

자동 가스차단 밸브의 동적 거동

The Dynamic Behavior of Earthquake-Actuated Automatic Gas Shutoff Devices

이 동 근* 김 태 호** 안 상 경** 임 용 재***
 Lee, Dong-Guen Kim, Tae-Ho Ahn, Sang-Kyung Im, Yongjae

Abstract

It can be seen through the previous earthquake damages that indirect damages such as those by fire are much greater rather than direct (firsthand) damage by earthquakes. Recently, gas is used very popularly all over the country but no measures have been taken against hazards (or dangers), for instance, such as fires caused by leaking gas pipes when earthquakes occur. Earthquake-Actuated Automatic Gas Shutoff Devices (Shutoff Device) are used to prevent such disaster in other countries. ChungJung Engineering. Co. is making a sample of a Shutoff Device for the first time in Korea. In this study, a derivation of mathematical model and the important effects of various variables on the shutoff device are mentioned.

1. 서 론

오늘날 가스는 청정연료로서의 효율성과 편리성 때문에 가정은 물론 산업전반에 걸쳐 널리 사용됨으로써 국민생활의 수준향상에 크게 기여할 뿐 아니라 산업발전에도 중추적인 역할을 담당하고 있다. 그러나 현대생활의 주에너지원으로서 가스사용이 급증하고 있고 지진 발생시에 사고발생 위험 및 강도도 높아지고 있다.

대구가스폭발(1995), 서울 아현동 도시가스폭발(1994) 등과 같은 대형사고는 사고현장 뿐만 아니라 가스배관을 통하여 주위에 많은 피해를 주어 이러한 이차적인 피해를 막기 위한 대책이 필요하게 되었다. 역사적으로도 이러한 피해를 막기위한 노력의 효과는 잘 나타나고 있다. 1906년 발생하였던 San Francisco지진⁽¹⁾은 지진 자체에 의한 피해보다는 지진으로 인하여 발생한 화재 때문에 도시 전체가 피해를 입은 것으로 잘 기억되고 있다. 즉, 가스 설비 및 수도 시설의 파괴 등으로 인하여 3일 동안 도시전체가 화염에 휩싸였다. 그 피해 원인은 지진동에 의한 피해가 5~20%, 화재에 의한 피해가 80~95%로 추정되고 있고 전체 사망인원의 3/4도 화재에 의한 것으로 보고 있다. 이 지진으로 인하여 내진설계 및 사고 예방에 대한 많은 연구를 불러 일으켰다. 그로부터 약 80여년 후인 1989년 역시 San Francisco에 흔히 Loma Prieta지진이라 불리는 지진이 일어났다. 리히터 규모 7.1에 이르는 이 지진은 내진 설계와 예방대책의 중요성을 잘 보여준 지진으로 적절히 설계된 건물들은 지진을 잘 견뎌내었고, 지진발생 후에 자연히 뒤따르기 마련인 화재도 역대 다른 지진에 비하여 상당히 적게 발생하였다.

* 정회원, 성균관대 건축공학과 교수

** 학생회원, 성균관대 건축공학과 대학원 박사과정

*** (주) 청정 엔지니어링 대표

자동 가스 차단밸브는 적정 수준 이상의 진동을 받을 경우 작동하여 배관의 파괴로 인한 가스 누출로 발생하는 화재 등의 위험을 효과적으로 줄일 수 있다. 특히 우리나라에서도 지진과 같은 충격에 의한 배관의 파손으로 인한 피해는 최근 몇 해 동안 발생한 가스폭발 사고의 결과로 미루어 그 피해가 클 것으로 예상된다. 최근 한반도에는 작은 규모의 지진이 계속 감지되고 있고 그 발생빈도 또한 점차 증가추세에 있으므로 가스 배관의 지진에 대한 대책은 필수적이다. 그러나 국내에서는 자동 차단 밸브에 대한 연구가 이루어지지 않은 상태이며 한반도가 지진의 안전지대가 아니라는 점은 차단 밸브에 대한 연구의 필요성을 강조하고 있다.

