

면진장치 적용을 고려한 원전구조물 생애주기 분석

김 선 용¹ · 이 흥 표^{1*} · 조 명 석¹

¹한국수력원자력(주) 중앙연구원

Life-Cycle Analysis of Nuclear Power Plant with Seismic Isolation System

Sunyoung Kim¹, Hong-Pyo Lee^{1*} and Myung-Sug Cho¹

¹Plant Construction & Engineering Lab, Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Daejeon, 305-343, Korea

Abstract

In order to extend the service life of a nuclear power plant(NPP) ensuring the structural safety, effective and efficient management of NPP considering structural deteriorations and various natural hazard risks has been treated as a significant tool(IAEA 1998). The systemic efforts is required to prevent the potential loss of NPPs resulting from the natural hazard including earthquakes, hurricane and flooding since the Fukushima accident. Earthquake risk of building structures can be mitigated through appropriate seismic isolation system installation. It has been known that a seismic isolation system can lead to reduction of the deleterious effect on ground motion induced by earthquakes, and structural safety can be improved. In this paper, the NPP life-cycle management is reviewed. Furthermore, effect of seismic isolation on the NPP life-cycle cost analysis with earthquake, and cost-benefit analysis in terms of life-cycle cost when applying the seismic isolation systems to NPP are introduced.

Keywords : nuclear power plant, earthquakes, seismic isolation system, life-cycle management, cost-benefit

1. 서 론

원자력발전소(이하 원전) 구조물은 지진을 포함한 자연재해에 의해 피해가 발생할 경우 그로 인한 피해강도와 범위가 다른 사회기반시설보다 크기 때문에 안전성이 무엇보다 강조된다(Kammerer *et al.*, 2012). 자연재해의 발생 시점과 강도를 정확히 예측하는 것은 그 불확실성으로 인해 현실적으로 불가능하다(Burby *et al.*, 2000; Lindell and Prater, 2003). 따라서, 발생 가능한 자연재해의 범위를 설정하고, 이를 바탕으로 구조물의 저항능력을 향상시켜 그로 인한 피해를 최소화하여야 한다. 특히, 최근 동일본 대지진 이후 원자력 시설물에 대한 지진 안전성에 대한 관심이 더욱 고조되고 있으며, 강진 다발지역에 원자력발전소를 건설할 경우 내진설계 뿐만 아니라 면진시스템의 적용이 필수적이다(Park *et al.*, 2012).

면진시스템은 구조물의 지진발생시 지반운동을 흡수하여 안전성을 확보하기 위한 장치로 다양한 토목/건축물에 적용되어 왔으며, 또한, 일반적으로 구조물의 하부와 지반상부의 경계지점에 설치되어 지진발생시 상부구조물의 고유주기를 증가시켜 지진하중에 영향을 감소시킨다(Kani 2008; Kelly 1986). 최근 지진에 대한 안전성 확보를 위해 면진시스템의 적용에 관한 연구가 진행되고 있다. 이미, 프랑스의 경우 1980년대부터 면진장치를 도입한 원전을 건설하여 현재까지 상업운전 중에 있으며, 일본을 비롯한 미국의 경우 독자적인 원전 면진규제 지침을 마련을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 원전구조물의 생애주기 성능분석에 있어서 고유 특성을 분석하고, 면진시스템이 적용될 경우 원전구조물의 생애주기 성능에 있어서 미치는 영향을 예측함으로써, 면진시스템 적용에 따라 발생할 수 있는 비용이득(cost-benefit)을 평가하게 된다. 이 비용이득의 구성을 위하여 지진의 발생빈

* Corresponding author:

Tel: +82-42-870-5826; E-mail: hplee@khnp.co.kr
Received October 28 2013; Revised November 5 2013;
Accepted December 3 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

도와 면진장치의 작동가능성을 고려한 의사결정 수목(decision tree)을 사용하게 된다.

