KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research
Vol. 42, No. 6: 763-773/ December, 2022
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2022.42.6.0763

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2799-9629 (Online)
www.kscejournal.or.kr

Structural Engineering **구조공학**

〈기술노트〉

산업환경시설의 설계하중과 내진성능목표 개선안

김익현* · 홍기증** · 김정한*** · 이진호**** · 조성국***** · 이진형******
Kim, Ickhyun*, Hong, Kee-Jeung**, Kim, Jung Han***, Lee, Jin Ho****, Cho, Sunggook*****, Lee, Jin-Hyeong******

Improvement in Design Load and Seismic Performance Objective for Industrial and Environmental Facilities

ABSTRACT
Industrial and environmental facilities, which are national growth engine, must sustain their structural safety and maintain their process to continue production activities under various load conditions including natural hazards. In this study, by improving existing design codes which aim to secure the structural safety only, new structural and seismic design codes are proposed to secure both the structural safety and the operability of facilities. In the proposed structural design code, a variety of loads to reflect the characteristics of industrial and environmental facilities are considered and load combinations for the ultimate strength design and the allowable stress design of structures are suggested. Considering the importance of a unit industrial facility and that of a unit process, the seismic design class, design earthquake, and seismic performance level of a unit component are determined to achieve the dual seismic performance objectives for securing both the structural safety and the operability. Also, the proposed design code are applied to an example of an environmental facility in order to examine its applicability.

Key words : Industrial facility, Environmental facility, Process, Equipment, Load combination, Seismic performance objective

초 록
산업환경시설은 국가 성장동력 지원시설로서 자연재해에 의한 하중을 포함한 다양한 하중 조건에 대해서 구조적 안전성을 확보해야 하며 그 공정을 유지하여 생산활동을 지속하는 것이 매우 중요하다. 이 연구에서는 구조적 안전성을 확보하기 위한 기존 국내외 구조 및 내진설계기준을 개선하여, 산업환경시설의 구조적 안전성 확보와 설비의 운전성 유지를 위한 설계기준을 제안하고자 한다. 이 설계기준에서는 산업환경시설의 특성을 반영하여 다양한 하중을 고려하고, 구조설계를 위해 강도설계법과 허용응력설계법의 하중조합을 제시한다. 산업환경시설의 내진설계를 위해, 단위산업시설 중요도와 단위공정 중요도에 따른 단위공정의 내진등급, 설계지진 수준 및 내진성능수준을 설정하여 산업환경시설의 이원화된 내진성능목표를 달성하고자 한다. 더불어, 대표적인 예제 산업환경시설을 선정하여 새로운 구조 및 내진설계기준의 적용성을 검토한다.

검색어 : 산업시설, 환경시설, 공정, 설비, 하중조합, 내진성능목표

* 정회원 · 울산대학교 건설환경공학부 교수 (University of Ulsan · ickhyun@ulsan.ac.kr)
** 정회원 · 교신저자 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 (**Corresponding Author** · Kookmin University · kjhong@kookmin.ac.kr)
*** 정회원 · 부산대학교 토목공학과 부교수 (Pusan National University · jhankim@pusan.ac.kr)
**** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 부교수 (Pukyong National University · jholee0218@pknu.ac.kr)
***** 정회원 · 이노스기술 대표 (Innose Tech Company · sgcho@innose.co.kr)
****** 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학과 박사과정 (Kookmin University · leejinhyeong87@gmail.com)

Received October 25, 2022/ **revised** November 1, 2022/ **accepted** November 25, 2022

Copyright ⓒ 2022 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 연구 배경 및 필요성

시설물은 시설물이 건설되는 지리적·지역적 환경 여건과 다양한 하중효과에 대하여 기본적으로 구조적 안전성을 확보하여야 한다. 시설물에 따라서는 시설물의 고유 기능과 피해 시 지역사회 및 국가에 미치는 직간접적인 영향을 고려하여 보다 강화된 안전성을 확보할 필요가 있다. 산업환경시설(플랜트시설, 전력시설, 가스시설, 석유화학시설, 환경시설, 제철시설 등)은 국가 성장동력 지원시설로서 일반적인 하중효과 외에 지진과 같은 발생빈도가 드문 환경하중에 대해서도 구조적 안전성을 확보해야 하며 더 나아가 공정을 유지하여 생산활동을 지속하여야 한다.

교량, 건물 등과 같이 독립적인 시설물로 설계하는 시설물들과 달리, 산업환경시설은 다양한 유형의 시설물이 한정된 공간에 모여 있고, 이들 시설물이 독립적으로 기능하기보다는 매우 강하게 상호 연계되어 기능하고 있다. 또한, 설비를 수용하여 보호하는 구조물(수용구조물)의 안전성뿐만 아니라 내부에 수용된 설비 자체의 안전성도 매우 중요하므로 기계·전기적인 하중효과를 반영하는 것이 중요하다.

경주지진(2016년)과 포항지진(2017년) 시 산업환경시설물에 공학적으로 의미 있는 피해는 발생하지 않았지만 해외의 지진피해 사례를 보면 시설물의 붕괴, 화재 및 폭발, 유해화학물질의 유출 및 이로 인한 환경오염(대기, 수질, 지반 및 해양 오염) 등 다양한 피해가 발생하였다. 또한, 수용구조물 피해가 발생하지 않더라도 설비의 피해가 발생하면 생산 중단으로 인한 경제적 피해(손실)가 상당하게 발생하는 특성을 보인다. 따라서 산업환경시설은 구조적인 안전성뿐만 아니라 산업환경시설의 운전성을 확보할 수 있는 내진성능목표의 설정이 필요하다.

해외의 경우, 산업환경시설의 구조적 안전성을 고려한 설계기준은 제시되어 있으나, 공정을 유지하기 위한 설계기준은 제시된 바가 없다. 우리나라의 경우, 산업환경시설의 특성을 반영한 구체적이고 독립적인 설계기준(내진설계 포함)을 확립하지 못하여 관련된 여러 국내외 기준 및 문헌(ACI 318, 2005; ACI 318, 2019; ASCE 7, 2005; ASCE 7, 2016; KDS 14 20 01, 2022; KDS 14 30 05, 2019; KDS 14 31 05, 2017; KDS 17 00 00, 2018; KDS 41 00 00, 2019)을 참조하여 설계함으로써 일관성 있는 구조안전성 확보와 지진에 대비한 운전성 확보가 불가한 문제점이 꾸준히 제기되어 왔다. 이에 본 연구진은 국내외 최신 기준과 문헌을 참조 및 개선하여, 산업환경시설의 공정을 이루고 있는 구조물, 설비지지구조, 앵커 및 기초에 대한 구조설계기준(안)과 내진설계기준(안)을 개발하였다. 이 논문에서는 구조설계기준(안)에서의 하중과 하중조합, 내진설계기준(안)에서의 내진성능목표 설정방법에 대해 중점적으로 다루었다.

