

# 가속도에 민감한 종합병원 의료 및 기계설비의 내진성능 평가

## Seismic Performance Evaluation of Acceleration-sensitive Medical and Mechanical Equipments in General Hospitals

김태원<sup>1)</sup> · 김승래<sup>1)\*</sup> · 추유림<sup>1)</sup> · 반다리 디워스<sup>1)</sup>

Kim, Taewan<sup>1)</sup> · Kim, Seung Re<sup>1)\*</sup> · Chu, Yurim<sup>1)</sup> · Bhandari, Diwas<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>강원대학교 건축공학과

<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

### / A B S T R A C T /

The main function of the general hospital building is to provide medical facilities and service. However, damage to the non-structural elements such as architectural, medical, mechanical and other components will interrupt those functions after the earthquake. Especially, it is considered that, damage to the non-structural elements is a serious event because it is directly associated with the lives of patients. Therefore, this study evaluated whether the certain non-structural elements of general hospital building has the seismic performance to provide hospital medical services after the earthquake. The evaluation is conducted by selecting the non-structural elements used in general hospital which are sensitive to acceleration, such as cooling towers, air handler, MRI and CT. As a result, the non-structural elements located on the upper floor without suitable support method did not meet the performance objective. Therefore, adequate anchorage against the seismic event is required for such non-structural elements that are acceleration-sensitives.

**Key words:** Hospital building, Non-structural element, Seismic performance evaluation, Performance objective, Anchorage

## 1. 서론

2017년 11월, 포항지역에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 구조요소뿐만 아니라 비구조요소에도 많은 피해가 발생하였다. 필로티건물 1층 기둥의 전단파괴 등 구조요소의 피해가 발생하였으며 천장이나 외부마감재들이 낙하되고 실내의 기타 요소들이 넘어지거나 깨지는 등 비구조요소의 피해가 발생하였다. 다행히도, 화재나 감전 등의 연쇄피해와 사망자는 발생하지 않았지만, 약 551억 원의 재산피해를 낳았다[1].

현재까지 국내 건축물의 내진성능평가 대상은 철근콘크리트, 철골 등의 보·기둥 등 구조요소가 주를 이루었으며 건물의 실질적 사용에 중요한 건축, 기계, 전기 등과 같은 비구조요소에 대한 내진성능평가는 주된 관심에서 떨어져 있었다. 지진 발생 시 구조시스템의 손상이 미비할지라도 건물 내

부에 위치해있는 비구조요소는 손상을 입을 수 있으며 심각한 경우, 화재 및 폭발, 누수 정전 등 연쇄 피해로 인해 심각한 손실을 초래할 수 있다. 특히, 실의 위생을 중요시하고 거동이 불편한 다수의 환자들을 수용하는 종합병원에서 비구조요소 손상은 병원의 핵심 기능인 의료서비스의 중단으로 이어질 수 있다. 또한 의료서비스의 중단은 환자들의 인명피해로 직결될 수도 있다. 따라서 종합병원에서는 비구조요소의 내진성능을 더욱 중요하게 고려해야 한다.

국내 건축구조 기준인 KBC2016 [2]와 미국의 ASCE7-10 [3]에서는 종합병원을 응급비상 필수 시설물로서 지진이나 태풍 또는 다른 비상시 긴급대피 수용시설로 분류하고 국내에서는 이에 대한 중요도를 ‘특’ 등급으로, 미국에서는 위험범주 ‘IV’로 지정하고 있다. 따라서 종합병원은 중요도계수 1.5를 사용하여 상대적으로 더 높은 수준의 내진성능을 확보하도록 설계된다. 또한 종합병원은 상해를 입은 환자들을 짧은 시간에 수용하고 빠르고 적절한 응급치료가 이루어져야 하기 때문에 건물의 구조요소뿐만 아니라 병원을 이루는 모든 비구조요소들 또한 지진 발생 후에도 제 기능을 유지할 수 있어야 한다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 지진에 의한 종합병원 구조요소의 손상이 미약하더라도 비구조요소의 피해가 특정 수준 이상으로 발생되면

\*Corresponding author: Kim, Seung Re

E-mail: srkim92@kangwon.ac.kr

(Received December 22, 2017; Revised March 27, 2018; Accepted April 6, 2018)

**Table 1.** Information of non-structural elements

Category	Utility facility			Medical equipment		
	Cooling tower	Air Handler (42)	Air Handler (30)	CT	MRI (1.5)	MRI (3.0)
Element						
Location (floor)	Roof	5F	Roof	1F	1F	1F
Weight (kN)	123	42	30	30	58	85
Size (m) (width x length x height)	5.6 x 5.3 x 4	6.8 x 2.7 x 2	6.1 x 2.1 x 2	2.4 x 1.2 x 2	1.6 x 1.4 x 2.3	2.0 x 1.8 x 2.3
Support method	Anchor bolt	None	None	Anchor bolt/None	None	None



(a) Damage of sprinkler at new olive view medical center



(b) Damage of ceiling at kona community hospital

**Fig. 1.** Examples of non-structural damage at hospital [5]

재해복구의 컨트롤 타워로서 제 기능을 유지할 수 없음을 의미한다.

실제로, 미국에서는 1994년 Northridge 지진 이후 캘리포니아지역 병원 20여 곳이 상당한 피해를 입었고 일부 병원에서는 서비스를 중지하기도 하였으며 [4] 이 중 New Olive View Medical Center는 구조요소에 대한 피해는 경미한 반면, 천장, 스프링클러, 장비의 앵커 등 비구조요소에 대한 막대한 피해를 입어 서비스를 중지하였다 (Fig. 1(a)). 또한 하와이에 위치해있는 Kona Community Hospital은 2006년 지진으로 인하여 거의 모든 위치의 천장재가 파괴되어 (Fig. 1(b)) 환자들을 퇴원시키거나 이송시켰다 [5].

이러한 피해를 줄이기 위해 미국에서는 의료시설에 대한 관련 법률 제정 등을 담당하는 기관이 별도로 존재하며 이에 대한 행정기준 [6-8]을 제정하여 구조요소뿐만 아니라 비구조요소의 내진성능을 점검토록 규정하며 불응 시 강력한 제재를 가하고 있다. 국내에서도 최근 ‘종합병원, 병원, 요양병원 내진설계기준 [9]’이 제정되었으나 이 기준은 건축구조기준인 KBC2016 [2]를 준용하였기 때문에 종합병원의 내진설계기준이라 하더라도 사실상 현행 구조기준을 따르는 것과 다름이 없다. KBC2016에서는 종합병원과 같은 내진·특·등급인 건축물의 비구조요소에 대한 설계조항이 있지만 이에 따라 설계한 비구조요소가 어떤 수준의 지진에 대하여 어느 정도의 성능을 보유하는지 확인해 볼 필요가 있다. 따라서 본 연구는 종합병원의 특정 비구조요소들이 지진 발생 후 정상적인 기능을 유지하여 병원의 의료서비스를 제공할 만한 내진성능수준을 보유하고 있는지 확인하였다. 이를 위해, Kim and Hong [10]이 제안한 내진성능평가를 위한 위계구조를 바탕으로 종합병원에서 사용하는 비구조요소 중 유지관리장비와 의료장비에 해당되는 요소를 선정하였다. 선정된 요소 중 유지관리 장비에 해당되는 비구조요소는 냉각탑과 공조기, 의료장비는 MRI와 CT이다.

