

기후변화에 따른 에너지 저장시설 지진 안전성평가에 관한 연구

A Study on the Earthquake Safety Assessment of Energy Storage Facilities According to Climate Change

함은구¹ · 이성일^{2*}Eun-Gu Ham¹, Sung-Il Lee^{2*}¹Professor, Department of Fire Protection & Safety Engineering, Open Cyber University, Seoul, Republic of Korea²Team Leader, Apartment Housing Division, Gyeonggi-do Provincial Office, Suwon, Republic of Korea

*Corresponding author: Sung-il Lee, si2000@gg.go.kr

ABSTRACT

Purpose: The risk assessment for earthquakes was conducted in accordance with the current design standard (KBC2016) for the Coalescer facility, which is a major facility of energy storage facilities. **Method:** The risk assessment for earthquakes was conducted in accordance with the current design standard (KBC2016) for the Coalescer facility, which is a major facility of energy storage facilities. **Result:** In this study, by statically loading earthquake loads and evaluating the level of collapse prevention of special-class structures, facility managers can easily recognize and evaluate the risk level, and this analysis result can be applied to future facility risk management. Earthquake analysis was performed so that. **Conclusion:** As a result of analyzing the Coalescer facility according to the current design standard KBC2016, the stress ratio of the main supporting members was found to be up to 4.7%. Therefore, the members supporting Coalescer were interpreted as being safe against earthquakes with a reproducibility period of 2400 years that may occur in Korea.

Keywords: Energy Storage Facility, Earthquake, Risk Assessment, Building Structure Standards, Risk Management

요약

연구목적: 에너지저장시설의 주요 시설물인 Coalescer 시설물을 대상으로 현행 설계기준(KBC2016)에 따라 지진에 대한 위험성평가를 수행하였다. **연구방법:** 구조해석은 상용프로그램인 MIDAS-IT의 MIDAS GENw를 사용하였고, 구조물의 해석을 위해 기존 설계 도서를 준용하였으며, 해석에 사용한 하중은 국토교통부의 「건축구조기준 KBC2016」와 미국 연방기준인 「Provisions of the Uniform Building Code」를 따랐다. **연구결과:** 본 연구에서는 지진하중을 정적으로 재하하고 특급 구조물의 붕괴방지수 준에 대하여 평가함으로써 시설물의 관리자가 간편하게 위험도를 인지하고 평가할 수 있도록 고려하였으며, 본 해석결과를 활용하여 향후 시설물의 위험관리에 적용할 수 있도록 지진해석을 수행하였다. **결론:** 현재 설계기준인 KBC2016에 의해 Coalescer 시설을 해석한 결과, 주요 지지부재의 stress ratio는 최대 4.7% 정도로 나타났다. 따라서 Coalescer를 지지하는 부재는 국내에 발생할 수 있는 재현주기 2400년 수준의 지진에 대하여 안전한 것으로 해석되었다.

핵심용어: 에너지저장시설, 지진, 위험성평가, 건축구조기준, 위험관리

Received | 2 March, 2021

Revised | 14 April, 2021

Accepted | 3 May, 2021

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

내진설계는 구조물의 지진에 대한 내진특성을 규명하고, 지진에 대하여 효과적으로 대처하여 구조물이 안전할 수 있도록 설계하는 것을 말한다. 우리나라의 경우 내진설계가 도입된 기간이 약 40년으로 일본, 미국, 유럽 등에 비하여 상대적으로 짧다. 초창기 내진설계는 1972년 원자력 구조물에 대하여 내진설계가 처음 도입된 이래 1988년 건축물, 1991년 도로교량, 1993년 댐 등에 지진하중에 대한 고려가 포함되었으나, 우리나라 고유의 내진설계 기준이 없고, 외국의 기준을 그대로 모방하여 사용함에 따라 단편적이고 체계적인 구성을 갖추지 못하였다. 이후 1994년 미국 노스리지지진과 1995년 일본 효고현 남부지진(규모7.2, 이하 고베지진)으로 인한 대규모 피해가 발생함에 따라 해외 내진기준의 대대적인 변화가 일어났으며, 국내에서도 지진에 대한 경각심이 증가하여 정부에서는 1997년 10월 자연재해대책법을 제정하고, 20개 법정시설물에 대한 내진설계를 시행할 것을 규정하였다.

