

도시가스시설물의 조기 지진피해평가시스템 구축을 위한 기초연구

A study on earthquake damage prediction system of gas facilities

김익현* 정효순** 정혁창*** 이종석****
Kim, Ick Hyun Jung, Hyo Soon Jeong, Hyeok Chang Lee, Jong Seok

ABSTRACT

In order to reduce the secondary earthquake disaster resulting from the damage of gas facilities it is indispensable to establish an early response system on the basis of damage prediction. In this study the procedure of damage prediction for gas facilities is proposed and applied to the gas supply model area. Model area is divided into several little blocks. The soil condition and the characteristics of facilities were investigated at each block. Using fragility curves of facilities the damage level was analyzed under various seismicities. It is confirmed that the exposure gas pipe line in several blocks is damaged seriously by the collapse of building structures.

1. 서 론

최근 들어, 우리나라에서도 비교적 강한 진동을 동반한 지진이 발생하고 있다. 2004년 5월에는 경북 울진 동쪽 약 80km 해역에서 규모 5.2의 비교적 큰 지진이 발생하였다. 이는 1978년 기상청에서 계기지진을 관측한 이후 한반도 남한에서 일어난 지진 중 가장 큰 지진으로 보고 되고 있어 사회기반시설의 지진방재에 대한 준비가 더욱 절실하게 요구되고 있다. 도시가스는 사회·경제시스템을 유지하는데 필수 불가결한 라이프라인으로 가스사업자는 평상시 안정공급을 확보하는 것은 물론 지진과 같은 대규모의 자연재해가 발생한 경우에도 신속하게 대처할 수 있는 시스템을 구축할 필요가 있다. 특히, 도시가스시설물은 지진에 의한 직접피해뿐만 아니라 가스누출로 인한 광범위한 지역의 화재를 야기하므로 조속한 사회기능을 회복하기 위해서는 지진계측시스템과 피

* 경희원 · 울산대학교 건설환경공학부, 부교수

** 울산대학교 건설환경공학부, 석사과정

*** 울산대학교 건설환경공학부, 박사과정

**** 울산대학교 건설환경공학부, 교수

해예측시스템을 포함하는 조기 대응시스템을 구축하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 가스시설의 지진피해로 인한 2차재해의 확산을 최소화하기 위한 피해예측시스템 구축 방안을 제시하였다. 또한, 실제 가스공급지역을 시범지역으로 선정하여 관련 시설물과 지반 조건을 데이터베이스화하고 다양한 지진도에 대한 피해 규모를 예측하였다.

2. 우리나라 도시가스 공급시설 및 내진성능

2.1 공급시설 및 체계

외국으로부터 액체상태로 LNG 전용선을 통하여 수입되는 액화천연가스는 제조소(인수기지)의 저장탱크에 저장되고 이를 기화시켜 공급배관을 통하여 수요가에 공급하게 된다. 기화된 가스의 공급은 제조소에서 수요가에 이르기까지 동일한 압력으로 운송되지 않고 운송의 효율과 배관피해시의 안전성을 고려하여 정압시설에서 각기 다른 압력으로 조정되어 공급하게 된다. 우리나라 가스배관은 가스운송 압력에 따라 고압배관(10-70kgf/cm²), 중압배관(3-8.5kgf/cm²), 저압배관(1kgf/cm²미만) 3가지로 분류된다.

우리나라의 가스 공급체계는 일본과 달리 그림 1과 같이 한국가스공사와 일반도시가스사(33개사)로 이원화 되어 있다. 한국가스공사는 인수기지의 저장탱크에 저장된 액화가스를 기화기에서 기화시켜 이를 고압배관을 통하여 정압시설인 정압기지로 운송하고 정압기지에서는 고압으로 운송된 가스를 중압으로 감압하여 각 도시가스사에 공급하고 있다. 일반도시가스사는 한국가스공사에서 공급받은 가스를 지구/지역정압기에서 수요가의 가스소요량에 따라 적절한 압력으로 감압하여 수요가에 공급하게 된다. 따라서 한국가스공사와 각 일반도시가스사는 그들이 관리하는 시설물의 안전관리 및 안전대책을 각자 책임지고 있어 이원화되어 운용되고 있다.