지진발생 후에도 병원의 정상적인 운영을 위해 종합병원의 비구조요소가 사용가능한 상태여야 함은 논란의 여지가 없을 것이다. 이를 평가하기 위해서는 각 비구조요소의 성능수준별 허용기준을 정의해야하며 본 연구에서는 ASCE41-13 [11]을 참고하였다. 또한 내진성능평가를 위해 종합병원의 비구조요소에 대한 성능목표와 평가방법, 절차에 대한 개념을 정립하였다. 이때, 비구조요소를 강체로 가정하여 거동모드를 분석하고 이에 대한

허용기준을 정립하여 내진성능평가를 실시하였다. 평가를 위하여 비선형 동적해석을 실시하였고 이를 기반으로 강체의 관성력을 산정하여 요소별 지지방법에 따른 저항능력을 산정하여 비교하였다. 강체의 저항능력은 앵커볼트지지와 지지방법이 없는 경우에 대해 고려하였다.

## 2. 종합병원의 주요 비구조요소

비구조요소란 전체 건축물의 구성요소 중에서 구조시스템을 제외하고 건물의 기능에 영향을 미치는 요소를 의미한다. 일반 상업용 건물이나 공동주택 건물의 비구조요소는 크게 건축, 기계, 전기, 기타요소로 분류할 수 있다. 건축요소는 내·외부 마감, 칸막이벽, 천장 등이다. 기계요소는 보일러, 물탱크, 각종 덕트 및 파이프 등이다. 전기요소는 조명 및 통신장비 등이 있으며, 선반과 같은 가구류를 기타요소로 취급한다. 종합병원에서의 비구조요소는 특수성을 고려하여 의료서비스에 초점을 맞춰 분류할 수 있다. Kim and Hong은 병원건물의 내진성능평가를 위해 위계구조를 정립하였으며 기계 및 전기장비들을 의료장비와 유지관리시설로 분류하였다. 의료장비는 수술실, 응급실, 방사선실의 장비 등이며 유지관리시설은 각종 배관, 전력공급 장비, 물탱크, 냉각탑, 공조기 등이다. 본 연구를 위해 선정된 비구조요소인 유지관리시설(냉각탑 & 공조기) 및 의료장비(MRI & CT)에 대한 정보를 Table 1에 정리하였다.

### 2.1 냉각탑 및 공조기

유지관리시설에 해당되는 냉각탑(Cooling tower)과 공조기(Air Handler)는 건물의 용도·용량 등을 고려하여 기기의 종류와 개수, 위치 등을 선정한다. 본 연구에 사용된 냉각탑·공조기의 위치와 제원은 일반적인 종합병원의 실의 용도와 건물의 크기 등을 고려하여 가정하였다. 냉각탑의 크기는 폭 5.6 m, 길이 5.3 m, 높이 4 m로, 가동 시 중량은 123 kN으로 가정하였다. 냉각탑을 설치하는 일반적인 방법을 고려하여 Fig. 2와 같이 높이 0.8 m인 콘크리트 기초 위에 직경 12 mm, 길이 100 mm인 콘크리트용 후설치앵커 2개가 12곳에서 냉각탑(Cooling tower\_Anc)을 지지하는 것으로 가정하였다. 일반적으로 냉각탑의 경우, Vibration isolator를 사용하지만 본 연구에서는 이에 대한 영향은 고려하지 않았다. 5층 공조기의 크기는 폭 6.8 m, 길이 2.7 m, 높이 2 m로, 가동 시 중량은 42 kN으로 가정하였다. 옥상공조기는 폭, 길이, 높이가 각각 6.1 m, 2.1 m, 2 m인 크기를 갖고, 가동 시 중량은 30 kN인 것으로 가정하였다. 공조기(Air Handler\_Non)는 냉각탑과 달리 앵커볼트로 지지하지 않으며, 소음 진동방지 고무패드위에 설치되어 있는 것으로 가정하였다.

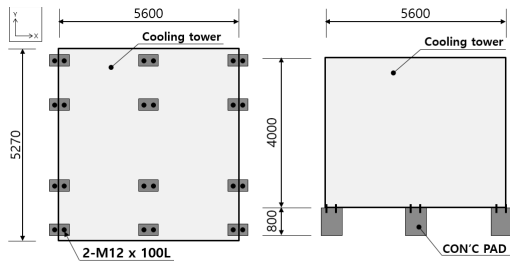


Fig. 2. plan & front view of cooling tower (unit: mm)

## 2.2 CT 및 MRI

CT 및 MRI실은 보통 기계실, 촬영실, 조정실로 구분되어 있다. 기계실에는 장비운용에 필요한 기계설비가 위치되어 있으며 촬영실에는 CT 또는 MRI, 조정실에는 사용자가 장비를 조정할 수 있는 시스템이 있다. 이 연구에서는 기계실 및 조정실의 장비들은 고려하지 않았으며 촬영실의 CT와 MRI 본체에 대한 평가를 실시하였다. CT의 크기는 폭 2.4 m, 길이 1.2 m, 높이 2 m로 가정하였다. CT는 장비 내부의 시스템이 고속 회전하기 때문에 촬영 중 장비의 움직임이 생길 수 있으므로 앵커볼트를 설치한다 (CT\_Anc). 하지만 종류에 따라 앵커볼트로 지지하지 않는 경우(CT\_Non)도 있기 때문에 본 연구에서는 두 가지 지지방법을 모두 고려하였다. 앵커볼트는 직경 12 mm, 앵커길이 150 mm인 콘크리트용 웨지앵커 4개를 콘크리트 기초가 아닌 슬래브 위에 직접적으로 설치하는 것으로 가정하였다. MRI는 1.5 T (Tesla) MRI (1.5)와 3.0 T MRI (3.0)를 선정하였다. Tesla는 자력의 세기를 나타내는 단위이다. 본 연구에 사용된 MRI (1.5)와 MRI (3.0)의 중량은 각각 58 kN과 85 kN으로 가정하였다. 크기로는 MRI (1.5)가 폭 1.6 m, 길이 1.4 m, 높이 2.3 m로, MRI (3.0)은 폭, 길이, 높이가 각각 2.0 m, 1.8 m, 2.3 m로 가정하였다. MRI는 CT와 달리 자기장을 만들어 주파수를 가하는 원리이기 때문에 내부 시스템에 의한 움직임이 없어 앵커로 지지하지 않고(MRI\_Non (1.5) & MRI\_Non (3.0)), 가동 시 소음을 저감시킬 수 있는 소음방지 고무패드위에 설치한다.

## 3. 비구조요소 내진성능평가방법

### 3.1 비구조요소 평가 방법

ASCE 41-13 [11]에는 비구조요소의 평가 및 보강 절차를 명시적 절차 (Prescriptive Procedure, PP)와 해석적 절차 (Analytical Procedure, AP)로 구분하여 비구조요소별로 어떠한 절차를 채택해야 하는지 정하고 있다. PP는 기준에 명시된 특성과 비교하여 평가하는 방법으로 실무자가 공학적인 전문지식이 미비하여도 기준을 따라 평가를 실시하면 해당 비구조요소의 적정 성능수준을 파악할 수 있는 방법이다. 반면, AP는 PP가 허용되지 않는 경우에 공학적 전문지식을 겸비한 사용자가 해석적인 절차로 평가하는 방법으로서 요구지진력과 저항능력을 역학적으로 계산하여 비교하는 방법이다.