2. 설계하중

2.1 하중 종류

미국은 일반 구조물에 작용하는 다양한 하중(지진하중 포함)과 하중조합을 ASCE 7(2016)에 제시하고 있으며, 원전 시설에 작용하는 하중과 하중조합을 ACI 349(2013)에 제시하고 있다. 유럽은 EN 1991(2002)에서 구조물 유형별로 작용하는 다양한 하중을 정의하고, EN 1998(2004)에서 구조물 유형별 지진하중을 구체적으로 다루고 있다.

이들 중 ACI 349(2013)에 제시된 하중 중 일부는 국내 산업환경시설에도 적용 가능하므로, 이를 토대로 산업환경시설에 적용 가능한 하중종류 및 하중조합을 제시한다. 원전시설에 작용하는 하중들 중 일반적인 시설물에도 동일하게 작용하는 하중들을 분류하면 다음과 같다. 고정하중(D), 활하중(L), 지붕활하중(L_r)이 기본적인 하중이고, ‘흙과 물(또는 이와 유사한 재료와 함유액체)의 토압하중(H)’과 ‘유체의 자중과 압력에 의한 유체하중(F)’이 일반시설물과 유사하게 정의되는 하중이다. 자연재해에 의한 하중으로 지진하중(운전지진(E_o)과 안전정지지진(E_{ss})의 2가지로 구분), 풍하중(W), 토네이도하중(W_t), 강우하중(R), 적설하중(S)이 포함된다.

산업환경시설에서 설비들은 중요한 공정을 담당하며 중량이 크므로 진동 및 충격 등 추가적인 동적하중 효과를 일으키거나, 고온 및 고압의 조건을 발생시키기도 한다. 이러한 요인에 의한 하중은 산업환경시설에 특화된 기준에서 필수적으로 제시되어야 한다. 설비의 동적효과는 가중될 수 있고 변화할 수 있다. 대표적으로 터빈이나 구동 모터 등과 같은 회전체를 포함하는 설비는 작동 시 회전진동수에 따른 주기적인 하중을 발생시킨다. 이는 해당 설비의 특성에 맞게 분석되어 일반적으로 고려하는 자중 외의 하중으로 고려해야 한다.

산업환경시설의 정상적인 가동에 따라서 설비나 구조물 내부의 온도나 압력이 증가하면 구조물에 하중효과로 부담을 줄 수 있다. 구조물 내부의 온도에 의해서 구조재료가 수축팽창하면, 구조물 하중이 증감되는 경우가 있을 것이며 이러한 정상온도하중(T_o)은 일반시설물에 비해 매우 커질 수 있으므로 따로 고려해야 한다. 다만, 밀폐형 격납구조 형식은 원자력 시설물을 제외한 다른 시설에는 거의 없기 때문에, 구조물 내부의 압력증가 효과는 고려하지 않는다.

설비의 하중은 지지 구조물에 의해 전달되어 하부 또는 수용구조물에 작용할 것이기 때문에 이러한 하중을 반력하중(R_o)으로 통칭할 수 있다. 여기에는 동적효과나 온도 및 압력에 의해 설비 지지점의 반력을 증가시키는 효과를 포함한다. 설비 외에 구조물 내에서 특별히 큰 하중을 발생시키는 것은 크레인이다. 크레인 자체가 중량물을 다루며 충격효과 등이 발생할 수 있기 때문에 크레인하중

(C_{cr})은 따로 구분하여 정의한다.

2.2 하중조합

현재까지, 산업환경시설에 특화된 구조설계기준이 국내에 제시된 바 없기 때문에, 시설물의 재료에 따라 콘크리트구조 설계기준(KDS 14 20 10, 2021), 강구조 설계기준(KDS 14 31 05, 2017)의 하중조합을 사용하거나 시설물 유형과 유사하다고 판단되는 설계기준의 하중조합을 사용하고 있다. 이러한 하중조합들은 산업환경시설에서 발생하는 하중들을 적절히 고려하지 못하므로, 본 연구에서는 강도설계법의 경우 ACI 349(2013)에서 제시한 원전시설의 콘크리트구조 하중조합을 국내 콘크리트구조설계기준인 KDS 14 20 10(2021)의 하중조합과 비교하면서 국내 실상에 맞도록 적절히 수정하였고, 허용응력설계법의 경우 ANSI/AISC N690(2018)에서 제시한 원전시설의 강구조 하중조합을 반영하여 이를 국내 산업환경시설의 구조설계 하중조합으로 제시한다.

2.2.1 강도설계법의 하중조합

KDS 14 20 10(2021)은 ACI 318(2019)(ASCE 7(2016)에 근거함)의 하중조합과 동일한 논리를 사용하여 하중조합을 제시하고 있다. 다만, ACI 318(2019)에서는 토압하중(H)을 수평토압(H_h)과 수직토압(H_v)으로 구분하고 있으며, ACI 318(2019)의 풍하중에 대한 하중계수 1.0을 KDS 14 20 10(2021)에서는 1.3으로 바꾸어 적용하고 있는 것이 차이점이다.

ACI 349(2013)은 ACI 318(2008)(ASCE 7(2005)에 근거함)의 하중조합과 동일한 논리로 하중조합을 제시하고 있으나, 지진하중과 풍하중의 경우 각각 안전정지지진과 토네이도에 의한 풍하중을 극한환경하중으로 구분하여 추가한다(Table 1). 본 연구에서는 이와 유사한 방식으로 정상환경하중(normal environmental loads), 심각환경하중(severe environmental loads) 및 극한환경하중(extreme environmental loads)으로 구분하여 강도설계법의 하중조합을 구성하였다.

ACI 349(2013)에서는 수직토압을 따로 구분하여 명시하지 않고 있으므로 본 연구에서 제시하는 하중조합에서도 이를 그대로 따른다. 국내 내진설계 일반(KDS 17 10 00, 2018)에서 정의하고 있는 재현주기 200년 이하의 지진과 재현주기 500년 이상의 지진을 각각 심각지진(E_1)과 극한지진(E_2)으로 정의하며, 이들은 원전에 적용하는 ACI 349(2013)의 운전지진(E_o)과 안전정지지진(E_{ss})보다 상당히 작은 지진세기를 가진다. 산업환경시설에 원전 수준의 높은 설계지진을 적용하는 것은 매우 보수적이라 적절하지 않으므로, 심각지진(E_1)과 극한지진(E_2)을 산업환경시설의 운전지진과 안전정지지진으로 선정하여 ACI 349(2013)의 하중조합과 함께 산업환경시설에 적용한다.

