

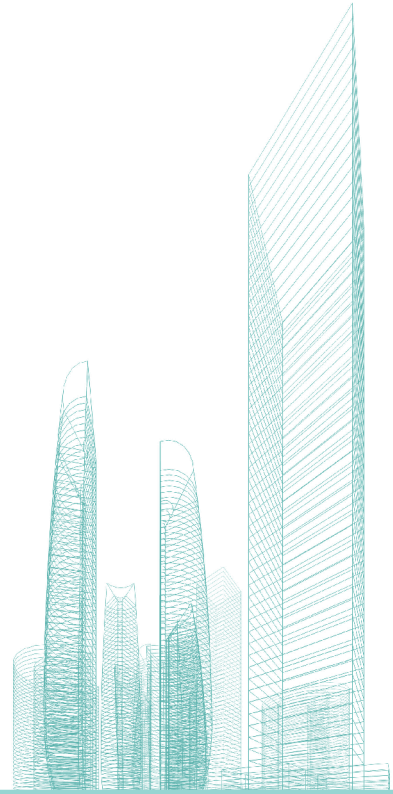


대만 지진에서 배우자!

■ 우리나라는 과연 지진에 안전한가?



| 김 지 상 |
 홍보위원회 부회장
 ㈜한구조엔지니어링 대표

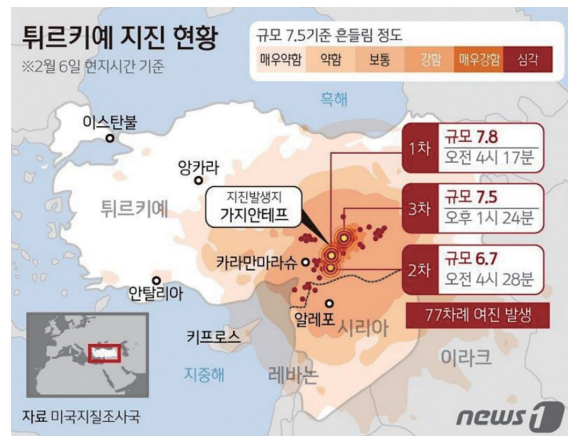
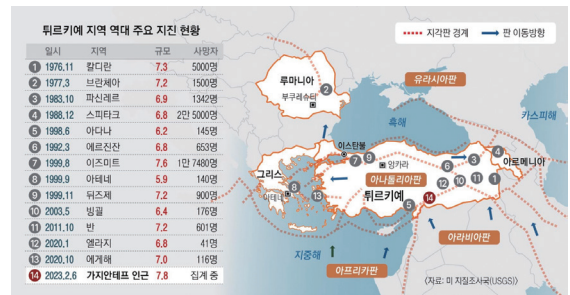


작년 이맘때 필자는 회지에 튀르키예 지진조사단의 답사기를 게재했다. 이 지진은 규모 7.0 이상의 강진이 빈번히 일어나는 지역에서 일어난, 7.5~7.8 규모의 또 한 번의 강진에 5만399명의 사망자가 발생한 지진이었다. 과연 왜 이렇게 많은 사람이 죽었을까? 지진이 너무 커서 그렇다고 생각하기에는 이 지역은 너무나 빈번히 강진이 일어나는 지역이었고, 튀르키예에는 엔지니어링 역량이 꽤 괜찮은 나라였다. 이것이 당시 답사의 가장 큰 의문점이었다.

이 답사를 통해 필자는 다음과 같은 점을 깊이 깨달았다고 썼다.

“...나는 정확하게 내진설계가 되고, 철저한 감리·감독하에 도면대로 정확히 시공된 건물은 수많은 생명을 보호한다는 것을 다시 한 번 강조하고 싶다...” 사실 다른 나라의 커다란 비극 앞에 그 나라의 잘못을 직설적으로 얘기 할 수는 없었기에, 완곡히 돌려 말했지만, 이 말 속에는 그 나라 공무원들과 관계자들의 안전불감증과 부패한 건설 관리 정책이 5만 여명의 무고한 희생에 책임이 있다는 것과 튀르키예의 상황을 반면교사 삼자는 의미가 내포되어 있었다.

올해 4월 3일 대만에서 튀르키예 지진보다는 약간 작지만, 유사한 규모의 강진이 발생했다. 그런데, 이 지진의 사망자는 단지 16명 뿐이었고, 이 중 건물 붕괴로 인한 사망자는 지진 발생 직후 고양이를 구하려 집 안으로 들어갔다가, 빠져나오지 못한 30대 여성 한명이었다, 다른 사람들은 모두 산사태 등으로 떨어진 낙석에 의해 목숨을 잃었다고 한다.

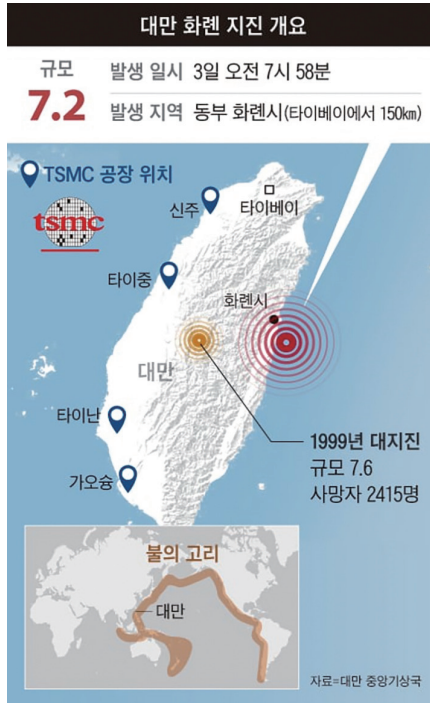


이번 대만에서 발생한 지진이, 화롄시에서 남쪽으로 30km 떨어진 해안에서 일어났다는 것, 많은 사람들이 건물에서 나간 아침 출근시간에 발생했다는 것 등, 튀르키예에서 발생한 지진 대비, 인명피해가 적을 수밖에 없는 조건인 것을 감안 하더라도, 5만여명대 16명이라는 숫자는 생각해볼 여지가 큰 수치이다. 튀르키예와 대만은 1999년도에 뼈아픈 지진피해를 입었던 나라들로, 두나라 모두, 지진 이후, 이를 뼈아픈 실패로 생각하여, 또다른 지진에 대하여, 철저하게 대비 했었기 때문이다.

1999년 8월 17일 새벽 이스탄불에서 약 150km 가량 떨어진 튀르키예 서부해안의 이즈미트 지역에 규모 7.6의 강진이 발생했다. 이 지진으로 최소 17,127명이 사망하고, 43,953명이 부상을 당했다. 튀르키예 사람들은 이 재앙을 계기로 지진에 대한 설계 기준을 강화했다. 튀르키예의 기술자들은 이 기준에 매우 강한 자부심을 가지고 있었다. 그런데, 그럼에도 불구하고, 2023년 2월 6일 새벽, 규모 7.8의 강진이 가지만 테프에서 발생하고, 인근지역에서 규모 7.5와 6.7의 여진이 발생했을 때, 지진 피해 사망자는 50,399명 부상자는 107,204명으로, 1999년 대비 더 많은 피해를 입었다.

1999년, 튀르키예 이즈미트 지진이 발생 한 지 한 달 가량 지난 9월21일, 921지진(치지 지진이라고도 함) 이 발생했다. 이 지진은 규모 7.3의 20세기 말 대만에서 발생한 최대 지진으로 2,415명이 사망했고, 11,305명이 부상을 입었다. 그리고 2024년 금번 지진에서는 단지 16명 만이 사망한 것이다.

1,999년 커다란 지진으로, 많은 국민의 생명을 잃었던 두 나라가 25년 후 내진성능의 극적인 차이를 보였다. 과연 그 요인은 무엇일까? 튀르키예의 실패 원인에 대해서는 2023년 5-6호 회지와 우리회 백서에서 자세히 다루었다. 이번 글에서는 대만의 성공요인과 향후 우리나라의 내진 정책의



방향에 대하여 살펴보기로 한다.

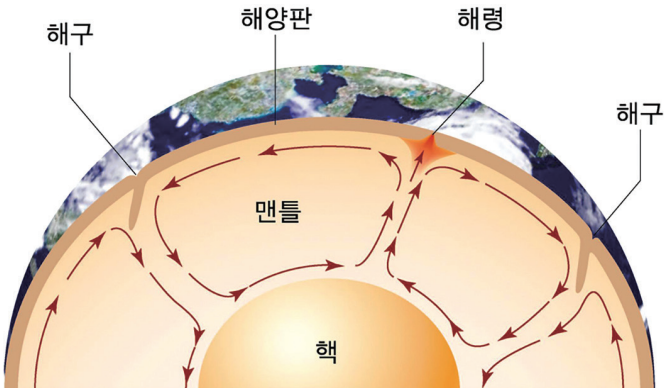
1999년 일어났던 치치 지진 이후 대만의 내진대책에 대해서는, 국립대만대학교 토목공학과 교수이자, 대만국립지진공학연구센터(NCREE) 소장인 Yu-Chen Ou 교수께서 <대만의 지진대비 ; Earthquake Preparedness in Taiwan>라는 글을 기고해 주셨고, 향후 우리나라의 내진 정책 방향과 관련해서는 (주)동양CNP 정광량 대표님께서 <지진 회복탄력성 관련 국내외 동향 및 산업시설의 회복탄력성 확보방안>이라는 글을 기고해 주셨다.

본론에 해당하는 두 편의 기고문을 소개하기 전에 우리나라는 과연 지진에 안전한 나라인가의 여부에 대하여 간단히 살펴보기로 한다.

알프레드 베게너에 의하면 아주 오래전 지구에는 판게아 라고 하는 초대륙이 존재했다고 한다. 그는 그 초대륙이 조금씩 깨지고 이동해서, 현재와 같은 대륙이 형성되었다고 주장했다. 이를 “대륙이동설”이라 한다. 그가 살아있을 당시에는 그의 이러한 주장은 터무니 없는 주장으로 여겨졌다. 왜냐하면 그는 어떻게 대륙이 이동할 수 있는지를 설명할 수 없었기 때문이다. 과학자들의 냉대속에 그는 대륙의 이동원인을 밝히기 위한 탐험을 떠났다가, 결국 인정받지 못하고 죽고만다.



그러나 그의 사후 1950년부터 고지자기학 등 관련 학문은 그의 주장을 뒷받침 해 주었고, 지금은 그의 주장이 사실인 것으로 확인 되었다. 그리고, 그에 의해 주장된 대륙이동설을 근거로, 고지자기학이 밝힌 내용에 따르면, 최초의 판게아 대륙이 갈라지고 이동하여, 북반구에는 로라시아라는 초 대륙이 생겼고, 남반구에는 곤드와나 라는 초 대륙이 존재했고 한다. 이러한 대륙의 이동이 지진이 일어나는 주된 이유라는 것이 현재는 정설로 인정되고 있다. 그리고 이러한 대륙의 이동은 대륙이 맨틀이라고 하는 유동성 고체 위에 얹혀져 있기 때문에, 맨틀의 대류에 의한 것이라고 밝혀졌다.