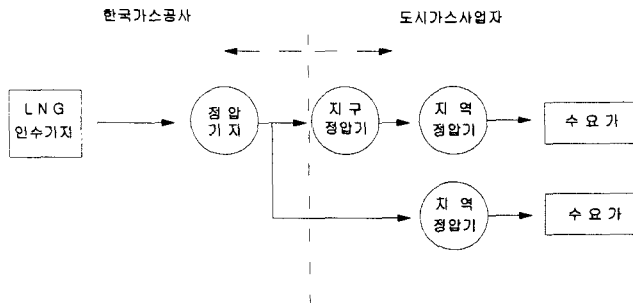


그림 1. 도시가스공급시설 관리도

2.2 주요 가스시설의 내진성능

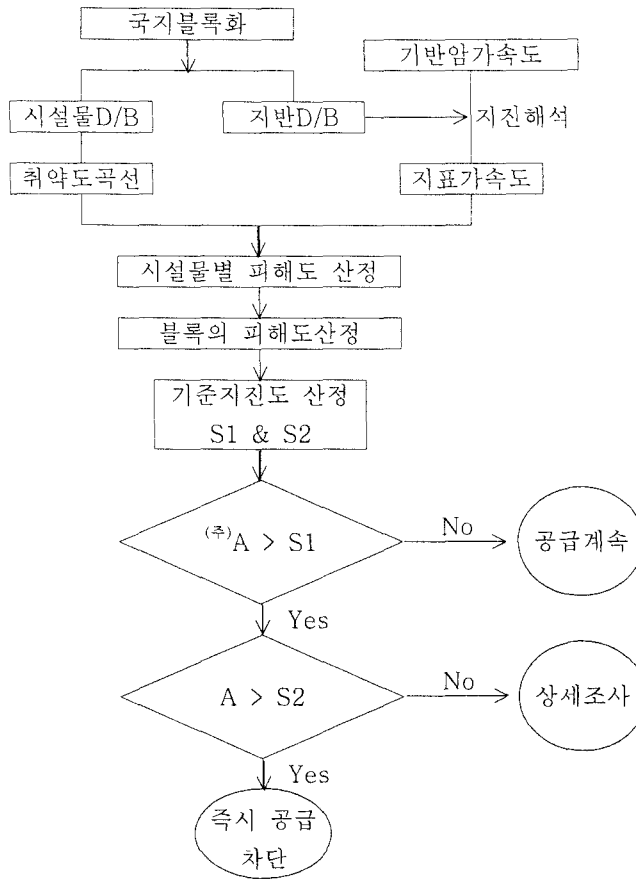
한국가스공사의 제조시설인 저장탱크 및 가스홀더의 지지구조물 및 기초에 대해서는 내진설계기준⁽¹⁾에 의하여 설계하고 지진에 대하여 안전한 구조로 하도록 되어 있어 내진성능을 확보하고 있다. 배관은 본관·공급관 및 내관을 포함하여 말한다. 고압배관은 한국가스공사가 관리하며 내진설계기준에 의하여 설계하고 지진의 영향으로부터 안전한 구조로 하도록 되어 있다. 일반도시가스사의 시설인 중·저압배관에 대해서는 지진에 대하여 안전한 구조로 하도록 하는 명시적인 규정은 없다. 그러나 배관

