

수계 파이프 시스템의 내진설계에 관한 연구 A Study on the Seismic Design for Water Extinguishing Piping Systems

이 동 명

Dong-Myung Lee

경민대학 소방방재학과
(2008. 1. 17. 접수/2008. 3. 12. 채택)

요 약

본 연구에서는 수계 시스템 중 스프링클러 헤드 파이프라인에 대한 내진설계를 수행하였다. 내진해석에 필요한 내진설계용 스펙트럼에 대응하는 인공지진 진동파형을 작성하고, 작성된 인공지진 진동에 대한 동적 응답 스펙트럼을 해석하였다. 내진설계를 위한 공학적 기반을 구축하였으며, 수계 및 가스계 파이프 시스템의 내진설계 기법을 제시하였다. 또한 본 연구의 결과로부터 수계 시스템의 파이프라인뿐만 아니라 소방시스템의 내진설계 및 성능평가에 응용할 수 있는 기틀을 마련하였다. 향후 진도규모 및 지반종류에 따른 추가적인 연구가 수행된다면 소방시스템의 신뢰성 향상과 안전성 제고, 성능위주설계가 이루어질 수 있을 것으로 본다.

ABSTRACT

In this study, seismic design in sprinkler head pipeline of water extinguishing system has been carried out. This study describes a generation of artificial earthquake wave compatible with seismic design spectrum, and also analyzed the dynamic response spectra by the simulated earthquake motion. This study constructed powerful engineering base for seismic design, and presented seismic design techniques of water and gas extinguishing piping system. Also, this study readied basis that can apply seismic design and performance estimation of fire fighting system and performance rating as well as pipeline of water extinguishing system from result of this research. Hereafter, if additional research by earthquake magnitude and ground kind is approached, reliance elevation, safety raising and performance based design of fire fighting system see to achieve.

Keywords : Seismic design, Response spectrum, Design spectrum accelerations, Piping system, Dynamic responses, Multi-degree of freedom

1. 서 론

최근 10년 사이에 우리나라의 지진발생이 2배나 증가했다. 2000년대 들어서는 지진의 횟수가 연 평균 40회를 넘고 있다. 지진에 대해 안전지역이라고 생각하였던 우리나라도 1978년 홍성의 5.0, 1996년 영월의 4.7, 2007년 평창의 4.8 규모의 지진을 비롯해서 더 이상 지진으로부터 안전지대가 아님을 인식시켜 주었고, 매스컴과 많은 전문가들에 의해서도 지진으로부터 안전지대가 아님이 거론되고 있다.

따라서 건축법에서는 2005년 7월부터 3층 이상 연면적 1,000 m² 이상의 건물에는 내진설계를 의무화하고 있다.^{1,2)}

지진은 지각 에너지의 불평형으로 표출되며, 이때 방출되는 에너지의 양에 따라 우리의 실생활에 크나큰 물리적인 피해와 인명피해를 가져다준다. 에너지의 불평형은 지구내부에 작용하는 힘인 지구 조력에 의한 것으로 6개의 판으로 이루어진 지각은 이 지구 조력에 의하여 서로 밀면서 충돌하여 조산현상이 일어나기도 하고 판 아래로 침강하여 엄청난 마찰에너지를 방출하여 화산분출과 지진을 일으키기도 한다.

이와 같은 지진으로 인해 발생하는 재난 중 우리 인

간이 만들어 놓은 시설물에도 엄청난 피해를 입히고, 특히 건물 및 구조물의 붕괴와 가스 및 유류탱크의 화학물질의 폭발, 가스 파이프의 절단 등으로부터 대형 화재사고는 물론 건물붕괴에 따른 소방시스템의 파괴와 작동불능 등으로 화재를 감지하지 못하거나 소방용수 등을 공급할 수 없도록 하여 화재의 심각성을 더해 주고 인명피해를 가중시키기도 한다. 그 대표적인 사례가 1995년 1월 일본 고베에서 발생한 지진피해로써 대부분의 피해는 목조건물에 의해 도시 전체가 화재에 휩싸여 수많은 인명피해를 가져왔다.³⁾

