



## 하천통과 매설배관의 사고사례에 대한 연구

마영화 · 김지윤 · \*윤기봉 · \*조영도

중앙대학교 기계공학부, \*한국가스안전공사 시스템연구부  
(2010년 10월 4일 접수, 2010년 12월 28일 수정, 2010년 12월 28일 채택)

### A Study on Accidents of Buried Pipeline Crossing River

Young Wha Ma · Ji Yun Kim · \*Kee Bong Yoon · \*Young Do Jo

Dept. of Mechanical Engineering, Chung Ang University, Seoul 156-756, Korea  
\*Dept. of System Research, Korea Gas Safety Corporation, Gyeonggi 429-712, Korea  
(Received 4. October. 2010, Revised 28. December. 2010, Accepted 28. December. 2010)

#### 요 약

해외 하천통과 매설배관 사고사례를 수집하여 분석하였다. 이는 국내 하천통과 도시가스매설배관의 합리적인 매설 심도를 결정하기 위한 기본 자료로 활용하기 위함이다. 사고사례 조사결과 하천을 통과하는 천연가스매설배관 사고의 주요원인은 홍수로 분석되었다. 홍수에 의한 배관 노출 및 과도 유량에 의한 하중이 파손 원인인 경우가 많다. 파손발생 위치에서 부식이 발생한 것도 원인이 되었다. 따라서 국내 하천통과 매설배관의 합리적이고 효율적인 매설심도 결정을 위해서는 국내 하천특성에 맞는 하천의 수리학적 특성평가와 배관의 구조해석이 요구된다. 일반 천연가스배관의 사고사례 조사 결과도 주요 원인이 외부간섭과 부식임도 요약하였다. 이들 두 주요원인은 매설환경에 따라 전체 사고에서 차지하는 비율이 차이가 있었다.

**Abstract** - Records of accidents for buried pipeline across the river were gathered and causes were analysed. The results are intended to be utilized as basic data for determining a reasonable criteria for the depth of buried city gas pipeline crossing the river. Accident of river-crossing buried pipeline was mainly caused by flood. Sometimes corrosion was detected at the failed location of the pipe. In order to determine reasonable and efficient depth of burial of the pipeline, hydraulic evaluation of the river and structural analysis of the pipeline are necessary. Published data for the buried natural gas pipeline incidents were also investigated and summarized. Main causes of buried natural gas pipeline incidents were external interference and corrosion. However, the two main causes of incidents showed significant difference in the proportion of the entire incident, depending on burial environment.

**Key words** : buried pipeline, river crossing, accident, natural gas, depth of burial

#### 1. 서 론

현재 국내에서 하천을 통과하는 도시가스배관은 설치환경(하천의 폭, 유량, 유속, 지질환경 등)과 사용조건 등의 변화에 따라 배관의 매설 깊이에 관한 법규 및 기준의 효율적인 관리전략 수립이 필요하다. 이를 위해서는 국내외에서 발생한 매설 배관의 사고사례와 사고원인 자료의 수집 및 분석이 선행되어야 한다. 또한, 이러한 파손사고를 방

지하기 위해 국내외적으로 어떠한 조치들이 취해지고 있는지에 대한 조사도 필요하다. 이들 결과를 토대로 국내 하천 매설배관의 위험등급을 재분류하여 국내 환경에 맞도록 하천통과 도시가스배관 매설심도가 합리화되어야 한다.

본 연구는 하천통과 도시가스배관 매설심도 합리화를 위한 사고사례 조사에 의한 원인 분석 연구로서 해외 하천통과 매설배관의 실제 사고사례 자료를 수집·분석하였고, 이를 통해 사고예방을 위한 합리적인 매설심도 결정 방안을 제시하였다. 또한 매설배관 사고 외에 일반 천연가스매설배관의 사고원인 문헌 결과를 분석 요약하였다.

\*주저자:kbyoon@cau.ac.kr

## II. 해외 매설배관 파손사고 조사 · 분석

### 2.1. 천연가스매설배관 사고 원인 요약

해외 천연가스매설배관의 사고빈도는 전체 배관망의 길이가 증가함에도 불구하고 Fig. 1에 보인 바와 같이 1980년 대 중반을 기점으로 점차 감소추세를 보인다 [1-3]. 이는 매설배관에 대한 새로운 재료의 사용 및 유지관리기술개발 결과이다. 하지만, 여전히 새로운 유형의 파손사고는 발생하고 있으므로 이들 파손사고 데이터를 수집 및 분석하여 매설배관 안전관리 및 사고 예방에 반영하여야 한다. 따라서 본 절에서는 천연가스매설배관의 사고사례 데이터 수집 및 분석 결과의 기존 자료를 요약하였으며, 하천통과 매설 배관 연구의 기초로 삼았다.