AP에 대해 보다 자세히 살펴보자면, AP를 통해 비구조요소를 평가하기 위해서는 거동특성의 분석을 선행한 후 이에 맞는 해석방법을 사용해야 한다. 비구조요소의 거동특성은 가속도 민감 (Acceleration Sensitive)과 변형

민감 (Deformation Sensitive)로 분류할 수 있으며 일부, 두 가지 모두 고려해야 하는 경우도 있다. 가속도 민감형 비구조요소는 관성 하중에 민감하고 이로 인한 손상을 입을 수 있는 비구조요소를 의미하며 변형 민감형 비구조요소는 구조물의 층간변위 또는 변형에 민감하고 이로 인해 손상을 받을 수 있는 비구조요소를 의미한다. 가속도 민감형 비구조요소는 요구지진력에 의한 관성 하중과 이에 대한 저항 능력을 비교하는 방법인 Force Analysis (이하 FA)를 따르며 변형 민감형 비구조요소는 구조시스템의 층간변위를 산정하여 해당 비구조요소의 허용층간변위와 비교하는 방법인 Deformation Analysis (이하 DA)를 따른다.

예를 들어, 창문 및 특정 외장재는 면내방향에 대해서 변형 민감형으로 분류되지만 면외방향으로는 관성 하중을 받아 손상 될 수 있다. 따라서 이와 같은 비구조요소는 면내방향에 대해서 DA, 면외방향에 대해서는 FA를 개별적으로 실시해야 한다. 또한 층간 또는 내진조인트를 가로지르는 배관은 건물의 층간변위에 민감한 변형 민감형으로 분류되지만 관성력을 받아 구조물에 설치되는 지지부 등이 손상될 수 있기 때문에 가속도 민감형을 함께 고려해야 한다. 그러므로 창문 및 특정 외장재, 배관과 같은 요소들은 DA와 FA를 함께 실시해야 한다. 반면, 기계장비 및 물탱크 등과 같이 층 슬래브 위에 설치되는 중량체는 관성 하중에 의한 영향만을 고려하면 되므로 FA만으로 비구조요소를 평가할 수 있다.

본 연구는 비구조요소의 내진성능평가 절차 중 역학적 계산을 통해 능력 (Capacity)과 요구 (Demand)를 비교하여 평가하는 해석적 절차를 채택하였다. 따라서 본 연구의 내진성능평가를 위한 방법은 해석적 절차에 의한 것이며 그 중 변위에 민감한 비구조요소는 허용기준에 대한 자료가 충분하지 않아 가속도에 민감한 비구조요소만을 선정하여 연구를 진행하였다.

### 3.2 성능목표

미국의 ASCE41-13에서는 위험범주별 기준 신축 건축물의 기본성능 목표 (BPOE or BPON, Basic Performance Objective for Existing or New building)를 각각 정하고 있다. ASCE7-10 [3]은 종합병원의 위험범주를 'IV'로 지정하고 있다. 따라서 본 절에서는 위험범주 'IV'에 해당하는 성능목표를 다룬다. Table 2에는 ASCE41-13에서 정의하는 위험범주

Table 2. Basic performance objective for risk category IV buildings (existing & new) [11]

	Seismic hazard level	Performance objective
Existing building	*BSE-1E 20%/50 years (225 years return period)	Immediate occupancy (S-1) Position retention (N-B) 1-B
	**BSE-2E 5%/50 years (975 years return period)	Life safety (S-3) Not considered (N-D) 3-D
New building	*BSE-1N (MCE*2/3)	Immediate occupancy (S-1) Operational (N-A) 1-A
	**BSE-2N 2%/50 years, MCE (2475 years return period)	Life safety (S-3) Not considered (N-D) 3-D

\* BSE-1X : Basic safety Earthquake-1, either the BSE-1E of BSE-1N  
\*\*BSE-2X : Basic safety Earthquake-2, either the BSE-2E of BSE-2N

‘IV’인 기존 신축 건축물에 대한 성능목표를 나타내었다.

기존건축물은 BSE-1E에 대해 즉시거주(구조)-위치유지(비구조), BSE-2E에 대해 인명안전(구조)-고려안함(비구조)을 성능목표로 정하며 신축 건축물은 BSE-1N에 대해 즉시거주(구조)-기능유지(비구조), BSE-2N에 대해 인명안전(구조)-고려안함(비구조)을 성능목표로 정하고 있다. 여기서 BSE-1E란 기존건축물(Existing building, E)의 기본안전지진-1(Basic Safety Earthquake-1)로서 225년 재현주기를 가지는 지진을 의미하며 BSE-2E는 이보다 더 강한 지진인 975년 재현주기를 가진 지진을 의미한다. BSE-2N은 신축건축물(New building, N)에 대한 기본안전지진-2로서 재현주기 2475년을 가지는 최대고려지진(MCE, Maximum Considered Earthquake)을, BSE-1N은 MCE의 2/3수준인 지진을 의미한다.

Table 2를 보면 알 수 있듯이, ASCE41-13 [11]에서는 내진성능평가를 위한 성능목표를 선정할 때 성능수준을 구조적 성능수준과 비구조적 성능수준의 조합으로 ‘1-A’, ‘3-C’ 등과 같이 나타낸다. 숫자는 구조적 성능수준을 의미하며 문자는 비구조적 성능수준을 의미한다. 구조적 성능수준은 총 6단계로 분류되며 비구조적 성능수준은 4단계로 분류된다. 구조적 성능

수준은 ‘S’와 숫자를 조합하여 S-1, S-2 등과 같이 표기하고 있다. 이때 ‘S’는 ‘Structural’을 의미한다. 비구조적 성능수준은 ‘N’과 문자를 사용하여 N-A, N-B 등과 같이 표기하며 여기서 ‘N’은 ‘Non-structural’을 의미한다. 각 성능수준에 대한 자세한 내용은 Table 3에 정리하였다. Table 4에는 구조적 성능수준과 비구조적 성능수준의 조합을 나타내었다. Table 4의 빗금으로 표시한 부분은 ASCE41-13의 성능목표 매트릭스(Table C2-2)에 사용되는 성능수준의 조합이다.

국내 건축구조 기준인 KBC2016 [2]에서는 종합병원을 중요도 ‘특’으로 분류하고 있다. 중요도가 ‘특’인 건물의 성능목표를 설계스펙트럼가속도에 대해 기능수행(또는 즉시거주), 설계스펙트럼가속도의 1.5배에 대해 인명 안전 및 붕괴방지로 정하고 있다. KBC2016 [2]의 성능목표는 ASCE41-13 [11]의 신축건물에 대한 구조적 성능목표와 유사하지만 KBC2016은 비구조적 성능목표에 대해 따로 언급하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 ASCE41-13을 참고하여 종합병원의 비구조적 성능목표를 정하였다.