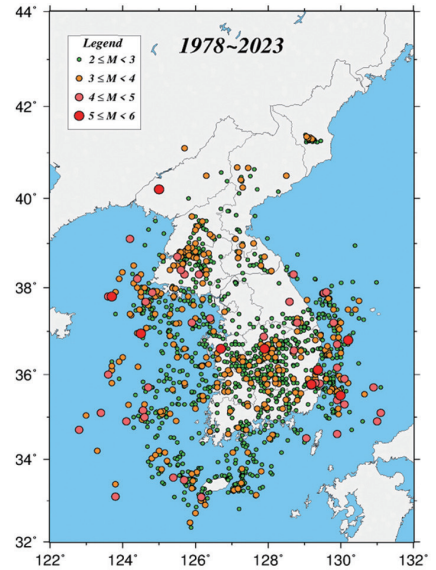
이러한 “대륙이동설”에 따라, 한반도는 흔히 알려진 사실과는 다르게, 단일한 땅덩어리가 아니라고 한다. 한반도는 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴라는 3개의 선캄브리아(5억4천만년 이전) 시대 땅덩어리와 그 사이에 낀 임진강대와 옥천대 라는 2개의 습곡대로 이루어져 있다. 그런데, 한반도에 위치한 이 육괴들은 과거 남반구의 곤드와나 대륙으로부터 수억년을 이동하여 현재의 위치로 이동하였다고 한다(한반도 자연사 기행/조홍섭/p27).



지금도 발생하고 있는 이러한 지반의 이동으로 인해 지반에는 단층들이 발생한다. 게다가, 남반구인 곤드와나에서 북반구까지 이동한 한반도 땅에는 더욱 많은 단층들이 존재한다. 따라서, 우리나라에서는 대부분 단층지진이 일어난다. 하지만 커다란 판들의 경계에 위치한 일본이나 대만과 달리, 판의 내부에 위치한 우리나라는 판간의 충돌로 인한 힘이 직접적으로 전달되지 않기 때문에, 규모가 큰 강한 지진이 자주 발생하지는 않는다. 그러나, 우리나라에도 충돌로 인한 힘은 지속해서 축적되고 있어, 큰 규모의 지진이

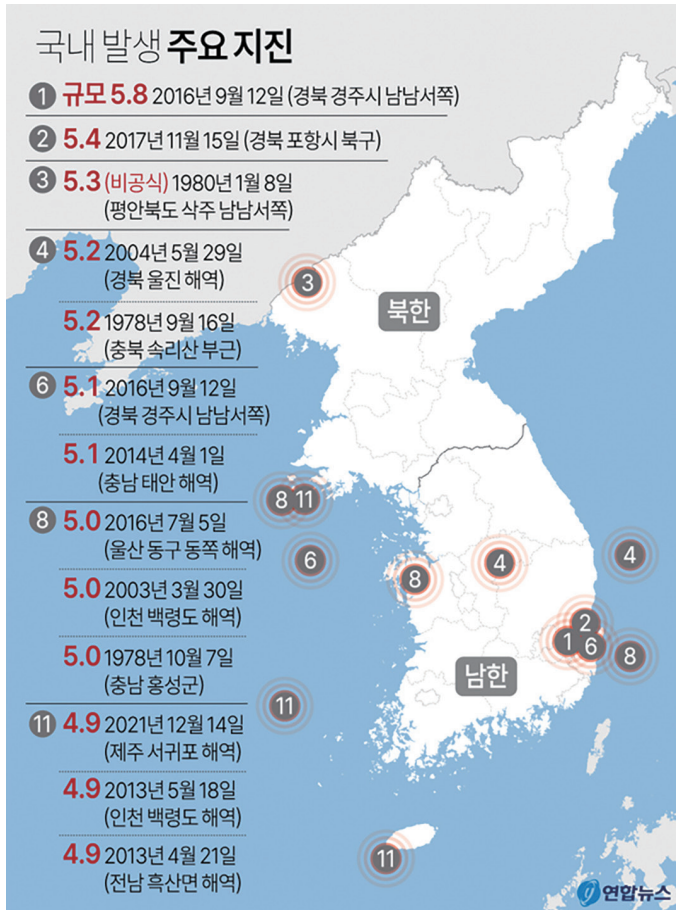
일어날 가능성은 얼마든지 존재한다고 한다.

연세대 지구시스템학과 홍태경 교수에 따르면, “한반도에 힘의 누적이 계속되면 규모 7 정도의 지진까지 발생할 수 있기 때문에 경각심을 가져야 한다”고 말한다. 게다가, 우리나라는 ‘단층의 나라’라고 불릴만큼 수억 년 전부터 단층활동이 활발히 진행되어 지질이 복잡



국내 발생 주요 지진

- ① **규모 5.8** 2016년 9월 12일 (경북 경주시 남남서쪽)
- ② **5.4** 2017년 11월 15일 (경북 포항시 북구)
- ③ **5.3 (비공식)** 1980년 1월 8일 (평안북도 삭주 남남서쪽)
- ④ **5.2** 2004년 5월 29일 (경북 울진 해역)
- 5.2** 1978년 9월 16일 (충북 속리산 부근)
- ⑥ **5.1** 2016년 9월 12일 (경북 경주시 남남서쪽)
- 5.1** 2014년 4월 1일 (충남 태안 해역)
- ⑧ **5.0** 2016년 7월 5일 (울산 동구 동쪽 해역)
- 5.0** 2003년 3월 30일 (인천 백령도 해역)
- 5.0** 1978년 10월 7일 (충남 홍성군)
- ⑪ **4.9** 2021년 12월 14일 (제주 서귀포 해역)
- 4.9** 2013년 5월 18일 (인천 백령도 해역)
- 4.9** 2013년 4월 21일 (전남 흑산면 해역)



원형민 기자 20221029

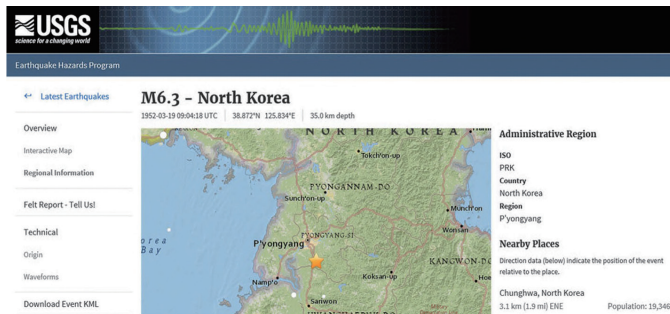
하고 단층이 많다. 이러한 단층들 중 지진을 일으킬 가능성이 높은 단층은 “활성단층”인데, 2012년의 한국지질연구원의 활성단층 조사 결과 전국에 최대 450개의 활성단층이 존재하는 것으로 추정되어, 한반도는 결코 지진의 안전지대가 아님을 확인하였다. 지진 관측을 시작한 1978년 이후 국내에서 발생한 지진은 2천 건이 넘는다고 한다.

조선왕조실록에 남아있는, 지진 기록에 따르면, 1,600년을 전후로 한 백년 사이 수도권 일대에서 규모 5 이상 지진이 모두 6차례나 발생했다. 특히 1,518년 지진은 규모가 무려 6.8로 추정됐는데, 이는 현대 지진 관측 사상 가장 강력했던 경주 지진보다 32배나 강한 지진이다.

1613년에도 서울 한복판에서 경주 지진과 비슷한 규모 5.7의 지진이 난 것으로 추정된다. 특히 수도권을 가로지르는 추가령 단층대는 최근에도 지진이 이어지고 있는데, 과거처럼 강진이 발생할 가능성을 배제할 수 없다는 게 전문가들의 분석이다. 게다가 지진 이력으로 보면, 비교적 최근이라고 할 수 있는 1952년에는 평양인근에 규모 6.2의 큰 지진이 발생했었다는 기록 역시 남아있다.

생각해 보자.

※ 이번 특집 기사를 기고해 주신 집필진 뿐만 아니라, 집필진을 소개해 주신 서울대학교 박홍근 교수님, 번역 원고의 감수를 맡아주신 국립공주대학교 김두기 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.



한겨레/2016.9.22. 보도/ 이근영 기자

이처럼 한반도는 결코 지진의 안전지대가 아니다. 대한민국이 지진 안전 지대가 되기 위해서 행정안전부는 매년 내진 보강대책을 시행해 전국 공공시설물 내진율을 높여왔고, 그 결과 2022년에는 전국의 내진설계 대상 시설 중 내진 성능 확보율은 70%에 달했다. 하지만 현재 우리나라의 민간 건축물 내진율은 15.2%로, 일본의 2016년 민간 건축물 내진율이 82%였던 것을 고려하면 아직 낮은 수치다. 올해 4월 3일 발생한 대만지진은 모범적인 지진대비 정책이란 무엇인가를 보여주는 좋은 사례다. 또한, 이를 통해, 우리나라의 내진정책이 나아가야 할 방향을 엿볼 수 있다. 또한 산업 시설의 밀집도가 높아져, 규모 6.0 이상의 지진 발생시 엄청난 재산 피해가 예상되는 우리나라에서, 이제는 수동적인 내진설계가 아닌, <회복탄력성 설계> 라는 미래지향적 설계기술을 도입할 시점이 된 것이 아닌가 라는 생각도 하게 된다. 이어질 두편의 글을 통해, 우리나라 내진정책의 방향을



대만 지진에서 배우자!

■ Earthquake Preparedness in Taiwan



| Yu-Chen Ou |

1) 대만 국립대 토목공학과 교수
 타오자웨이(Tao-Jia Wei) 석좌교수
 대만 국립지진공학연구센터(NCREE) 소장

Yu-Chen Ou¹⁾ Chiun-Lin Wu, Chi-Hao Lin, Min-Lang Lin, Yuan-Tao Weng,
 Yu-Wen Chang, Shu-Hsien Chao, and Che-Min Lin
 National Center for Research on Earthquake Engineering
 National Applied Research Laboratories
 Taiwan



Taiwan is located on the Pacific Ring of Fire and is constantly threatened by earthquakes. The 1999 ML-7.3 Chi-Chi earthquake was the most severe seismic disaster in Taiwan in the last five decades. With the epicenter near the densely populated central Taiwan, it caused extensive surface fault ruptures and strong ground motions, resulting in approximately 2,400 deaths and the collapse of over 50,000 households. This significant seismic disaster compelled all sectors in Taiwan to actively face the threat of earthquakes. Since 1999, the National Center for Earthquake Engineering Research (referred to hereafter as the “NCREE”) has been actively engaged in earthquake engineering research, including seismic hazard assessments, revisions of seismic design codes and standards, seismic retrofitting techniques, earthquake early warning systems, and the development of seismic scenario simulation technologies. Over the past 20 years, these technologies have been progressively implemented in Taiwanese society to strengthen its seismic resilience. This article provides a quick look into the seismic preparations in Taiwan that have been achieved largely in the post-Chi-Chi era. At the end of this article, some examples of building damage during the April 3, 2024, Hualien earthquake are presented to illustrate the performance of buildings with or without seismic retrofitting. More information on building damage during the Hualien earthquake can be found in the online document available at the following link https://www.ncree.narl.org.tw/assets/file/20240403_Hualien_TW_EQ_V2.0en.pdf

대만은 태평양 불의 고리에 위치해 있으며 지진의 위협을 끊임없이 받고 있다. 1999년 -7.3 치치 지진은 지난 50년간 대만에서 가장 심각한 지진 재해였다. 진앙은 인구가 밀집한 중부 대만 인근이었으며, 광범위한 표면 단층 파열과 강한 지반 운동으로 약 2,400명의 사망자와 5만 가구 이상의 붕괴를 초래했다. 이처럼 심각한 지진 재난으로 대만의 모든 부문이 지진의 위협에 직면했다. 국립지진공학연구센터(이하 NCREE)는 1999년부터 지진위험도평가, 내진설계 코드 및 기준 개정, 내진보강기법, 지진조기경보시스템, 지진시나리오 시뮬레이션 기술 개발 등 지진공학 연구에 적극적으로 참여하고 있다. 지난 20년 동안 대만 사회에서 이러한 기술은 내진 회복력(resilience)을 강화하기 위해 점진적으로 구현되었다. 이 글에서는 치치 지진 이후 대만의 지진 대비 상황을 간략히 살펴보고, 마지막에는 2024년 4월 3일 화롄 지진 당시의 건물 손상 사례를 소개하여 내진 보강이 있거나 없는 건물의 성능을 설명한다. 화롄 지진 당시 건물 피해에 대한 자세한 내용은 다음 링크를 참조할 수 있다.

https://www.ncree.narl.org.tw/assets/file/20240403_Hualien_TW_EQ_V2.0en.pdf

1. Foundation Built via Joint Efforts of Earthquake Science and Engineering Communities

Since the early 1990s, the Central Weather Administration (CWA) in Taiwan has gradually established a comprehensive dense network of strong motion seismometers and an earthquake rapid reporting system. During the 1999 Chi-Chi earthquake, this system provided a good wealth of near-fault strong motion records. After the earthquake, the Taiwan government continuously invested significant resources to investigate active faults across the island of Taiwan and surrounding seas, and further upgraded the seismic monitoring networks over time. These efforts have become a solid foundation for fundamental research and development of earthquake science and engineering technologies in Taiwan. After the 1999 Chi-Chi earthquake, the earthquake science and engineering communities in Taiwan conducted long-term studies on strong ground motion characteristics of disastrous earthquakes, including site amplification effects due to different intensities of seismic motions, near fault effects resulting from long-period velocity pulses, etc.