미국은 교통부(Department of Transportation, DOT) 산하에 배관망 및 위험물질 안전관리국(pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)에서 배관사고에 대해 조사 및 분석하여 보고하였다[2]. 유럽은 15개국의 주요 가스수송시스템 운영업체로 구성된 가스배관 사고 데이터 그룹(European Gas Pipe Line Incident Data Group, EGIG)을 통해 가스배관 사고 데이터베이스를 구축하여 공개하고 있다[1]. 이 외에도 캐나다(National Energy Board, NEB)[4], 러시아(Gosdortehnadzor)[3], 오스트리아(Australian Pipeline Industry Association, APIA)[5]등도 자국의 가스배관 파손사고 데이터를 데이터베이스화 하고 있다. 최근에는 DOT/ PHMSA, EGIG, 독일, 러시아 등의 협회 및 국가기관이 공동으로 참여하는 국제적인 연구그룹(International Gas Union, IGU)이 설립되어 천연가스 매설배관 안전사고에 관한 활발한 정보 교류 및 연구를 수행하고 있다[6]. 얻어진 결과들은

천연가스매설배관의 시공, 유지 · 보수, 검사 등과 관련된 코드 개발 및 법규 제정에 적극 활용되고 있다.

본 연구에서 앞에서 열거한 기관 및 협회들은 효율적으로 배관파손사고 데이터를 분류/체계화 하기 위해 사고형태를 분류하였다. 기관 및 협회마다 사용하는 용어상의 차이는 있으나 다음과 같이 사고형태를 분류할 수 있다.

- 외부간섭(타공사 및 제3자 활동)
- 부식(배관 내외부 부식, 응력부식균열)
- 시공결함 및 기계적 또는 재료 손상
- 일반적인 자연재해(지반이동, 홍수 등)
- 운전에러 또는 에러에 의한 핫택
- 기타 알려지지 않은 원인들

위 사고형태들은 단독으로 발생하기도 하지만, 복합적으로 발생하기도 한다. 예를 들면, 부식이 발생한 부위에 지반이동 등에 의해 국부적으로 비정상적인 응력이 가해질 경우 부식부위는 부식이 발생하지 않은 부위보다 높은 응력집중이 발생하게 된다. 이로 인해 이 부위의 응력집중계수 값이 파괴인성 값을 초과하게 되어 파괴가 발생하게 된다. 또 다른 예로, 타공사로 인해 배관에 기계적 손상이 가해졌을 경우, 그 당시에는 사고가 발생하지 않았지만 시간이 지남에 따라 손상부위에서 부식이 발생 및 성장하여 두께 감육이 발생함으로써 설계압을 견디지 못하고 파손이 발생하기도 한다.

매설된 천연가스배관에서 발생한 전체 사고를 앞에서 설명한 사고 원인별로 분석한 결과를 Fig. 2-Fig. 5에 나타내었다. 결과에서 유럽은 전체 사고 원인 중 외부간섭(External Interference)에 의한 사고가 전체 사고의 50% 정도를 차지하고 있다. 반면, 캐나다의 경우는 외부요인에 의한 사고가 전체 사고의 5% 미만을 차지한다. 미국과 러시아는 중간 정도에 해당하는 20% 정도의 사고율을 보여주고 있다. 부식에 의한 사고가 차지하는 비율을 살펴보면, 유럽과 미국은 전체사고의 15% 정도를 차지하는 반면, 캐나다는 60%를 초과한다. 캐나다의 부식에 의한 사고율 산정은 금속감육(Metal Loss)과 균열을 부식 메커니즘에 의한 손상으로 간주할 수 있는데 근거하였다. 러시아에서도 부식(응력부식균열 포함)에 의한 파손사고율이 가장 높은 30%를 넘는 것으로 조사되었다. 하천매설배관에서 주로 발생하는 사고의 원인에 해당하는 일반 자연재해(지반이동, 홍수 등)는 모든 국가에서 5% 정도의 사고율을 보여 준다.