건축물의 내진성능평가를 실시할 때에는 두 개의 성능목표를 모두 고려해야 한다. 위험범주 ‘IV’에 해당되는 종합병원은 BSE-2X에 대해 구조적

**Table 3.** Structural and nonstructural performance levels [11]

Group	Performance level	Contents
Structural performance level	Immediate occupancy (S-1)	The post-earthquake damage state in which only very limited structural damage has occurred. The basic vertical- and lateral-force-resisting systems of the building retain almost all of their pre-earthquake strength and stiffness.
	Damage control range (S-2)	The post-earthquake damage state between S-3 and S-1.
	Life safety (S-3)	The post-earthquake damage state in which a structure has damaged components but retains a margin against the onset of partial or total collapse.
	Limited safety range (S-4)	The continuous range of damage states between S-3 and S-5.
	Collapse prevention (S-5)	The post-earthquake damage state in which a structure has damaged components and continues to support gravity loads but retains no margin against collapse.
	Not considered (S-6)	Where an evaluation or retrofit does not address the structure
Non-structural performance level	Operational (N-A)	The post-earthquake damage state in which the nonstructural components are able to provide the functions they provided in the building before the earthquake.
	Position retention (N-B)	The post-earthquake damage state in which nonstructural components might be damaged to the extent that they cannot immediately function but are secured in place so that damage caused by falling, toppling, or breaking of utility connections is avoided. In general, building equipment is secured in place and might be able to function if necessary utility service is available. However, some components might experience misalignments or internal damage and be inoperable.
	Life safety (N-C)	The post-earthquake damage state in which nonstructural components may be damaged, but the consequential damage does not pose a life-safety threat.
	Not considered (N-D)	Where an evaluation or retrofit does not address all nonstructural components to one of the levels

**Table 4.** Target building performance levels [11]

Non-structural performance level	Structural performance level					
	Immediate occupancy (S-1)	Damage control range (S-2)	Life safety (S-3)	Limited safety range (S-4)	Collapse prevention (S-5)	Not considered (S-6)
Operational (N-A)	Operation, 1-A	2-A	Not recommended	Not recommended	Not recommended	Not recommended
Position retention (N-B)	Immediate occupancy, 1-B	2-B	3-B	4-B	Not recommended	Not recommended
Life safety (N-C)	1-C	2-C	Life safety, 3-C	4-C	5-C	6-C
Not considered (N-D)	Not recommended	Not recommended	3-D	4-D	Collapse prevention, 5-D	No evaluation or retrofit

**Table 5.** Nonstructural performance levels and illustrative damage [11]

System or component group	Nonstructural performance levels		
	Life safety (N-C)	Position retention (N-B)	Operational (N-A)
HVAC equipment	Units shifted on supports, rupturing attached ducting, piping, and conduit, but did not fall. Units might not operate.	Units are secure and possibly operate if power and other required utilities are available.	Units are secure and operate if emergency power and other utilities provided.

성능목표를 제시하고 있지만 비구조적 성능목표는 고려하지 않는 것으로 명시하고 있다. 따라서 위험범주 ‘IV’에 해당되는 건물의 비구조요소에 대한 내진성능평가를 실시하고자 할 때, 지진위험도 BSE-1X를 선택하여 기본성능목표를 정해야 한다. 본 연구에서는 종합병원을 신축 건물로 가정하여 비구조요소의 성능목표를 BSE-1N에 대해 기능유지(Operational, OP)를 성능목표로 정하였다.

### 3.3 요구변수 및 허용기준

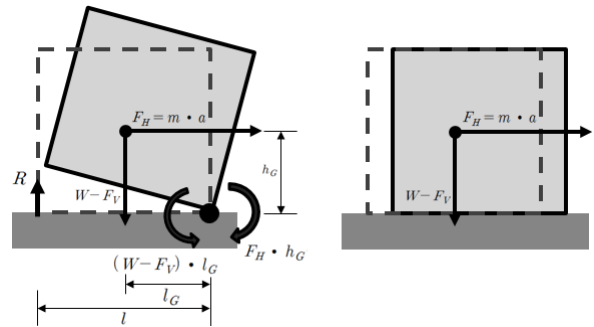
본 연구는 비구조요소를 강체로 가정하여 전도와 미끄러짐 거동을 요구 변수로 정하고 두 거동이 발생하는 시점을 바탕으로 해당 비구조요소의 허용기준을 정하였다. 강체의 거동모드와 그에 따른 요구지진력에 대한 자세한 내용은 3.4장에서 다루었다.

허용기준을 정하기에 앞서 ASCE41-13 [11]에서 제시하고 있는 비구조요소의 성능수준별 손상상태에 대해 서술하고자 한다. 이를 위해 Table 5에 HV AC장비를 예로 들었다. 표에서 알 수 있듯이 이 장비는 거동이 없고 작동 가능한 상태가 기능유지(Operational, OP)수준이다. 거동이 없으나 다른 요인에 의해 작동 가능성이 감소한 상태는 위치유지(Position Retention, PR)수준이다. 거동이 있고 작동하지 않을 가능성이 큰 상태는 인명안전(Life Safety)수준이다. 즉, 거동 및 작동 유무에 따라 성능수준이 정해지는 것이다. 이를 바탕으로 냉각탑, 공조기, CT와 MRI는 전도 또는 미끄러짐 거동이 발생하면 OP를 만족하지 못하는 것으로 정의하였다.

ASCE41-13에서 가속도 민감형 비구조요소의 수평지진하중을 구할 때, 성능수준별로 중요도계수를 1.0 또는 1.5로 사용하고 이를 관성력에 곱한다. 여기서 중요도계수의 차이가 허용기준이다. 즉, 1.5배의 요구지진력을 저항할 수 있어야 더 높은 수준을 만족한다. 기계장비의 허용기준을 예로 들면 LS와 PR의 중요도계수는 1.0으로 사용하고 OP의 중요도계수는 1.5를 사용한다. 이는 PR은 OP보다는 낮은 수준을 기대하지만 LS와는 비슷한 상태를 기대하고 있다는 의미다. 최종적으로 본 연구의 목표성능수준이 OP이므로 내진성능평가를 실시할 때 모든 비구조요소의 관성력에 중요도계수 1.5를 적용하였다.

### 3.4 강체의 거동모드 및 요구지진력

바닥판 위에 위치되어 있는, 가속도 민감형 비구조요소는 층 가속도에 의한 관성력에 의해 거동이 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 비구조요소를 직육면체의 강체(Rigid block)로 가정하여 무게중심에 작용하는 관성력으로 인해 발생하는 거동모드를 확인하였다. 일반적으로 강체의 거동모드는 전도와 미끄러짐으로 구분할 수 있다. 전도와 미끄러짐은 가속도의 크기와 강체의 형상 및 무게에 따라 결정된다. 관성력에 의한 전도모멘트가



**Fig. 3.** Analysis of rigid block behavior mode

중력과 수직 지진하중에 의한 저항모멘트보다 크면 전도로 거동하고 반대일 경우 전도되지 않는다. 또한 강체가 관성력을 받을 때 관성력이 강체 바닥의 마찰력보다 크면 미끄러짐으로 거동한다.

ASCE41-13에서는 비구조요소의 수평지진하중을 구할 때 층 가속도( $A_x$ )와 무게( $W_p$ )의 곱에 비구조요소별 증폭계수( $a_p$ )와 반응수정계수( $R_p$ ), 중요도계수( $I_p$ )를 고려하여 식(1)과 같이 계산한다.

$$F_H = \frac{a_p A_x W_p}{\frac{R_p}{I_p}} \quad (1)$$

여기서, 증폭계수는 층 가속도로부터 해당 비구조요소의 동적 증폭을 고려한 계수이며, 반응수정계수는 해당 비구조요소 자체 및 연결부의 연성을 고려한 계수다. 본 연구는 비구조요소를 강체로 취급하여 평가함에 따라, 두 계수 모두 고려하지 않는 것이 적절하다고 판단하였다. 따라서 증폭계수와 반응수정계수는 모두 1.0을 사용하였다.