최근에는 한반도 주변을 포함한 여러 지역에서 크고 작은 지진이 다수 발생하고 있다. 2000년 이후부터 현재까지 전세계적으로 연 평균 25,000회 이상의 지진이 발생하였으며 그 중 진도 4.0 이상의 규모가 50%에 육박하는 것으로 나타났다. 2008년 쓰촨성지진(규모8.0), 2010년 아이티지진(규모 8.0), 2010년 칭하이 지진(규모7.1) 등은 많은 인명피해 및 재산피해를 가져왔다. 특히 2011년 동일본대지진(규모9.0)의 직접적 피해규모는 한화로 환산하면 약160~250조원으로 26년 전 고베지진의 물적 피해액 약96조원의 2배가 넘는 것으로 추산되며, 2차 피해 및 사회적 비용까지 고려할 경우 천문학적인 금액이 예상된다. 이로 인하여 구조물에 대한 내진설계의 중요성이 커지고 있으며, 국내에서는 특히 건축물에 대하여 2005년과 2009년에 내진설계기준을 강화하였다.

Table 1. Major recent earthquake

Earthquake name	Year of occurrence	Scale	deaths missing
Indonesia Sulawesi Earthquake	2018	7.5	7,256
Earthquake in Chiapas, Mexico	2017	8.1	98
Nepal Gorka earthquake	2015	7.8	9,120
Japan Tohoku Pacific Ocean Earthquake	2011	9.0	19,846
Haiti earthquake	2010	7.0	222,570
Earthquake in Sichuan, China	2008	8.0	87,652
The Great Earthquake in South Asia, Indonesia	2004	9.2	283,106

Table 2. Earthquake outbreaks around the world from 2000 to 2017

year magnitude	2000	2001	2002	2003	2004	2005
8.0 ~ 9.9	1	1	0	1	2	1
7.0 ~ 7.9	14	15	13	14	14	10
6.0 ~ 6.9	146	121	127	140	141	140
5.0 ~ 5.9	1,344	1,224	1,201	1,203	1,515	1,693
4.0 ~ 4.9	8,008	7,991	8,541	8,462	10,888	13,917
Sum	9,513	9,352	8,681	9,820	12,560	15,761

Table 2. Earthquake outbreaks around the world from 2000 to 2017 (Continue)

magnitude \ year	2006	2007	2008	2009	2010	2011
8.0 ~ 9.9	2	4	0	1	1	1
7.0 ~ 7.9	9	14	12	16	21	19
6.0 ~ 6.9	142	178	168	144	151	204
5.0 ~ 5.9	1,712	2,074	1,768	1,896	1,963	2,271
4.0 ~ 4.9	12,838	12,080	12,292	6,805	10,164	13,303
Sum	14,703	14,350	14,240	8,862	12,300	15,798

magnitude \ year	2012	2013	2014	2015	2016	2017
8.0 ~ 9.9	2	2	1	1	0	1
7.0 ~ 7.9	15	17	11	18	17	6
6.0 ~ 6.9	129	125	140	124	127	106
5.0 ~ 5.9	1,412	1,402	1,475	1,413	1,506	1,424
4.0 ~ 4.9	10,990	9,795	13,494	13,239	12,771	10,990
Sum	12,548	11,341	15,121	14,795	14,421	12,527

Table 1은 2000년부터 2020년 까지 발생한 주요 강진 규모와 사망·실종자수를 보여주고 있으며 Table 2는 2000년에서 2017년 동안 전 세계 지진 발생 현황을 보여주고 있다. Fig. 1은 2008 중국 쓰촨성 지진, 2010 아이티 지진, 2011 일본 도호쿠 태평양해역 지진 등 주요 강진 피해를 보여주고 있다.