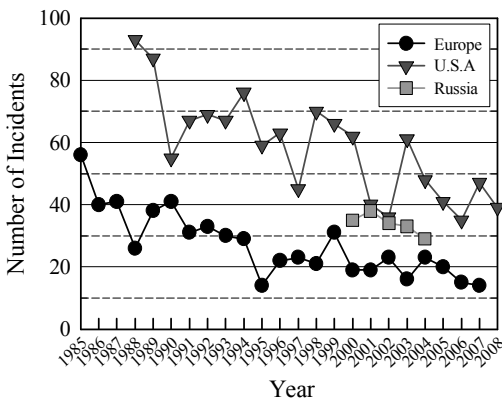


Fig. 1. Number of natural gas pipeline incidents during 1985-2008[1-3].

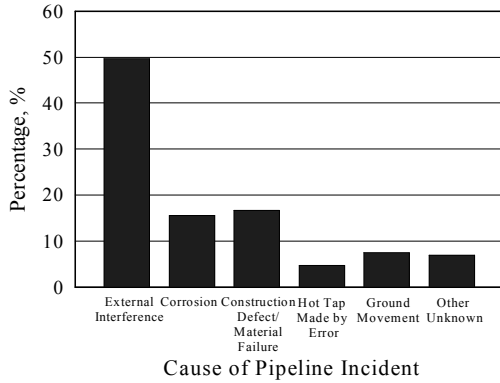


Fig. 2. Distribution of cause of natural gas pipeline incidents occurred in Europe from [1].

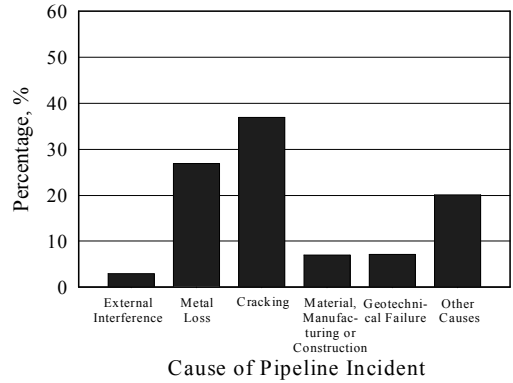


Fig. 4. Distribution of cause of natural gas pipeline incidents occurred in Canada from [4].

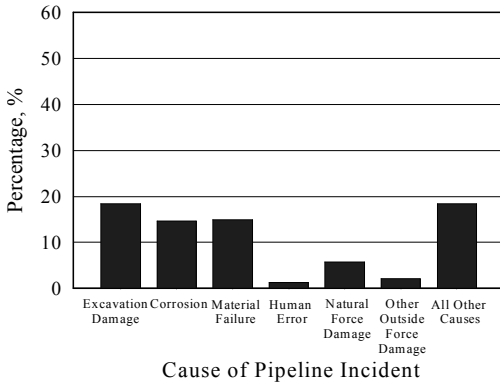


Fig. 3. Distribution of cause of natural gas pipeline incidents occurred in U.S.A from [2].

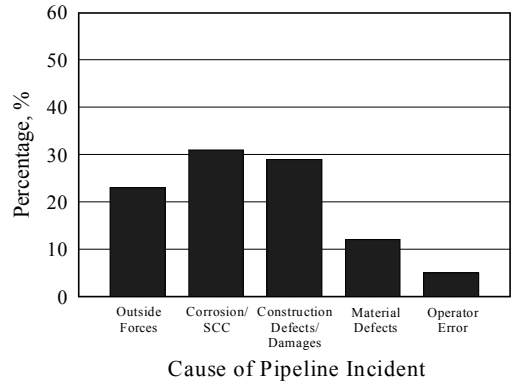


Fig. 5. Distribution of cause of natural gas pipeline incidents occurred in Russia during 2000 ~ 2004 from [3].

사고원인 조사 결과로부터 매설된 천연가스배관에서의 사고원인별 비율은 국가별로 서로 다른 매설환경의 차이로 인해 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 국내의 도시가스매설배관의 건전성 평가 시에 매설환경이 중요한 평가 인자로 고려되어야 함을 보여준다.

기타 분명하지 않은 원인으로 분류된 사고 중 사용 년 수에 따른 사고빈도를 각각의 시공 년도별로 Fig. 6에 나타내었다. 1964년 이전에 시공된 배관들은 20~30년 사용 시점에서 가장 높은 부식에 의한 사고빈도를 보여준다.