This involved extensive surveys of site characteristics across Taiwan and established a site classification database through boring logs at strong ground motion stations, which serves as a good reference for seismic microzonation. Integrating these research findings on strong ground motion characteristics also propelled the continual refinement of localized ground motion models in Taiwan from the so-called “attenuation law” to, more recently, “ground motion prediction equations.” Additionally, in conjunction with establishing a database for seismic source characteristics, ground motion characteristics, and local site amplifications, the re-evaluation and updating of Taiwan's seismic hazard levels have facilitated the improvements of earthquake-resistant design standards to reflect the actual seismic threats Taiwan faces.

2. Earthquake Early Warning and Structural Monitoring Systems

To assist the public in emergency evacuation at the first moment of a major earthquake, the rapid and reliable dissemination of earthquake early warning information is a crucial part of earthquake disaster mitigation measures. Building on the long-term enhancement and updates of the seismic monitoring network and the contributions and advancements in earthquake early warning technologies from the academic and industrial sectors, the CWA has, since 2013, integrated the application of real-time strong motion alerts into the national disaster prevention strategy, and progressively established a comprehensive earthquake early warning system across

1. 지진학과 지진공학 분야의 공동 노력을 통한 기반 구축

대만 중앙기상국(CWA)은 1990년대 초부터 강도 높은 운동 지진계의 포괄적인 고밀도 네트워크와 지진 신속 보고 시스템을 점차 구축해 왔다. 1999년 치치 지진 당시 이 시스템은 다량의 근거리 지진의 강진 기록을 제공했다. 지진 발생 후 대만 정부는 지속적으로 대규모 자원을 투입하여 대만 섬 전역과 주변 해역의 활성 단층을 조사하고, 시간이 지남에 따라 지진 감시 네트워크를 더욱 업그레이드했다. 이러한 노력은 대만의 지진학 및 지진공학 기술의 기초 연구 및 개발을 위한 견고한 기반이 되었다. 1999년 치치 지진 이후 대만의 지진학과 지진공학 분야에서는 지진동의 강도의 차이로 인한 지반 증폭 효과, 장주기의 속도파로 인한 근거리 지진 효과 등 재난 지진의 강진동 특성에 대한 장기적인 연구를 수행했다.

이는 대만 전역의 부지 특성에 대한 광범위한 조사와 강력한 지상 운동 관측소의 시추주상도를 통해 부지 분류 데이터베이스를 구축하는 것을 포함하며, 이는 정밀한 지진연구에 좋은 참고 자료이다. 강한 지진동 특성에 대한 이러한 연구 결과를 통합함으로써 대만에서 지역화된 지반운동 모델이 소위 “감쇄식”에서 보다 최근에는 “지반운동예측식(GMPE)”으로 지속적으로 개선되었다

또한 지진원 특성, 지반운동 특성, 국지적 현장증폭에 대한 데이터베이스 구축과 함께 대만의 지진위험 수준에 대한 재평가 및 갱신을 통해 대만이 직면한 실제 지진 위협을 반영한 내진설계 기준의 개선이 용이해 졌다.

2. 지진조기경보 및 구조물 모니터링 시스템

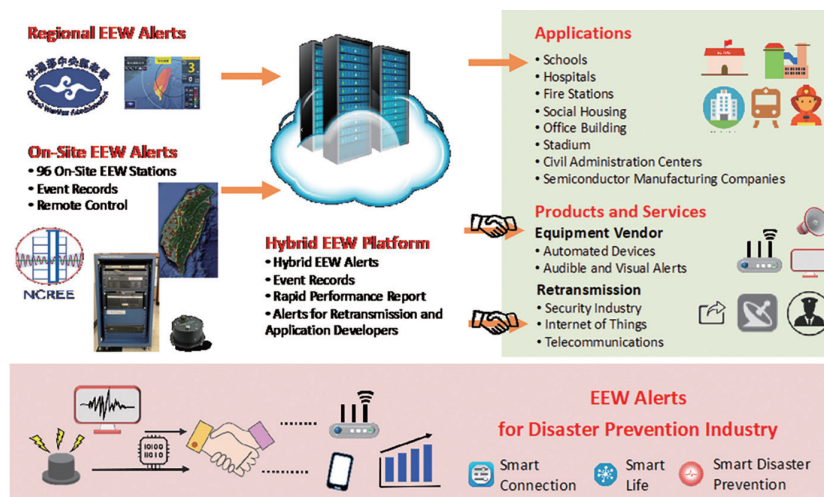
지진재난 경감 대책은 지진 조기 경보 정보의 신속하고 신뢰성 있는 전파를 통해 대지진 발생 시 국민의 긴급 대피를 지원하는 데 매우 중요한 역할을 하고 있다. CWA는 지진 모니터링 네트워크의 장기적인 개선과 업데이트, 학술 및 산업 분야의 지진 조기경보 기술의 기여와 발전을 바탕으로 2013년부터 실시간 강력한 움직임 경보 적용을 국가 방재 전략에 통합하고 대만 전역에 종합적인 지진 조기경보 시스템을 점진적으로 구축했다. 대지진 때는 지진 신속 보고 소프트웨어, 모바일 앱, PWS(Public

Taiwan. During major earthquakes, earthquake alerts are issued instantly through earthquake rapid report software, mobile apps, and the Public Warning System (PWS). Additionally, collaborations with television stations and private sector partners help to extend the reach of earthquake warnings to various industries and enhance their applicability.

Another earthquake early warning system in Taiwan is the Hybrid Earthquake Early Warning Platform, first established by the NCREE. As shown in Figure 1, this platform integrates the local on-site early warning alerts from 96 stations set up by the NCREE across Taiwan and the national early warning alerts from the CWA. Through the Hybrid Earthquake Early Warning Platform, these alerts are converted into emergency messages for many townships and districts across Taiwan. This enables both regions close to the epicenter and those a bit farther away to maximize their early warning leeway for taking emergency response actions. The alerts are also provided to retransmission and application developers for use in developing automated disaster prevention and mitigation measures. These measures include providing audible and visual alerts within buildings for personnel to take cover and guiding post-earthquake evacuation routes, shutting down important operating equipment immediately upon receiving the alert to minimize or avoid damage, slowing down moving trains to prevent derailment, and allowing rescue personnel to evacuate dangerous areas promptly to avoid secondary disasters. Currently, this system has been applied in public elementary and middle schools, civil administration centers, office buildings, social rented housing, fire stations, construction sites, hospitals, semiconductor manufacturing factories, etc. During the 2024. Hualien earthquake, this platform has again successfully issued early warning messages.

Warning System) 등을 통해 지진 경보가 즉시 발령된다. 또한 텔레비전 방송국 및 민간 부문 파트너와의 협력은 지진 경보의 범위를 다양한 산업으로 확장하고 적용 가능성을 높이는 데 도움이 된다. 대만의 또 다른 지진 조기경보 시스템은 NCREE가 최초로 구축한 하이브리드 지진 조기경보 플랫폼이다.

이 플랫폼은 <그림 1> 과 같이 NCREE가 대만 전역에 설치한 96개 스테이션의 현지 현장 조기 경보와 CWA의 국가 조기 경보를 통합한다. 하이브리드 지진 조기 경보 플랫폼을 통해 이러한 경보는 대만 전역의 많은 타운십 및 구에 대한 긴급 메시지로 변환된다. 이를 통해 진원지와 가까운 지역과 조금 더 멀리 떨어진 지역 모두 긴급 대응 조치를 취할 수 있는 조기 경고의 여지를 극대화할 수 있다. 또한 자동화된 재해 예방 및 완화 조치를 개발하는 데 사용할 수 있도록 재전송 및 애플리케이션 개발자에게 경고를 제공한다. 이러한 조치에는 직원들이 대피할 수 있도록 건물 내에서 청각 및 시각 경보를 제공하고 지진 후 대피 경로를 안내하는 것, 피해를 최소화하거나 방지하기 위해 경보를 받은 즉시 중요한 운영 장비를 폐쇄하는 것, 탈선을 방지하기 위해 열차의 이동 속도를 늦추는 것, 구조 요원이 위험 지역을 신속히 대피하여 2차 재난을 피할 수 있도록 하는 것 등이 포함된다. 현재 이 제도는 공립 초·중학교, 민원행정센터, 청사, 사회임대주택, 소방서, 건설현장, 병원, 반도체 제조공장 등에 적용되고 있다. 2024년 화롄 지진 때, 이 플랫폼은 조기 경보 문자를 성공적으로 발송했다.



[Fig.1] Hybrid Earthquake Early Warning Platform
[그림 1] 하이브리드 지진 조기경보 플랫폼

3. Continuous Revisions of Seismic Design Code for Buildings

The seismic design force requirement was implemented for the first time in the 1974 Taiwan Building Technical Regulations (referred to as TBTR hereinafter), which was based on the format of the US Uniform Building Code (UBC). TBTR was subject to a major revision in 1982, including an adjustment of the zonation scheme and the importance factors for various building occupancy categories. After the 1985 Mexico earthquake, the importance of the fundamental vibration of the Taipei basin was recognized and a specific acceleration response spectrum was incorporated in the 1989 TBTR. In 1997, the Seismic Design Specifications and Commentary of Buildings (also known as the Taiwan Building Code, referred to as TBC hereinafter) was officially released together with a major revision, including a new equation for design base shear determination, soil liquefaction assessment, etc. to ensure that buildings can maintain their functionality after minor earthquakes and protect life safety after a major earthquake; the TBTR remained at providing high level regulation rules. Figure 2 compares the seismic zonation schemes of the horizontal response spectral acceleration coefficient in different year editions of the TBTR and TBC. These seismic zones were revised over time based on new earthquake catalog and new geological survey findings. The 1999 Chi-Chi earthquake, caused by the catastrophic rupture of the Chelungpu fault, resulted in significant casualties in central Taiwan. This led to an urgent revision of seismic zones in December 1999 and an increase in seismic design forces. In 2005, the TBC was subject to major revisions, which included:

- (1) New additional chapters for seismic evaluation and retrofit of existing buildings, seismic isolation, and energy dissipating components;
- (2) The seismic design requirements for the horizontal response spectral acceleration coefficients were revised by employing a Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) approach to rationally reflect Taiwan's seismic potential and to better characterize strong motions using a locally developed attenuation equation based on Taiwan's ground motion database;
- (3) The 2005 TBC took into account the 13 active faults published by the former Central Geological Survey (referred to as CGS hereinafter) with strong evidence of activities so that near-fault factors were incorporated into the requirements.