[2008 Earthquake in Sichuan, China]



[2010 Haiti earthquake]



[2011 Japan Tohoku Pacific Ocean Earthquake]



[2015 Nepal Gorka earthquake]

Fig. 1. Major earthquake damage cases
(material : USGS Real-time Earthquake Map with exact dates and live earthquake reports)

한반도 지진자료 분석

한반도 지진의 특성

한반도는 유라시아판 내부에 존재하여 지진으로부터 안전지대로 인식되어 왔으며, 강진은 한반도 주변의 환태평양 지진대의 판 경계인 일본의 동부와 대만 등에서 주로 발생하였다. 그러나 2005년 일본 후쿠오카 지진은 일본의 서부에서 발생한 지진으로 판 내부에서 발생하여 한반도 전역에 지진파가 전달되었으며, 부산 지역에서는 인체감지가 가능하였다. 후쿠오카 지역은 판의 경계에서 약간 떨어져 있어 수백 년간 중소규모의 지진만 발생하는 등 국내와 유사한 지진발생 경향을 보이던 곳으로 금번에 7.0 규모의 지진이 발생하여 국내에서도 대규모 지진발생 가능성이 있음을 예시한 지진이라고 판단되고 있다. 또한 한반도의 동남부의 해상에서 발생하는 지진에 의해서 동해안 및 남해안이 지진해일 피해의 위험성이 존재하여 내륙지역뿐만 아니라 해안지역도 지진피해의 위험지역이라는 전문가들의 인식이 확산되어 있는 상황이다. Fig. 2는 일본 남서부지역과 한반도의 지진발생 현황을 보여주고 있다.

2005년 후쿠오카 지진 이후 2008년 중국 쓰촨성 대지진(M8.0)의 발생은 모두 대륙판 내부에서 발생한 지진으로서 그 영향은 한반도가 판 내부에 존재하지만 판 내부에서도 지진이 발생할 수 있으며, 판 내부에 단층이 존재하는 경우 강진의 위험성은 존재한다고 판단된다. 판 내부의 대표적인 지진은 미국 New Madrid(미국 중동부에 위치) 지역의 규모 8.0의 강진이 1812년 발생하였으며, 1976년 중국 당산에 강진이 발생하여 약 600,000명의 인명피해를 발생시킨 사례가 있다. 한반도에서는 충남 서산과 경북 포항을 잇는 약 100km 정도 지역에서 지진이 집중적으로 발생하고 있으며, 경남 양산지역의 단층은 활성단층으로 판정되었다. 따라서 한반도는 판 내부에 존재하지만, 일본 서부에서 발생하는 지진에 의해서 또는 한반도 내부에 존재하는 단층에서 대규모의 지진 발생가능성은 항상 존재하고 있으며, 지난 2016년 경주지진과 2017년 포항지진에서 보듯이 단층대 부근에서 많은 지진이 발생하고 있는 실정이다.