2. 구조물 생애주기 분석

구조물의 성능은 시간이 지남에 따라 각종 열화현상에 의해 감소한다. 구조물의 생애주기 성능분석은 일반적으로 열화현상과 하중변화, 그리고 유지관리에 의한 영향을 고려한 구조물의 시간 의존적 성능평가를 의미한다(Frangopol and Liu, 2006). 구조물의 성능을 평가하고 예측하는 것은 구조물의 생애주기 성능분석에 있어서 가장 중요하며, 그와 관련한 불확실성을 효과적으로 고려하기 위해 신뢰성 바탕의 생애주기 성능 분석 기법이 적용되어 왔다(Ang and De Leon 2005; Moan 2005). 신뢰성 바탕의 생애주기 성능분석은 최적화 기법을 통하여, 최적의 유지보수 시기와 방법, 그로 인해 발생하는 비용과 예상수명을 예측하게 된다(Cho *et al.*, 2002; Shin *et al.*, 2005). 이러한 최적화 기법의 목적은 예상비용의 최소화(minimizing the expected total cost), 구조물의 성능최대화(maximizing the structural performance), 수명의 최대화(maximizing the expected service life)가 될 수 있다. Fig. 1에서는 유지보수에 따른 구조물의 성능과 수명을 도식화 하였다.

구조물 생애주기 분석에서 사용되는 최적화 기법의 목적이운데 생애주기 예상비용의 최소화는 가장 일반적으로 사용되는 것으로, 생애주기 예상비용 C_{ET} 은 다음과 같이 표현된다(Frangopol *et al.*, 1997).

$$C_{ET} = C_{INI} + C_M + C_{INS} + C_{FAIL} \quad (1)$$

여기서, C_{INI} 는 설계/시공비용을 포함한 구조물 최초비용, C_M 은 유지보수에 필요한 비용, C_{INS} 는 구조물 점검에 요구되는 비

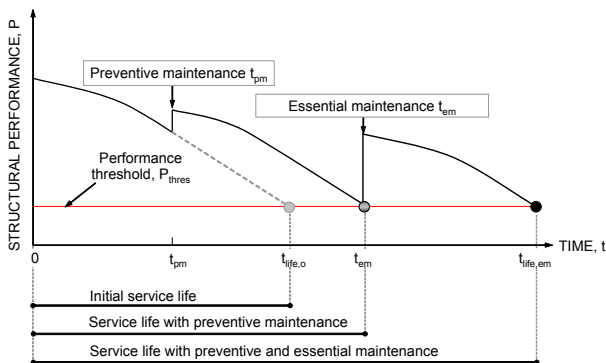


Fig. 1 Structural performance profile considering maintenance

용, 그리고 C_{FAIL} 은 예상 파괴비용을 나타낸다. C_{FAIL} 은 구조물의 수명기간 중 파괴확률 $P_{F,life}$ 와 파괴로 인한 손실비용 C_f 의 곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{FAIL} = P_{F,Life} \times C_f \quad (2)$$

최근, 구조물 생애주기에 사용되는 최적화 기법 가운데 2개 이상의 서로 상충되는 목적을 동시에 고려하는 다중목적 최적화 기법(multi-objective optimization)이 사용되고 있다. 예를 들어, 구조물의 성능향상은 비용이 요구되며, 생애주기 비용을 최소화시키기 위해서는 구조물의 성능향상에 제한이 생기게 된다. 따라서, 균형잡힌 구조물 생애주기 전략을 수립하기 위해서는 서로 상충되는 비용과 구조물 성능의 적절한 균형을 찾는 것이 필요하며, 이를 위해 다중목적 최적화 기법이 사용되게 된다.

다중목적 최적화 문제의 해를 구하기 위해서는 (i) weighted sum, (ii) weighted min-max, (iii) weighted global criterion, (iv) ϵ -constraint, (v) genetic algorithm(GA)이 사용 가능하며, GA는 비연속적이거나 미분이 가능하지 않는 목적함수(objective function)에도 적용할 수 있기 때문에 널