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 전도 모멘트는  $F_H \times h_G$ 로 계산할 수 있으며 저항 모멘트는  $(W_p - F_V) \times l_G$ 로 계산할 수 있다. 이때,  $F_H$ 와  $F_V$ 는 각각 수평, 수직 지진하중이다. 수평 지진하중은 강체의 관성력을 의미하며 수직 지진하중은 ‘소방시설 내진설계 기준’ [12]을 참고하여 수평 지진하중의 1/2로 하였다.  $h_G$ 와  $l_G$ 는 각각 강체의 무게중심으로부터 회전축까지의 수직, 수평거리이다. Fig. 3과 같이 회전축으로부터 거리  $l$ 만큼 떨어져 있는 위치에서 전도하중( $R$ )은 식(2)으로 계산한다.

$$R = \frac{F_H \times h_G - (W - F_V) \times l_G}{l} \quad (2)$$

강체에 작용하는 미끄러짐하중은 강체의 무게중심에 작용하는 수평지진하중(식(1))인 관성력으로 계산한다.

### 3.5 저항능력

ASCE41-13 [11]에서는 해석방법에 따라 비구조요소의 관성력과 변위를 산정하는 방법에 대해 설명하고 있지만 이에 대한 저항능력은 따로 설명하지 않고 있다. 비구조요소는 개별적으로 지지방법이 매우 다양하기 때문에 해당 요소의 지지방법에 따라 저항능력을 각각 산정해야 한다. 본 연구에서 비구조요소는 앵커볼트에 의해 지지되어 있거나 지지되어 있지 않는 경우로 구분하였다. 비구조요소가 앵커볼트에 의해 지지되어 있지 않을 때 전도 및 미끄러짐은 각각 자중과 바닥면의 마찰력으로 저항한다. 비구조요소가 앵커볼트에 의해 지지되어 있을 때 전도와 미끄러짐은 자중과 마찰력에 더해 각각 앵커볼트의 인장강도와 전단강도로 저항한다. 단, 앵커볼트가 지지할 때는 바닥면의 마찰력에 의한 저항능력은 고려하지 않았다.

#### 3.5.1 앵커볼트가 지지할 때

앵커볼트의 저항능력은 한국콘크리트학회의 ‘콘크리트구조기준’ [13]을 참고하여 산정하였다. 콘크리트구조기준에서는 힘을 받는 콘크리트용 앵커의 파괴모드를 세분화하고 이에 대한 파괴강도 중 가장 지배되는 강도를 사용하도록 규정하고 있다. 파괴모드는 앵커가 인장과 전단을 받을 경우로 나누는데, 인장을 받는 앵커의 경우 강재의 인장파괴, 콘크리트 파괴, 앵커의 뽑힘, 콘크리트 측면 파열이 있으며 전단을 받는 앵커는 강재의 전단파괴, 콘크리트파괴, 콘크리트의 프라이아웃이 있다. 콘크리트구조기준에 따르면 후설치앵커의 뽑힘강도를 현장 실험으로 결정하므로 본 연구의 파괴강도 계산에서 제외하였다. 또한 앵커의 콘크리트 측면 파열은 콘크리트기초 가장자리에 인접한 앵커의 묻힘 깊이가 작기 때문에 고려하지 않았다.

Fig. 2를 통해 알 수 있듯이, 냉각탑의 앵커볼트 설치형태는 12개의 콘크리트기초위에 지지되어 있으며 각각의 단일콘크리트기초에 M12 앵커볼트 2개씩 접합되어 있는 것으로 가정하였다. 단일콘크리트기초의 상세한 그림은 Fig. 4에 나타내었다. 기초의 크기는 가로 550 mm, 세로 350 mm, 두께 800 mm로 가정하였으며 앵커볼트의 묻힘깊이는 100 mm로 기초 평면의 좌우측으로부터 각각 105 mm, 위아래로 중심인 위치에 설치되어 있는 것으로 가정하였다. CT\_Anc의 앵커볼트는 냉각탑과 다르게 따로 콘크리트기초위에 설치되어 있지 않고 슬래브 위에 M12 앵커 4개가 150 mm 만큼 묻혀 있는 것으로 가정하였다.

산정한 인장 및 전단을 받는 앵커볼트의 파괴강도를 Table 6에 나타내었다. 인장을 받는 앵커볼트의 강도는 강재의 전도하중이 회전축으로부터 거리에 비례하여 커지기 때문에 회전축의 최외각 앵커볼트의 파괴강도를 산정하였다. 또한 Table 6에 짙게 표시한 부분은 인장 및 전단을 받는 앵커볼트의 파괴모드 중 가장 지배되는 파괴모드에 대한 강도이다.

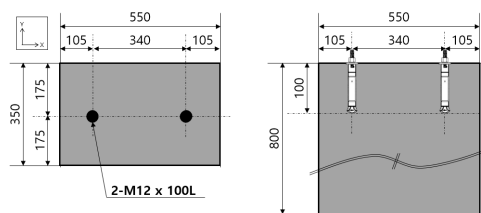


Fig. 4. Detail of single concrete foundation for cooling tower

Table 6. Strength of anchor bolts

Non-structural elements	Failure mode		Strength (kN)	
Cooling tower_Anc	Tension (T <sub>ANC</sub> )	X-dir.	Anchor bolt	37.2
			Concrete failure	203.4
		Y-dir.	Anchor bolt	55.9
			Concrete failure	157.2
	Shear (S <sub>ANC</sub> )	X-dir.	Anchor bolt	253.9
			Concrete failure	130.3
			Concrete pryout	410.8
		Y-dir.	Anchor bolt	253.9
			Concrete failure	345.1
			Concrete pryout	314.4
CT_Anc	Tension (T <sub>ANC</sub> )	X-dir.	Anchor bolt	18.6
			Concrete failure	30.0
		Y-dir.	Anchor bolt	18.6
			Concrete failure	54.7
	Shear (S <sub>ANC</sub> )	X-dir.	Anchor bolt	42.3
			Concrete pryout	59.9
		Y-dir.	Anchor bolt	42.3
			Concrete pryout	109.3

Table 7. Static friction force of non-structural elements

Elements	F <sub>r</sub> (kN)
Air Handler_Non (30)	5.2
Air Handler_Non (42)	9.2
CT_Non	11.5
MRI_Non (1.5)	21.3
MRI_Non (3.0)	31.2

#### 3.5.2 앵커볼트가 지지하지 않을 때

마찰력 ( $F_r = F_n \mu$ )은 강재가 미끄러짐으로 거동할 시 수직항력 ( $F_n$ )과 면과 면사이의 마찰계수 ( $\mu$ )를 통해 구할 수 있다. 수직항력은 강재에 작용하는 수직 지진하중 ( $F_v$ )에 대한 영향을 고려하여  $mg - F_v$ 로 계산하였다. 마찰계수는 비구조요소들의 바닥면을 구성하고 있는 재질에 대해 정하였다. 콘크리트-강철의 정지마찰계수는 물리학적으로 흔히 사용되는 0.45를 사용하였고 고무-강철의 정지마찰계수는 Elena Iordana DELADI [14]의 강철재질과 고무패드 사이의 정지 마찰력에 관한 연구를 참고하여 0.43을 사용하였다. Table 7에는 비구조요소별로 산정한 마찰력을 정리하였다.