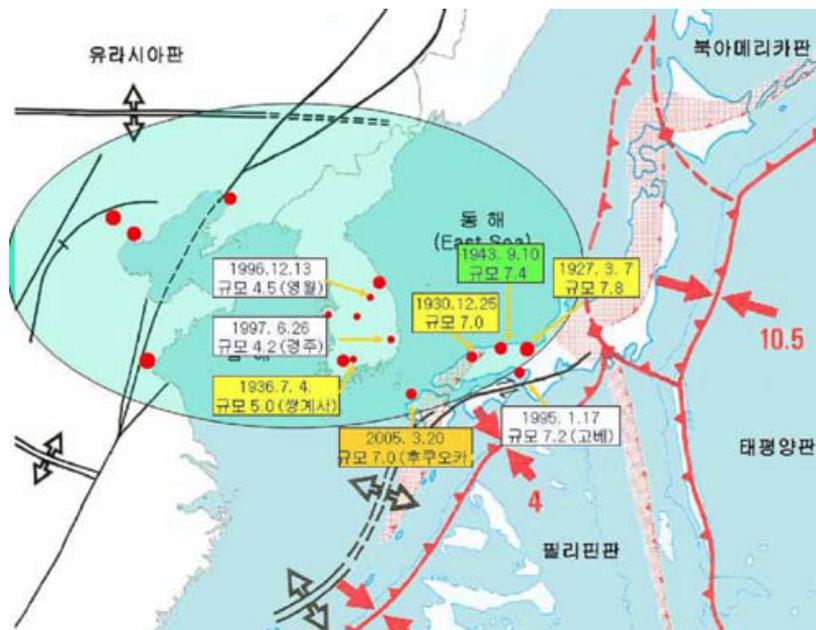


Fig. 2. Earthquakes in Southwestern Japan and the Korean Peninsula

국내 주요 지진

한반도의 지진활동은 역사적으로 15-17세기에 활발하였고 16세기에 지진 발생빈도가 가장 높았다. Fig. 3 국내 연도별 지진 발생 횟수를 보여주는 것으로 국내에서 지진을 관측한 것은 1905년부터이며 지진 발생 빈도는 1978년부터 1998년까지 아날로그 관측기간 동안 연평균 19.2회 발생하였으며 1999년 디지털 관측이 시작된 이래 2017년까지 연평균 67.6회 발생하였다. 특히 2017년 규모 3.0 이상의 지진은 19회로 연평균 9.7회 보다 약 2배 많이 발생하였고, 지진으로 진동을 느낀 유감지진은 98회로 연평균 8.4회 보다 11배 가까이 많이 발생하였다.

2016년 발생한 9.12지진의 강한 에너지로 인하여 한반도 전역에서 지진 발생 횟수가 증가하였다. 특히, 2017년 11월 15일 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진은 부상 92명, 이재민 1,797명 및 27,317개소의 시설피해와 약 551억원의 피해(출처:행정안전부)를 발생시킨 재난이었다. 포항지진은 9.12지진에 비해 규모가 0.4 정도 작지만, 지진이 발생한 지역의 지질학적 특성으로 인하여 더 큰 피해를 준 지진이다. 특히, 대규모 지진 발생시 수반되는 액상화 현상이 관측되어 지진재해에 대한 경각심을 일깨우게 되었다. 그리고 대부분의 국민들이 일상생활을 하고 있는 오후 시간에 발생하였고, 사회적 관심이 큰 대학수학능력 시험을 하루 앞둔 시점이어서 심리적인 충격이 더욱 크게 느껴진 지진이었다. 2017년에 발생한 규모 2.0 이상의 국내지진은 총 223회로 9.12지진 발생 이후로 꾸준히 증가했던 지진들과 포항지진의 여진 76회가 포함되어 있다. 특히, 유감지진의 횟수가 98회로 가장 많은 횟수를 기록하였다. 이것은 포항지진이 발생한 지역의 지질학적 특성과도 연관되어 있는 것으로 보인다.

