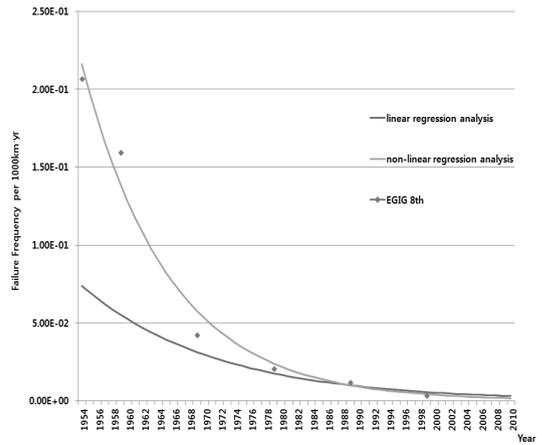
구 분		UKOPA 2nd	UKOPA 8th
관찰 기간 (year)		1952-2000	1952-2010
관찰구간거리 (km·yr)		592,326	785,385
타공사	소누출	0.01283	0.01311
	중누출	0.03743	0.03098
	대누출	0.00989	0.00803
부식	소누출	0.05455	0.04475
	중누출	0.00187	0.00115
	대누출	0.00000	0.00000
시공/재료	소누출	0.02487	0.01984
	중누출	0.00214	0.00115
	대누출	0.00000	0.00000
지반이동	소누출	0.00535	0.00492
	중누출	0.00187	0.00098
	대누출	0.00187	0.00115

국한하고 있기 때문에 비교적 적은 사고건수(총178건)를 바탕으로 사고빈도 데이터가 만들어져있다. 반면에 EGIG의 경우는 유럽 천연가스 매설배관의 50%이상의 구간을 대상으로 사고데이터를 수집하고 있기 때문에 비교적 많은 사고건수(총1249건)를 가지고 사고빈도를 추출하고 있다. 그러므로 국내에서 사고빈도를 사용하고자 할 때에는 UKOPA보다 EGIG의 데이터를 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

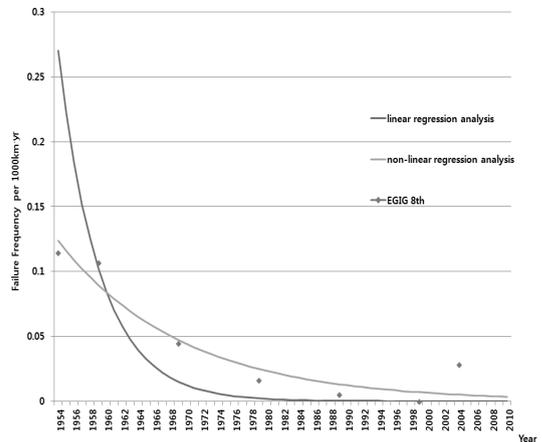
### III. 매설 배관 파손 빈도분석 방법론 고찰

EGIG와 UKOPA의 데이터를 분석해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 두 데이터 모두 매설배관에 대한 사고빈도 데이터를 제공해준다.
- (2) EGIG는 유럽 전체, UKOPA는 영국내의 매설 배관에 대한 사고빈도를 제공한다.
- (3) EGIG는 천연가스 배관만을 대상으로하지만 UKOPA는 다른 가연물질도 포함되어 있다.



**Fig. 1.** Comparison of linear and non-linear regression analysis (Failure Frequency due to Corrosion).



**Fig. 2.** Comparison of linear and non-linear regression analysis (Failure Frequency due to Construction/Material Defect).

따라서 관찰기간, 관찰거리 등을 종합하여 분석한 결과 EGIG의 데이터를 사용하는 것이 더욱 합리적일 것으로 판단되어 이후 배관의 파손빈도 분석에서 사용할 기초 자료로 EGIG 8차 보고서를 사용하여 빈도를 분석하는 방법론을 고찰해 보았다.

#### 3.1. 비선형 회귀분석

자료의 형태가 비선형의 경우 크게 두가지 방법을 가지고 회귀분석을 실시한다. 첫 번째 방법은 자료의 형태를 선형으로 변환시킨 후 선형 회귀분석을

이용하는 것이며, 두 번째 방법은 비선형 회귀분석을 이용하는 것이다.

첫 번째 방법의 경우 데이터를 로그로 치환시킨 후 그 데이터를 선형회귀분석을 이용하여 a와 b값을 구하여  $\log y = a + bx$  와 같이 나타내고 이를 다시 치환하여  $y = e^{a+bx}$  와 같이 나타낸다.

두 번째 방법의 경우 바로 비선형 회귀분석을 이용하여  $y = e^{a+bx}$  와 같이 나타낸다.