풍하중의 경우 ACI 349(2013)에서는 하중계수 1.6을 사용하고 있으며 이는 풍하중 기준이 개정되기 전 기준인 ASCE 7(2005)을 참조한 것이다. 풍하중 기준이 개정된 ASCE 7(2016)을 따른다면 이 하중계수는 1.0이 되어야 한다. 다만, ASCE 7(2016)의 풍하중은 300년, 700년 혹은 1,700년 재현주기의 3초간 최대순간풍속인 반면, 국내에서 설계풍속 지도를 제공하는 기준인 KDS 41 12 00(2022)에서는 500년 재현주기의 10분 평균풍속으로 서로 다르게 제시되어 있다. KDS 41 12 00(2022) 이전의 기준에서 풍하중의 재현주기는 100년을 기본으로 하였으며 이는 산업환경시설의 심각지진 재현주기와 유사하였다. 2022년에 이 풍하중이 500년 재현주기로 변경되었으며, 이는 산업환경시설의 500년 재현주기 극한지진과 동일한 극한환경하중에 해당하므로, 이 풍하중을 극한하중으로 취급할 수 있다. 이때 극한환경의 지진하중 계수가 1.0이므로, 앞에 언급한 ASCE 7(2016)과 일관되도록, 500년 재현주기 풍하중의 계수도 지진하중 계수와 마찬가지로 1.0을 적용하여 산업환경시설의 하중조합에 적용한다. 이 풍하중을 심각환경하중이 아닌 극한환경하중으로 취급하였으므로 ACI 349(2013)의 극한환경하중에 해당하는 '토네이도에 의한 극한풍하중(W_t)'과 동일한 수준의

Table 1. Comparison of Load Combinations between ACI 349 and this Study for Strength Design

load type	ACI 349(2013)	this study
normal environmental load	$1.4(D+F+R_o)+T_o$	$1.4(D+F+R_o)+T_o$
	$1.2(D+F+R_o)+1.2T_o+1.6(L+H)$ $+1.4C_{cr}+0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$1.2(D+F+R_o)+1.2T_o+1.6(L+H)$ $+1.4C_{cr}+0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
	$1.2(D+F+R_o)+0.8(L+H)+1.4C_{cr}+1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$1.2(D+F+R_o)+0.8(L+H)+1.4C_{cr}+1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
severe environmental load	$1.2(D+F+R_o)+1.6(L+H+E_o)$	$1.2(D+F+R_o)+1.6(L+H)+E_1$
	$1.2(D+F+R_o)+1.6(L+H+W)$	-
extreme environmental load	$D+F+0.8L+C_{cr}+H+T_o+R_o+E_{ss}$	$D+F+R_o+T_o+0.8L+H+C_{cr}+E_2$
	$D+F+0.8L+H+T_o+R_o+W_t$	$D+F+R_o+T_o+0.8L+H+W$
abnormal environmental load	$D+F+0.8L+C_{cr}+H+T_a+R_a+1.2P_a$	-
	$D+F+0.8L+H+T_a+R_a+P_a+Y_r+Y_j+Y_m+E_{ss}$	-

하중으로 취급할 수 있다. 이를 토대로 극한지진과 극한풍하중으로 조합된 ACI 349(2013)의 극한환경 하중조합을 그대로 차용하여 산업환경시설에 적용할 수 있다.

ACI 349(2013)에서는 비정상온도하중(T_a), 비정상반력하중(R_a), 비정상압력(P_a), 배관 파괴로 인한 반력(Y_r), 배관 파괴로 인한 고속가스 충격(Y_j), 배관 파괴로 인해 발생한 비행물 충격(Y_m) 등과 같은 비정상하중을 원전의 안전을 위해 고려하고 있다. 그러나, 이러한 하중을 결정하고 해석하기에는 상당한 기술적 노력이 필요하며, 국내 산업환경시설에서 이러한 비정상하중은 거의 발생하지 않는 것으로 예상되기 때문에 이러한 비정상하중을 산업환경시설에서 고려하지 않는 것이 합리적이다.

위에서 언급한 내용에 근거하여 ACI 349(2013)의 하중조합을 Table 1과 같이 차용 및 수정하여 국내 산업환경시설에 적용하고자 한다. 고려하는 하중은 정상하중, 심각환경하중, 극한환경하중의 3가지로 구분된다. 정상하중은 시설의 정상적인 운전 및 정지 동안 발생하는 하중이고, 부등침하, 크리프, 건조수축, 팽창 또는 프리스트레싱(포스트텐션)에 의한 하중효과는 고정하중에 포함한다. 심각환경하중은 산업시설의 수명 동안 간헐적으로 발생하는 하중으로 운전지진에 해당하는 심각지진(E_1) 조건을 나타낸다. 극한환경하중은 심각환경하중에 비하여 발생빈도가 매우 작은 하중으로서 빈도에 따라 하중이 매우 크게 변화하는 경우에 적용하며 극한지진(E_2) 및 풍하중(W)이 이에 해당된다.

Table 1의 하중조합에서 주목할 점은 심각지진에 대한 하중계수로 1.6이 아닌 1.0을 적용한 점이다. 내진I등급 시설물의 경우 심각지진(E_1, 평균재현주기 100년)과 극한지진(E_2, 평균재현주기 1,000년)의 위험도계수(I)는 각각 0.57과 1.4이다. 만약 심각지진에 대하여 하중계수 1.6을 적용하면 등가의 위험도계수는 0.91(=1.6×0.57)이 된다. 이 경우 극한지진의 위험도계수는 심각지진의 1.54(=1.4/0.91)배가 된다. 극한지진에 대해 시설물의 소성거동이 허용되도록 1.54 이상의 응답수정계수(R)을 적용하는 경우, 극한지진을 R로 나눈 세기의 지진에 대해 시설물이 충분한 항복강도를 갖는지 검토해야 한다. 이 지진은 심각지진보다 작은 세기의 지진이 되므로, 결국 심각지진에 대한 탄성유지수준 확보가 설계를 지배하게 된다. 연성설계 시 대부분 1.5 이상의 R을 적용하는 점을 고려하면, 심각지진에 대한 탄성유지수준 확보가 시설물의 설계를 지배하게 되어 경제성을 확보하기 위한 연성설계가 불가능하게 되는 문제가 발생한다.