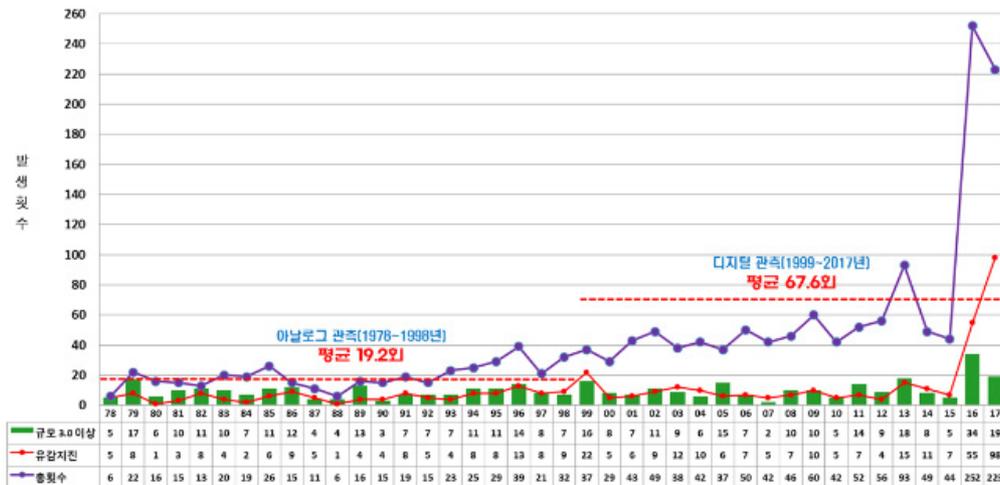


Fig. 3. Number of earthquake occurrences by year in Korea

내진설계기준

내진설계기준

법규 및 적용기준

내진설계를 위한 지진하중과 지진위험도는 2016년 국토교통부에서 개정한 ‘건축구조기준’(이하 KBC2016)의 내용을 따른다.

설계지반운동

구조물에 영향을 주게 되는 수평방향 지진동의 특성은 표층지반의 영향을 많이 받기 때문에 설계지반운동 수준은 기반면에서 설정한다. 시설물의 내진등급과 내진성능에 따른 지진의 재현주기는 내진설계기준연구 II(1997, 건설교통부)를 따르고 있으며, KBC2016은 특등급, 붕괴방지수준을 기준으로 하고 있다. Table 3은 시설물 내진등급 구분을 보여주고 있으며 Table 4는 내진등급에 따른 성능목표를 나타내고 있다.

Table 3. Classification of seismic level of facilities

Reproduction cycle(year)	Function	Prevent collapse
50	Grade II	-
100	Grade I	-
200	Special grade	-
500	-	Grade II
1000	-	Grade I
2400	-	Special grade

Table 4. Seismic rating and performance target

Seismic rating	Performance target	
	Performance level	Earthquake risk
Special grade	Function (or immediate residence)	1.0 times the design spectrum acceleration ²⁾
	Safety of life and prevention of collapse	1.5 times the design spectrum acceleration
I	Life safety	1.2 times the design spectrum acceleration
	Prevent collapse	1.5 times the design spectrum acceleration
II	Life safety	1.0 times the design spectrum acceleration
	Prevent collapse	1.5 times the design spectrum acceleration

¹⁾It is decided according to the performance target level of the user or designer.

²⁾In accordance with the provisions specified in 0306.3 Seismic Risk.

내진 해석절차

Computer Programs

- ① MIDAS-GEN, POSCO Co., Ltd. KOREA
- ② MIDAS-SDS, POSCO Co., Ltd. KOREA
- ③ DESIGN-A, HYUNDAI ENG. Co., Ltd. KOREA

사례연구

에너지 저장시설의 주요 시설물인 Coalescer 시설물을 대상으로 현행 설계기준(KBC2016)에 따라 지진에 대한 위험성평

가를 수행하였다. 대상 시설물의 위험성평가를 통해 그 안전성 수준을 확인하고 정확한 판단 및 위험관리를 통해 시설물의 안전성을 확보하고 적절한 의사결정의 근거를 제공하기 위하여 지진에 대한 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 상용프로그램인 MIDAS-IT의 MIDAS GENw를 사용하였고, 구조물의 해석을 위해 기존 설계 도서를 준용하였으며, 해석에 사용한 하중은 국토교통부의 「건축구조기준 KBC2016」와 미국 연방기준인 「Provisions of the Uniform Building Code」를 따랐다. 구조물의 설계와 해석에 사용되는 모든 물리적 특성, 기하학적 특성, 외력요인 등은 모두 확률적 변동성을 가지지만 본 연구에서는 고려하지 않았다. 그리고 실제 지진에 의한 구조물의 붕괴는 동적 거동과 밀접하게 관련되어 있어 비선형 동적 시간 이력해석을 실시하는 것이 정확한 내진성능을 검토할 수 있지만, 이를 반영하기 위해서는 매우 복잡한 구조해석을 수행하여야 하며, 이를 수행하기 위한 기술자의 숙련도와 결과의 신뢰도가 중요한 요소로 작용한다. 또한 본 연구에서 해당 시설물에 대하여 비선형 동적해석을 고려하는 것 또한 현실적으로 어려움이 크고 가득성(可得性) 또한 용이하지 않기 때문에 본 연구에서는 지진하중을 정적으로 재하하고 특급 구조물의 붕괴방지수준에 대하여 평가함으로써 시설물의 관리자가 간편하게 위험도를 인지하고 평가할 수 있도록 고려하였으며, 본 해석결과를 활용하여 향후 시설물의 위험관리에 적용할 수 있도록 지진 해석을 수행하였다.