100층이 넘는 초고층 건물이 건설 중이고 활성화되고 있는 현 시점에서 건축분야에서는 초고층 건물의 내진설계에 대한 연구가 왕성하게 이루어지고 있는 실정이다. 일반적으로 구조물의 주기가 길어질수록 지진에 의하여 발생하는 구조물의 가속도는 줄어들어 지진에 대한 위험도는 낮지만, 초고층이 주는 사회적 중요성, 붕괴 시 발생할 수 있는 막대한 피해, 발생된 구조 손상에 대한 보수·보강의 어려움 등으로 내진설계에 대한 전략적인 접근을 시도하고 있다.⁴⁾

소방에서도 지진으로부터 인명과 재산피해를 최소화할 수 있고 대처할 수 있는 체계적인 대비책이 절실히 필요한 실정이다. 예를 들면, 소방대상물에 설치되는 스프링클러, 옥내소화전 등과 같은 수계 및 가스계 소화시스템에 사용된 수많은 파이프라인이 지진에 대한 안전성과 신뢰성이 입증된 내진설계로부터 소방시스템의 운전 건전성(operability integrity)이 확보될 수 있도록 해야 한다.

본 연구에서는 수계시스템의 스프링클러 헤드 설치 파이프라인을 선정하고, 화재안전기준에서는 내진설계에 대한 규준이 없기 때문에 건교부의 내진설계 및 성능평가 기준(KBC 2005)²⁾을 바탕으로 내진설계와 평가 기법, 내진설계에 필요한 엔지니어링 데이터 취득방법 등을 제시함으로써 파이프 시스템의 신뢰성 향상과 안전성 제고를 위한 내진설계 및 성능위주설계가 이루어질 수 있는 기틀을 마련하였다.

2. 내진설계 및 평가

내진설계란 지진특성 및 지반의 특성을 고려하여 지진에 안전할 수 있도록 구조물(소방시스템 등)을 설계하는 것으로, 내진평가는 내진해석(seismic qualification)과 내진실험(seismic test)으로 구분된다. 가장 바람직한 것은 지진에 대한 구조물 전체를 내진실험을 하는 것이지만 구조물 제작과 설계변경의 어려움으로 내진해석을 통해 구조물의 안정성 평가와 설계를 실시하고 있다.

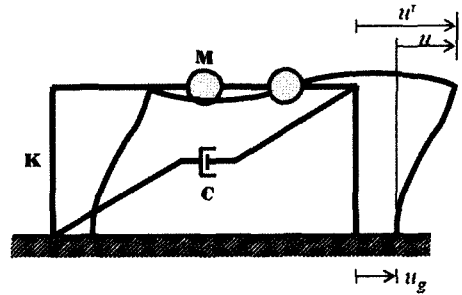


Figure 1. Structure for multi-degree of freedoms.

2.1 운동방정식

지반의 운동을 받고 있는 수계 파이프 시스템을 동역학적 모델로 나타내면 Figure 1과 같이 다자유도 계의 구조물로 나타낼 수 있다. Figure 1에서 M은 구조물의 질량, C는 감쇠, K는 강성을 의미하고, u'는 지진에 의한 구조물의 변위 u(t)와 지진에 의한 지반의 변위 u_g(t)의 합으로 나타난다.

Figure 1의 다자유도 구조물의 운동방정식을 행렬 식으로 나타내면 식 (1)과 같이 된다.^{5,6)}

$$\begin{aligned}
 [M]\ddot{u}'(t) + [C]\dot{u}'(t) + [K]u'(t) &= -[M]\ddot{u}_g(t) \\
 u'(t) &= u(t) + u_g(t) \\
 P_{eff}(t) &= -[M]\ddot{u}_g(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식 (1)에서 [M], [C], [K]는 지진을 받는 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 의미하고, $\ddot{u}'(t)$, $\dot{u}'(t)$, $u'(t)$ 는 지진에 의한 구조물의 가속도, 속도, 변위를 의미한다. 또 식 (1)에서 P_{eff}(t)를 유효지진하중이라고 하며, P_{eff}(t)는 내진해석에 있어서 가장 중요한 데이터로 실제 지진으로부터 발생하는 지반의 가속도 이력에 의해 구하거나 지진지역과 지역계수, 지반의 종류에 따른 설계 스펙트럼 가속도로부터 지진의 설계하중을 구하기도 한다.^{2,4)}