반면, 하중계수 1.0을 적용하면 심각지진에 대한 극한지진의 위험도계수 비는 2.45(=1.4/0.57)이다. 즉, R=2.45 이상을 적용하는 경우(상당한 연성을 허용하는 경우)에만 심각지진에 대한 탄성유지수준 확보가 설계를 지배하게 된다. 또한, 이는 큰 연성으로 인해 항복강도가 지나치게 작아지는 것을 방지하는 일종의 항복강도에 대해 하한값을 설정하는 효과가 있다. 한편, 2.45보다 작은 R을 적용하는 경우(작은 연성을 허용하는 경우)에는 극한지진에 대한 붕괴방지수준 확보가 설계를 지배하게 된다. 이를 정리하면, 심각지진의 하중계수 1.0을 적용하는 것이 1.6을 적용하는 것보다 실질적인 연성설계가 가능하게 하고, 이를 통해 현대 내진설계의 기본 원리인 연성설계를 충분히 반영할 수 있다. 우리나라의 경우 지진하중에 대한 통계 특성이 아직 확립되어 않아 적정한 하중계수의 설정이 어려운 것이 현실이다. 추후 평균재현주기 별 설계지진의 통계 특성이 확립된다면 하중계수를 적정하게 재산정할 수 있을 것이다.

2.2.2 허용응력설계법의 하중조합

허용응력설계법은 기본적으로 ANSI/AISC N690(2018)을 참고한다(Table 2). 이는 원전의 강구조기준으로, 원전의 콘크리트구조기준과 유사하게 심각환경하중과 극한환경하중을 구분하고 있기 때문에 강도설계법과 일관성을 유지할 수 있다. 모든 하중조건에 대해서 ANSI/AISC N690(2018)과 동일한 하중계수를 적용하나

Table 2. Comparison of Load Combinations between AISC N690 and this Study for Allowable Stress Design

load type	ANSI/AISC N690(2018)	this study
normal environmental load	$D+L+R_o+F+H+T_o+C_{cr}$	$D+L+R_o+F+H+T_o+C_{cr}$
	$D+(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+R_o+F+H+T_o+C_{cr}$	$D+(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+R_o+F+H+T_o+C_{cr}$
	$D+F+0.75L+0.75H$ $+0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+T_0+C_{cr}$	$D+F+0.75L+0.75H$ $+0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+T_0+C_{cr}$
severe environmental load	$D+R_0+F+E_o+0.75(L+H)$ $+C_{cr}+0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+T_0$	$D+R_0+F+E_1+0.75(L+H)$ $+C_{cr}+0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+T_0$
	$D+R_0+F+0.6W+0.75(L+H)$ $+C_{cr}+0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+T_0$	-
extreme environmental load	$D+L+C_{cr}+R_o+T_o+E_{ss}+F+H$	$D+L+C_{cr}+R_o+T_o+E_2+F+H$
	$D+L+R_o+T_o+W_t+F+H$	$D+L+R_o+T_o+W+F+H$
abnormal environmental load	$D+L+C_{cr}+P_a+R_a+T_a+F+H$	-
	$D+L+P_a+R_a+T_a+Y_r+Y_j+Y_m+0.7E_{ss}+F+H$	-

강도설계법에서와 마찬가지로 풍하중은 심각환경하중이 아닌 극한환경하중에서 제시하고 이때 토네이도에 의한 극한풍하중 식을 차용하였다. 역시, 강도설계법에서와 마찬가지로 산업환경시설에서 비정상하중을 고려하지 않는다. 허용응력설계법에서 고정하중이 횡력이나 들림의 영향에 대해 안정화시키는 역할을 하는 경우 고정하중의 하중계수는 0.6을 적용한다.

3. 내진성능목표

지진·화산재해대책법에서는 33종 시설물에 대해 내진설계기준을 정하도록 규정하고 있으며, 이에 포함된 산업환경시설은 관계법령에 의거하여 내진설계기준을 제정 및 운영 중에 있다. 국내 산업환경시설의 설계기준은 국토교통부, 산업통상자원부, 환경부, 해양수산부 등 다수의 중앙부처(관리주체)가 따로 관리하고 있어 각 부처에서 작성한 설계기준들 사이에 일관성이 결여되어 있다. 국내에서 지금까지 제시된 산업환경시설 관련 내진설계기준은 내진설계의 기본개념 수준만 규정하고 있고, 내진성능목표를 확보하기 위한 구체적인 설계방법에 대한 규정은 제시하지 않고 있다(KDS 31 50 05, 2021; KDS 31 90 25, 2021; KDS 31 90 45, 2021; KDS 41 00 00, 2019; KDS 51 00 00, 2018; KDS 54 00 00, 2018; KDS 57 00 00, 2019; KDS 61 00 00, 2019; KDS 61 50 00, 2022; KDS 61 55 00, 2019; KDS 61 60 00, 2019). 더 나아가, 설비와 구조물의 유형이 매우 다양하고 상호간 연계가 많은 산업환경시설에 필수적인 공정 유지 목표를 고려하지 못하고, 시설물 고유의 특성을 고려한 내진성능목표를 제시하지 못하고 있다. 이를 개선하고자, 지진으로부터 산업환경시설의 구조적 안전성 및 안정성(전도, 활동, 침하)을 확보할 뿐만 아니라 기능이 연계된 운전성을 보장하여 인명피해와 재산피해를 최소화하도록 내진성능목표를 결정하는 절차를 다음과 같이 제시한다.

우선 내진설계의 대상이 되는 설비(설비의 지지구조물, 앵커 및 기초가 설계 대상임)와 구조물을 단위요소라 칭하고, 이들이 공정 유지 관점에서 사업장에 어떠한 영향을 끼치는지를 정의하기 위해 다음과 같은 개념을 이해할 필요가 있다. 여러 개의 계층화된 공정으로 이루어진 산업환경시설의 사업장(단위산업시설, unit industrial facility)은 지진 시에도 운전을 유지하는 성능(운전성)을 확보하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 사업장을 이루고 있는 계층화된 하위 공정(process)들이 전체 공정에 기여하는 영향을 평가하여 그에 맞는 설계를 수행해야 한다. 즉, 최하위 단계 공정(단위공정, unit process)들이 기여하는 영향 정도에 따라 내진등급(seismic class)을 설정할 필요가 있다. 단위공정은 하나 또는 여러 개의 단위요소(unit component)로 구성된다. 단위산업시설, 계층화된 공정, 단위공정 및 단위요소 사이의 관계를 예시로 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다.