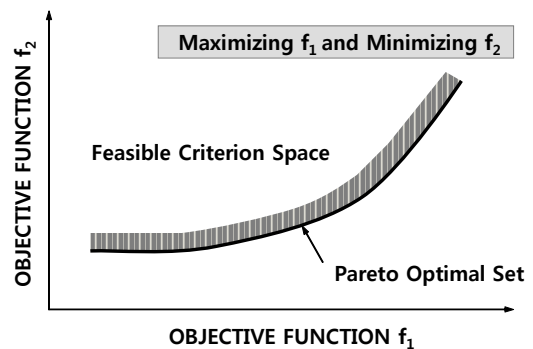


Fig. 2 Pareto solution set of multi-objective optimization with maximizing f_1 and minimizing f_2

Table 1 Recent studies for life-cycle analysis based on multi-objective optimization

Objectives	Source
<ul style="list-style-type: none"> • Min. worst lifetime condition index • Max. worst lifetime safety index • Min. life-cycle maintenance cost 	Liu and Frangopol(2005a; 2005b), Neves <i>et al.</i> (2006a; 2006b)
<ul style="list-style-type: none"> • Max. safety • Max. service life • Min. life-cycle maintenance cost 	Furuta <i>et al.</i> (2006)
<ul style="list-style-type: none"> • Min. probability of system failure • Max. system redundancy • Min. life-cycle maintenance cost 	Okasha and Frangopol(2009)
<ul style="list-style-type: none"> • Min. failure cost • Min. life-cycle maintenance cost 	Orcesi and Frangopol(2011)

리 사용되고 있다(Arora, 2004). 여기서 생성된 해는 하나가 아닌 집합군을 이루고 있으며, 이를 Pareto solution set이라고 한다. Fig. 2에서는 목적함수 f_1 의 최대화와 f_2 의 최소화를 위한 다중목적 최적화 문제의 해인 Pareto solution set의 경향을 도식화하였다. Table 1에서는 다중목적 최적화 기법을 기반으로 한 구조물 생애주기 분석 일부 연구에 대한 요약을 제공한다.

3. 원자력발전소 생애주기 분석

원전은 다른 어떤 토목구조물보다 안전성이 중요시 된다. 예상하지 못한 원전의 사고발생시 그로 인한 경제적 사회적 파급효과가 광범위하기 때문에 최초 설계단계부터 높은 구조 성능이 요구되며, 지속적이고 엄격한 예방정비와 유지보수를 통해 안전성 확보에 초점을 둔다.

원전의 생애주기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 도식화 할 수 있다. 원전구조물의 생애주기는 일반구조물과는 다른 몇몇 특징을 지닌다(IAEA, 2002; Hall, 2004). 생애주기 비용은 전력생산으로 인한 이득과 원자력연료의 소비와 처리에 따른 비용, 사용 중 원전 관리비용, 추후 발전소 폐쇄에 따른 비용을 고려해야 한다. 또한, 원전구조물은 일정한 안전수준을 지속적으로 유지해야 하기 때문에 유지보수가 적극적이며, 주기적 점검과 안전성 평가가 필수적이다(EPRI, 2001).

Table 2에서는 원전구조물의 생애주기 분석에 고려되어야 할 입력인자들이 제시된다. 일반적 입력인자(general inputs)는 원전의 생애주기 분석에 기반이 되는 필수적 안전유지관련 인자들이며, 안전관리(safety management)와 경련열화 관리(aging management)를 포함한다. 또한, Table 2에서는 다소 가변적 변수가 고려된 입력인자를 life-cycle state input으로 구별하고 있다.

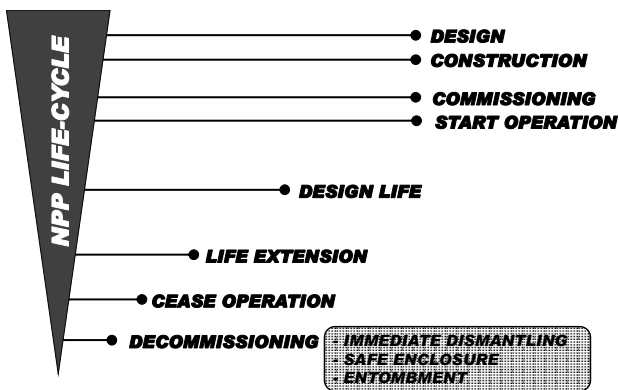


Fig. 3 Life-cycle of nuclear power plant(adapted and modified from IAEA 2002)