1974년~1983년 사이에 시공된 배관은 시공 초기(약 5년 이내)에 가장 높은 파손빈도를 보이고 이후에는 점차 파손빈도가 감소하였다. 또한, 다른 년도에 시공된 배관들과 비교하여 그 파손빈도가 매

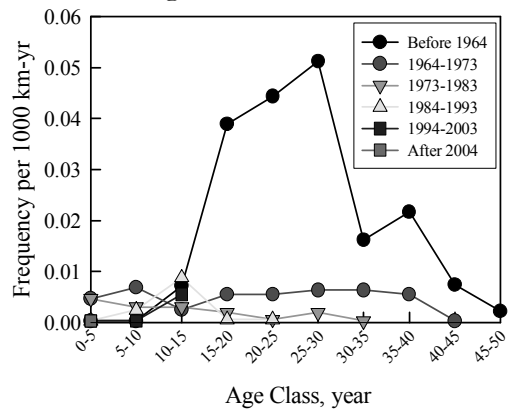


Fig. 6. Ageing analysis(corrosion) relationship between age and construction year class from [1].

우 낮은 것으로 확인된다. 2003년 이후 시공된 배관은 아직 사용 년수가 길지 않아 다른 결과 데이터와의 직접적인 비교는 어렵다. 하지만, 시공 초기 5년 이내의 사고율만을 놓고 볼 때 사고빈도가 매우 적음을 알 수 있다.

**2.2. 해외 하천통과 매설배관 사고사례**

해외 매설배관 사고사례는 많이 보고되고 있다. 하지만, 하천을 통과하는 천연가스배관의 사고 사례는 매우 드물며, 사고 중에서도 일부내용만 공개되어 있다. 따라서 본 논문에서 수집한 사고사례는 천연가스 배관 뿐 만이 아니라, 오일 등을 수송하는 모든 하천통과 배관 사고에 대해 조사하였다. 조사 결과를 아래에 정리하였다.

1) 펌비나 배관 사고

- (Pembina Pipeline Accident) [7]
- 발생년도: 2008. 6. 15.
- 위치: 캐나다, 레드디어 강(Red Deer River)
- 배관직경: 152-203 mm
- 매설깊이: 배관망은 강바닥에 노출
- 사고원인: 일방향의 굽힘하중 피로에 의한 파손 (비 때문에 증가된 유량이 토양 침식을 유발하고, 침식된 토양이 배관에 굽힘하중으로 작용한 경우임)
- 결과: 오일이 강으로 방출 (제어 및 데이터 모니터링 시스템이 배관망에서의 오일 누출을 감지).

2) 티타스 배관 사고

- (Titus Gas Transmission Pipeline Accident) [8]
- 발생년도: 2008. 1. 14.
- 위치: 방글라데시, 투락 강의 지류
- 배관직경: 152-203 mm
- 매설깊이: 수중 3.7 m
- 사고원인: 모래를 싣고 강을 지나가던 화물선의 프로펠러에 의한 배관망 파손.
- 결과: 파손된 배관망의 일부 파편이 강 위를 통과하고 있던 전선과 부딪혀 불꽃을 발생, 불꽃이 화염원으로 작용하여 화재 유발, 화염이 파손부에서 36 m 거리까지 도달. 인명 피해는 없었음.

3) 콜로니얼 배관 파손 사고

- (Colonial Oil Transmission Pipeline Incident) [9]
- 발생년도: 1996. 6. 26.
- 위치: 미국 사우스캐롤라이너 리디강(Reedy

River)

- 배관직경: 914 mm
- 매설깊이: 수중 3.7 m
- 사고원인: 부식에 의한 배관 파손
- 결과: 3,625 m<sup>3</sup>의 오일이 방출되어 정화 비용이 약 240억원 (약 2천만불)이었던 사고.

4) 라살르강 배관 파손

- (La Salle River Crossing Pipeline Incident) [10]
- 발생년도: 1996. 4. 15
- 위치: 캐나다 마니토바, 라살르강 (La Salle River)
- 배관직경: 864 mm, 두께: 12.7 mm
- 매설깊이: 강바닥에서 1.31 m 이상
- 사고원인: 부식(부식 깊이: 5.8 mm)
- 결과: 폭발과 함께 화구(Fireball)가 발생하였고, 강 주변의 나무와 채소밭이 파괴되었음. 폭발 후 길이 17 m, 폭 13.5 m, 깊이 5m의 분화구가 생성되었으며, 파편이 날아간 거리가 40 m에 달했음.