단위공정의 내진등급은 단위산업시설 중요도와 단위공정 중요도를 고려하여 결정한다. 단위산업시설 중요도는 단위산업시설의 지진피해로 인한 인명피해와 재산피해의 규모를 Table 3과 같은 기준으로 ‘대(large)/중(medium)/소(small)’로 분류하고, 이를 Table 4와 같이 조합하여 ‘핵심(Core)/중요(Important)/일반(Normal)’ 시설로 분류한다. 이러한 분류는 산업환경시설에 대한 환경영향평가서 결과와 매출규모에 대한 통계자료를 토대로 결정할 수 있다. 이러한 자료가 충분치 못한 경우, 관리주체의 의견을 수렴하여 결정할 수 있다.

단위공정 중요도는 단위공정이 단위산업시설의 안전성 및 운전성에 미치는 영향에 따라 Table 5와 같이 ‘주(main)/부(sub)/보조(auxiliary)’공정으로 구분하고 내진설계전문가와 공정전문가의 협의를 통해 결정하도록 한다.

앞서 정의한 단위산업시설 중요도와 단위공정 중요도를 조합하여 단위공정의 내진등급(seismic class)을 Table 6과 같이 ‘내진특(Seismic Special)/내진 I (Seismic I)/내진II(Seismic II)/비내진(Non-seismic)’등급으로 분류한다. 비내진등급으로 분류되는 경우 내진설계가 필요하지 않게 된다.

2장에서 정의한 바와 같이, ‘심각지진(severe earthquake)’은 설계수명(공용기간) 내 발생 확률이 비교적 크지만 지반운동 세기가 작은 지진으로서 평균재현주기 50년, 100년, 200년의 설계지진을 의미하며, ‘극한지진(extreme earthquake)’은 시설물의 설계수명(공용기간) 내 발생 확률이 매우 작지만 지반운동 세기가 큰 지진으

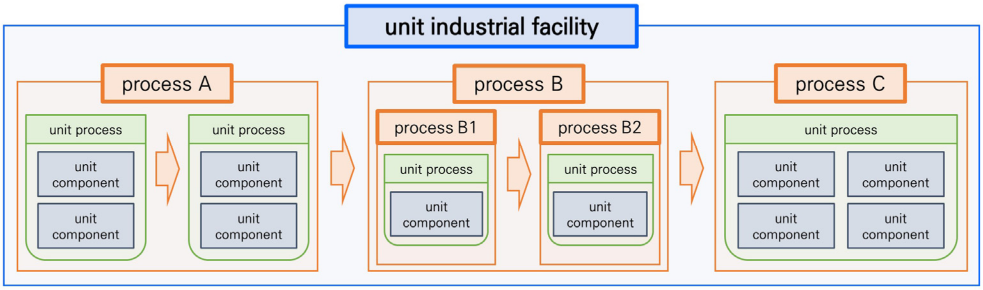

Fig. 1. Relationships of Unit Industrial Facility, Process, Unit Process and Unit Component

Table 3. Classification Criteria in terms of Life and Property Losses for Unit Industrial Facility

loss type	level	classification criteria
life loss	large	severe life loss of public is occurred because material is leaked and transferred to outside of facility site
	medium	severe life loss of worker is occurred because material is leaked and transferred to inside of facility site
	small	limited life loss is occurred even though material is leaked and transferred
property loss	large	significant property loss of public or adverse effect on related industry is occurred
	medium	severe property loss of owner and limited adverse effect on related industry are occurred (if necessary, consult with owner)
	small	small property loss of owner and no adverse effect on related industry are occurred (if necessary, consult with owner)

Table 4. Importance of Unit Industrial Facility

level of life loss due to leaked materials		level of property loss	importance of unit industrial facility
toxic material	large	large	core facility
		medium	
		small	
	medium	large	
		medium	
		small	
	small	large	
		medium	important facility
		small	
combustible (or explosive) material	medium	large	core facility
		medium	important facility
		small	
	small	large	core facility
		medium	important facility
		small	
normal material	–	large	core facility
		medium	important facility
		small	normal facility

Table 5. Importance of Unit Process

effects of unit process on safety and operability of unit industrial facility	importance of unit process
direct or significant effect	main process
indirect effect	sub process
no effect	auxiliary process

Table 6. Seismic Classification of Unit Process

importance		importance of unit industrial facility		
		core facility	important facility	normal facility
importance of unit process	main process	Seismic Special	Seismic I	Seismic II
	sub process	Seismic I	Seismic II	Seismic II
	auxiliary process	Non-seismic		

로서 평균재현주기 500년, 1,000년, 2,400년, 4,800년의 설계지진을 의미한다. Table 6에서 정한 단위공정의 내진등급에 따라 설계지진을 Table 7과 같이 결정하여, 중요한 등급의 단위공정일수록 더 큰 설계지진에 대해 구조 안전성과 안정성, 그리고 공정 운전성을 유지하도록 설계한다.

단위공정을 구성하고 있는 단위요소에 요구되는 내진성능수준은 손상정도 및 복구기간에 따라 Table 8과 같이 '탄성유지(elastic behaviour)/즉시복구(immediate recovery)/장기복구(long-term recovery)/붕괴방지(collapse prevention)'수준으로 분류한다. 단위요소가 속한 단위공정의 운전성을 유지하기 위해, 내진설계전문가와 공정전문가의 협의를 통해 단위요소의 거동특성을 고려하여 내진성능수준을 결정한다. 이때 필요한 고려사항은 변형, 압력, 온도에 대한 민감성, 파손 시 즉시 대체 가능성, 우회 운전 가능성 등이 있다.

내진설계 일반(KDS 17 00 00, 2018)의 내진성능수준에서는 '기능수행/즉시복구/장기복구/붕괴방지'수준이란 용어를 구조물의 손상정도를 표현하는데 사용하고 있다. 그러나 붕괴방지를 제외한 다른 용어들은 손상정도가 아닌 손상에 의한 결과 또는 대응을 의미하는 단어로 표현되어 있다. 특히, '기능수행수준'이란 용어는 구조물이 탄성거동함을 기본적으로 의미하고 있음에도 '기능'이란 용어로 인해 산업환경시설의 운전성을 표현하는 것처럼 오인되고 있다. 산업환경시설에서는 탄성거동의 범위를 벗어나도 기능(또는 운전성)을 유지하는 시설들이 있으므로 이러한 혼동을 막을 필요가 있어, '기능수행'을 '탄성유지'란 용어로 바꾸어 사용하기로 한다.