Later, the 2011 TBC took one step further to introduce seismic microzonation for the Taipei basin to better address significant long period seismic motions that can cause serious damage to high-rise buildings. In response to the new active faults map published by the former CGS in 2021, the 2024 TBC expanded its potential seismic sources to 20 active faults, enhancing the seismic requirements for nearby

3. 건축물 내진설계 기준의 지속적 개정

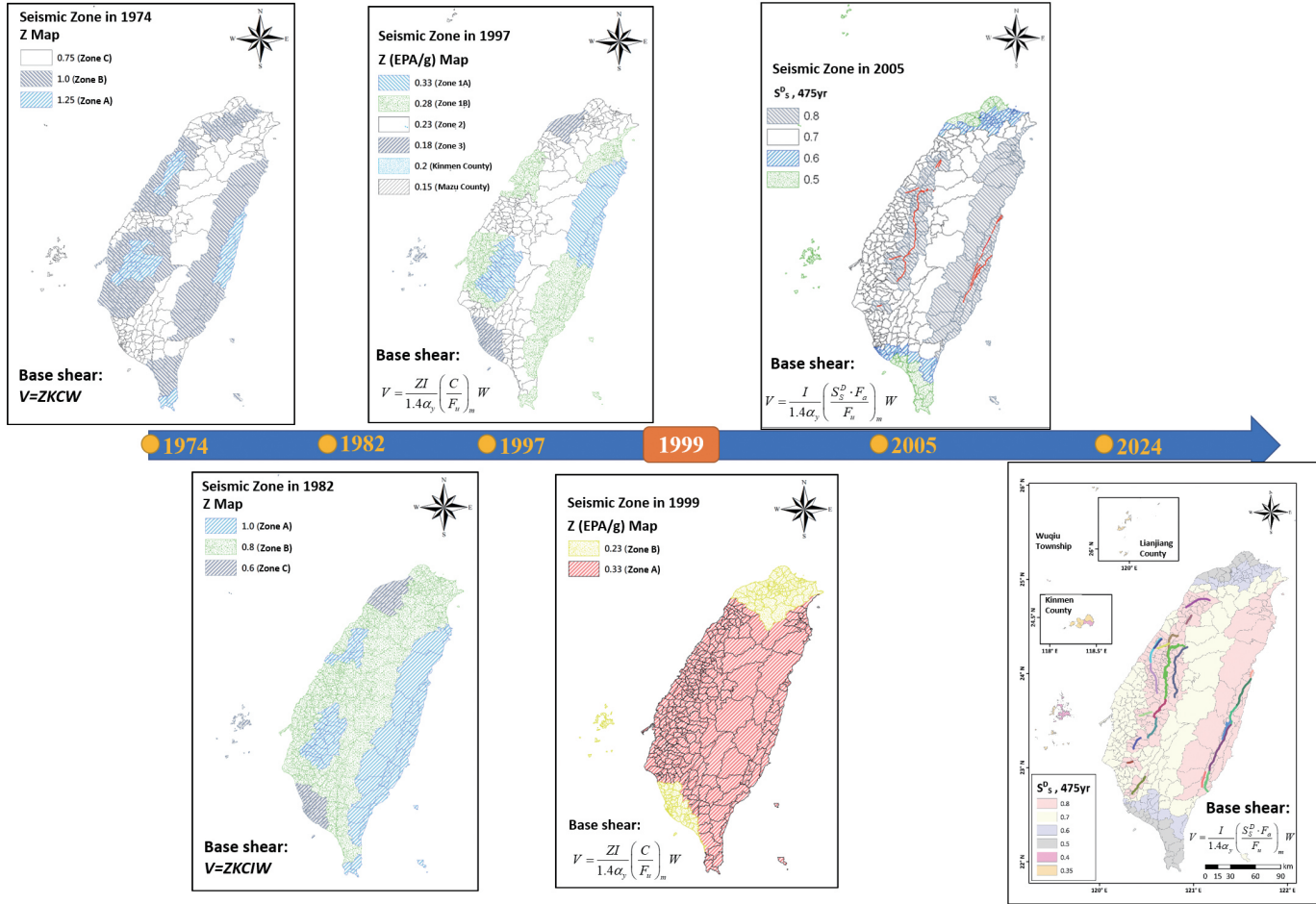
설계지진력 요건은 1974년 미국 UBC(Uniform Building Code)의 형식을 기본으로 한 대만 건축기술규정(이하 TBTR)에서 최초로 시행되었다. TBTR은 1982년 구역 계획의 조정과 다양한 건물 점유 범주에 대한 중요성 요소를 포함하여 주요 개정을 거쳤다. 1985년 멕시코 지진 이후 타이베이 지역의 고유한 진동특성의 중요성이 인식되어 1989년 TBTR에 부지가속도응답스펙트럼이 통합되었다.

1997년에는 건축물의 내진설계기준 및 해설(Taiwan Building Code, 이하 TBC)이 설계 밀면전단력 결정, 토양액상화평가 등을 위한 새로운 식을 포함한 주요 개정과 함께 공식적으로 발표되었고, TBTR은 여전히 높은 수준의 규정을 제공하고 있다.

그림 2에 TBTR과 TBC의 서로 다른 연도판에서 수평 응답 스펙트럼 가속도 계수의 지진 구역화 계획을 비교하였다. 이러한 지진대는 새로운 지진목록과 새로운 지질 조사 결과를 바탕으로 시간이 지남에 따라 수정되었다. 1999년 치치 지진은 치룽푸 단층의 치명적인 파열로 인해 대만 중부에서 큰 인명 피해를 냈다. 이로 인해 1999년 12월 긴급한 내진구역 개정과 내진설계력 증가로 이어졌다. 2005년, TBC는 주요 개정을 거쳤는데, 여기에는 다음과 같은 내용이 포함되었다:

- (1) 기존 건축물의 내진평가 및 보수, 내진 및 에너지 소산 구성요소에 대한 신규 추가 장;
- (2) 대만의 지진 잠재력을 합리적으로 반영하고 대만의 지상 움직임 데이터베이스를 기반으로 현지에서 개발된 감쇠식을 사용하여 강한 움직임을 더 잘 특성화하기 위해 PSHA(Probabilistic Seismic Hazard Analysis) 접근법을 사용하여 수평 응답 스펙트럼 가속도 계수에 대한 지진 설계 요구 사항을 수정
- (3) 2005년 TBC는 활동에 대한 강력한 증거와 함께 구 중앙지질조사국(이하 CGS)이 발표한 13개의 활성단층을 고려하여 근거리 지진에 대한 요구사항을 포함

이후 2011년 TBC는 한 걸음 더 나아가 타이베이 분지에 정밀 지진개념을 도입하여 고층 건물에 심각한 손상을 줄 수 있는 중요한 장기간의 지진 운동을 더 잘 해결했다. 2021년 구 CGS가 발표한 새로운 활성단층 지도에 대응하여 2024년 TBC는 잠재적 지진원을 20개의 활성단층으로 확장하여 인근 현장에 대한 지진



[Fig.2] Evolution of seismic zonations of horizontal response spectral acceleration coefficients from different year editions of the TBTR and TBC.
 [그림 2] TBTR과 TBC의 서로 다른 년도 판에서 수평 응답 스펙트럼 가속도 계수의 지진 지역의 변화.

sites to carefully account for the potential near fault effects. Over the past five decades, significant improvements in building seismic capacity have been achieved through reflections on accumulated lessons learned from past earthquake events and advancements in earthquake engineering technologies.

4. Taiwan Earthquake Loss Estimation System

Given the fast development of industrialization and urbanization in Taiwan, the increasing number of buildings and the population concentration make the consequences of earthquake disasters near urban areas potentially severe. In the past three decades, the United States, Japan, and Taiwan have all experienced catastrophic earthquakes, such as the 1994 Northridge earthquake, the 1995 Kobe earthquake, and the 1999 Chi-Chi earthquake.

요구 사항을 개선하여 잠재적인 근단층 영향을 주의 깊게 고려했다. 지난 50년 동안 과거 지진 사건에서 얻은 축적된 교훈과 지진공학 기술의 발전에 대한 성찰을 통해 내진 능력을 구축하는데 상당한 개선이 이루어졌다.

4. 대만 지진피해 추정 시스템

대만의 산업화와 도시화의 빠른 발전을 고려할 때, 증가하는 건물의 수와 인구 집중은 도시 지역 인근의 지진 재해의 결과를 잠재적으로 심각하게 만든다. 지난 30년간 미국, 일본, 대만 모두 1994년 노스리지 지진, 1995년 고베 지진, 1999년 치치 지진 등 대재앙의 지진을 경험했다. 진원지가 도시 지역과 가깝기

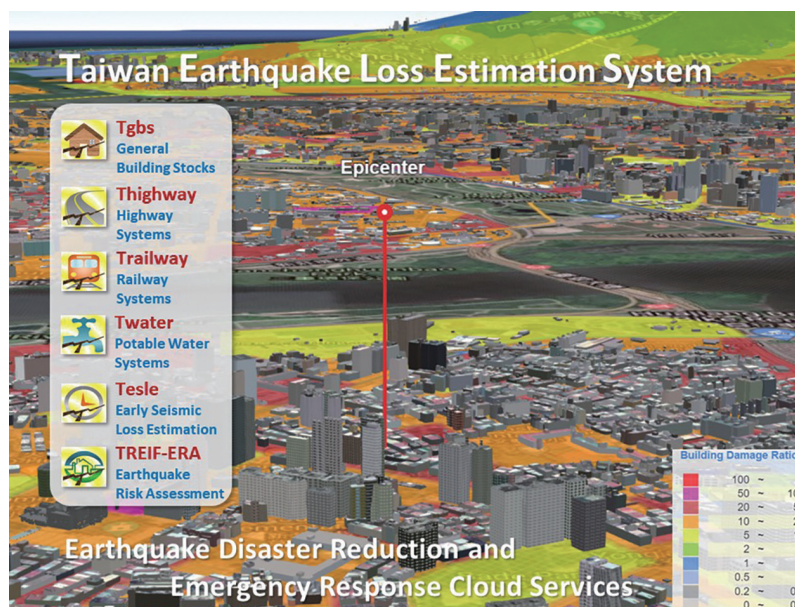
Due to the proximity of the epicenters to urban areas, these earthquakes have resulted in significant loss of life and socio-economic impact. Despite being technologically advanced countries with world-class structural seismic design and construction quality requirements, many buildings and bridges still collapsed during these earthquakes. One of the feasible solutions is to adopt a risk management approach and use simulation to estimate the potential impact and scale of disastrous losses in advance.

Since 1998, the NCREC has participated in the HAZ-Taiwan project, led by the National Science and Technology Council, investing significant manpower and funds to establish localized data, analytical models, and parametric studies. To expand the functionality and improve the usability of HAZ-Taiwan, the NCREC independently developed the Taiwan Earthquake Loss Estimation System (TELES in short). TELES offers a more user-friendly interface and customizable data classification system. It also includes features for early seismic loss estimation and risk assessment, providing various services for earthquake disaster prevention and mitigation needs. As shown in Figure 3, TELES integrates Geographic Information System (GIS) with its four main functions: earthquake scenario simulation, early seismic loss estimation, earthquake risk assessment, and cloud services.

It provides tools for earthquake disaster loss estimation for central and local governments, disaster prevention and mitigation organizations, and private sector entities. These tools can be used to formulate earthquake mitigation, emergency preparedness, and earthquake insurance risk management strategies.