의 내진성능은 배관의 재질, 접합방법, 신축이음흡수장치 등에 크게 영향을 받기 때문에 내진설계를 수행하지 않아도 상당한 내진성능을 확보하는 경우가 많다⁽²⁾. 중압배관에 대해서는 KS D 3631(연료가스배관용 탄소강관), KS D 3583(배관용 아크용접 탄소강관) 및 동등 이상의 것, 저압배관에 대해서는 KS D 5301(이음매 없는 동 및 동합금관), KS D 5539(이음매 없는 니켈 합금관) 및 동등 이상의 것으로 규정하고 있으며 4kgf/cm² 이하의 매설배관의 경우에는 내진성능이 매우 우수한 가스용 폴리에틸렌관(PE관)을 사용할 수 있도록 규정하고 있다. 배관접합은 용접접합을 원칙으로 하고 있고, 배관이 신축에 의하여 파손될 우려가 있는 부분에서는 신축을 흡수할 수 있는 조치를 하도록 규정하고 있어 상당한 내진성능을 확보하고 있다. 한편, 한국가스공사의 정압기지와 일반도시가스사의 지구/지역정압기에 대해서는 별도의 내진설계 규정은 없다. 다만, 정압기지에는 지진계측기를 설치 운영하도록 의무화 되어 있다.

3. 가스시설 피해예측 시스템

3.1 시스템 구축 기본 방침

지진 시 가스시설물의 피해는 시설물의 내진성능에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 다만 이러한 피해가 광범위한 지역에 다발적으로 발생하여 2차재해로 확산되는 것을 최소화하기 위해서는 적절하게 가스공급을 차단하는 것이 필요하다. 일본의 경우 가스사의 공급정지와 별도로 개별 가옥에 가스차단장치가 장착된 가스미터기를 부착하여 적정한 진동이 감지될 때 자동으로 가스공급을 차단하고 있지만 우리나라와 같이 지진의 빈도가 많지 않고 지진세기가 상대적으로 작은 경우에는 이러한 장치의 도입은 합리적이지 않을 수 있다. 따라서 가스시설에 대한 광범위한 지진피해가 예상되는 경우 가스공급사에서 일괄적으로 가스공급을 중단하는 방안이 효율적인 해결방안이다. 다만, 도시가스의 공급 중단은 주민 생활에 큰 불편을 초래하므로 특정한 피해수준에 이른 지역에 한해서 공급을 정지하는 시스템 구축이 필요하다. 그림 2는 도시가스시설물의 지진방재시스템구축을 위한 흐름도이다. 국지블록은 비교적 면적이 크기 때문에 지진피해를 보다 상세하게 예측하기 위하여 행정단위(동 및 면 단위)로 소분할 한다. 각 행정구역 단위에서의 지반조건과 시설물을 조사하고 시설물의 취약도 곡선을 산정한다. 다양한 기반암 가속도에 대해 지진해석을 수행하여 지표에서의 가속도를 산정하고 이로부터 시설물의 피해도를 산정한다. 각 행정단위별로 산정된 피해도를 조합하여 국지블록에서의 피해도를 산정한다. 이 피해도로부터 적절한 조치가 필요한 지진도수준을 결정한다. 이 때 지진도수준은 가스공급을 즉시 정지시키지는 않지만 상세현장조사가 필요한 S1수준과 즉시 공급정지를 요하는 S2수준 두 단계로 설정한다. 가스공급지역내에 설치된 지진계측기로부터 지진이 감지되면 이로부터 각 블록에서의 가속도(기반암 가속도)를 예측하고 이를 S1 및 S2와 비교하여 적절한 조치를 취하게 된다.



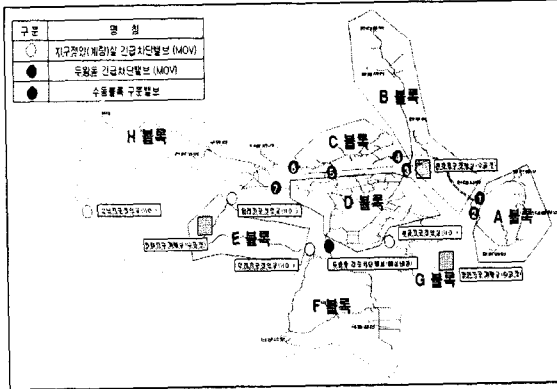
(주) A는 지진계측기에서 계속된 가속도로부터 블록별 기반암 가속도로 예측된 값