5) 엑손, 콜로니얼, 텍사코, 발레로 배관 파손 (Exxon, Colonial, Texaco and Valero Pipeline Accidents) [11]

- 발생년도: 1994. 10. 19-20.
- 위치: 미국, 텍사스주 산자신토강 (San Jacinto River)
- 배관직경 및 매설깊이: 정보 없음.
- 사고원인: 자연재해(집중호우로 인한 강의 범람), 고수부지에서의 잘못된 배관망 설계와 운전절차가 원인이 됨.
- 결과: 8개의 오일 배관망이 파손됨, 이로 인해 오일, LP가스 등이 강과 만으로 유입되어 환경오염이 유발됨.

이상의 수집된 사고사례로 보면, 하천을 통과하는 매설배관이 정상적으로 매설되어 운전되고 있을 경우, 주요 사고원인은 갑작스런 폭우로 인해 늘어난 유량 및 유속이 주요 원인으로 보여 진다. 즉, 홍수로 인한 하천의 지형학적 변형(침식 등)으로 인해 커다란 외부 하중이 배관에 작용하여 파손을 유발할 가능성이 제일 많다고 볼 수 있다. 물론, 라살르강 배관 파손의 경우에는 부식이 발생하여 국부적으로 부식 수명이 많이 소진되어 파손이 발생한 경우도 있지만, 이때에도 홍수로 인한 외부 하중이 가해지지 않았다면, 설계수명(약 40년) 동안은 사용이 가능했을 것이다. 이에 대한 판단의

근거로 라살르강 배관은 1962년에 시공되어 사고 발생 시점까지 34년 동안 정상적으로 운전되고 있었다. 사고 후 파손분석 결과로부터 사고 부위에서 부식이 5.8 mm까지 진행된 것이 관찰되었기 때문이다. 배관 두께를 기준으로 부식 깊이 비는 0.46 정도였다. 이 정도의 부식 깊이 및 진행속도라면, 내압이 작용하더라도 설계 수명 40년에 도달하는 5~6년 정도는 충분히 정상적인 운전이 가능하였다고 판단된다.

1994년의 미국 운수성(DOT)의 배관안전 규제기준(Pipeline Safety Regulations)에 따르면, 하천을 통과하는 가스매설배관은 최소한 1.2 m (암반이 있는 경우 0.6 m)의 매설깊이를 가져야 한다고 권고하고 있다. 따라서 홍수로 인한 사고가 발생한 경우에는 실제 강 바닥의 침식 깊이가 1.2 m 이상이었음을 추측할 수 있다. 이상의 경우를 고려하면 강을 통과하는 배관의 매설심도는 적어도 1.5m 이상이 되어야 안전할 것으로 판단되며, 실제 1.5m 이상이 추천되고 있다. 하지만 이 깊이는 하천의 유량, 유속 등의 특성을 반영하지 않고 결정한 것이기 때문에, 각 하천에서의 합리적이고 효율적인 매설심도는 하천의 수리학적 특성 평가를 통해 결정되어야 할 것이다.

Fig. 7은 일반 자연재해에 의한 세부 항목별 천연가스매설배관 사고율을 보여주고 있다 [1]. 이 결과를 보면 하천매설배관의 사고위험 요인에 해당하는 홍수에 의한 사고(19%)와 하천에서의 사고(7%) 비율이 확인된다. 하천에서의 천연가스배관 사고는 전체 자연재해에 의한 사고의 약 7% 정도를 차지하고 있으므로 하천에서의 사고가 상당하다는 것을 알 수 있다. 자연재해에 의한 배관사고의 가장 큰 원인은 산사태로 인한 지반이동이었다.

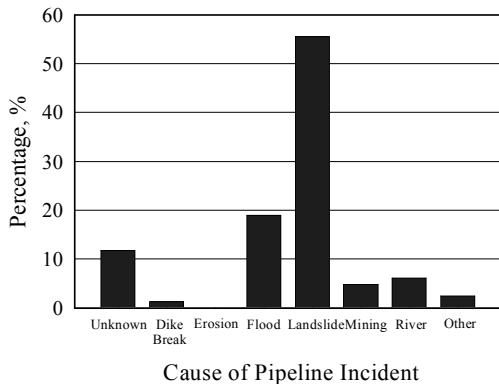


Fig. 7. Distribution of natural gas pipeline accident caused by natural disaster [1].

### III. 하천 매설심도 효율화 방안

하천매설배관의 매설심도를 결정하기 위해서는 안전도에 대한 기술적 평가, 작업 환경, 경제성, 사고발생 시 피해 거리 등을 포함해야 한다. 그리고 이들을 종합적으로 산정하여 최종적인 매설심도를 결정해야 한다. 국내의 경우 행정적인 하천분류를 통해 일률적인 매설깊이를 정하고 있으나, 국외의 경우는 최소 매설깊이 기준(1.2 m 이상)을 제시하고 위에서 설명한 하천영향평가 결과를 토대로 적절한 매설심도를 결정하도록 권고하고 있다. 효율적인 하천 매설심도는 하천의 특성에 따라 다음 절차에 의해 결정될 필요가 있다.