## 4. 종합병원 비구조요소 내진성능평가

### 4.1 예제건물

예제건물은 Kim et al. [15]에서 사용한 건물과 동일하다. 총 6층, 높이 21.3 m인 건물로서 1층의 층고는 4.5 m, 2층부터 6층까지의 층고는 4.3 m이다. 건물의 평면은 일반적인 종합병원의 형태이며, Fig. 5에 나타내었다.

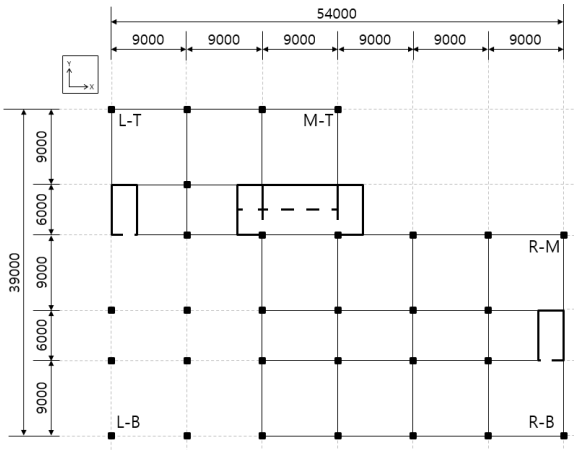


Fig. 5. Second floor story plan of example building [15] (unit: mm)

건물의 평면은 넓은 경간 (6 m, 9 m) 을 갖으며 평면의 중앙부와 양 측면에 코어가 위치해 있다. 또한 건물의 로비로 사용되는 부분은 1, 2층이 개방되어 있어 Fig. 5의 좌측 아래 부분과 같이 2층의 슬래브와 보 부재가 존재하지 않으며 3층부터는 이 부분에도 슬래브와 보 부재가 존재한다.

예제건물의 비구조요소의 위치는 종합병원의 용도에 부합하도록 가정하였으며 Table 1에 나타나있다. 현대의 종합병원이 입원증심에서 외래증심 진료로 변화함에 따라 응급 및 진료서비스를 이용하는 외래환자들의 편의를 위해 진단 검사기능이 건물의 저층부에 집중되어 있다. 따라서 MRI 실 및 CT실은 1층에 위치해 있는 것으로 가정하였다. 또한 공조기는 종합병원의 공기조화시스템을 병동, 진료부, 관리부 등으로 zoning하는 것을 고려하여 지하층의 기계실과 5층 및 옥상에 배치된 것으로 가정하였다(Air Handler\_Non (42) & Air Handler\_Non (30)). 이때, 본 연구에서는 지하층의 공조기는 고려하지 않았다. 종합병원의 냉각탑은 저항력이 약한 환자의 출입로 및 산책로에 영향을 주지 않고 소음으로 인해 병동과는 별도로 설치하여야 때문에 일반적으로 옥상에 설치한다. 본 연구는 이를 반영하여 냉각탑은 옥상에 위치하는 것으로 가정하였다.

예제건물의 구조요소에 대한 부재 설계는 KBC2016 [2]을 따라 진행하였다. 예제건물의 콘크리트와 철근의 재료강도는 각각 24 MPa, 400 MPa를 사용하였다. 종합병원의 수직하중은 무거운 의료시설 및 유지관리시설, 유동인구 등에 의해 큰 것이 특징이며 종합병원의 평면계획을 참고하여 활하중을 적용하였다. 지진하중 산정을 위한 지역계수는 지진구역 1에 해당하는 지역계수 0.22 g의 80%인 0.176 g, 중요도계수는 1.5, 지반조건은 S<sub>D</sub>로 가정하였다.

Kim et al. [15]은 이 건물의 구조요소에 대한 내진성능평가를 MCE의 LS 성능목표에 대해 실시하였다. 이 건물은 특등급으로 중요도계수 1.5를 적용하여 설계했기 때문에 비탄성거동은 크지 않았다. 층간변위는 최상층에서 0.5% 미만으로 나타났으며 전단벽 및 기둥의 소성회전각 또한 매우 작게 나타났다. 하지만 전단벽의 전단 성능은 부족한 것으로 나타났다. Kim et al. [15]에서는 ‘중간모멘트골조를 가진 이중골조’에서 철근콘크리트 보통전단벽 시스템과 ‘보통전단벽-골조상호작용시스템’의 2가지로 설계하였는데 여기서는 요구지진력이 더 크게 나타난 후자로 설계한 건물을 사용하였다. 예제건물의 설계 및 해석 결과에 대한 자세한 내용은 Kim et al. [15]에 서술되어 있다. 본 연구에서는 구조체의 성능은 무시하고 진행하였다.

## 4.2 지진파

본 연구에서는 비구조요소에 작용하는 관성력을 확인하기 위해 예제건물에 대한 비선형동적해석을 수행하였다. 지진파는 예제건물의 대상 부지 (S<sub>D</sub>, 보통암 깊이 20 m 이상)에 대해 PEER ground motion database [16]을 통해 수평성분 2개가 한 쌍으로 이루어진 7개의 입력지진파를 선정하였다. 지진파 선정 시 지진의 규모는 6~7, 전단파 속도는 대상 부지에 해당하는 180~360 m/sec로 지정하였다. KBC2016에 따라 각 지진파의 수평성분 2개를 SRSS한 후, 평균 지진파 스펙트럼을 고유주기의 0.2배에서 1.5배 사이에서 지진위험도인 BSE-1N의 1.3배의 90% 이상이 되도록 스케일링 하였다. 본 연구에 사용된 지진파는 Kim et al. [15]에 사용된 지진파와 종류는 같지만 BSE-1N의 수준임을 주지한다.

## 4.3 비구조요소 내진성능평가 결과

비구조요소의 요구지진력은 3.4절에서 기술한대로 거동모드별로 미끄러짐은 식 (1), 전도는 식 (2)로 계산하였다. 이를 위해서는 층 가속도가 필요한데 앞서 선정된 7쌍의 지진기록을 이용하여 비선형동적해석을 수행하고 각 지진파에 대한 최대 층 응답가속도를 평균한 값을 사용하였다. 이때, 최대 층 응답가속도는 각 층의 평면에서 가장 큰 값을 사용하였다. Table 8에는 비구조요소의 거동 모드별 요구지진력과 저항능력을 정리하였다.

Table 8에서 비구조요소를 앵커로 지지하지 않을 경우 (Air Handler\_Non (42 & 30), MRI\_Non (1.5), MRI\_Non (3.0) & CT\_Non) 전도에 대한 저항능력은 없으며 식 (2)로 계산한 R이 양수면 전도가 발생한 것이다. 실제로는 자중이 저항하나 자중의 역할은 R 계산에 반영했음을 주지한다. 미끄러짐에 대한 저항능력은 Table 7의 마찰력 (F<sub>r</sub>)이며, 요구지진력은 식 (1)으로 계산한 수평지진력 (F<sub>H</sub>)이다. 반면, 앵커가 있을 경우 (Cooling tower\_Anc & CT\_Anc)에는 전도와 미끄러짐에 대한 저항능력은 Table 6에서와 같이 각각 앵커의 인장강도 (T<sub>ANC</sub>)와 전단강도 (S<sub>ANC</sub>)다.