이 두 가지 방법은 각각의 장점과 단점이 존재하게 되는데 첫 번째 방법은 쉽게 회귀분석을 수행할 수 있다는 장점이 있으며, 단점으로는 회귀분석 시 발생하는 오차가 클 경우 제대로 수렴하지 않는 경우가 발생하게 된다. 두 번째 방법의 경우는 오차의 유무에 관계없이 비교적 잘 수렴하는 회귀분석을 수행할 수 있다. 하지만 그 방법이 복잡하고 어려우며, 데이터의 질에 따라 회귀분석을 수행 못하는 경우가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하게 되면 발생하는 오차가 커서 수렴하지 않는 것으로 나타났기 때문에 두 번째 방법의 회귀분석을 수행하였으며 통계 프로그램인 SAS를 이용하여 비선형 회귀분석을 수행하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 부식과 시공/재료결함에 의한 사고빈도 데이터를 선형 및 비선형 회귀분석을 수행한 결과 그래프이다. 이들 결과로부터 비선형 회귀분석이 EGIG 데이터와 더 부합되는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 타공사 사고빈도 추출

EGIG 8차 보고서의 타공사 데이터 중 배관직경에 대한 사고빈도 데이터를 기초로 하여 비선형 회

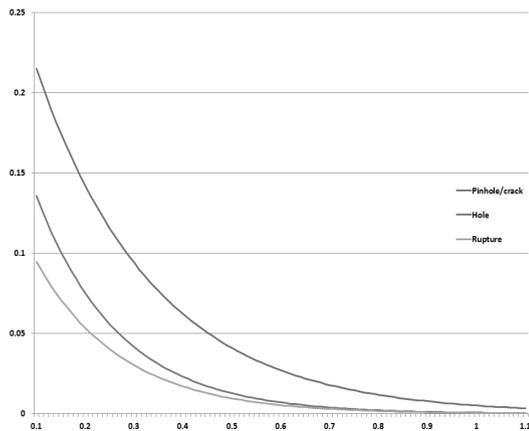


Fig. 3. Failure frequency due to external interference.

귀분석을 이용하여 회귀식을 배관의 직경 d(m)에 따라 산출하면 다음과 같다.

$$F_{pinhole} = e^{-5.9166d - 1.4062} \quad (1)$$

$$F_{hole} = e^{-4.144d - 1.1233} \quad (2)$$

$$F_{rupture} = e^{-5.7292d - 1.7848} \quad (3)$$

전체 배관 사고빈도 중 타공사 사고빈도가 약 50%를 차지하고 있고 EGIG 참여사들의 배관 순찰 주기, 배관 매설 조건이 국내와 상이하여 산출된 회귀식을 그대로 사용하기에는 부적합하며 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3. 부식 사고빈도 추출

부식에 의한 소누출의 사고빈도 데이터에 대하여 회귀분석을 이용하여 건설년도(y)에 따른 회귀식을 추출해 내었다. 회귀식을 추출해 낼 경우 이용자가 해당 배관의 건설연도를 알게 되면 그 연도를 이용하여 쉽게 사고빈도를 추정해 낼 수 있으며, 현재나 미래에 건설될 배관에 대한 부식의 사고빈도 역시 추정할 수 있는 장점이 있다. EGIG 8차 보고서에는 부식으로 발생한 사고의 빈도 데이터는 소누출만 충분히 있었으며, 중누출, 대누출의 경우는 1980년대 이전의 자료만 존재하기 때문에 회귀분석이 불가능하였다. 그리고 부식의 경우 중누출 이상이 발생하기 위해서는 장시간이 필요하며, 발달된 배관점검 방법 등으로 대량 누출이 발생하기 전에 미리 발견되기 때문에 보수적으로 고려하기 위해 소누출 데이

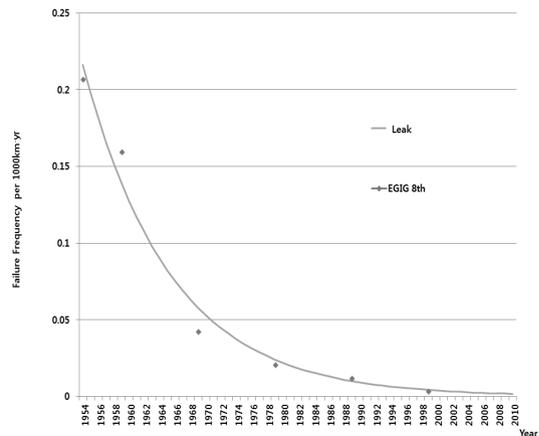


Fig. 4. Failure frequency due to corrosion.

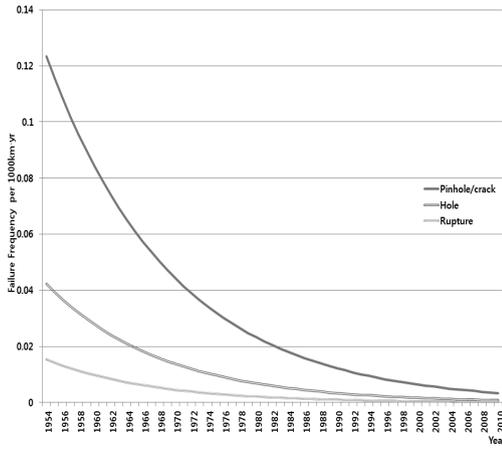


Fig. 5. Failure frequency due to construction/material defect.