(주)청정에너지어링에서는 일정 규모 이상의 지진 뿐만 아니라 배관 망의 파열로 인한 대량의 가스 누출에 따른 대형 사고를 방지하기 위하여 긴급 차단용 안전 밸브를 개발하고 있다. 본 연구에서는 차단밸브의 작동 원리와 이론적 배경을 정립하고 연구결과를 이용하여 긴급 차단용 안전 밸브의 초기 설계를 가능하게 함을 그 목적으로 하고 있다.

2 지진에 작동하는 자동 가스차단 밸브에 대한 기준

현재 미국 캘리포니아와 같은 강진지역에서는 기준(ASCE 25-97)을 통하여 가스 차단 밸브의 성능 및 사용을 규정하고 있다. 지진에 작동하는 자동 가스차단 밸브에 관한 미국의 규정은 다음과 같은 내용을 가지고 있다.

2.1 자동 가스차단 밸브의 작동범위

밸브나 시스템의 감지장치가 반드시 작동해야 되는 범위와 작동하지 않아야 하는 범위를 그림 1에 나타내었다. 모든 밸브나 감지 장치는 모든 주기범위에서 그림 1에 제시된 작동 범위와 비작동 범위사이에 있어야 한다. 여기서 제시된 반드시 작동되어야 하는 테스트 포인트들은 수평방향의 조화하중(sin pulse)으로 가해진 것으로 차단장치를 5초안에 작동시켜야 한다. 이러한 조건은 감지 장치의 수평축에 적용된다. 작동되지 않아야 하는 테스트 포인트들도 또한 조화하중을 받으며 차단장치는 5초 이내에 작동하지 않아야 한다. 이 조건은 감지장치의 수평, 수직축 모두에 대해서 적용된다.

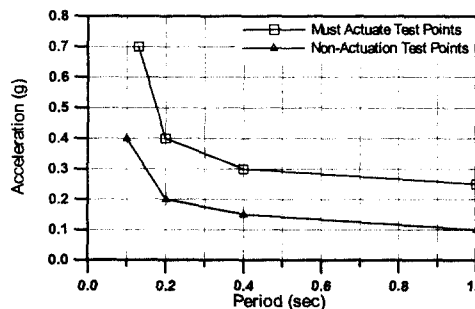


그림 1 자동 차단 밸브의 작동 범위

작동 범위는 Northridge지진을 기초로 하여 설정되었으며, 반드시 작동해야 되는 수준은 주요 진동수 영역인 2.5 Hz ~ 5.0 Hz에서 30%~50%정도 더 낮게 설정하여 잘 작동하도록 하였으며, 작동범위 내에서는 가스가 새는 등의 구조적인 손상을 입지 않도록 하여야 한다. 반면 작동하지 않아야 하는 범위는 각 시험 진동수 범위에서 작동 수준보다 0.15g ~ 0.20g 낮게 조정되어있다. 이것은 작동 범위에 충분한 여유를 두어 지진에 대하여 장치의 다양성을 확보하고, 또한 낮은 가속도 수준에서 작동하여 시간 및 경제적으로 피해를 주지 않기 위한 조치로 보인다. 위에서 제시된 가

속도 응답은 1981년 승인된 ANSI Z21.21과 비교하면 작동범위에 대하여 상당히 세부적인것으로 보인다. 참고로 ANSI Z21.21에서 제시한 작동 범위는 다음과 같다.

- (1) 밸브나 시스템의 감지장치는 0.3g의 피크 가속도와 0.4초의 주기를 가진 수평방향의 조화진동(sin pulse)을 받게 할 때 5초 이내에 차단 작동을 하여야한다.
- (2) 밸브나 시스템의 감지장치는 (가) 0.4g(3.92m/s²)의 피크 가속도를 0.1초의 주기로, (나) 0.08g(0.78m/s²)의 피크 가속도를 0.4초의 주기로, (다) 0.08g(0.78m/s²)의 피크 가속도를 1.0초 주기로하는 조화진동을 5초 동안 받아 작동하지 않아야 한다.

2.2 자동 차단 밸브의 시험 방법

규준에서는 밸브의 작동영역을 확인하기 위하여 시험 방법을 제시하고 있으며 주요사항을 정리하면 다음과 같다.