지진의 운동방정식 식 (1)의 해를 구하기 위해 동적 해석방법 중의 하나인 응답 스펙트럼 해석법(response spectrum analysis method)이 사용된다. 응답 스펙트럼 방법은 구조물의 최대 응답을 기준으로 필요 강도를 결정하기가 편리하고 진동주기와 구조물의 최대응답을 그래프로 표현이 가능하며, 내진설계에서는 구조물의 시간이력의 거동을 요구하지 않기 때문에 내진해석에서 가장 많이 사용한다. 지반 가속도에 대한 구조물의 상대변위를 결정하기 위해 식 (1)을 응답 스펙트럼으로 나타내면 식 (2)와 같이 된다.^{5,6,9)}

$$\ddot{u}_i(t) + 2\zeta\omega_n\dot{u}_i(t) + \omega_n^2 u_i(t) = -\ddot{u}_g^i(t)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \zeta = \frac{C}{2M\omega_n} \quad (2)$$

식 (2)에서 ω_n 은 구조물의 고유진동수이고, ζ 는 구조물의 감쇠비이다. 지진에 의한 구조물의 가속도, 속도, 변위벡터 $\ddot{u}(t), \dot{u}(t), u_g(t)$ 는 고유진동수 ω_n 이 구해지면 모드 중첩법(mode superposition method)에 의해 결정하게 된다.

2.2 지진하중

내진설계에서 최소한의 지진하중 및 하중조합을 어떻게 적용하느냐가 중요한 관건이다. 즉, 식 (1)에 나타난 유효지진하중 $P_{eff}(t)$ 를 결정하는 것이다. 유효지진하중은 각 지역별로 나타난 지진의 실측값을 이용하는 것과 예측값인 인공지진파를 이용하는 방법이 있다. 지진의 실측값을 이용하는 방법은 실제 지진이 발생한 지역의 진도값을 이용하는 것으로 정확도는 높지만 데이터 취득의 어려움으로 사용에 제약이 있기 때문에 지진하중으로 인공지진파를 작성하여 내진설계와 평가에 이용하고 있다. 이때 인공지진파에 의한 유효지진하중 $P_{eff}(t)$ 는 식 (1)에 나타난 바와 같이 지반의 가속도를 구함으로써 결정할 수 있고, 임의 지반의 가속도는 지반의 특성과 설계 스펙트럼 가속도를 결정함으로써 구할 수 있다.

지진하중은 지진발생 시 지반의 성질에 따라 구조물의 거동에 상당한 차이가 있기 때문에 KBC 2005²⁾에서는 우리나라를 Table 1과 같이 두 개의 지진구역으로 나누고 지반별 특성을 고려하여 지진하중 계산 시 해당지역의 위험도를 적절히 고려하여 합당한 지진하중을 산정할 수 있도록 지역계수로 나타냈다.

KBC 2005에서는 설계 스펙트럼 가속도를 0.2초 단주기 S_{DS} 와 1초 장주기 S_{D1} 으로 나누고 있다. 이들 두 주기는 5% 감쇠에 대한 가속도 스펙트럼이고, 이들 두 주기를 유효지반의 가속도와의 관계는 식 (3)과 식 (4)

Table 1. Seismic region and coefficients

	지진구역 구분	지역 계수
지진구역 I	- 서울, 6대 광역시(부산, 대구, 울산, 대전, 인천, 광주) - 경기도 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부	0.11
지진구역 II	- 강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07

Table 2. Design spectrum accelerations of short period

지반종류	지반종류의 호칭	지진지역	
		I	II
S _A	경암 지반	2.0MA	1.8MA
S _B	보통 압 지반	2.5MA	2.5MA
S _C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	3.0MA	3.0MA
S _D	단단한 토사 지반	3.6MA	4.0MA
S _E	연약한 토사 지반	5.0MA	6.0MA

Table 3. Design spectrum accelerations of 1 sec period

지반종류	지반종류의 호칭	지진지역	
		I	II
S _A	경암 지반	0.8MA	0.7MA
S _B	보통압 지반	1.0MA	1.0MA
S _C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	1.6MA	1.6MA
S _D	단단한 토사 지반	2.3MA	2.3MA
S _E	연약한 토사 지반	3.4MA	3.4MA

와 같다.

$$S_{DS} = 2.5 \times C_a \quad (3)$$

$$S_{D1} = C_v \quad (4)$$

지반가속도 C_a 를 2400년에 대한 2/3 수준의 극한하중의 스펙트럼 가속도 $M = 1.33$ 으로 하고, Table 1의 지역계수를 적용하여 지반의 종류에 따라 식 (3)과 식 (4)의 단주기 S_{DS} 와 장주기 S_{D1} 를 계산하면 Table 2와 Table 3과 같이 된다.²⁾ Table 2와 Table 3에서 A는 지진의 규모를 나타내는 진도를 의미한다.