단위요소의 내진성능목표는 단위요소가 속한 단위공정의 내진등급에 따른 설계지진 작용 시 요구되는 단위요소의 내진성능수준으로 정의된다. 내진설계 일반(KDS 17 00 00, 2018)의 내진성능목표에 근거하여 단위요소는 다음 두 개의 내진성능목표를 동시에 만족해야 한다.

① 심각지진(E_1)에 대해 단위요소는 탄성유지수준을 만족해야 한다.
② 극한지진(E_2)에 대해 탄성유지수준 또는 붕괴방지수준으로 단위요소의 안전성 및 운전성을 확보해야 한다.

Table 7. Mean Return-period of Design Earthquake for Each Seismic Class

seismic class	design earthquake	mean return-period
Seismic II	severe earthquake (E_1)	50 years
	extreme earthquake (E_2)	500 years
Seismic I	severe earthquake (E_1)	100 years
	extreme earthquake (E_2)	1,000 years
Seismic Special	severe earthquake (E_1)	200 years
	extreme earthquake (E_2)	2,400 or 4,800 years

Table 8. Seismic Performance Level of Unit Component

seismic performance level	damage level	recovery duration	criteria
elastic behaviour	no damage	no repair	operable under no damage, high-speed rotating, high·low temperature, high·low pressure
immediate recovery	light damage	immediate repair	operable under light damage, impossible to bypass and to replace immediately
long-term recovery	moderate damage	long-term repair	operable under moderate damage, possible to bypass
collapse prevention	severe damage	demolition and reconstruction	operable even under severe damage

터빈과 같이 단위요소(설비 및 구조물)의 운전성이 손상에 민감한 경우, 극한지진 시 탄성유지수준이 요구된다. 반면, 수용구조물(또는 연성이 큰 배관)과 같이 큰 손상에도 불구하고 수용된 설비(또는 배관)의 운전성을 확보할 수 있다면 극한지진 시 붕괴방지수준이 요구된다. 내진설계 일반(KDS 17 00 00, 2018)에서는 4개의 내진성능수준을 제시하고 있으나, 아직까지 즉시복구와 장기복구에 대한 구체적인 내진설계방법이 제시되어 있지 않은 상태이다. 그러므로, 본 연구에서는 탄성유지와 붕괴방지의 내진성능수준만을 고려한다. 향후, 즉시복구와 장기복구의 내진성능수준에 대한 구체적인 설계방법을 개발하기 위한 연구의 수행이 필요하다.

4. 내진성능목표 적용 예제

단위요소에 내진성능목표를 설정하는 설계사례로 석유화학플랜트 단위산업시설에 있는 메탄(CH_4) 제거 공정을 고려한다. 단위산업시설 중요도를 정하기 위해, 기존 사고 통계자료를 토대로 재산피해와 인명피해 규모를 적절히 가정하여 설정한다. 단위공정 중요도는 현재 석유화학플랜트에서 의무적으로 수행하고 있는 공정 위험성 평가에 기반하여 설정한다. 내진성능목표 결정 절차를 요약하면 다음과 같다.

① 단위공정 내진등급(설계지진): 단위산업시설 중요도 및 단위공정 중요도

② 내진성능목표: 설계지진과 내진성능수준

4.1 단위공정 내진등급(설계지진)

단위공정 내진등급은 단위산업시설 중요도와 단위공정 중요도로 결정한다. 단위산업시설 중요도는 인명피해와 재산피해를 기준으로 분류하며, 한국산업안전보건공단에서 발행한 연구보고서(Seo et al., 2018)의 2008년부터 2017년까지 10년간 발생한 329건의 사고사례 통계정보로부터 인명피해의 수준을 분류한다. 2013년부터 2017년까지 5년간 제조업에서의 화학사고에 의해 5년간 연평균 28명의 사망자가 발생하였다(Table 9). 이 기간 연평균 약 33건의 크고 작은 사고가 발생했고, 분기별 큰 사고가 1회 발생한 것으로 가정할 때, 하나의 사고에서 연평균 사망자수(28명)의 1/4에 해당하는 7명 이상의 사망자가 발생한 경우를 인명피해 규모 '대'로 가정한다. 인명피해 규모 7명 미만인 경우는 '중', 3명 미만인 경우는 '소'로 가정한다(Table 10). 본 연구에서는 사고에 의한 직접적인 인명피해 정보를 활용하였으나, 향후 해당 단위산업시설의 환경영향평가서 등을 토대로 직간접적인 인명피해 규모(영향을 받는 지역의 인구)에 대한 통계자료를 확보하여 단위산업시설 중요도를 더욱 현실적으로 결정할 수 있다.

재산피해 규모는 매출 규모를 기준으로 분류하며 본 연구에서는 매출 규모 1,000억원 이상인 경우를 '대', 1,000억원 미만인 경우 '중', 100억원 미만인 경우 '소'로 가정한다(Table 10). 향후 해당 분야의 매출 규모 통계자료를 활용하여 재산피해 규모 분류를 더욱 현실적으로 설정할 수 있다. 이러한 자료가 부족한 경우, 단위산업시

Table 9. Life Loss due to Accidents in Chemical Plants during 2013~2017

type of accident \ year	2013	2014	2015	2016	2017	total
explosion	20	14	12	10	11	67
fire	12	8	16	7	8	51
chemical material exposure	7	6	4	1	4	22
total	39	28	32	18	23	140
annual average (life loss/year)				28		

Table 10. Example Criteria for Life Loss and Property Loss in Unit Industrial Facility

classification	life loss	property loss
large	≧ 7	≧ ₩100 billion
medium	3 ≦ life loss < 7	₩10 billion ≦ life loss < ₩100 billion
small	< 3	< ₩10 billion

설 관리주체와 논의하여 재산피해 규모를 결정할 수 있다.

울산 울주군에 위치한 온산공장은 2022년 5월 19일 가연성 가스의 누출로 인한 폭발사고가 발생했으며, 이 사고로 인한 피해는 사상자(인명피해) 10명, 생산중단된 매출 규모(재산피해) 5,762억원으로 보고되었다(Lee, 2022). 본 예제의 단위산업시설은 이 사고에 준하는 피해가 발생할 수 있는 시설로 가정하여 인명피해 10명으로 ‘대(7명 이상)’, 매출 규모 5,762억으로 ‘대(1,000억원 이상)’로 분류하였다. 이를 Table 4에 제시한 단위산업시설 중요도 분류에 대입하면, 가연성 재료(combutible material)의 인명피해 ‘중(medium)’ 이상과 재산피해 ‘대(large)’에 해당하여 예제 단위산업시설은 ‘핵심시설’로 분류된다.