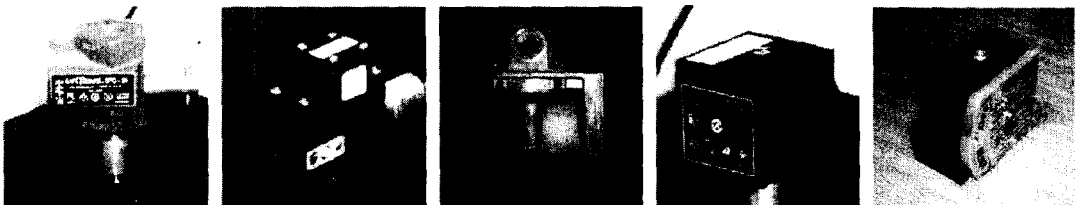
- (1) 차단 밸브 테스트는 3개의 표본으로 수행하며 이 표본들은 동시에 실험할 수 있다.
- (2) 차단 밸브는 진동대 테이블 표면에서 15cm 이내에 설치해야 한다.
- (3) 시험 가속도는 서서히 증가되어야하며 비동작 범위에서 5초동안 가진한다. 가속도의 증가 비율은 1초당 0.01g를 초과해서는 안된다.
- (4) (3)의 시험을 만족할 경우 시험 가속도를 다시 서서히 증가시켜 차단장치가 작동할 때까지 가진한다.
- (5) 실험되고 있는 장치는 제조업자의 설명대로 설치해야 하며 진동대는 시험에서 요구하는 사항을 나타낼 수 있어야 한다.
- (6) 실험은 가속도의 방향과 동일하게 원래의 위치에서부터 각각 45°, 90° 그리고 135° 회전된 방향에서 각각 3회에 걸쳐서 반복한다.

3. 긴급 가스 차단밸브의 작동원리

3.1 기존 자동 차단 밸브의 작동원리

현재 미국에서 상용화되어있는 가스 차단밸브 중 일부를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a) 밸브는 1방향으로만 작동하는 단점을 가지며, (b)와 (c)는 어떤방향의 수평하중에도 작동하도록 설계되어 있다.

가스 차단밸브의 작동원리는 크게 두가지로 나눌 수가 있으며 그림 2에 나타낸 제품들에 대하여 그 대표적인 작동원리를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 (a)는 제품 A에 대한 단면으로 이 밸브는 한 방향으로만 작동한다. 작동원리는 오목한 면에 있는 구슬이 기준치 이상의 가속도를 받으면