때문에 이러한 지진은 상당한 인명 손실과 사회 경제적 영향을 초래했다. 기술적으로 세계적인 수준의 구조 내진 설계와 시공 품질 요구 사항을 갖춘 선진국임에도 불구하고, 이러한 지진 동안 많은 건물과 다리가 여전히 붕괴되었다. 실현 가능한 솔루션 중 하나는 위험 관리 접근 방식을 채택하고 시뮬레이션을 사용하여 재난적 손실의 잠재적 영향과 규모를 사전에 추정하는 것이다. NCREC는 1998년부터 국가과학기술심의회가 주도하는 HAZ-Taiwan 프로젝트에 참여하여 현지화된 데이터, 분석 모델 및 파라메트릭 연구를 구축하기 위해 상당한 인력과 자금을 투입하고 있다. NCREC는 HAZ-Taiwan의 기능을 확장하고 사용성을 개선하기 위해 대만 지진 손실 추정 시스템(TELES)을 독자적으로 개발했다. TELES는 보다 사용자 친화적인 인터페이스와 사용자 정의 가능한 데이터 분류 시스템을 제공한다. 또한 지진 초기 손실 추정 및 위험 평가를 위한 기능이 포함되어 지진 재해 예방 및 완화 요구에 대한 다양한 서비스를 제공한다. 그림 3과 같이 TELES는 지리 정보 시스템(GIS)을 4가지 주요 기능과 통합된다: 지진 시나리오 시뮬레이션, 지진 초기 손실 추정, 지진위험도평가 및 클라우드 서비스.

중앙 및 지방 정부, 방재 및 완화 기관, 민간 부문 주체에 대한 지진 재해 손실 추정 도구를 제공한다. 이러한 도구를 사용하여 지진 완화, 비상 대비 및 지진 보험 위험 관리 전략을 수립할 수



[Fig.3] TELES family / [그림 3] TELES 제품군



Through earthquake scenario simulations, TELES can provide the distribution and scale of potential disasters shortly after an earthquake occurs, helping disaster response centers plan emergency response measures appropriately. Additionally, it can estimate seismic scenarios for the largest possible earthquakes during regular times, helping formulate regional disaster prevention and rescue plans and thereby reducing casualties and economic losses.

5. Seismic Performance Improvement of Existing Buildings after the 1999 Chi-Chi Earthquake

The 1999 Chi-Chi earthquake was a watershed moment for the accelerated advancement of seismic technologies in Taiwan. Before 1999, Taiwan's seismic design codes for buildings were not comprehensive. The Chi-Chi earthquake resulted in the complete or partial collapse of over 80,000 buildings, including a significant number of school buildings and residential structures subjected to weak story failures. In post Chi-Chi era, the TBC was revised several times; as a result, for major earthquakes occurring after 1999, such as the 2010 Jiashian earthquake, the 2016 Meinong earthquake, the 2018 Hualien earthquake, and the 2024 Hualien earthquake, buildings designed and constructed according to the new standards have demonstrated satisfactory performance. However, buildings constructed before 1999 still have issues with inadequate seismic performance. The following is a summary of the measures taken to improve the seismic performance of older school buildings and residential structures, and the benefits from these improvements.

(1) Seismic Retrofit of School Buildings

After the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan embarked on a comprehensive effort to enhance the seismic resilience of old school buildings, which included over 27,227 structures across 3,621 public junior high schools and vocational high schools. This endeavor spanned over 20 years, divided into two main phases: preparation (2002-2009) and implementation (2009-2022). During the preparation phase, efforts were primarily focused on activities such as developing preliminary and detailed evaluation methods, studying the seismic behavior of old school buildings, and developing effective seismic retrofit schemes. Experimental validation of seismic retrofit schemes was also conducted at the preparation phase. During the implementation phase, a large-scale execution of seismic evaluation and retrofit for numerous school buildings across Taiwan was conducted.

Over the course of 14 years, engineering efforts to improve the seismic resilience of school buildings resulted in the retrofit of 9,550 structures.

This accounts for approximately 35% of the total number of public junior high

있다. TELES는 지진 시나리오 시뮬레이션을 통해 지진이 발생한 직후 잠재적 재난의 분포와 규모를 제공할 수 있어 재난대응 센터가 긴급 대응 방안을 적절하게 계획할 수 있도록 지원한다. 또한 정기적인 시간 동안 발생할 수 있는 가장 큰 지진에 대한 지진 시나리오를 추정할 수 있어 지역별 재난 예방 및 구조 계획을 수립하고 이를 통해 인명 및 경제적 손실을 줄일 수 있다.

5. 1999년 치치 지진 이후 기존 건축물의 내진성능 향상

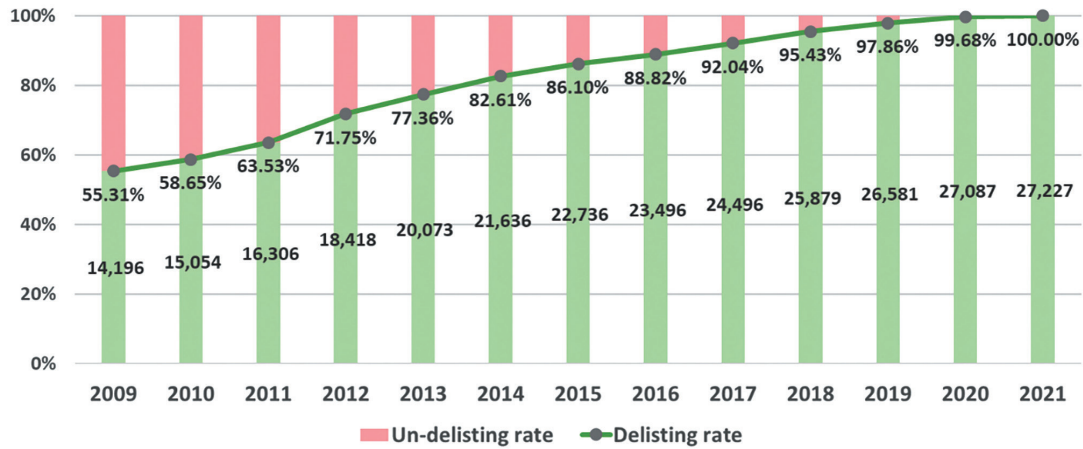
1999년 치치 지진은 대만의 지진 기술 발전이 가속화된 분수령이었다. 1999년 이전에 대만의 건축물 내진 설계 코드는 포괄적이지 않았다. 치치 지진으로 약충을 가진 학교 건물과 주거용 건물 등 8만여 채의 건물이 완전히 또는 부분적으로 붕괴됐다. 치치 지진 이후 여러 차례 TBC를 개정하여 2010년 자센 지진, 2016년 메이농 지진, 2018년 화롄 지진, 2024년 화롄 지진 등 1999년 이후 발생한 대지진에 대해 새로운 기준에 따라 설계하고 시공한 건물들이 만족할 만한 성능을 보였다. 그러나 1999년 이전에 건설된 건물은 여전히 내진 성능이 부족한 문제가 있다. 노후 학교 건물 및 주거 구조물의 내진 성능 향상을 위해 취해진 조치와 이러한 개선으로 인한 이점을 정리하면 다음과 같다.

(1) 학교 건축물의 내진 보강

1999년 치치 지진 이후 대만은 3,621개의 공립 중학교와 직업계 고등학교에 걸쳐 27,227개가 넘는 구조물을 포함하는 오래된 학교 건물의 내진 회복력을 향상시키기 위한 포괄적인 노력에 착수했다. 이 노력은 20년에 걸쳐 진행되었으며, 준비(2002-2009)와 실행(2009-2022)의 두 가지 주요 단계로 나누어졌다. 준비 단계에서는 주로 사전 및 세부 평가 방법 개발, 노후 학교 건물의 내진 거동 연구, 효과적인 내진 보강 계획 개발 등의 활동에 중점을 두었다. 준비단계에서는 내진보강 계획에 대한 실험적 검증도 수행되었다. 실행단계에서는 대만 전역의 수많은 학교 건물에 대한 내진평가 및 보강에 대한 대규모 실행이 수행되었다.

14년 동안 학교 건물의 내진 회복력을 향상시키기 위한 공학적 노력은 9,550개의 구조물을 개조하는 결과를 낳았다.

이는 전국 27,227개 건물에 해당하는 공립 중학교와 직업계 고등학교 전체의 약 35%를 차지한다. 이 계획을 위해 약 1,284



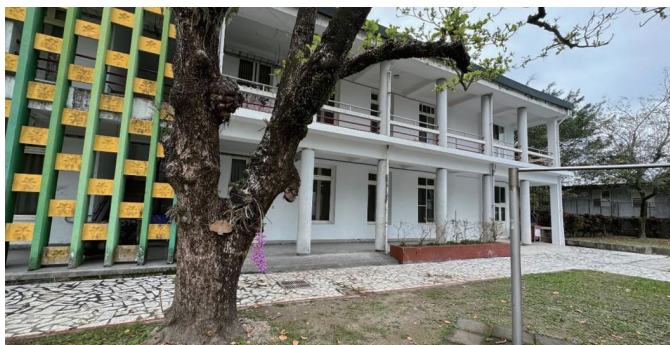
[Fig.4] The statistics for the number of school buildings completed and removed from the retrofitting project's monitoring list over the years
 [그림 4] 다년간의 학교건물 준공 및 보수공 모니터링 대상에서 제외된 학교건물 수에 대한 통계

schools and vocational high schools, which amounts to 27,227 buildings nationwide. A total investment of around 128.4 billion New Taiwan Dollars was allocated for this initiative. As a result, all public junior high schools and vocational high schools now meet the required seismic safety standards, ensuring the safety of both students and teachers. Figure 4 depicts the yearly completion statistics of the school retrofit project.

In the April 3, 2024 Hualien earthquake, the Fine Arts Building of National Hualien Girls' High School, which was retrofitted using reinforced concrete walls and column expansion in 2019, showed no structural damage (Figure 5a). In contrast, the Complex Building, which was not retrofitted, suffered severe damage to the columns of the first story (Figure 5b). This demonstrates that completing seismic retrofitting significantly enhances the seismic performance of school buildings, as evidenced by the differing outcomes between the two buildings on the same campus.

억 뉴대만 달러의 총 투자금이 배정되었다. 그 결과 현재 모든 국립 중학교와 직업계 고등학교가 요구되는 내진 안전 기준을 충족하여 학생과 교사 모두의 안전을 보장하고 있다. 그림 4는 학교 내진보강 사업의 연도별 준공 통계이다.

2024년 4월 3일 화롄 지진에서 2019년 철근콘크리트 벽체와 기둥 확장을 이용하여 개보수한 국립 화롄 여자고등학교 미술관 건물은 구조적인 손상이 없는 것으로 나타났다(그림 5a). 이에 비해 개보수를 하지 않은 복합건물은 1층 기둥이 심하게 파손되는 피해를 입었다(그림 5b). 이는 동일한 캠퍼스에 있는 두 건물의 상이한 결과에서 알 수 있듯이 내진 보강을 완료하는 것이 학교 건물의 내진 성능을 크게 향상 시킨다는 것을 보여줬다.



(a) Fine Arts Building (seismically retrofitted)



(b) Complex building (not seismically retrofitted)

[Fig.5] The National Hualien Girls' Senior High School after the 0403 Huelien earthquake.