Table 2 Inputs for life-cycle of nuclear power plant (adapted and modified from IAEA 2002)

General inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Management: safety, asset, aging, quality, knowledge, performance, human resource, fuel cycle/waste, license, environmental, risk, stakeholder • Preventive maintenance, periodic safety reviews • Economic optimization
Life-cycle stage inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Design strategies and criteria • Social impact • Self-managed or turnkey during construction, commissioning, operation or decommissioning • Operating strategies • Decommissioning options • Statutory and regulatory requirements • Utility business objectives

4. 면진시스템의 생애주기 성능영향

4.1 면진시스템 적용에 따른 원전구조물 지진해석

현재 세계적으로 강한 지진의 발생빈도가 커지고 있는데 원전 수출 경쟁력 확보를 위해 수출형 원전에 대한 면진장치 적용에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다(Lee et al., 2013).

원전의 면진적용은 경제성 및 안전성 등 다양한 예비타당성 평가를 통해 격납건물과 보조건물인 NI(Nuclear Island) 구역으로 결정하였다. Fig. 4는 수출형 원전의 전체적인 형상으로 격납건물과 보조건물 하단에 면진장치를 적용하게 된다. Fig. 4의 면진구역에 대한 지진해석을 위하여 Fig. 5에 도시한 것처럼 해석모델을 개발하였다. 면진부분 하단의 기초매트 부분은 고체요소 540개로 모델화하였고, 상부는 해석시간을 단축하기 위하여 집중질량으로 이산화하였다. 해석모델은 수출형 원전의 설계에서 사용한 것으로, 본 연구에서는 면진시스템에 의한 지진력저감효과 평가가 궁극적인 목적이므로 모델에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다. 이때 지진저감효과

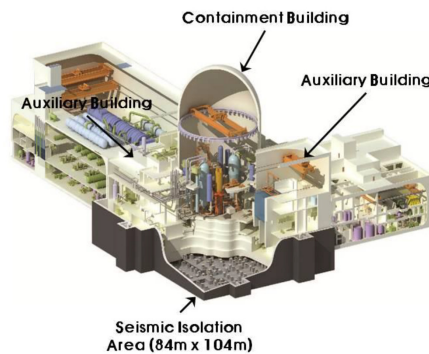


Fig. 4 Nuclear power plant with seismic isolation system(courtesy of KEPSCO-E&C)

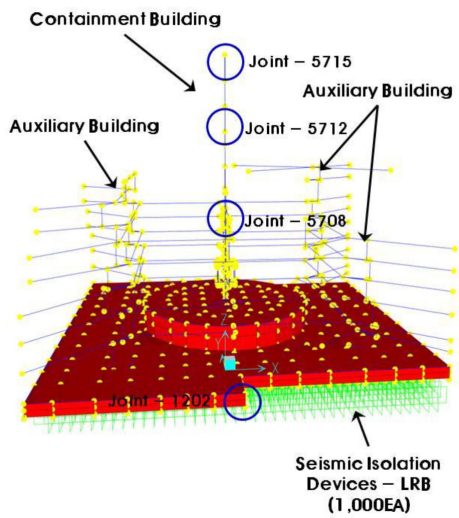
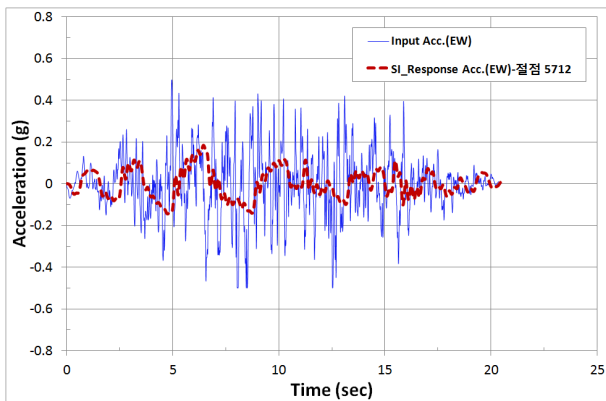
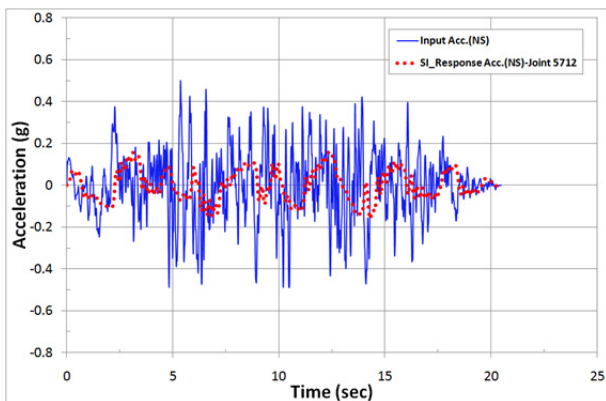