(a) 제품 A

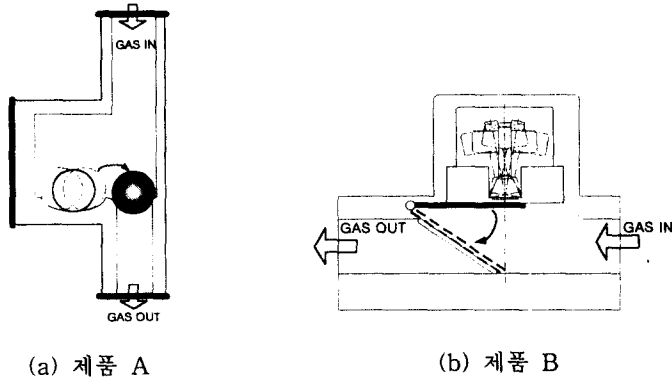
(b) 제품 B

(c) 제품 C

(d) 제품 D

(e) 제품 E

그림 2 긴급 가스 차단밸브의 형상



(a) 제품 A (b) 제품 B

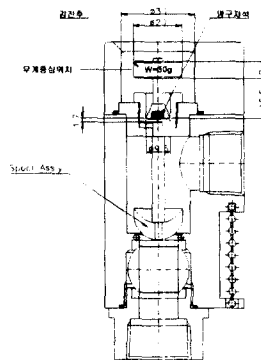
그림 3 기존 가스 차단밸브의 작동원리

면 가스의 통로를 막아 가스를 차단하도록 하는 것이다. 그림 2의 (c) 밸브는 상하부 막대 사이에 구슬을 끼워넣고 기준치 이상의 지반가속도가 가해질 경우 구슬이 떨어지고 이에 따라 상부의 막대가 아래로 내려가면서 가스의 흐름을 차단하는 장치도 있다. 다음으로는 추(감진추)를 이용하는 방법으로 그림 3의 (b)는 감진추와 바로 밑의 가스차단판이 자력에 의하여 붙어있다가 지진하중을 받기 시작하면서 감진추가 흔들리게 되고 이에 의하여 가스차단판의 자력이 감진추에 충분히 붙어 있기 어렵게 되어 힌지로 고정된 가스차단판이 아래로 떨어져 가스의 통로를 차단하게 되어있다. 이 차단 밸브는 어떤 방향의 지진하중에도 작동하도록 되어있는 것이 특징이다.

3.2 개발중인 자동 차단 밸브의 작동원리

그림 4의 (a)는 (주)청정엔지니어링에서 제작한 CJ2001 모델의 사진이다. 그림 4 (b)는 개발 모델의 단면으로 진동에 대해서는 상부의 감진추가 작동하여 하부추를 떨어뜨리고 과도한 가스압에 대해서는 하부추가 압력을 받아 통로를 차단하는 형태로 설계되어 있다.

그림 5는 내부의 감진추 형상으로써 일정 이상의 지진동을 받을 때 정지되어 있던 감진추가 평형을 잃어 그림 6과 같이 작동을 하게 되고 하부에 매달려 있던 spool assembly와 감진추 하부에 있는 자석과의 거리가 멀어져 자력이 낮아지면서 spool assembly의 무게보다 작을 경우에는 spool assembly가 아래로 떨어져 가스밸브의 통로를 차단한다.



(a) 긴급 가스 차단밸브 사진 (b) 긴급 가스 차단 밸브의 단면

그림 4 개발중인 긴급 가스 차단밸브

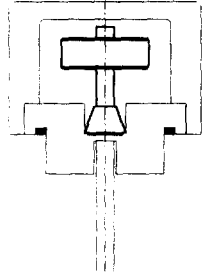


그림 5 감진추의 형상

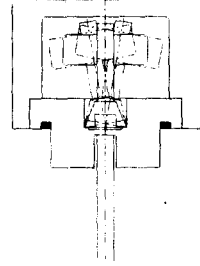


그림 6 감진추의 작동

감진추의 허용가속도값은 추의 무게, 추의 무게중심 높이, 영구 자석의 자력 등을 통하여 조절이 가능하며 이러한 설계 변수에 의하여 감진추의 진동을 발생시키는 지반가속도의 크기가 결정된다.

4. 자동 차단 밸브의 동적해석

4.1 자동 차단 밸브의 모형화

해석을 위하여 감진추는 그림 7과 같이 모형화 할 수 있다. 감진추에 가해지는 힘은 지진에 의한 지반가속도와 감진추 질량의 곱으로 표현되고, 하중에 저항하는 힘은 자력 $P(\theta)$ 로 및 중력에 의한 것으로 표현된다. 이를 종합하여 감진추의 동적 평형방정식은 식(1)과 같이 표현된다. 이러한 모형화를 위해서 감진추의 질량은 추의 질량만을 고려하였으며 감진추의 거동은 감진추 저면의 각변화는 미소하다고 가정하였다.

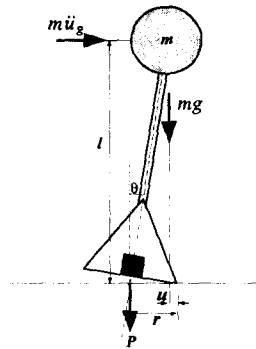


그림 7 감진추의 해석모형

$$m \ddot{u}_g l - mg u = P(\theta) r \quad (1)$$

m : 추의 질량, \ddot{u}_g : 지반가속도, g : 중력가속도, r : 밀면의 반지름

$P(\theta)$: 각에 따른 자력, l : 추의 무게중심까지의 거리

여기서, $u = r - l\theta$ 이므로 식(1)의 u 항을 바꾸어 지반가속도에 관한 식으로 정리하면 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{u}_g = \frac{P(\theta)r}{ml} - g\theta + \frac{gr}{l} \quad (2)$$

식(2)를 살펴보면 감진추가 저항할 수 있는 가속도는 밀면의 반지름 r 에 비례하고 감진추의 중심에서 밀면까지의 거리 l 에 반비례한다. 감진추 질량 m 도 저항가속도에 반비례하지만 상대적으로 변수 r 이나 l 에 비하여 영향이 적음을 알 수 있다.