2.3 설계 응답 스펙트럼

일반적으로 구조물의 진동주기가 짧은 경우에는 지반의 가속도(절대 가속도)는 최대값이 되고, 구조물의 진동주기가 아주 긴 경우에는 지반의 가속도는 거의 영(zero)이 된다.

내진설계 기준의 수평 지진하중은 설계 가속도 응답 스펙트럼으로부터 유도된다. 따라서 설계 가속도 응답 스펙트럼에 근접한 인공지진 진동파형을 작성하여 건물의 동적응답을 평가하는 것은 그 의미가 있다. 이에 따라 작성되는 인공지진 진동파형은 임의로 주어지는 가속도 응답 스펙트럼에 적합하도록 작성할 수 있게 된다.

본 연구에서는 내진설계기준을 참고하여 다음과 같이 설계 가속도 스펙트럼을 설정하였다.⁷⁻⁹⁾

$$T \leq T_0: S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} + 0.4 S_{DS} \quad (5)$$

$$T_0 \leq T \leq T_S: S_a = S_{DS} \quad (6)$$

$$T \geq T_S: S_a = \frac{S_{DS}}{T} \quad (7)$$

식 (5)~(7)에서 T는 구조물의 고유진동주기이고, $T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}$, $T_S = S_{D1} / S_{DS}$ 가 된다. 식 (5)~(7)는 감쇠비 5%에 대해 진동주기에 따라 설계 가속도 응답 스펙트럼 형상을 정의한 것이며, 식 (5)~(7)을 이용하여 진동주기에 따른 가속도 응답 스펙트럼 크기를 조정하면 다양한 지반특성과 지진활동에 따른 다른 지역의 설계용 가속도 스펙트럼을 구할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

내진해석을 위한 유효지진하중을 결정하기 위해 설계 스펙트럼 가속도를 이용하여 구하고, 이를 바탕으로 가속도 이력에 대한 수계 스프링클러 파이프 시스템에 대한 내진해석을 실시하였다. 내진해석을 위한 파이프 시스템의 모델링은 Solidworks¹⁰⁾를 이용하고 내진해석을 위한 동적 응답해석은 ANSYS¹¹⁾를 이용하였다.

3.1 설계 스펙트럼 가속도

설계 스펙트럼 가속도를 설정하기 위하여 지반지역을 Table 1의 지진지역 I로 가정하고, 단주기 S_{DS} 와 1초 장주기 S_{D1} 은 Table 2와 3에서 지반의 종류 S_D 인 단단한 토사지반에서 지진이 발생한 것으로 가정하였다. Table 2와 3에 의하면 $S_{DS} = 3.6MA$ 와 $S_{D1} = 2.3MA$ 이 되고, 지진규모는 진도 VII(0.25~0.3 g) 등급이 발생한 것으로 가정하였다. 진도 VII등급은 굴뚝이 무너지고 차안의 운전자가 느끼는 정도이며, 잘 지어진 건물의 경우에는 피해가 무시되는 정도이다. 이를 근거로 설계 가속도 응답 스펙트럼에 근접한 인공지진 진동파형을 시간이력에 대해 작성하면 Figure 2와 같다.⁹⁾

인공지진 진동파형은 모드 중첩법에 의해 계산된 것이다. $S_{DS} = 3.6MA$ 와 $S_{D1} = 2.3MA$ 일 때 최대 지반 가

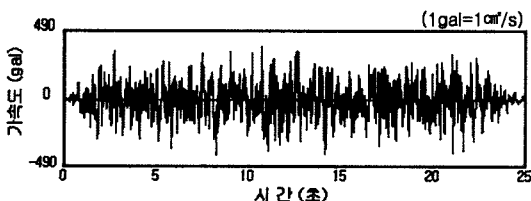


Figure 2. Acceleration-time of seismic history.