[그림 5] 0403 후엘리엔 지진 이후의 국립 화롄 여자 고등학교

(2) Seismic Retrofit of Private Buildings

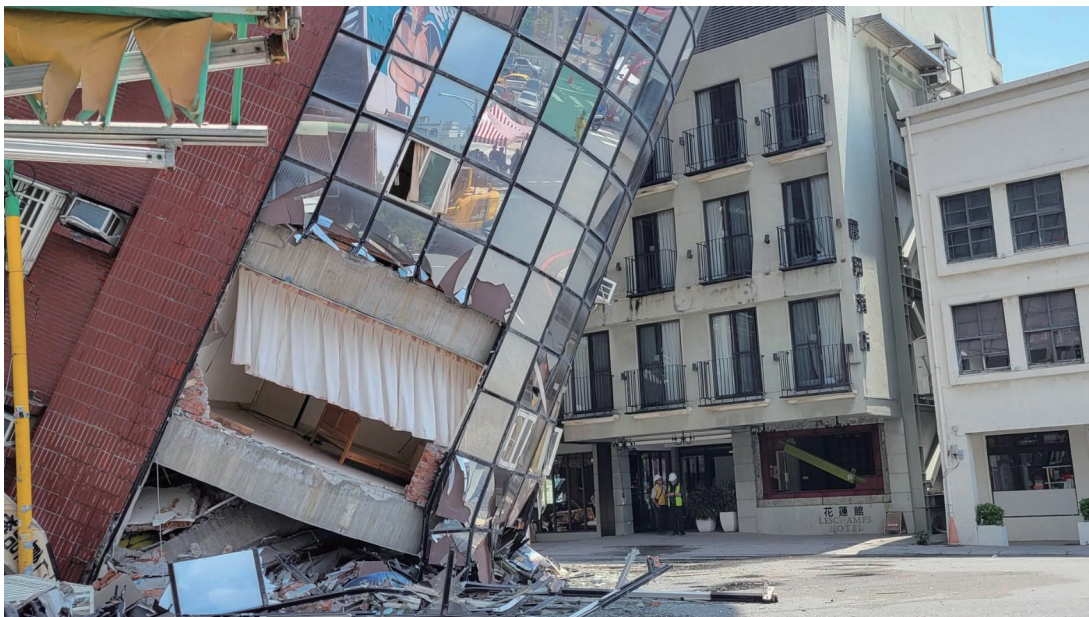
In the 2016 ML-6.4 Meinong earthquake in Taiwan, a total of 117 people lost their lives. Among them, 115 individuals (98.3%) died as a result of the collapsed Weiguan Jinlong Building. One of the primary reasons for its collapse was the failure of a weak story, leading to the structural system instability. In the 2018 ML-6.26 Hualien earthquake, four buildings collapsed, resulting in 17 fatalities. Similar to previous earthquakes, the collapse was attributed to the mechanism of soft weak story failure. Consequently, starting from 2018, the Executive Yuan initiated the seismic assessment and retrofit project for old private buildings. The NCREE also began to assist with the development of the "Single Building Seismic Retrofit Technical Manual and Demonstration Cases." Open seminars to discuss the design and construction methods for seismically retrofitting weak stories in single buildings and provide guidance on actual demonstration cases of weak story retrofitting in apartment buildings are helpful in facilitating subsequent promotion and offer practical references for the public to follow.

Promoting seismic retrofitting for private buildings poses significant challenges, primarily due to the complex ownership structure inherent in such properties. Costs must be shared among multiple private owners and addressing relocation issues during construction oftentimes further complicates consensus-building efforts. Taking these factors into consideration, the NCREE suggests narrowing the scope of retrofit, reducing costs, and focusing retrofit project in public spaces whenever possible.

(2) 민간건축물의 내진보강

2016년 대만 ML-6.4 메이닝 지진으로 총 117명이 목숨을 잃었다. 이 가운데 웨이관 진룽 빌딩 붕괴로 사망한 사람은 115명(98.3%)이다. 그 붕괴의 주요 원인 중 하나는 약층의 붕괴로 인해 구조적인 시스템의 불안정으로 이어졌다. 2018년 -6.26 화롄 지진에서는 건물 4동이 붕괴되어 17명의 사망자가 발생했다. 이번 붕괴는 이전 지진과 마찬가지로 약층-연층의 붕괴 메커니즘에 기인한 것으로 분석된다. 이에 따라 관리자는 2018년부터 노후 민간 건물에 대한 내진평가 및 개조 사업을 시작했다. NCREE는 또한 "단일 건물 내진 보강 기술 매뉴얼 및 실증 사례" 개발을 지원하기 시작했다. 단독건물의 약층보충 설계 및 시공방법을 논의하고 공동주택의 약층보충의 실제 실증사례를 안내하는 공개세미나는 후속추진에 도움이 되며 국민들이 따라 할 수 있는 실질적인 참고자료를 제공한다.

민간 건물에 대한 내진 보강을 촉진하는 것은 주로 이러한 속성에 내재된 복잡한 소유 구조 때문에 상당한 과제를 안고 있다. 비용은 여러 개인 소유자 간에 공유되어야 하며, 건설 중 이전 문제를 해결하는 것은 종종 합의의 구축 노력을 더욱 복잡하게 만든다. NCREE는 이러한 요소들을 고려하여 보수 범위를 좁히고 비용을 절감하며 가능하면 공공장소에 보수 사업을 집중할 것을 제안한다.



[Fig.6] Performance comparison of private buildings after the 2024 Hualien earthquake: in the front, the Uranus Building; in the back, the Les Champs Hotel building.
 [그림 6] 2024 화롄 지진 이후 민간건물의 성능 비교 : 정면에는 천왕성 건물, 후면에는 레상 호텔 건물.

Since 2019, the NCREE has been commissioned by the National Land Management Agency to establish the "Private Building Seismic Weak Story Retrofit Project Office." This office assists in promoting and advocating seismic weak story retrofit, establishes a review procedure for retrofit designs, provides outreach education and training for practicing engineers, and offers information and assistance to the public regarding seismic weak story retrofit.

As of May 20, 2024, the office has assisted communities in obtaining government-approved subsidy programs for a total of 70 cases, among which 12 cases have been completed.

The Uranus Building in Hualien had actually sustained minor damage in the 2018 ML-6.26 Hualien earthquake. At that time, it was tagged "yellow" indicating seismic repair or upgrade would be needed. The owner chose not to retrofit it. In the 2024 Hualien earthquake, the Uranus Building sustained severe damage in the ML-7.2 mainshock, but 13 minutes later collapsed in the ML-6.5 aftershock (the building in the front in Figure 6). In contrast, the old building adjacent to the Uranus Building (Les Champs Hotel building, located directly behind the Uranus Building in Figure 6) was seismically retrofitted with buckling restrained braces and remained undamaged during the earthquake on April 3, 2024.

NCREE는 2019년부터 국토관리청의 위탁을 받아 '민간건축물 내진취약층 복고사업소'를 설립하고 있다. 이 사무소는 내진 약층 보수를 홍보하고 옹호하는 데 도움을 주고, 복고 설계에 대한 검토 절차를 수립하고, 실무 엔지니어를 위한 아웃리치 교육 및 훈련을 제공하며, 일반 대중에게 내진 약층 복고에 대한 정보와 도움을 제공한다.

2024년 5월 20일 현재, 동사무소는 총 70건에 대해 정부가 승인한 보조금 프로그램을 획득할 수 있도록 지역사회를 지원하고 있으며, 이 중 12건이 완료되었다.

2018년 -6.26 화롄 지진에서 화롄 천왕성 빌딩이 경미한 피해를 입었다. 당시에는 지진 수리나 업그레이드가 필요하다는 '노란색' 태그를 붙였다. 소유주는 그것을 개조하지 않기로 결정했다. 2024년 화롄 지진에서 천왕성 빌딩은 ML-7.2 본진에서 큰 피해를 입었지만, 13분 후 ML-6.5 여진에서 붕괴되었다(그림 6의 앞 건물). 반면, 천왕성 빌딩(Les Champs Hotel, 그림 6의 천왕성 빌딩 바로 뒤에 위치)에 인접한 옛 건물은 2024년 4월 3일 지진 때 좌굴 억제 교정기가 지진에 의해 개조되어 손상되지 않은 상태로 유지되었다.

※ 본 원고는 박흥근 교수의 요청으로 국립대만대학 Yu-Chen Ou (歐昱辰) 학장께서 기고한 글을 김지상 부회장이 번역하였다.

[필자소개]

Yu-Chen Ou 교수는 대만 국립대 토목공학과와 저명한 교수이자 타오자웨이(Tao-Jia Wei) 석좌교수의 보유자인 Yu-Chen Ou는 대만 국립지진공학연구소(NCREE) 소장이다.



대만 지진에서 배우자!

■ 지진 회복탄력성 관련 국내외 동향 및 산업시설의 회복탄력성 확보방안



| 정 광 량 |
한국건축구조기술사회
전임회장(15대)
(주)씨애피동양 대표이사



| 김 지 영 |
(주)씨애피동양
상무 / 기술연구소장



| 우 운 택 |
(주)씨애피이앤씨
연구소장



1. 서론

올해 4월 3일 오전 7시30분경, 대만에서 발생한 규모 7.4의 강진이 발생했다. 1999년에 7.6 지진이 발생한 이후 대만에서 발생한 가장 큰 규모의 지진으로 글로벌 반도체 생산·공급업체인 TSMC(Taiwan Semiconductor Manufacturing Co.) 공장 역시 일부 제조를 중단하고 직원들을 긴급 대피시켰다고 전해진다. 이와 같이 지진으로 인한 인명피해와 함께, '산업의 쌀'로 불리는 반도체 생산 차질로 전 세계가 긴장하는 상황이 발생하였다. 이미, 세계 반도체 공업회(Semiconductor Engineering.co.)도 전 세계 반도체 생산시설이 강진지역, 특히 일본, 대만, 미국의 서부와 한국(중진지역)에 집중되어 있다는 점을 우려한 바 있다.²⁾

재난에 대한 산업시설의 회복탄력성 확보는 국내 뿐만 아니라 전 세계적인 경제 침체를 최소화하기 위해 선택이 아닌 필수임이 확인되었다. 따라서, 우리나라도 재난시 산업시설에 대한 회복탄력성 확보를 위해 관련 법·제도 정비와 함께 실효적 제도이행을 위한 내진설계 및 보강 관련 기술을 확보하는 종합적 대책 마련이 필요하다. 본 기고에서는 재난 대응 회복탄력성과 관련한 제도·정책 및 기술동향을 소개하고, 향후 우리나라 산업시설의 회복탄력성 향상을 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 회복탄력성 개요

일본건축학회는 회복탄력성과 BCP레벨 관련 보고서를 통해 회복탄력성과 건축구조에서의 현황을 소개하고, 구조물의 강건성과 회복탄력성의 평가 방안 및 미래 연구개발 방향을 제시하였다.¹⁾ 회복탄력성은 대상에 작용한 외력으로 저하된 성능에 대한 회복력으로 정의할 수 있다. 또한, 시설물에 자연재해 등 이벤트에 의해 피해가 발생하여도 최소한의 기능을 유지하고 신속히 복구할 수 있는 능력을 의미한다. 회복탄력성의 개념은 파괴확률의 감소, 인명 및 경제적 손실 감소, 기능복구 시간의 감소 등을 포함한다.