4.2 매개변수에 따른 자동 차단 밸브의 거동 분석

spool assembly가 자석과 이루는 거리와 자석의 자력에 대한 항은 가스의 과류에 대한 해석과 관련되므로 본 연구에서 이 항들은 고정된 것으로 보았다. 따라서 설계 변수로는 감진추 무게와 추에서 저면까지의 거리(l) 등이 있으며 이러한 변수의 변화에 따른 저항가속도를 검토하였다. 이 경우 해석모델에서 밀면의 반지름은 3mm 이고, 밀면의 자석에 매달린 spool assembly의 무게는 0.0235 kgf로 계측되었다.

감진추가 작동함에 따라 감진추의 밀면이 흔들리게 되고 이에 따라서 자력이 변화한다. 이 자력이 하부추의 무게보다 작게 되면 하부추가 떨어져 밸브를 막아 가스의 흐름을 차단하게 된다. 해석에 사용된 자석은 직경이 5 mm이고 높이가 3 mm이다. 표 1은 해석에 적용한 자석의 자력을 거리에 따라서 나타낸 것으로 자석과 하부추와의 거리는 기본적으로 1.70 mm이며, 표에 나타낸 굵은 선은 하부추의 무게와 평형을 이루는 거리를 나타낸다. 이 표를 참고로 하면 대략 감진추의 각도가 6.0° 정도에서 spool assembly가 떨어질 것으로 예상된다. spool assembly의 무게가 굵은 선 표시한 자력보다 클 경우에는 감진추의 미소한 흔들림에도 spool assembly는 떨어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 spool assembly의 무게는 초기 설계시 적절히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

표 1 $\phi 5 \times 3H$ 자석의 자력

(단위 : kgf)

기울기 거리mm	0.0°	0.5°	1.0°	1.5°	2.0°	2.5°	3.0°	3.5°	4.0°	4.5°	5.0°	5.5°	6.0°	6.5°	7.0°	7.5°	8.0°
1.6	0.042	0.041	0.039	0.038	0.038	0.036	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027	0.025	0.025	0.025	0.023	0.023
1.7	0.038	0.037	0.035	0.035	0.034	0.032	0.031	0.028	0.027	0.027	0.024	0.023	0.023	0.022	0.021	0.020	0.020
1.8	0.035	0.034	0.032	0.032	0.031	0.029	0.028	0.028	0.025	0.025	0.024	0.022	0.022	0.021	0.020	0.019	0.019
1.9	0.031	0.030	0.028	0.028	0.028	0.027	0.026	0.025	0.023	0.022	0.022	0.020	0.020	0.019	0.019	0.017	0.017
2.0	0.028	0.028	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024	0.022	0.021	0.020	0.020	0.018	0.018	0.017	0.016	0.016	0.016
2.1	0.026	0.025	0.023	0.023	0.023	0.022	0.022	0.021	0.019	0.018	0.018	0.016	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014
2.2	0.024	0.022	0.021	0.022	0.022	0.020	0.020	0.019	0.018	0.016	0.016	0.015	0.015	0.014	0.013	0.013	0.013
2.3	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.019	0.018	0.018	0.016	0.015	0.015	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012
2.4	0.020	0.019	0.018	0.019	0.018	0.017	0.016	0.016	0.014	0.014	0.013	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011	0.011
2.5	0.018	0.018	0.016	0.016	0.016	0.016	0.015	0.015	0.013	0.013	0.012	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010

1) 밀면의 반지름(r)과 무게중심거리(l)비의 변화에 따른 가속도 응답

밀면의 폭(r)과 길이의 비를 변화시켰을 경우는 식 (3)과 같다. 이때, 추의 질량은 $3.06E-05$ kg 이며 밀면의 반지름(r)은 3mm로 고정하고 추의 무게중심거리(l)을 변화시켰다.