그림 2. 지진피해예측시스템 구축 흐름도

3.2 지진피해 시스템의 구축

1) 블록화

본 연구에서는 울산지역에 가스를 공급하는 일반가스사(이하 “시범지역 가스사”)를 대상으로 하여 지진피해 시스템을 구축하고 피해예측을 수행하였다. 시범지역 가스사의 총 공급세대수는 267,000여 세대이며, 총공급 면적 및 공급량은 각각 273.7km², 895,291m³이다. 피해가 발생한 특정 지역만 가스공급을 정지하고 피해를 입지 않은 지역에 대해서는 가스공급을 재개할 수 있도록 공급지역을 블록화 하는 것이 필요하다. 비용측면, 효율성측면, 재해대처능력 등을 고려하여 블록의 크기를 산정하는 것이 바람직하며 시범지역 가스사의 경우에는 일본의 소블록과 유사하게 공급가 구수가 5만 가구 이하가 되도록 하였다. 그림 3은 가스공급지역의 블록화 현황으로 8개의 국지블록으로 분할하였다.



블록 기호	블록차단 밸브수		공급가구수 (세대)	면적 (km ²)
	원격	수동		
A		2	42,787	22.2
B		4	33,564	37.7
C		4	37,000	16.0
D	2	3	34,687	45.7
E	2		3,246	12.6
F	2		34,142	53.0
G	1		25	12.7
H	2	2	43,000	73.8

그림 3. 국지블록화

2) 지반조건 및 건물 취약도

각 블록의 지반조건과 시설물의 특성을 조사하기 위하여 국지블록을 다수의 행정구역으로 분할하였다. 각 행정구역의 대표 지질도는 시범지역 전역에서 조사된 지질주상도에서 선정하였다. 표토층까지의 심도분포는 그림 4와 같다.(그림에서 심도가 0으로 나타나는 지역은 지질데이터가 없는 지역임). 시범지역 가스사의 주요 가스공급시설은 지구/지역 정압기와 배관이다. 본 연구의 주된 목적은 광범위한 피해로 인한 2차재해를 최소화하는데 있다. 따라서 기기 및 배관의 고정 여부에 따라 내진성능이 크게 좌우되는 지구 및 지역 정압기의 피해예측은 고려하지 않고 배관의 피해만을 대상으로 하였다. 앞서 기술한 바와 같이 가스사의 배관은 재질과 접합방법에서 매우 우수한 내진성능을 확보하고 있어⁽⁴⁾ 매설배관에서 대규모 피해가 발생할 가능성은 매우 낮으며 이는 외국의 지진사례에서도 나타나고 있다. 따라서 주요 피해가 예상되는 배관은 수요가의 입일배관으로 건물의 피해에 동반되는 피해가 가장 심각할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 각 행정구역 단위에서의 건물의 형식을 조사하여 취약취약도 곡선을 산정하였다. 건물형식은 미국의 FEMA(Federal Emergency Management Association)에서 개발한 HAZUS 프로그램에서 구분하는 형식 중에서 유사하다고 판단되는 12가지를 선정하였고, 건물의 취약도 곡선은 내진규정 이전(Pre-code)과 내진규정 이후(Low code)로 구분하였다⁽³⁾. 건물형식 중 가장 많은 것은 일반 주택인 3층 이하의 비보강 조적조 건물이며 이에 대한 취약도곡선은 그림 5와 같다.