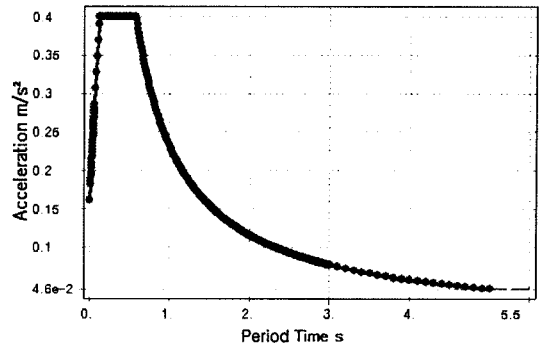


Figure 3. Accelerations of design spectrum.

속도 C_a 는 400 gal이고 최소 지반 가속도 C_v 는 -400 gal 정도가 된다.

작성된 인공지진 진동파형으로부터 식 (5)~(7)을 이용하여 진동주기에 따른 설계 스펙트럼 가속도를 그림으로 나타내면 Figure 3과 같이 된다.⁹⁾ Figure 3에 나타난 바와 같이 지진에 의한 지반의 운동은 약 0.3초에서 1초 내에 최대 활성화가 되어 스펙트럼 가속도가 최대가 되고, 이로부터 짧은 시간 내에 큰 피해를 주게 됨을 알 수 있다.

3.2 내진해석

내진해석을 위해 스프링클러 헤드 파이프라인을 선정하고, 파이프라인은 Figure 4와 같이 Solidworks를 이용하여 모델링하였다. 파이프라인의 규격 및 물리적 특

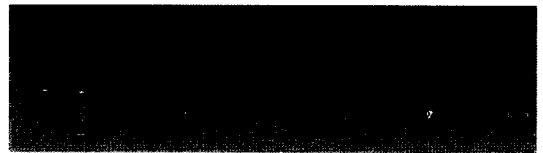


Figure 4. Modeling and boundary conditions of sprinkler heads piping line.

Table 4. Physical properties of piping systems

Dimension of piping lines	SPP15~150A×sch40
Young's modulus	2.e+011Pa
Poisson's ratio	0.3
Density	7850 kg/m ³
Thermal expansion	1.2e-005 1/°C
Tensile yield strength	2.5e+008 Pa
Compressive yield strength	2.5e+008 Pa
Tensile ultimate strength	4.6e+008 Pa
Compressive ultimate strength	0 Pa

성은 Table 4와 같다. Figure 4에서 ‘A’와 ‘B’는 파이프 행거의 위치이고, 이들 두 위치는 내진해석에서 경계조건이 된다.

내진해석을 위해 파이프라인은 유한요소해석의 상용 프로그램인 ANSYS®을 사용하였고, 응답 스펙트럼 해석을 위해 랜덤진동방법을 사용하였다. 파이프라인의 유한요소해석을 위해 Figure 4의 모델링을 셀 요소를 이용하여 Figure 5와 같이 메시 생성(mesh generation)을 하였으며, 생성된 메시는 211,230개의 절점과 40,584개의 셀 요소로 구성되었다. Figure 5는 Figure 4에서 ‘C’ 부분만 확대하여 메시 생성의 일부를 나타낸 것이다.

응답 스펙트럼의 변위계산에 사용될 파이프라인의 고유진동모드(Hz)를 모드해석으로부터 1차~12차까지 계산하여 Table 5에 제시하였다. 지진하중이 가해지지

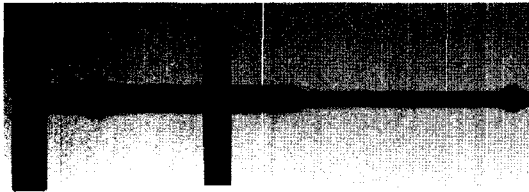


Figure 5. Mesh generation of sprinkler heads piping.