Fig. 5 3-D FE model(courtesy of KEPCO-E&C)



(a) Acceleration response - EW direction at node 5712



(b) Acceleration response - NS direction at node 5712

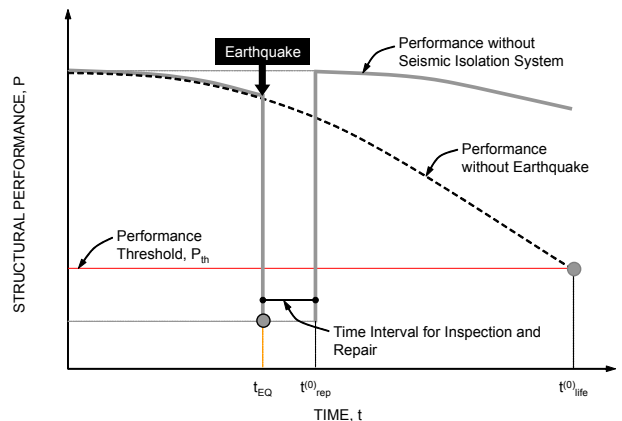
Fig. 6 Analysis results for application of seismic isolation system to the nuclear power plant

평가를 위한 해석은 SAP200 Ver.15를 사용하였다. 입력지진파는 REG. Guide 1.60의 표준응답스펙트럼 $ZPA=0.5g$ 에 해당하는 인공지진파로 시간 간격 0.005초의 총 20.48초

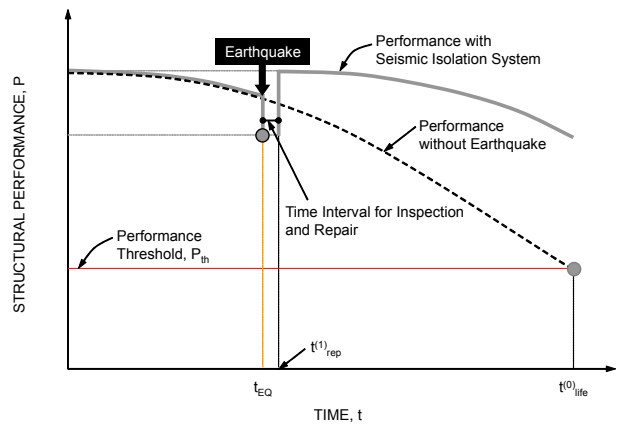
지속시간을 가지고 있다. Fig. 6은 절점 5712(Fig. 5 참조)의 동서(EW)방향에 대한 가속도 시간이력 곡선과 응답스펙트럼을 나타낸다.

4.2 면진장치를 고려한 원전구조물 시간의존적 성능변화

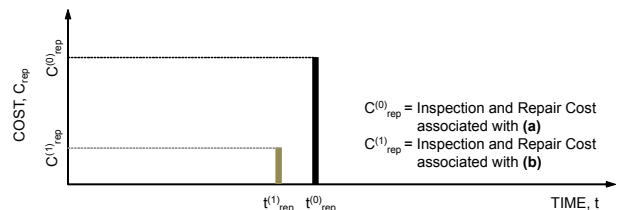
지진과 같은 자연재해 발생 시 구조물의 성능은 급격히 떨어질 수 있다. 면진시스템이 적용된 구조물의 경우, 지진 발생시 그 성능이 적절히 발휘된다면 급격한 성능저하를 방지할 것으로 기대된다.