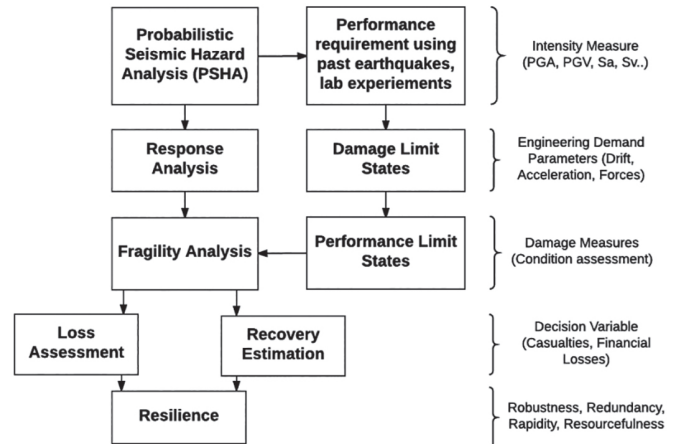
회복탄력성의 평가척도는 그림 1의 회복탄력성 삼각형으로 설명할 수 있다. 그림 1에서 재해 전의 성능 상태를 100%로 설정한 경우, 자연재해가 시각에서 발생하여 구조물의 성능이 저하되고, 이후 시각에 성능이 재해 전의 수준으로 복구되는 것을 나타낸다. 여기서 회복탄력성을 나타내는 지표로서 값이 제안되었으며, 값은 그림 1의 음영부분 면적이며, R 값이 적을수록 회복탄력적이다.²⁾

회복탄력성은 표 1과 같이 4가지 특성을 가진다.³⁾ 회복탄력성은 국가, 커뮤니티, 대상건물 등 대상과 범위가 달라질 수 있다. 또한, 회복탄력성은 표 1과 같이 대상 구조물 자체의 Robustness와 Redundancy 뿐만 아니라

기능회복을 위한 복구자원, 기술 등과 함께 신속한 복구를 위한 능력에 따라 결정된다.

건축구조물을 대상으로 할 경우, 회복탄력성을 향상하기 위해 Robustness와 Redundancy를 강화하는 것이 중요하다. 자연재해 중 지진이 가장 큰 대상 중 하나이며, 지진과 같이 변동성이 큰 대상일 경우, 평균을 초과하는 사건으로 인해 회복탄력성이 크게 낮아질 수 있다. 따라서, 건축구조에서의 회복탄력성을 고려할 때 최악의 시나리오를 가정하는 것이 중요하다. 병원, 공공건물, 기간산업시설 등 중요 건축구조물의 기능유지를 위해 회복탄력성에 기반한 내진설계가 필요하며, 기존 건축물에 대해서는 회복탄력성의 평가 및 내진성능보강 방안이 요구된다.

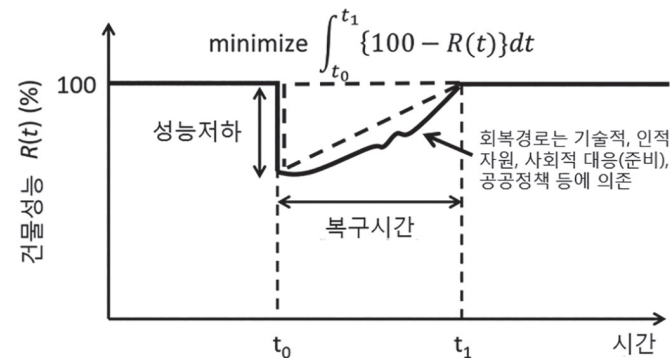
이와 같이 대상구조물의 회복탄력성 확보방안 수립을 위하여, 그림 2와 같은 회복탄력성 프레임워크를 참고할 수 있다.⁴⁾ 지진 회복력 기반 설계를 위해, 먼저 대상 구조물에 대하여 예상할 수 있는 강진을 설정하고 정확한 지반운동을 식별하여 응답해석을 수행한다. 그 다음으로 대상 구조물의 손상한계와 성능한계를 수립하고 응답해석의 결과를 반영하여 지진에 대한 취약도를 작성한다. 이를 이용하여 재난시 손실평가 및 복구비용을 추정하여 회복탄력성을 최종 평가하게 된다.



[그림 2] 회복탄력성 확보를 위한 프레임워크⁶⁾

[표 1] 회복탄력성 특징⁵⁾

특징	주요내용
Robustness	구조요소 및 시스템 등이 가지는 손상에 대해 저항하는 능력
Redundancy	일부 기능이 손상, 전체 시스템의 기능은 유지하는 능력
Resourcefulness	기능회복을 위한 자원, 기술, 정보, 인적자원 확보 능력
Rapidity	신속한 기능회복 능력



[그림 1] 회복탄력성 삼각형(Bruneau M., 2006)³⁾

3. 국내외 동향

일본은 지진을 포함한 재난·재해 등 긴급상황에 대응한 국가차원의 사업연속성 계획(BCP) 기본방침 및 표준기준을 제정하고 있다. 내각부 산하 중앙방재회의에서는 2005년부터 기업과 정부기관의 사업 연속성을 강화하기 위해 기본방침 및 표준기준을 제정하였으며, 니가타현 지진(2004·2007년), 동일본대지진(2011년) 등 위기상황 발생 후 지속적인 보완을 실시하였다.⁵⁾

미시간 도요타자동차 2011년 동일본대지진 발생에 따른 부품수급 차질 등 공급망의 문제 등을 경험하고, 'RESCUE'라는 부품공급업체 정보를 관리하는 체계를 운영하고 있다. RESCUE 시스템은 약 6,800개 품목에 대한 공급망 정보를 저장하고 표준화되었으며 일본 자동차 공업 협회와 협력하여 재해 복구 공급망의 기반을 마련하는데 기여하고 있다.⁶⁾

미국 LADEC(LA경제개발공사)는 기업의 지진영향을 최소화하기 위해 'Planning for Business Operations After Earthquake' 가이드 제공하고 있다.⁷⁾ 강진 지역인 캘리포니아에서 비즈니스를 운영하는 경우 지진이나 기타 자연 재해 이후에도 비즈니스 운영 및 시스템이 가동될 수 있도록 비즈니스 연속성, 비즈니스 복원력 및 재해 복구를 계획하는데 가이드를 활용할 수 있다.

미국 FEMA(2020)는 지진 후 비즈니스 연속성을 위해 Resilience-Based Design and the NEHRP Provisions을 제시하고 있다.⁸⁾ 현재 미국 연방 정책은 지역 사회 단위에서 지진 회복력을 향상시킬 것을 요구하고 있으며, 이를 위해 기능 복구 시간에 기반한 설계 기준을 제공함으로써 목표한 회복탄력성을 달성하도록 제시하고 있다. 다양한 내진 설계 범주에 대하여 특정 설계기준을 설정하는 것과 같이, 서로 다른 기능에 대한 복구 시간에 대해 단계적으로 사용할 수 있는 일련의 요구 사항을 표 2와 같이

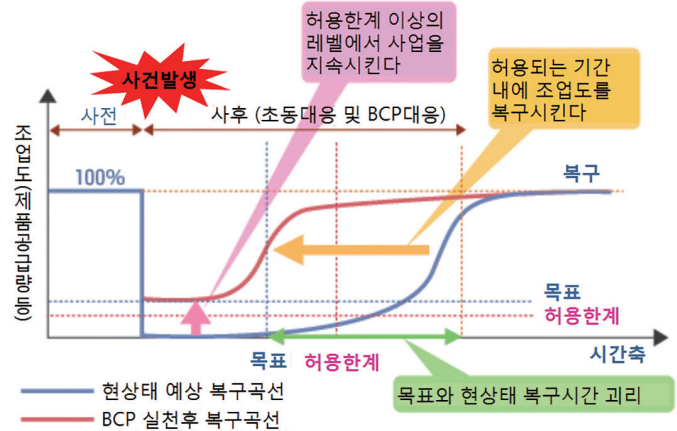


제시하고 있다.

국내는 포항지진(17) 이후 지진조기경보 추진, 공공시설물 내진보강 기간단축 등 지진방재 개선대책 발표하였다. (행안부, '18.5.25) 지진시 정부, 지자체 등의 업무연속성 관리(행안부, '14)와, 국가 산업단지 지진재난 안전관리(광주대, '20) 등 정책연구도 수행하였다. 그러나, 건축구조를 대상으로 한 회복탄력성 확보를 위한 지침, 설계기준 등이 부족한 실정이며, 특히 대규모 재난 발생시 국가경제활동의 근간이 되는 중요 산업시설에 대한 기능유지를 위한 제도적, 기술적 방안이 미흡하므로, 이에 대한 대응방안 마련이 필요하다고 사료된다.

[표 2] Hypothetical prescriptive design requirements for a range of functional recovery times¹⁰⁾

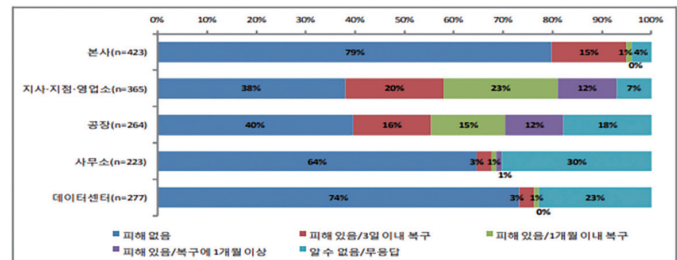
Functional Recovery Design Requirement	Target Functional Recovery Time, T _{target}			
	1 Hour	1 Day	1 Week	1 Month
Structural				
Limits on lateral system selection	Required	Required	Required	-
Limits on drift	Required	Required	Required	-
Factor on required strength	Required	Required	-	-
etc.	...	...	...	...
Nonstructural				
Increased bracing scope	Required	Required	Required	-
Reliability factors on design strength	Required	Required	-	-
Ruggedness certification	Required	Required	-	-
etc.	...	...	...	...
Recovery-critical contents				
To be determined by user groups	Required	Required	-	-
etc.	...	...	...	...
Utility service				
Electricity backup	Required	Required	Required	-
Potable water backup	Required	Required	Required	Required
Wastewater alternative	Required	-	-	-
Telecommunications	Required	-	-	-
etc.	...	...	...	...
Reoccupancy and recovery planning				
Repair services on retainer	Moot	Required	Required	-
Pre-determined safety evaluation protocol	Moot	Required	-	-
Business continuity plan	Required	Required	-	-
Pre-defined permit application	Moot	Required	Required	-
etc.	...	...	...	...



[그림 3] 사업연속성 개념 (일본 내각부) 10)

4. 국내 산업단지의 회복탄력성 향상 방안

일본 도호쿠 지방에서 발생한 9.0 규모의 대지진(11)으로 인해 일본 기업뿐만 아니라 GM 등 글로벌 기업의 생산 축소, 중단 사태 발생하였다. 사상자 및 실종자 28,485명이며, 건축물, 인프라, 사회기반 시설 등 피해 추계액 16조 9천억엔으로 집계되었다. (위키백과) 특히, 동일본 대지진 시 발전소 피해로 인한 전력부족, 공급망 단절로 인한 산업부문 피해, 기업의 직접적 피해 발생하였다. (KIEP, '11)



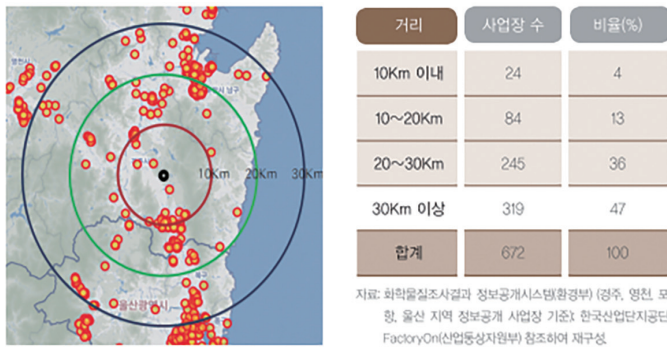
주: 해당 거점을 가진 기업을 대상으로 집계.
자료: 野村総合研究所(2011, 6), <http://www.nri.co.jp>.