평가 결과, 상층부에 위치한 비구조요소의 성능이 부족한 경향을 보였다. Cooling tower\_Anc는 X방향 미끄러짐에 대해 허용기준을 만족하지 못하였으며 Air Handler\_Non (42)과 Air Handler\_Non (30)은 Y방향 전도와 X방향, Y방향 미끄러짐에 대해 허용기준을 만족하지 못하였다. 반면 저층부에 위치한 CT와 MRI는 앵커지지 여부에 관계없이 허용기준을 만족하였다. 이는 층수가 올라갈수록 가속도의 증폭이 커짐에 따른 당연한 결과라 할 수 있다.

## 5. 결과 토의

가속도에 민감한 비구조요소는 자체 무게와 층 가속도가 중요한 변수이다. 따라서 비구조요소가 중량이 크고 상층부에 위치했을 경우 크게 증폭된 층 가속도로 인해 더 큰 관성력을 받게 된다. Table 8을 보면, 지붕층에 위치한 Cooling tower\_Anc는 중량이 크고 층 가속도가 가장 크므로 요구지진력 (R 및 F<sub>H</sub>)이 가장 크다. 물론 앵커볼트가 지지하고 있어 전도에는 저항하고 있으나 X방향 미끄러짐에는 저항하지 못하였다. 같은 지붕층에 위치하고 있으나 Cooling tower에 비해 중량이 작은 Air Handler\_Non (30)은 더

**Table 8.** Result of seismic performance evaluation

Elements	dir.	Floor acc. (g)	Rocking			Sliding		
			Demand (R)	Capacity (TANC)	Result	Demand (FH)	Capacity (SANC or Fr)	Result
Cooling tower _Anc	X	0.79	32.2	37.2	OK	146.6	130.3	NG
	Y		27.4	55.9	OK		253.9	OK
Air Handler _Non (42)	X	0.65	-4.7	-	OK	41.2	9.2	NG
	Y		4.5	-	NG			
Air Handler _Non (30)	X	0.79	-0.2	-	OK	35.8	5.2	NG
	Y		11.0	-	NG			
CT_Anc	X	0.19	9.5	18.6	OK	8.8	42.3	OK
	Y		-7.2	18.6	OK			
CT_Non	X	0.19	-9.2	-	OK	8.8	11.5	OK
	Y		-5.5	-	OK			
MRI1.5_Non	X	0.19	-12.6	-	OK	17.0	21.3	OK
	Y		-10.8	-	OK			
MRI3.0_Non	X	0.19	-22.0	-	OK	24.9	31.2	OK
	Y		-20.4	-	OK			

**Table 9.** Maximum acceleration that each element can resist

Elements	Maximum acceleration (g)		
	Sliding	Rocking (x)	Rocking (y)
Air Handler_Non (42)	0.24	0.84	0.54
Air Handler_Non (30)	0.24	0.81	0.46
MRI_Non (1.5)	0.24	0.34	0.31
MRI_Non (3.0)	0.24	0.40	0.38

작은 관성력을 받음에도 앵커가 지지하지 않아 전도와 미끄러짐 모두 허용 기준을 만족하지 못하였다. 층 가속도가 지붕층에 비해 작은 5층에 위치한 Air Handler\_Non (42)도 앵커가 지지하지 않아 같은 결과를 보였다. 반면, CT의 경우 제품 내부의 회전에 의한 거동을 방지하기 위해 앵커볼트를 설치하였지만 1층에 위치하여 요구지진력이 작기 때문에 앵커볼트가 없어도 허용기준을 만족할 수 있었다. MRI는 앵커가 지지하지 않아 저항능력이 매우 작지만 1층에 위치하여 허용기준을 만족할 수 있었다.

이러한 결과를 통해 각 층에서 비구조요소의 허용기준 만족 여부는 층 가속도의 증폭에 따라 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 비선형동적해석 결과로 평면의 각 모서리에서 층 가속도 크기를 확인하고 이를 앵커볼트로 지지하지 않은 비구조요소가 각 거동별로 허용기준을 만족하기 위한 최대가속도 (이하 최대가속도)와 비교하였다.

먼저, Table 9에는 앵커볼트로 지지하지 않은 비구조요소의 거동모드별 최대가속도를 나타내었다. 각 거동에 대한 최대가속도는 중요도계수, 반응수정계수, 증폭계수에 영향을 받지만 평가대상인 비구조요소들의 각 계수는 모두 같기 때문에 이에 대한 영향은 고려하지 않았다. 또한 각 거동에 대한 최대가속도는 비구조요소의 무게와 상관없이 없다. 미끄러짐에 대한 최대가속도는 모든 비구조요소가 동일하며 전도에 대한 최대가속도는 각각의 비구조요소별, X방향과 Y방향이 차이가 있다. 이는 미끄러짐에 대한 최대가속도는 마찰계수에 영향을 받고 전도에 대한 최대가속도는 비구조요소의 형상에 영향을 받기 때문이다.

Table 10에는 L-T (Left-Top), M-T (Mid-Top), R-M (Right-Mid),

**Table 10.** Variation in performance according to vertical and plane locations when elements are placed in one direction (unit: g)

Floor	L-T		M-T		R-M		L-B		R-B	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Roof	0.71	0.67	0.71	0.36	0.48	0.78	0.40	0.67	0.40	0.78
6	0.54	0.48	0.54	0.26	0.38	0.57	0.34	0.48	0.34	0.57
5	0.52	0.57	0.52	0.34	0.37	0.63	0.41	0.57	0.41	0.63
4	0.50	0.56	0.50	0.36	0.36	0.60	0.40	0.56	0.40	0.60
3	0.45	0.58	0.45	0.39	0.35	0.58	0.42	0.58	0.42	0.58
2	0.32	0.46	0.32	0.33	0.27	0.51	0.36	0.46	0.36	0.51
1	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

: OK  
 :  $\geq X: 0.34 \text{ g}, Y: 0.31 \text{ g}$  (MRI\_Non (1.5) Max. acceleration)  
 :  $\geq X: 0.40 \text{ g}, Y: 0.38 \text{ g}$  (MRI\_Non (3.0) Max. acceleration)  
 :  $\geq X: 0.81 \text{ g}, Y: 0.46 \text{ g}$  (Air Handler\_Non (30) Max. acceleration)  
 :  $\geq X: 0.84 \text{ g}, Y: 0.54 \text{ g}$  (Air Handler\_Non (42) Max. acceleration)

L-B (Left-Bottom) 그리고 R-B (Right-Bottom) 위치 (Fig. 5 참조)에서 각 층의 가속도를 나타냈다. 이를 통해 가속도의 증폭은 층별로 다를 뿐 아니라 평면의 위치별, 방향별로도 다를 수 있다. 평면의 우측에서는 Y 방향으로 좌측에서는 X 방향으로 가속도가 크게 나타났다. 이는 강성이 큰 전단벽이 평면의 중앙에서부터 좌측 및 우측에 치우쳐 위치하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

Table 10에서 음영의 농도는 방향별 비구조요소의 전도에 대한 최대가속도 초과 여부를 표시한 것이다. 이를 층별로 살펴보면, Air Handler\_Non (42)과 MRI\_Non (3.0)은 3층 이상에서 최대가속도를 초과하고 Air Handler\_Non (30)과 MRI\_Non (1.5)은 2층 이상에서 최대가속도를 초과한다. 추가적으로 층별로 평면 위치에 따른 결과를 살펴보면, Air Handler\_Non (42)은 다른 위치에서는 3층 이상에서 최대가속도를 초과하였으나 3-5층 M-T 위치에서는 최대가속도를 초과하지 않는다. 마찬가지로 Air