Table 5. Frequencies of sprinkler heads piping

Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1	14.010	7	59.523
2	14.024	8	59.661
3	33.287	9	88.769
4	33.403	10	89.987
5	40.285	11	95.600
6	47.035	12	96.145

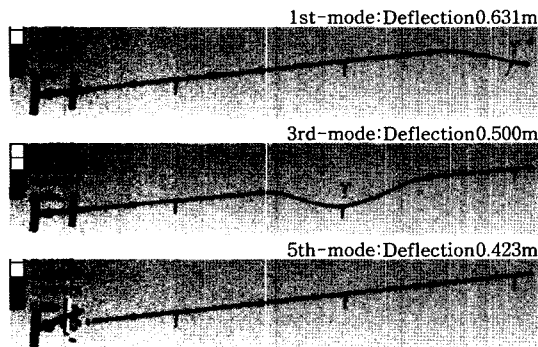


Figure 6. Deflection for each mode of sprinkler heads piping.

않은 상태에서의 변위 즉, Table 5의 각 고유진동모드에 대한 파이프라인의 변형을 나타내면 Figure 6과 같다. Figure 6은 지면의 한계로 1차, 3차, 5차 모드만을 나타냈다.

Figure 6에 나타낸 바와 같이 파이프라인이 저차 모드에서 손상(변형)이 가장 큰 것으로 나타났듯이 내진해석에서 지진하중은 이론상으로 손상이 가장 큰 주파수 영역은 1~33 Hz 범위인 것으로 알려지고 있고, 지진에 의한 지속적인 지반의 운동은 10~15초 범위인 것으로 알려져 있다. 따라서 지진에 의해 구조물에 가해지는 유효지진하중은 Figure 3의 설계 스펙트럼 가속도를 Table 5의 주파수 영역에 해당하는 응답 스펙트럼 가속도(PSDA)로 다시 나타내면 Figure 7과 같다. Figure 7의 유효지진하중은 응답 스펙트럼 해석에 사용되어 파이프라인 축방향의 변형과, 응력, 속도, 가속도 등을 계산하는데 사용된다.

Figure 7의 유효지진하중이 파이프라인에 작용할 때 파이프라인 축방향의 변형과, 응력, 속도, 가속도에 대한 응답 스펙트럼을 계산하면 Table 6과 같다.

Table 6에서 응답 스펙트럼의 변형과 응력을 이론값과 비교해보면 단단한 토사지반에 설치된 수계 파이프 시스템은 진도 VII의 지진을 견뎌내지 못하고 파괴된다고 볼 수 있다.

Figure 8~11은 파이프라인 축방향의 변형과, 응력, 속도, 가속도에 대한 응답 스펙트럼을 그림으로 나타낸

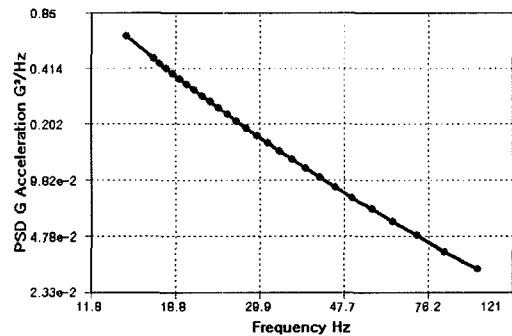


Figure 7. Frequency-acceleration of seismic loads.

Table 6. Response spectrum for X direction

Deflection (m)	Theory	0.0081
	Calculated	0.0112
Stress (MPa)	Theory	73.000
	Calculated	84.966
Velocity (m/s)	Calculated	0.9670
Acceleration (m/s ²)	Calculated	129.50

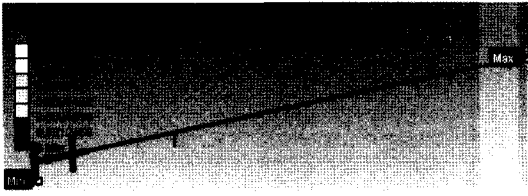


Figure 8. Response spectrum for deflection of X-Dir.

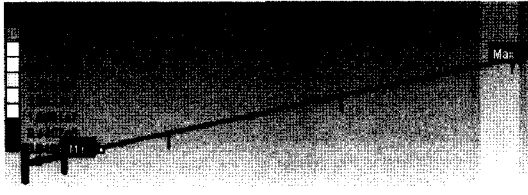


Figure 9. Response spectrum for stress of X-Dir.