$$\ddot{u}_g = \left\{ \frac{r}{l} \left(\frac{P(\theta)}{mg} + 1 \right) - \theta \right\} g \quad (3)$$

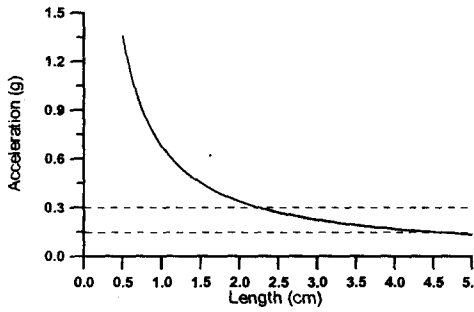


그림 8 감진추 각도가 0° 일 경우의 무게중심거리에 따른 가속도 응답

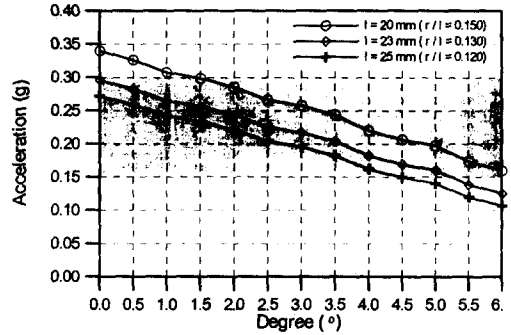


그림 9 무게중심거리의 변화에 따른 가속도 응답의 변화

그림 8은 감진추의 각도가 0° 일 경우에 감진추 밑면과 무게중심과의 거리(l)의 변화에 따른 최대 저항가속도의 변화를 나타낸 것으로 빗금친 부분은 규준에서 제한하는 작동범위를 나타낸 것이다. 즉 0.3g이하의 응답을 얻기 위해서는 대략 2.3cm 이상의 무게중심 거리가 필요한 것으로 나타났다. 그림 9는 이를 기준으로 하여 무게 중심 거리를 20mm, 23mm 그리고 25mm 세가지에 대하여 각도의 변화에 따른 가속도 응답을 나타낸 것이다. 이때, 자력은 감진추가 진동하면서 자석과 하부에 매달린 spool assembly와의 거리가 변하게 되므로 이에 대한 변화를 고려하여야 한다.

해석 결과에 의하면 무게중심 거리(l)가 23mm 이상일 경우에는 적절히 작동하는 것으로 나타났다. 이것은 실험 상황에서 점차 증가하거나 동일한 크기의 지반 가속도를 가하게 되므로 결국 추를 움직이기 위한 초기 가속도 값이 감진추의 안정성 여부를 결정하게 된다. 따라서, spool assembly가 떨어져 밸브를 차단하는 각도인 6.0° 에서의 가속도 응답은 크게 중요하지 않게 된다. 이러한 관점에서 보면 무게중심 거리(l)이 23mm이상인 경우에 차단각도인 6.0° 에서의 가속도 응답이 비작동 가속도인 0.15g미만이 되어도 큰 문제가 없게 된다. 하지만, 무게 중심 거리(l)이 20mm인 경우에는 감진추를 움직이기 위한 가속도가 0.34g에 이르기 때문에 반드시 작동해야 되는 0.3g범위에서는 추가 움직이지 않게 된다. 따라서, 이 경우 차단각도인 6.0° 에서의 가속도 응답이 비작동 가속도인 0.15g를 넘어 적절하게 보이지만 초기에 추의 무게 중심이 흐트러지지 않아 밸브가 차단되지 않는 상황이 되어 부적절하다.