[그림 4] 동일본 대지진에 따른 거점 피해현황 (KIEP, '11) 10)

우리나라도 1999년 이후 연평균 발생회수는 70회이나, 최근 3년간은 연평균 196회로 증가('16~'18년), 지진 안전지대 아님을 확인하였다. 2019년 규모 3.0 이상의 지진은 총 14회로서 2018년 4회 대비 크게 증가하였으며, 최근 10년('99~'18) 평균 10.9회 대비 높은 수준으로 나타났다. (기상청, '20)

국내 산업시설의 부족한 내진성으로 인해 지진 발생시 근로자 인명피해, 공급망 단절, 시설 가동중단 등에 의한 경제적 피해발생이 예상되나,

국가산업단지의 내진율은 41%(면적기준)에 그치고 있어 내진성능에 대한 향상이 시급히 필요하다. 특히, 최근 지진이 발생한 경주 인근의 사고대비 물질 취급 사업장은 672개소이며, 이 중 53%가 지진발생 중심 30km 이내에 분포한다.⁹⁾



[그림 5] 경주지역 사고대비물질 취급사업장 현황 (KEI 포커스, '16) 11)

현재 국내 지진피해 발생 후 공공시설물의 내진보강이 진행되고 있으나, 민간시설, 특히 산업시설에 대한 내진대책이 부족한 실정이다. 국민 경제 활동의 중심인 산업시설에 대한 내진율을 향상하고, 지진 후 기능유지 또는 신속한 복구를 위한 지진회복력 강화 방안 마련이 시급하다고 사료된다.

최근 산업시설의 공정은 로봇화되어 있어 높은 정밀도를 요구하고 있으며, 정밀한 생산수율(투입수에 대한 완성된 양품(良品)의 비율) 즉, 불량률의 최소화가 매우 중요하다. 그러나, 자연재난 중 지진의 경우 건물 자체를 흔들어 버리기 때문에 지진발생 후 생산설비의 정밀도가 낮아질 수 있다. 또한, 지진은 본진이후 계속적으로 여진이 발생되어 정상적인 생산 여부를 결정하기 어려워진다.

따라서 이러한 정밀 생산시설의 경우는 건물의 구조체와 생산설비의 변형을 관리하기 위해서는 정밀계측을 통한 시간별 3차원 모델정보 데이터가 필요하다. 이러한 데이터 관리를 통해 공장 및 설비의 변형을 신속히 파악하고, 공장생산의 중단을 최소화하여 생산의 지속가능성을 높일 수 있다. 따라서, 최첨단 공장시설 경우 건축법 및 기준에서 요구하는 사양기반 설계(Code-based Design) 보다는 건축법 이상의 성능요구사항에 근거한 회복탄력성 기반 설계(Resilience-based Design) 개념을 도입하는 것이 필요하다. 여기에 건물 구조체 내진성능 확보와 함께 생산설비 기능유지, 전기 등 수전공급, 소방 등 안전설비도 함께 고려되어야 재난 후 비즈니스 연속성의 효과를 극대화 할 수 있다.

이를 위해 기존 산업시설의 회복탄력성을 정량적으로 평가하고, 신속히 향상하는 방안이 필요하며, 이를 위해 구조물의 내진성능을 정량적으로 평

가하는 기술과 지진에 대한 저항성, 다중성, 자원의 확보 및 분배, 복구 능력 등을 고려한 내진성능 향상 기술이 요구된다. 또한, 구조물의 안전성 뿐만 아니라 복구자원의 배분, 우선 순위 결정 등을 판단하고, 이들을 통합·운용할 수 있는 관리시스템을 갖추는 것이 필요하다. 또한, 재해 후의 잔여성능을 고려한 회복탄력성을 평가하여 기능회복을 위한 복구시간을 최소화하는 제도 및 기술적 방안이 요구된다.

이를 위해 (주)씨앤피동양은 그림 6과 같이 기존 산업시설을 대상으로 지진재해 대응 회복탄력성 향상을 위한 프레임워크를 수립하고, 세부 기술요소를 단계적으로 개발하고, 실무적용 중에 있다. 프레임워크는 총 6개 단계로 구성되며, 각 단계는 3D 스캐닝, BIM, 비선형 동적해석, 내진성능 평가, 내진성능보강 및 지진 모니터링 등 요소 기술로 구성된다. 이를 이용하여 설비를 포함한 산업시설물의 내진성능 진단·평가 기술, 산업시설의 운영중단을 최소화하면서 내진성을 향상하는 기술, 지진 시 근로자 안전 확보와 신속한 운영재개를 가능하게 하는 기술을 특징으로 한 산업시설물 지진 회복탄력성 강화방안을 수립하였다.

산업시설의 지진 회복력 강화를 위해서는 우선적으로 현재 시설물에 대한 상태를 정확히 조사하는 것이 필요하다. 이를 위해 보유한 설계도서 검토와 함께, 3D 스캔으로 현재 시설물의 상태를 그대로 스캐닝하여 As-used BIM을 작성하고, 현장 안전점검·진단 정보 등 조사자료를 디지털화 하는 것이 필요하다. BIM 기반 디지털 정보를 바탕으로 구조물 변형 및 임의 구조변경사항의 분석, 구조해석용 모델링 작성 등을 자동화 할 수 있다. 또한, As-used BIM을 정기적으로 수행하고, 이전 단계의 BIM 모델과 비교함으로써 구조물의 변형, 손상, 노후화 등을 분석할 수 있다.

그 다음으로 구조물에 대한 비선형 동적해석 등 구조해석을 수행하고, 내진성능을 평가하여 보강방안을 수립한다. 이를 위해 BIM으로 구축된 디지털 정보 및 구조 BIM을 활용하고, 구조 BIM의 현장조사 속성정보를 바탕으로 구조해석모델을 작성한다. 또한, 해석 및 성능평가 결과에 따른 구조보강 방안 수립시 현재 대상 시설물의 설비 배치, 운영현황을 고려하여 공장가동 중단을 최소화할 수 있는 보강설계를 수행할 수 있다. 또한 대상 시설물에 지진모니터링 시스템을 설치하여, 지진 속도 전달, 지진 후 건물 및 설비 성능진단 등에 활용할 수 있다.

5. 맺음말

현재 전 세계가 하나의 공동체가 되어감에 따라 국가별 중요 산업시설의 내진설계 및 내진보강을 통한 회복탄력성의 확보는 선택이 아닌 필수인 것을 최근 대만 지진 등 해외 지진피해 사례에서 확인하였다. 우리나라도 국내 산업시설의 지진 대비 체계를 재점검하고, 법제도 정비와 함께 내진설계, 시공감리 및 내진성능향상에 대한 제도 마련과 함께 관련 기술에 대한


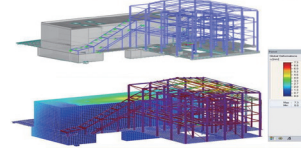
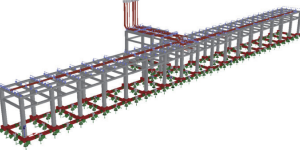
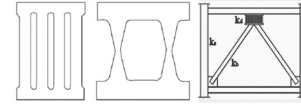




확보를 추진할 필요가 있다. 나아가 단순한 피해 복구를 넘어, 재난 발생 시 신속한 기능복구와 회복탄력성 확보를 위한 종합적인 대책 마련이 필요하다.

이를 위해서는 정부와 기업, 전문가 집단의 협력이 필수적이다. 기업은 자발적으로 내진보강에 투자하고, 회복탄력성이 가능한 체계를 갖추어야 한다. 전문가 집단은 최신 기술과 노하우를 바탕으로 설계와 시공 과정에 적극 참여하고, 지속적인 연구개발을 통해 회복탄력성에 기반한 내진기술을 고도화해 나가야 한다. 산업시설의 내진보강과 회복탄력성(Resilience capacity)제고는 향후 지속가능한 경제 발전을 위한 첫걸음이 될 것이다.

“한번도 일어난 적이 없는 일은 언제나 일어난다”

- 스콧세이건 교수 -

<p>1] BIM 기반 시설물 정보 구축</p>  <p>넓은지역, 복잡한 시설물에 대한 3차원 정보 취득/구축</p> <p>드론 활용 3D 스캔을 이용한 산업시설 As-used BIM 정보 구축</p>	<p>2] 시설물 내진성능평가</p>  <p>산업시설 기능유지 및 안전에 대한 지진해석 및 검토</p> <p>비선형 정적 및 동적 해석을 이용한 산업시설물 내진성능 평가</p>
<p>3] 설비/비구조 내진성능평가</p>  <p>복잡한 구조물에 대한 As-used 정보 반영 해석모델 작성</p> <p>BIM 기반 설비/비구조 구조해석모델 생성 및 지진응답 해석</p>	<p>4] 시설물 내진성능보강</p>  <p>산업시설 운영 시 장애요인 사전검토 및 신속한 내진보강공사 수행</p> <p>조립식 보강, 제진기구를 이용한 신속 내진성능보강</p>
<p>5] 설비/비구조 내진성능보강</p>  <p>간편한 내진보강으로 시설운영 제한을 최소화</p> <p>조립식 보강제품을 이용한 신속 내진성능 보강</p>	<p>6] 지진 모니터링 시스템</p>  <p>지진시 설비운영 정지 및 재개를 신속한 지진정보 및 시설물 안전정보 제공</p> <p>지진 및 시설물 모니터링을 통한 지진 조기경보, 시설물 안전 신속평가</p>

[그림 6] 산업시설물 지진 회복탄력성 향상 프레임워크 (㈜씨애플피동양)

<참고문헌>

- 1) 日本建築学会 (2020), 建物のレジリエンスとBCPレベル指標計特別調査委員会報告書
- 2) 福田降介(2015), ‘構造物のレジリエンス - 自然災害に備えキーワード’, 콘크리트工学特集
- 3) Bruneau M.(2006), Reinhorn AM:Overview of the Resilience Concept, Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering, April 18-22
- 4) Harish K. Mulchandani, G. Muthukumar(2017), Resilience Based earthquake design of buildings: current practice, problems and opportunities in Indian scenario, Conference Paper · December 2017
- 5) KIEP (2020), ‘일본의 재난관리 대책 및 시사점 : BCP를 중심으로’, KIEP 세계경제 포커스, Vol. 3, No. 7
- 6) <https://global.toyota/en/detail/11373994>
- 7) LAEDC (2019), Planning for Business Operations After Earthquakes, Los Angeles County Economic Development Corporation Guide
- 8) FEMA (2020), Resilience-Based Design and the NEHRP Provisions, National Institute of Building Sciences Building Seismic Safety Council Resource Paper
- 9) 内閣府 (2013), 事業継続ガイドライン
- 10) KIEP (2011), 동일본대지진 이후 일본의 피해복구 현황과 시사점, KIEP 오늘의 세계경제
- 11) KEI (2016) 지진대비 산업단지 환경안전을 위한 정책제언, KEI 포커스

[필자소개]

정광량 대표(CNP 그룹 총괄대표)는 고려대학교에서 건축구조전공 박사학위를 취득하였으며, 1995년 (주)CNP동양(前동양구조안전기술)을 설립한 후 초고층, 대공간 등 국내외 다양한 프로젝트의 구조설계를 진행하였다. 제15대 한국건축구조기술사회 회장과 제3대 한국초고층도시건축학회 회장을 역임하였고, 한국공학학림원 회원 및 CTBUH Fellow이면서 한국대표로 활동하고 있다.

김지영 상무는 고려대학교에서 내풍설계분야 연구로 박사학위를 취득하였으며, 1996년부터 (주)대우건설 기술연구원에서 방재분야 기술개발을 수행하였다. 이후 국토교통과학기술연구원 PD로 재직하면서 건축분야 대형 R&D 사업을 기획하였으며, 현재 (주)씨애플피동양 기술연구소 소장으로 재직하고 있다.

우은택 소장은 오사카대학교에서 동적내진설계분야 연구로 박사학위를 취득하였으며, 1995년에 (주)동양구조안전기술에 입사하여, 건축구조분야 기술개발을 수행하였다. 이후 단국대학교 연구교수로 근무한 후, (주)씨애플피동양을 거쳐 현재 (주)씨애플피동양 연구소장으로 재직하고 있다.