단위공정 중요도는 한국산업안전보건 공단에서 발행한 공정안전보고서 작성예시집의 메탄 제거 공정의 공정위험성평가 예제를 참고하였다(KOSHA, 2020). 매탄 제거 공정의 흐름도 및 배관·계장도면(Piping & Instrument Diagram, P&ID)을 토대로 ‘위험과 운전분석(Hazard and Operability Studies, HAZOP)’기법을 적용한 공정위험성평가 결과를 활용한다. 해당 공정은 가연성 가스인 메탄을 처리하는 공정(methane refining process)으로 화재·폭발의 위험이 존재한다. 따라서 운전원의 실수 또는 기기의 결함에 의해 발생할 수 있는 모든 위험성, 원인 및 운전상의 문제점을 확인하여 이와 관련된 문제점들을 제거하기 위한 조치의 필요 여부를 결정하고, 어떤 방법으로 문제점을 해결할 것인가에 대한 방안을 목적으로 HAZOP을 수행한다(KOSHA, 2020). Table 11에는 메탄 정제 공정의 검토구간(node number)을 정리하여 보여주며, 본 연구에서는 각 검토구간을 단위공정으로 취급한다.

Table 11. Unit Process in the Sample of Methane Refining Process

node number (unit process)	P&ID No.	description
1	D20-2	Inject DCPD to T-010 by using P-010 in TANK LORRY
2	D20-2	Nitrogen purging and vent system in T-010
3	D20-2	Inject DP source material to T-110 by using P-011
4	D20-2	Inject DP drum to T-110 by using P-111
5	D20-2	Nitrogen purging and vent system in T-110
6	D30-2	Supply from H2 type trailer to R-100
7	D30-2	Inject DP source material to R-100 by using P-110
8	D30-2	R-100 circulation pumping system
9	D30-2	R-100 reactant DH Transfer system
10	D30-2	R-100 reactor Hot Oil circulation system

HAZOP기법은 위험의 발생 빈도(가능성)와 강도(중대성)를 고려하여 위험등급을 결정한다. 위험등급은 1~5로 나눠지며, 이렇게 결정된 위험등급을 Table 5에 제시한 단위공정 중요도(주, 부, 보조 공정)와 연결지어, 위험등급 1은 보조공정(auxiliary process), 위험등급 2와 3은 부공정(sub process), 위험등급 4와 5는 주공정(main process)으로 정의한다(Table 12).

다음 Table 13에는 Table 11에서 보여준 단위공정별 설비 목록을 보여주고 있으며, 각 단위공정별 HAZOP 기법을 이용해 공정위험도평가를 수행한 결과로 얻어진 위험등급 및 이에 해당하는 단위공정 중요도를 정리하여 보여준다.

앞서 결정한 단위산업시설 중요도 및 단위공정 중요도를 조합하여 단위공정의 내진등급을 결정할 수 있다. 본 예제의 단위산업시설 중요도는 ‘핵심시설’로 분류되며, 단위공정 중요도는 ‘부공정’ 및 ‘보조공정’ 두 가지로 분류된다. 이를 Table 5에서 제시한 단위공정의 내진등급과 연결지어 정리하면 다음과 같다. 단위공정 중요도가 ‘부공정’이면 단위공정의 내진등급은 ‘내진 I 등급’으로 결정되고, 단위공정 중요도가 ‘보조공정’이면 단위공정의 내진등급은 ‘비내진등급’으로 결정된다(Table 14). ‘비내진등급’으로 분류된 단위공정(node number 5, 7)의 경우 내진설계가 필요하지 않다. Table 8에 따라, ‘내진 I 등급’으로 분류된 단위공정의 설계지진은 Table 14의 마지막 열과 같이 정리된다.

4.2 내진성능목표

결정된 설계지진에 대하여 단위공정을 구성하는 단위요소가 내진성능수준(탄성유지, 즉시복구, 장기복구, 붕괴방지)을 만족하도록 내진설계를 수행해야 하며, 3장에서 이러한 내진성능목표를 정의하였다. Tables 13 and 14에서‘내진 I 등급’단위공정에 속한 설비의 지지부, 앵커 및 기초 설계가 필요한 단위요소는 리액터,

Table 12. Importance of Unit Process Determined by HAZOP

HAZOP				importance of unit process
risk level		necessary risk management	work	
1	negligible risk	keep current risk management	accept risk of work	auxiliary process
2	slight risk	provide standard periodic education for safety information and safety of work		sub process
3	significant risk	establish safety plans during scheduled period for maintenance or repair	conditionally accept risk of work	sub process
4	important risk	need to work after establishing urgent temporary plans for safety, and then establish safety plans during scheduled period for maintenance or repair		main process
5	unallowable risk	stop working immediately	no accept risk of work	main process

Table 13. Risk level and Importance of Unit Process for Equipment

node number (unit process)	P&ID No.	equipment list	risk level from HAZOP	importance of unit process
1	D20-2	pump	2	sub process
2	D20-2	tank	2	sub process
3	D20-2	pipe, tank, pump	2	sub process
4	D20-2	pipe, pump	2	sub process
5	D20-2	pipe	1	auxiliary process
6	D30-2	pipe	2	sub process
7	D30-2	pipe, pump	1	auxiliary process
8	D30-2	pipe, pump	2	sub process
9	D30-2	pipe, pump	2	sub process
10	D30-2	reactor, pump	2	sub process

Table 14. Seismic Class and Mean Return-period of Design Earthquakes for Each Unit Process

node number (unit process)	P&ID No.	importance of unit industrial facility	importance of unit process	seismic class of unit process	mean return-period of design earthquake
1	D20-2		sub process	Seismic I	
2	D20-2		sub process	Seismic I	100 years (E_1), 1,000 years (E_2)
3	D20-2		sub process	Seismic I	
4	D20-2		sub process	Seismic I	
5	D20-2		auxiliary process	Non-seismic	–
6	D30-2	core facility	sub process	Seismic I	100 years (E_1), 1,000 years (E_2)
7	D30-2		auxiliary process	Non-seismic	–
8	D30-2		sub process	Seismic I	
9	D30-2		sub process	Seismic I	100 years (E_1), 1,000 years (E_2)
10	D30-2		sub process	Seismic I	