Coalescer 내진해석

3-D Modeling

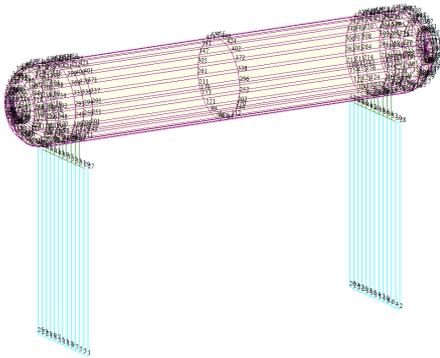


Fig. 4. Node model

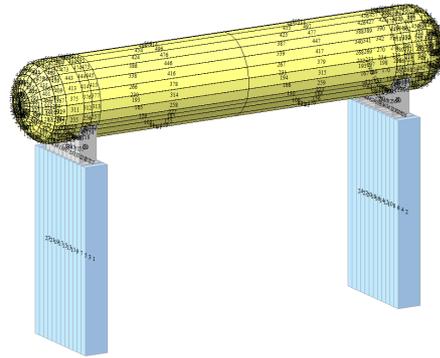


Fig. 5. Element numbers

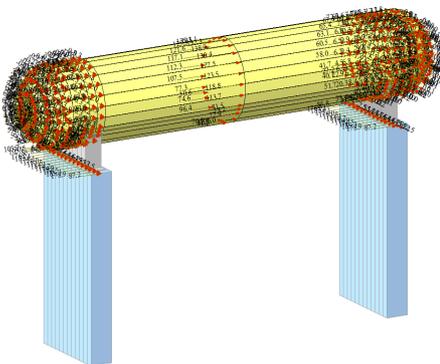


Fig. 6. Static seismic loads(X-Dir.), N

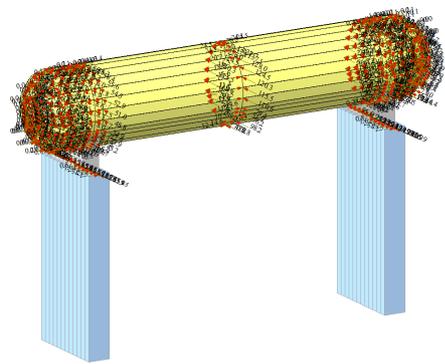


Fig. 7. Static seismic loads (Y-Dir.), N

- Member Stresses

Table 6. Principal stress

Elem.	Max(MPa)	Ratio(%)	Elem.	Max(MPa)	Ratio
25	4.49	1.6	38	0.63	0.2
26	4.03	1.5	39	0.83	0.3
27	4.35	1.6	40	0.78	0.2
28	4.08	1.6	41	4.08	1.6
29	0.78	0.2	42	4.34	1.6
30	0.83	0.3	43	4.04	1.5
31	0.63	0.2	44	4.51	1.6
32	0.74	0.2	47	0.10	3.3
33	2.11	0.8	48	11.10	3.3
34	2.31	0.8	63	0.03	4.7
35	2.31	0.8	64	1.25	4.4
36	2.11	0.8	65	0.16	4.4
37	0.74	0.2	66	1.25	4.7