2) 감진추 질량의 변화에 따른 가속도 응답

전 절에서 얻어내었던 결과를 바탕으로 r 은 3mm, l 은 23mm로 하여 식(3)에 대입하면 이때의 최대 가속도는 식(4)과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{u}_g = \left\{ 0.13 \frac{P(\theta)}{mg} + 0.13 - \theta \right\} g \quad (4)$$

해석에 필요한 추질량의 산정을 위하여 먼저 추의 각도가 0° 일 경우에 대하여 해석을 수행하였으며 해석 결과는 그림 10에 나타내었다. 규준에서 0.3g이하의 가속도 응답을 요구하고 있으므로 그림 10에서 보면 대략 3.0E-05 kg이상의 질량이 필요하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 3.0E-05 kg이상의 질량이 적절한 것으로 판단되며, 해석에는 2.5E-05 kg, 3.0E-05 kg 그리고 3.5E-05 kg의 질량을 가진 감진추에 대하여 각도가 변함에 따른 가속도 응답을 해석하였으며 해석 결과는 그림 11에 나타내었다. 빗금친 부분은 작동범위를 표시한 것으로 3.0E-05 kg이상의 질량을 가진 감진추는 규준에 대하여 적절하게 작동하는 것으로 나타났다.

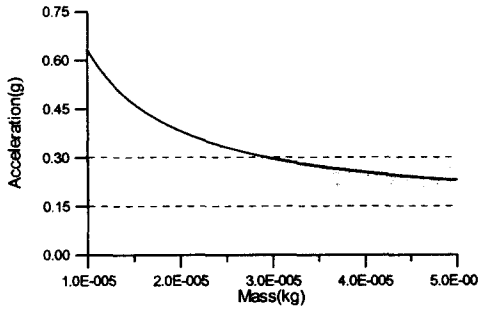


그림 10 추 각도가 0° 일 경우의 감진추 질량의 변화에 따른 가속도 응답

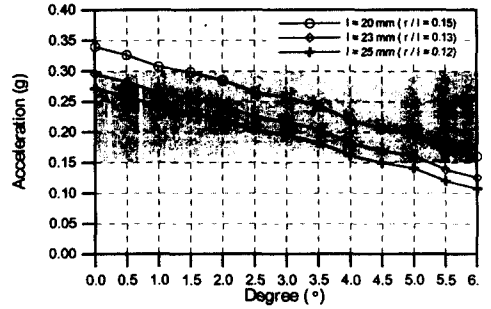


그림 11 감진추 질량의 변화에 따른 가속도 응답

추 질량은 예상된 바와 같이 무거울수록 작은 지반가속도에도 흔들리게 되지만 질량을 고정시켜 놓고 볼 때 감진추의 기울기 정도는 감진추의 무게중심거리를 변화시켰을 때의 기울기와 비슷하지만 적절한 가속도 수준을 찾기 위하여 상당히 많은 질량의 변화가 필요함을 알 수 있다. 따라서 추질량을 주요 변수로 하여 조절하는 것보다는 추의 각도가 0° 일 경우에 대하여 적절한 저항 가속도를 갖는 질량을 선택하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 지진발생에 따른 차단 밸브의 작동원리와 이론적 배경을 알아보고 자동 가스 차단 밸브의 초기 설계를 위하여 여러 가지 변수를 이용하여 해석을 수행하였다. 앞에서 살펴본 내용을 정리하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 개발중인 밸브의 감진추에 대한 설계에 영향을 미치는 변수로는 자력, 감진추 무게, 밀면의 반지름과 추 무게중심과 거리의 비 등이 있는 것으로 나타났으며 설계 변수로서 밀면의 반지름과 추 무게중심과의 거리의 비를 조절하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.
- 2) 현재 시제품으로 제작중인 밸브의 감진추를 설계할 경우 추무게가 0.03 kg일 경우에는 감진추의 무게 중심거리가 최소한 23mm 이상이 필요한 것으로 판단된다.

위에서 얻은 해석적 결과는 추후 실험을 통하여 이론치와 비교하는 것이 필요하며 규준에 적합성 여부를 검증하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 (주) 청정 엔지니어링의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Berg, V. Glen., "Seismic Design Codes and Procedures", EERI, 1982
- 2) ASCE Standard 25-97, Earthquake-Actuated Automatic Gas Shutoff Devices, ASCE, 1997
- 3) ANSI Z21.21, Automatic Valves for Gas Appliances, American Gas Association, 1981
- 4) Paz, M., "Structural Dynamics: Theory and Computation", Van Nostrand Reinhold, 1985
- 5) Weaver, W. Jr., Timoshenko, S. P. and Young, D. H., "Vibration Problems in Engineering", John Wiley & Sons, 1989