Table 15. Seismic Performance Objective for Each Unit Component

node number (unit process)	euipment or structure (unit component)	seismic performance level	design earthquake
1	pump	elastic behaviour	
2	tank	collapse prevention	
3	pipe	collapse prevention	
	tank	collapse prevention	1,000 years (E_2)
	pump	elastic behaviour	
4	pipe	collapse prevention	
	pump	elastic behaviour	
5	pipe	collapse prevention	–
6	pipe	collapse prevention	1,000 years (E_2)
7	pipe	collapse prevention	–
	pump	elastic behaviour	
8	pipe	collapse prevention	
	pump	elastic behaviour	
9	pipe	collapse prevention	1,000 years (E_2)
	pump	elastic behaviour	
10	reactor	elastic behaviour	
	pump	elastic behaviour	

배관, 탱크, 펌프로 총 4가지이다. ‘내진 I 등급’에 해당하는 모든 단위요소는 평균재현주기 100년 심각지진(E_1)이 포함된 하중조합에 대해 ‘탄성유지’수준을 만족해야 한다. 더불어, 평균재현주기 1,000년 극한지진(E_2)이 포함된 하중조합에 대해, 탄성범위에서 거동해야 운전성이 확보되는 리액터류와 펌프류는 ‘탄성유지수준’을 만족해야 하고 심각한 변형(또는 손상)에도 운전성이 유지되는 배관류와 탱크류는 ‘붕괴방지수준’을 만족해야 한다(Table 15).

5. 결 론

최근 국내외의 유사 설계기준을 참조하여 산업환경시설의 특성을 고려한 구조설계기준과 내진설계기준을 새롭게 제시하였다. 이 논문에서는 산업환경시설에 적용해야 하는 설계하중과 하중조합을 제시하였고, 산업환경시설의 구조 안전성 확보 뿐만 아니라 공정 유지를 위한 내진성능목표를 제시하였다. 더불어, 대표적인 메탄가스시설을 예제로 하여 내진성능목표를 부여하는 절차를 자세히 소개하였다. 이 연구를 통하여 제안된 산업환경시설 설계기준의 주요 특징을 요약하면 다음과 같다.

(1) 이 기준(안)은 건설산업기본법의 건설공사에 포함되는 대상시설물인 산업생산시설, 환경시설, 발전시설 등과 같이 공정이 중요한 시설의 구조물, 지지구조, 정착부 및 기초의 설계에 적용한다.
(2) 설계하중은 정상하중, 심각환경하중, 극한환경하중의 3가지를 고려하였으며, 강도설계법과 허용응력설계법에 부합하는 하중조합을 제시하였다.
(3) 단위산업시설 중요도와 단위공정 중요도를 고려하여 구조적인 안전성뿐만 아니라 기능 연계된 공정의 운전성을 유지하도록 단위공정의 내진등급을 부여하는 방법을 새롭게 제시하였다.
(4) 심각지진(E_1)에 대해서는 탄성유지을 만족하도록 하였으며, 극한지진(E_2)에 대해서는 산업환경설비의 변형이 공정에 민감한 영향을 끼치는 경우 탄성유지수준, 상당한 변형에도 공정유지 가능한 경우 붕괴방지수준으로 이원화하여 내진성능목표를 선택할 수 있도록 하였다.
(5) 이 연구를 통하여 개발된 산업환경시설의 구조설계기준 및 내진설계기준은 국내 기간산업 시설물의 구조적 안전성과 공정 운전성을 확보하는데 핵심적인 기준으로 활용될 것으로 기대된다.
(6) 추후 보다 완성도 높은 기준 확립을 위하여 설계하중별 크기, 내진등급 분류를 위한 단위산업시설 및 단위공정 중요도의 정량화에 대한 연구가 필요하며, 발주자(관리기관)의 다양한 요구성능에 부응할 수 있도록 즉시복구 및 장기복구에 대한 내진설계법의 개발이 필요하다.
(7) 향후 산업환경시설의 시스템 위험도분석을 수행하면, 시스템 위험도와 단위요소들의 민감도를 구할 수 있고 이들을 토대로 단위산업시설 중요도와 단위공정 중요도를 결정할 수 있다.
(8) 산업환경시설의 공정 운전성을 유지하기 위해 설비 또는 구조물의 중요도를 체계적으로 결정하도록 제시한 이 방법론은 화재나 폭발에 대한 설계기준에도 유사하게 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22RMPP-C163162-02).

References

ACI 318 (2005). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute.

ACI 318 (2008). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute.

ACI 318 (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute.

ACI 349 (2013). *Code requirements for nuclear safety-related concrete structures and commentary*, American Concrete Institute.

ANSI/AISC N690 (2018). *Specification for safety-related steel structures for nuclear facilities*, American Institute of Steel Construction.

ASCE 7 (2005). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, American Society of Civil Engineers.

ASCE 7 (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, American Society of Civil Engineers.

EN 1991 (2002). *Eurocode 1: Actions on structures –Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, European Standard.

EN 1998 (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance –Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Standard.

KDS 14 20 01 (2022). *Concrete structure*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 14 20 10 (2021). *Analysis and design principles of concrete structure*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 14 30 05 (2019). *General requirements for design of steel structure (Allowable stress design)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 14 31 05 (2017). *General requirements for design of steel structure (Load and resistance factor design)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 17 00 00 (2018). *General seismic design*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 17 10 00 (2018). *General requirements for seismic design*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 31 50 05 (2021). *Gas facility*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 31 90 25 (2021). *Industrial and environmental facility –design of district heating facility*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 31 90 45 (2021). *Industrial and environmental facility –design of transfer pipe and collection facility for household waste*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 41 00 00 (2019). *Building sructure design*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 41 12 00 (2022). *Building design loads*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 51 00 00 (2018). *River design code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 54 00 00 (2018). *Dam design code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 57 00 00 (2019). *Waterworks design code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 61 00 00 (2019). *Sewer design code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 61 50 00 (2022). *Design code for water treatment facility*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 61 55 00 (2019). *Design code for sludge treatment facility*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

KDS 61 60 00 (2019). *Design code for livestock-waste treatment facility*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, South Korea (in Korean).

Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA) (2020). Writing examples for process safety management report (in Korean).

Lee, C. H. (2022). *'Staggering even with the biggest performance'... Post-accident impact of fire at ulsan plant of S-Oil*, economist, Available at: https://economist.co.kr/2022/05/25/industry/ceo/20220525190104932.html (Accessed: May 25, 2022).

Seo, D. H., Lee, K. W., Han, W. S. and Choi, E. R. (2018). *Investigation on the reason of fire and explosion accident during normal or abnormal working based on accident statistics in chemical plants*, Korea Occupational Safety and Health Research Institute, South Korea (in Korean).