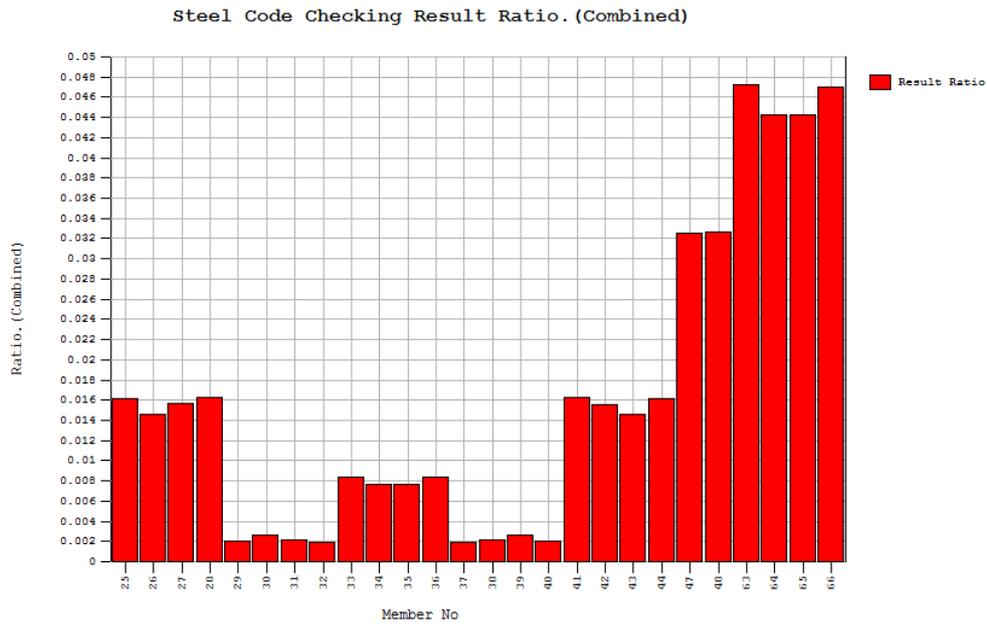


Fig. 12. Result ratio(combined)

결론

에너지저장시설의 주요 시설물인 Coalescer 시설물을 대상으로 현행 설계기준(KBC2016)에 따라 지진에 대한 위험성평가를 수행하였다. 대상 시설물의 위험성평가를 통해 그 안전성 수준을 확인하고 정확한 판단 및 위험관리를 통해 시설물의

안전성을 확보하고 적절한 의사결정의 근거를 제공하기 위하여 지진에 대한 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 상용프로그램인 MIDAS-IT의 MIDAS GENw를 사용하였고, 구조물의 해석을 위해 기존 설계도서를 준용하였으며, 해석에 사용한 하중은 국토교통부의 「건축구조기준 KBC2016」와 미국 연방기준인 「Provisions of the Uniform Building Code」를 따랐다.

구조물의 설계와 해석에 사용되는 모든 물리적 특성, 기하학적 특성, 외력요인 등은 모두 확률적 변동성을 가지지만 본 연구에서는 고려하지 않았으며 실제 지진에 의한 구조물의 붕괴는 동적 거동과 밀접하게 관련되어 있어 비선형 동적 시간이력 해석을 실시하는 것이 정확한 내진성능을 검토할 수 있지만 본 연구에서는 지진하중을 정적으로 재하하고 특급 구조물의 붕괴방지수준에 대하여 평가함으로써 시설물의 관리자가 간편하게 위험도를 인지하고 평가할 수 있도록 고려하였으며, 본 해석결과를 활용하여 향후 시설물의 위험관리에 적용할 수 있도록 지진해석을 수행하였다. 현재 설계기준인 KBC2016에 의해 Coalescer 시설을 해석한 결과, 주요 지지부재의 stress ratio는 최대 4.7% 정도로 나타났다. 따라서 Coalescer를 지지하는 부재는 국내에 발생할 수 있는 재현주기 2400년 수준의 지진에 대하여 안전한 것으로 해석되었다.

References

- [1] Ham, E.-G. (2017). Reduction of damage from flood damage to facilities. Disaster Prevention and Safety Specialist Training Program, Seoul, Korea.
- [2] Ham, E.-G. (2016). Safety Assessment Against Climate Change. Korea Gas Safety Corporation. Seoul, Korea.
- [3] Ham, E.-G. (2020). "A Study on the response plan natural disaster risk by climate change." Proceedings of the 25th The Society of Disaster Information, Seoul, Korea, pp.1102-1125.