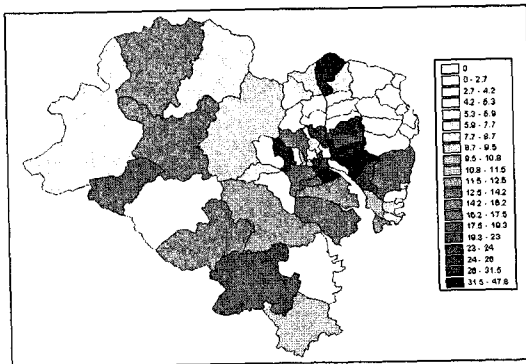


그림 4. 표토층 깊이 분포

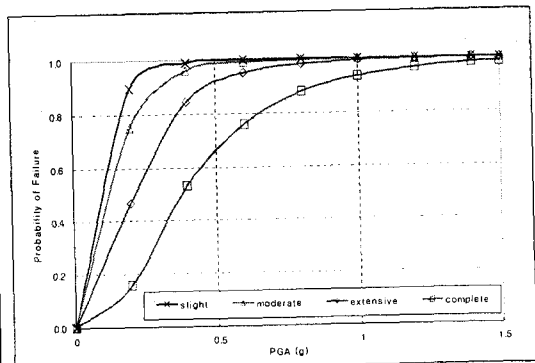


그림 5. 비보강조적조(3층 이하) 취약도곡선

3.3 피해 예측

지반가속도에 따른 수요가 인입배관의 피해를 살펴보기 위하여 지진해석을 수행하였다. 설계 기준의 응답스펙트럼에 부합되는 인공지진을 생성하여 기반암에서의 시간이력으로 하였으며 지표에서의 가속도는 등가선형해석 프로그램인 SHAKE91을 사용하여 얻었다. 수요가의 인입배관의 파손은 이들이 충분한 신축이음 장치를 가지고 있어 건물의 피해도가 “Complete(80-100% 파손)” 일 때 발생하는 것으로 가정하였다. 각 건물 형식별로 산정된 피해도로부터 국지블록 전체의 피해도를 산정하기 위해서는 거주자 수와 같이 피해도에 영향이 큰 인자를 고려하여 산정하는 것이 바람직하지만 본 연구에서는 한정된 데이터로 인해 식(1)과 같이 국지블록내의 전체 건물 수에 대한 특정 형식의 건물이 차지하는 수의 비율대로 조합하였다.

$$P_f^{Blk} = \sum_{i=1}^n P_f^{Type} \times N_i / N \quad (1)$$

여기서, P_f^{Blk} 는 국지블록 전체의 건물의 평균 손상확률, P_f^{Type} 는 건물형식별 손상확률, N_i 는 형식 i 의 건물 수, N 은 전체 건물수이다.

그림 6과 그림 7은 재현주기 1000년인 설계지진시의 각 국지블록에서의 지표가속도와 손상도 분포를 나타낸다. 표토층이 깊은 지역에서의 지반가속도의 크기는 0.8g 이상에 이르며 이 때의 손상(“Complete” 손상) 확률은 80% 이상으로 심각한 피해가 발생함을 알 수 있다.

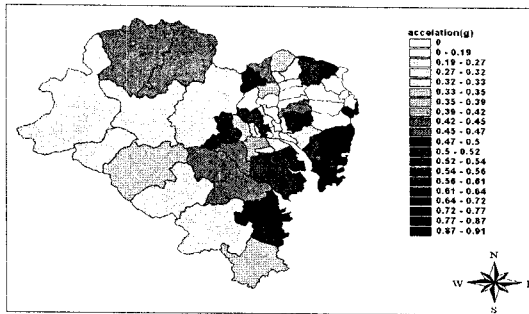


그림 6. 설계지진시 지반가속도 분포

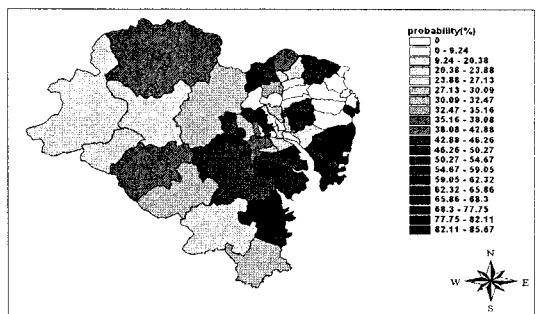


그림 7. 설계지진시 손상도 분포

다양한 가속도(기반암) 수준에 대한 국지블록의 손상도는 그림 8과 같다. 해안 연안에 위치한 블록 G와 블록 A의 손상도가 크게 나타나고 있다. 그림 8로부터 손상확률이 30%와 50%일 때의 가속도 수준을 나타내면 표 1과 같다. 표 1에서의 지진의 평균재현주기는 보통 암지반에서의 최대 가속도의 분포를 Type II 국지분포로 가정하여 식(2)의 년초과확률(G_s)로부터 산정하였다.

$$G_s(s) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{s}{\mu}\right)^{-\alpha}\right] \quad (2)$$

여기서, s 는 기반암에서의 가속도, α 와 μ 는 각각 2.4798, 0.009616(지진구역 I의 경우)이다.