**Table 11.** Variation in performance according to vertical and plane locations when elements are placed in another direction (unit : g)

Floor	L-T		M-T		R-M		L-B		R-B	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Roof	0.71	0.67	0.71	0.36	0.48	0.78	0.40	0.67	0.40	0.78
6	0.54	0.48	0.54	0.26	0.38	0.57	0.34	0.48	0.34	0.57
5	0.52	0.57	0.52	0.34	0.37	0.63	0.41	0.57	0.41	0.63
4	0.50	0.56	0.50	0.36	0.36	0.60	0.40	0.56	0.40	0.60
3	0.45	0.58	0.45	0.39	0.35	0.58	0.42	0.58	0.42	0.58
2	0.32	0.46	0.32	0.33	0.27	0.51	0.36	0.46	0.36	0.51
1	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

	: OK
	: ≥ X : 0.31 g, Y : 0.34 g (MRI_Non (1.5) Max. acceleration)
	: ≥ X : 0.38 g, Y : 0.40 g (MRI_Non (3.0) Max. acceleration)
	: ≥ X : 0.46 g, Y : 0.81 g (Air Handler_Non (30) Max. acceleration)
	: ≥ X : 0.54 g, Y : 0.84 g (Air Handler_Non (42) Max. acceleration)

Handler\_Non (30)은 2-3층 M-T 위치에서는 최대가속도를 초과하지 않는다. MRI\_Non은 Air Handler\_Non에 비해 최대가속도가 작기 때문에 지붕층에서는 위치에 상관없이 모두 최대가속도를 초과한다.

전도에 대한 최대가속도는 Table 9에서와 같이 비구조요소의 방향별 형상에 따라 다르기 때문에 Table 11에서는 최대가속도 X와 Y를 Table 10과 다르게 서로 바꿔서 층 가속도와 비교하였다. Tables 10과 11을 비교하면 특히 Air Handler\_Non (42)와 Air Handler\_Non (30)이 R-M, L-B, R-B 위치에서 전 층에 걸쳐 최대가속도를 초과하지 않는 것이 크게 다른 점이다. 참고로 미끄러짐에 대한 최대가속도는 매우 작기 때문에 2층 이상에서 모든 층 가속도는 최대가속도를 초과하였다.

이와 같이 평면에서 위치별로 가속도 증폭의 차이는 비구조요소를 상층부에 설치해야할 때 고려해야 하는 주요한 변수임을 확인하였다. 비구조요소의 설치 위치를 계획할 때 층가속도의 증폭경향에 대해 확인할 필요가 있으며, 불가피하게 가속도 증폭이 큰 위치에 설치할 경우에는 반드시 앵커볼트 등으로 고정할 필요가 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 종합병원의 비구조요소들 중 가속도에 민감한 요소들을 선택하여 각각의 내진성능을 확인해보았다. 대상은 냉각탑, 공조기, MRI, 및 CT다. 그 결과 비구조요소가 위치한 층에 따라 내진성능은 달랐으며 주로 상층부에 위치한 비구조요소의 성능이 부족한 경향을 보였다. 냉각기는 앵커로 지지되어 있음에도 불구하고 X방향 미끄러짐에 대해 성능이 부족했으며, 앵커로 지지되어 있지 않은 공조기는 전도 및 미끄러짐에 대해 저항능력이 부족하였다. CT와 MRI는 저층부에 위치하여 앵커 지지가 없더라도 성능목표를 만족하였다.

또한 비구조요소 내진성능은 위치한 층수뿐만 아니라 평면에서의 위치에 따라라도 변화가 있었다. 계단실과 같이 벽체가 많이 있는 곳으로부터 상대적으로 멀리 떨어진 위치에서 가속도의 증폭이 커서 같은 층에 위치하더라도 성능목표 만족 여부가 달라졌다. 또한 평면의 가로 및 세로 방향의 가

속도 증폭도 벽체가 놓인 방향에 따라 차이가 있었다. 여기에 더해 전도에 대한 저항능력은 해당 비구조요소의 형상에 좌우되므로 설치 방향에 따라서도 내진성능에 차이가 발생하였다. 결론적으로 가속도에 민감한 비구조요소들은 건물에서 수직적 위치뿐만 아니라 평면에서의 위치, 해당 비구조요소의 설치 방향은 성능목표 만족 여부에 중요한 변수이므로 설치 시 이들을 충분히 잘 고려해야 한다. 만약 부득이하게 특정 위치에 설치해야 하는 경우 앵커를 사용하는 방법과 같이 추가적인 지지를 사용하는 것이 바람직하다.

이러한 결과는 연구 대상 비구조요소의 진동에 의한 내부 결함을 고려하지 않았음을 주지하는 바이다. 본 연구에서는 비구조요소 전체의 움직임 여부로 기능유지 여부를 판단하였으나, 전체움직임이 없더라도 관성력에 의한 진동으로 내부 장치가 손상되어 기능을 상실할 수도 있다. 따라서 비구조요소의 제조사로부터 이러한 성능을 평가할 수 있는 기준을 제공 받는다면 보다 더 정밀한 평가를 할 수 있을 것이다.

## / 감사의 글 /

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2016014186)

## / REFERENCES /

1. Pohang city hall, 11, 15 Eathquake damage investigation and damage control, Pohang City Disaster Safety Countermeasures Headquarters, Pohang, Korea, c2017.
2. AIK, KBC 2016, Korean building code-structural, Seoul, Korea; code-structural, c2016.
3. ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10), American Society of Civil engineers, Reston, Virginia, c2010.
4. Huang W, Toranzo-Dianderas LA, Reynolds AD, Gacan JR, Wallace JW, A case study of performance-based seismic evaluation and retrofit of an existing hospital building in california, US, the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, c2008.
5. FEMA 577, Risk management series design guide for improving hospital safety in earhquakes, Floods, and High Winds, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. c2007.
6. CBC, California building code (california code of regulations, title 24), Part 1 [Internet]. Available from : <https://codes.iccsafe.org/public/document/details/toc/651>.
7. CBC, California building code (california code of regulations, title 24), Part 2, Volume 1 [Internet]. Available from : <https://codes.iccsafe.org/public/document/details/toc/653>.
8. CBC, California building code (california code of regulations, title 24), Part 2, Volume 2 [Internet]. Available from : <https://codes.iccsafe.org/public/document/details/toc/655>.
9. Ministry of Health and Welfare, Ministry of health and welfare notice No. 2016-201.
10. Kim NH, Hong SG, Preliminary study on the enhancement of seismic performance of korea hospital buildings, Earthquake Engineering

- Society of Korea, 2016 Dec;20(7):510–516.
11. ASCE, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41–13), American Society of Civil engineers, Reston, Virginia, c2013.
  12. Ministry of public safety and security, Commentary of Seismic Design Code of Fire Facilities, Korea, c2016.
  13. KCI, KCI 2012, Concrete design code of Korea, Korea Concrete Institute, Seoul, Korea, c2012.
  14. Elena loredna Deladi, Static friction in rubber–metal contacts with application to rubber pad forming processes, University of Twente, Netherlands, c2006.
  15. Kim TW, Chu YR, Kim SR, Seismic performance evaluation of a mid-rise general hospital building, Earthquake Engineering Society of Korea, 2017 Sept;21(5):245–254.
  16. Pacific earthquake engineering research (PEER) center, PEER Strong Motion Database [Internet]. Available from: <http://ngawest2berkeley.edu>