- 하천의 지질학적/수리학적 특성 파악
- 배관의 수리학적/구조적 안전성 평가 (위험도 평가 포함)
- 하천 특성에 따른 매설심도 제안
- 제안된 매설심도의 타당성 검증 후 시공

다만, 수리해석 결과는 사용하는 모델 마다 서로 다른 결과를 제공할 수 있기 때문에 이러한 모델에 따른 의존성을 해결하기 위해서는 모델 변수들에 대한 단순한 민감도 해석이 아닌 통계학적 기법을 도입한 위험도평가 해석이 수행될 필요가 있다 [12, 13]. 통계학적 해석을 통해, 모델들 뿐 아니라 모델들이 포함하고 있는 변수들 사이의 상호관계와 물리적 의미를 고찰할 필요가 있다.

### IV. 결론

본 연구에서는, 해외 하천통과 매설배관(천연가스, 오일 등) 사고사례를 수집/분석하였다. 이를 근거로 국내 하천통과 도시가스매설배관의 매설심도 효율화 방안을 수립하기 위함이다. 또한 기존의 천연가스매설배관의 사고원인조사에 대해서도 요약하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하천을 통과하는 매설배관(천연가스, 오일 등)의 주요사고 원인은 폭우 등으로 갑자기 불어난 유량과 이에 따른 유속의 증가로 인해 발생하였다. 유량과 유속은 하천바닥 지형을 변화시킴으로써 매설심도 안정화에 크게 영향을 주게 된다.
- 2) 국내 하천통과 매설배관의 합리적이고 효율적인 매설심도 결정을 위해서는 각각의 하천특성에 맞는 수리학적 특성평가와 구조해석이 필요하다. 다만, 수리해석 모델의 한계를 극복하기 위한

통계학적 위험도평가가 해석도 동시에 수행될 필요가 있다.

3) 천연가스매설배관의 주요사고 원인은 외부 요인(타공사 등)과 부식에 의한 것으로 확인되었다. 하지만, 이 두 주요원인은 매설환경에 따라 전체 사고에서 차지하는 비율이 크게 차이가 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업 [2010-10035310, 차세대 USN기반의 사회안전 프레임워크 기술개발]과 한국가스안전공사 위탁연구 “도시가스 하천횡단배관 매설심도 합리화 연구”의 일환으로 수행되었음

### 참고문헌

- [1] *Gas Pipeline Incidents*, the 7th EGIG- Report, European gas incident data group (EGIG), (2008).
- [2] *Mechanical Damage*, DOT-Final Report, US Department of Transportation, pipe-line and hazardous materials safety administration office of pipeline safety (DOT/PHMSA), (2009)
- [3] S. Mokrousov, “Safety Measures, Regarding Transmission Pipeline Transport in the Russian Federation,” Lecture of workshop on the prevention of water pollution due to pipeline accidents, (2005)
- [4] *Pipeline Reports*, the transportation safety board of Canada (TSB), (1996)
- [5] P. Tuft and C. Bonar, “Review of Pipeline Incident Data to 2004” [http:// www.apia.net.au](http://www.apia.net.au).
- [6] *Using or Creating Incident Databases for Natural Gas Transmission Pipelines*, Report of Study Group 3.4: a guideline international gas union(IGU), (2006)
- [7] *ERCB Investigation Report: Pembina Pipeline Corporation Crude Oil Pipeline Failure*, B. Temple, D. Buechler, D. Grzyb, M. Barber, J. Miller, P. Hendy and M. Bevan, (2009)
- [8] <http://www.thedailystar.net/story>, (2008)
- [9] List of Pipeline Accidents, [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_pipeline\\_accidents](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pipeline_accidents).
- [10] P. Kinsman and J. Lewis, “Report on a Study of International Pipeline Accidents”, (2000)
- [11] J. J. Leonard, “San Jacinto River Incident: Armege-don Visits Houston,” Int. Oil Spill Conference, (1997)
- [12] *Final Report on QRA of Proposed Saint John River Alternative Crossing*, Bercha Engineering Limited, (2007)
- [13] G. A. Papadakis, “Mayor Hazard Pipelines: A Comparative Study of Onshore Transmission Accidents,” *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 91-107, (1999)