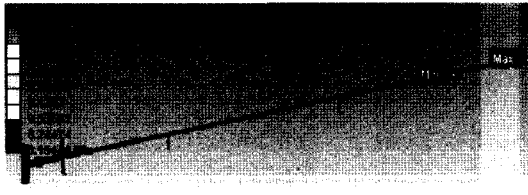


Figure 10. Response spectrum for velocity of X-Dir.

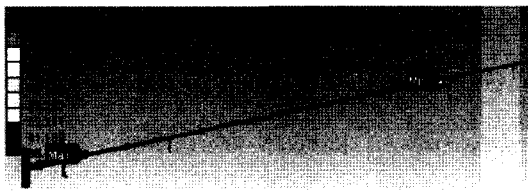


Figure 11. Response spectrum for acceleration of X-Dir.

것이다. Figure 8~11에서 Max와 Min은 최대값과 최소값의 위치를 의미한다. 이들 그림으로부터 응답 스펙트럼의 변형과, 응력, 속도는 Figure 6의 1차 모드와 같이 스프링클러 헤드 가 설치된 파이프라인의 말단부가 가장 취약한 것으로 나타났고, 가속도는 파이프의 크기를 감소시킨 리듀서 부분에서 가장 크게 나타났고 Figure 6의 5차 모드와 같이 리듀서 부분이 가장 취약할 것으로 예상된다.

이상의 내진해석결과로부터 서울을 비롯한 6대 광역시와 수도권 지역의 건물에 설치하는 수계 파이프 시스템 중 스프링클러 파이프라인은 화재안전기준대로 설계하여 시공하면 상당히 위험하다고 볼 수 있으며, 지진을 견뎌낼 수 있도록 파이프 두께가 다시 계산되어야 하고 행거의 위치와 감쇠효과를 줄 수 있는 재질

의 선정이 다시 이루어져야 한다.

5. 결 론

수계 시스템 중 스프링클러 헤드 설치 파이프라인을 선정하여 건교부의 내진설계 및 성능평가 기준을 바탕으로 내진설계를 실시하였다.

기존 화재안전기준에서 제시하는 방법으로 파이프를 설계하면 지진에 상당히 취약한 것으로 나타났고, 파이프 행거의 위치선정과 지진을 감쇠시킬 수 있는 재질의 변경이 불가피 할 것으로 사료된다. 내진설계를 위한 공학적 기반을 구축하였으며, 수계 및 가스계 파이프 시스템의 내진설계 기법을 제시하였다. 수계 시스템의 파이프라인뿐만 아니라 소방시스템의 내진설계 및 성능평가에 응용할 수 있는 기틀을 마련하였다.

본 연구를 바탕으로 향후 진도규모 및 지반종류에 따른 추가적인 연구가 수행된다면 소방시스템의 신뢰성 향상과 안전성 제고 및 진정한 성능위주의 설계가 이루어질 수 있을 것으로 보며, 소방도 반드시 지진에 대비한 설계가 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 한국건설기준연구원, “내진설계 기준연구(I)”, 건교부 (1996).
2. 건교부, “건축설계기준(KBC 2005)-내진설계기준 및 성능평가 기준”, 대한건축학회(2005).
3. 日本建築學會, “鐵筋 콘크리트 構造物の 耐震性能評價指針(案) 同解説”, 東京(2004).
4. 박홍근, 임태성, “초고층 건축물의 내진설계”, 건축학회, Vol.6, No.4, pp.72-75(2006).
5. S.S. Rao, “Mechanical Vibrations”, Addison Wesley, pp.190-230(1992).
6. R.W. Clough, “Dynamics of Structures”, McGraw Hill, pp.521-628(1975).
7. 전대환, 강병두, 김재용, “설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파에 의한 비선형 응답특성의 분석”, 한국지진공학회, Vol.10, No.5, pp.63-71(2006).
8. 전대환, 강병두, 김재용, “내진 설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파의 작성과 응답특성”, 한국지진공학회, 학술대회 논문집, pp.141-148(2006).
9. 이동명, 김엽래, “수계 파이프 시스템의 내진설계에 관한 기초 연구”, 한국화재소방학회, 추계발표 논문집, pp.33-37(2007).
10. Solidworks Co., “Solidworks 2007”(2007).
11. ANSYS Co., “ANSYS Ver.11”(2007).