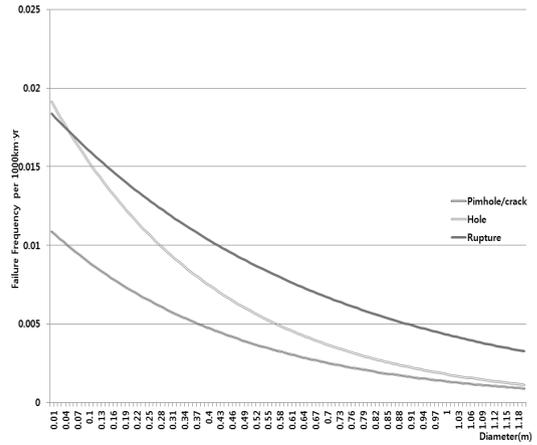


Fig. 6. Failure frequency due to ground movement.

터틀 중누출과 대누출에 동일하게 적용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

- 부식에 의한 누출

$$F_{leak} = e^{-0.0879y + 170.2244} \quad (4)$$

### 3.4. 시공/재료결함 사고빈도 추출

시공/재료결함 사고빈도는 가스 배관의 건설년도(y)를 기준으로 산출하면 다음과 같다.

- 소누출

$$F_{pinhole} = e^{-0.0642y + 123.3548} \quad (5)$$

- 중누출

$$F_{hole} = e^{-0.0702y + 134.0081} \quad (6)$$

- 대누출

$$F_{rupture} = e^{-0.0762y + 144.719} \quad (7)$$

### 3.5. 지반이동 사고빈도 추출

지진이나 연약지반 등에 의한 지반이동에 따른 사고빈도를 가스 배관의 직경에 따라 산출하면 다음과 같다.

- 소누출

$$F_{pinhole} = e^{-2.1009d - 4.5} \quad (8)$$

- 중누출

$$F_{hole} = e^{-2.3716d - 3.9334} \quad (9)$$

- 대누출

$$F_{rupture} = e^{-1.4533d - 3.9821} \quad (10)$$

## IV. 결론

본 연구에서는 국내 매설 고압가스배관의 사고빈도 데이터 구축 시 활용할 수 있도록 국외에서 발표하고 있는 고압가스배관 사고빈도 데이터에 대해 고찰 하였다. 고압가스배관 사고빈도 데이터의 대표적인 것으로는 미국의 DOT, 유럽의 EGIG 및 영국의 UKOPA가 있다. 국외의 사고빈도 데이터의 국내 적용 가능성을 확인하기 위하여 이들을 비교 분석한 결과 EGIG 데이터가 국내 실정에 더 적합하였다.

EGIG 8차 보고서의 사고빈도 데이터를 사용하여 비선형회귀분석을 수행한 결과 배관 설치 연도에 따른 지수형의 곡선을 얻었다.

EGIG에는 타공사 사고빈도가 전체 사고빈도의 약 50%를 차지하고 있어 국내에 적합한 데이터 확보를 위하여 향후 타공사 부분에 대한 집중적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

또한, 국내 사고빈도 데이터의 유효성 문제가 있는 것은 하지만 현재의 국내 데이터와 국외 데이터를 합성하여 사고빈도를 유추할 수 있는 방법 역시 고찰해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

## V. 감사의 글

이 논문은 2012년도 호서대학교의 재원으로 교내 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다. (과제번호 : 2012-0355)

REFERENCES

- [1] De Stefani, V., Wattis, Z and Acton, M., "A Model to Evaluate Pipeline Failure Frequencies based on Design and Operating Conditions", *AIChE 5th Global Congress on Process Safety*, Tampa, Florida, April 2009
- [2] The Health and Safety at Work Etc. Act 1974.
- [3] US Code of Federal Regulations, 49 CFR Part 192, "Transportation of Natural and Other Gas by Pipeline: Minimum Federal Safety Standards", October 2009
- [4] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Gas Transmission and Distribution Piping Systems", B31.8-2010
- [5] BSI, BS EN 1594, "Gas supply systems- Pipelines for maximum operating pressures over 16 bar - Functional requirements", 2009
- [6] BSI. BS PD 8010 Code of practice for pipelines - Part 3 - Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables - Supplement to PD 8010-1:2004, 2009
- [7] Standards Australia, AS 4360, "Risk management", 2004
- [8] Acton, M.R., Baldwin, P.J., Baldwin, T.R., and Jager, E.E.R., "The Development of the PIPE-SAFE Risk Assessment Package for Gas Transmission Pipelines," *Proc. 2nd International Pipeline Conference (IPC98)*, ASME International, Calgary, 1998
- [9] "Safety Assessment Results for High Pressure Gas Pipeline in Regional Change Section", KGS, 2008. 12
- [10] "8th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (1970 - 2010)", December 2011
- [11] "UKOPA Pipeline Product Loss Incidents - 8th Report (1962-2010)". 2011