국지블록내의 평균 손상도로부터 적절한 대응을 하기 위한 지진도 수준 S1과 S2를 결정하기 위해서는 향후 많은 연구가 진행되어야 하지만 블록내의 1/2정도가 파손되는 손상확률 50%를 지진도 S2로 가정하는 경우 가스공급을 즉시 정지해야 하는 가속도 수준으로 가정한다면 해안가에 위치한 블록 G에서는 0.137g(재현주기727년)로 피해확률이 매우 높으며 산악지역에 위치한 블록 C와 블록 H의 경우에는 0.3g 이상(재현주기 5000년 이상)으로 피해확률은 매우 작음을 알 수 있다.

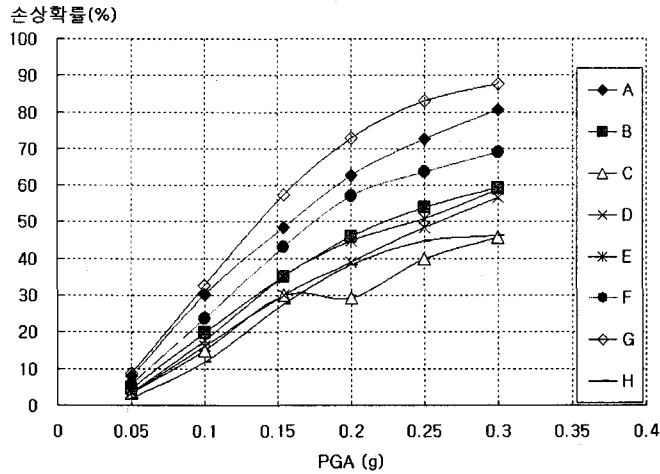


그림 8. 가속도(기반암) 분포에 따른 손상 수준

표 1. 손상확률 30%와 50%의 지진도

블록	손상확률 30% 경우		손상확률 50% 경우	
	가속도(g)	재현주기(년)	가속도(g)	재현주기(년)
A	0.100	333	0.158	1,035
B	0.134	688	0.222	2,404
C	0.153	955	0.3 이상	5,072이상
D	0.154	971	0.261	3,591
E	0.138	740	0.245	3,070
F	0.118	502	0.174	1,314
G	0.093	278	0.137	727
H	0.163	1,118	0.3 이상	5,072이상

4. 결론

본 연구에서는 가스시설의 지진피해로 인한 2차재해를 최소화하기 위하여 조기 지진피해평가 시스템을 제시하였다. 가스는 주민의 일상생활과 매우 중요하여 공급이 중단되는 경우 상당한 불편을 초래하게 되므로 가능하면 피해가 발생한 지역에 한하여 가스공급이 중단되도록 공급지역을 블록화 하였다. 각 블록에서의 지반조건과 시설물 데이터를 D/B화하고 이로부터 다양한 가속도 수준에 대한 시설물들의 손상확률을 평가하여 적정한 수준의 기준지진을 산정하도록 하였다. 제안

된 평가시스템을 시범지역에 적용하여 지진피해도를 예측해 보았다. 가스시설(수요가 인입배관)의 지진피해도는 토질조건과 건물의 특성에 많은 영향을 받았으며 토질조건이 좋지 않은 지역에서는 설계지진(재현주기 1000년) 보다 작은 지진시에도 손상수준이 “Complete(80-100% 파손)”인 확률이 80%를 넘어 적절한 대응 시나리오의 확립이 필요하다는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 “가스 시설물 지진 대응 시스템 기반 구축” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국지진공학회, “가스시설의 내진설계 기준 연구”, 1997.
2. 한국가스안전공사, 도시가스안전관리기준 통합고시, 2001
3. *Federal Emergency Management Agency*, “HAZUS Manual”, 1999
4. 한국지진공학회, “도시가스 배관의 내진설계 연구”, 1998.