(a) Time-dependent structural performance with non-seismic isolation system



(b) Time-dependent structural performance with seismic isolation system



(c) Cost associated with (a) and (b)

Fig. 7 Time-dependent structural performance and cost under earthquake risk

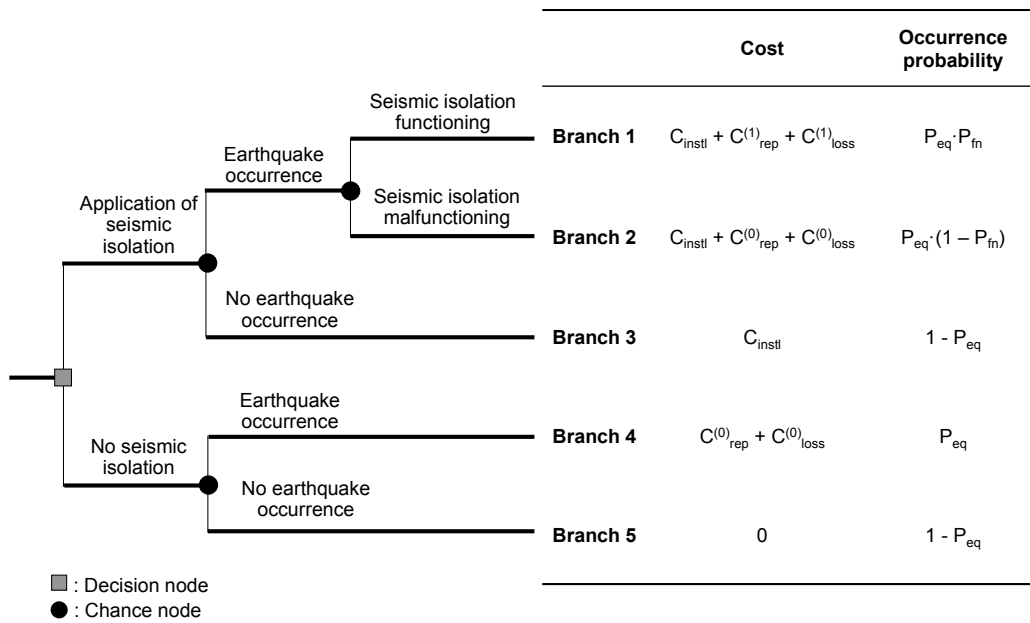


Fig. 8 Decision tree for cost-benefit analysis

Fig. 7에서는 구조물의 수명기간 중 지진이 발생할 경우, 면진시스템이 적용되지 않은 구조물과 적용된 구조물의 시간 의존적 성능변화를 도식화하였다. 구조물의 성능저하된 값이 특정 한계값 이하로 떨어질 경우 구조물은 더 이상 수명을 유지할 수 없다.

따라서, 지진발생시 면진시스템이 기대효과를 발휘할 경우, 갑작스러운 구조물 성능저하를 방지하고, 지진발생후 구조물의 점검과 보수에 대한 노력을 줄임으로써 수명을 지속할 수 있게 한다. 특히, 원전구조물의 경우 지진으로 인한 구조물 손상이 발생할 경우, 그로 인한 피해는 산정하기 어려운 만큼 크며, 원전 재가동을 위한 보수/보강에는 최초 건설 비용에 가까운 비용이 요구될 수 있다.

4.3 면진시스템 적용에 따라 발생할 수 있는 비용이득

면진시스템 적용에 따른 비용이득(cost-benefit)은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 의사결정수목(decision tree)로부터 표현할 수 있다. 우선, 의사결정절점(decision node)에서는 두 가지의 가능성이 존재하는데, 면진시스템의 적용과 비적용이다. 면진시스템을 적용할 경우 구조물의 수명기간동안 지진이 발생하게 되어 그 본래의 기능이 적절하게 작용함으로써 구조물에 피해가 발생하지 않게 되면, 관련 비용은 $C_{instl} + C_{rep}^{(1)} + C_{loss}^{(1)}$ 가 되며, 이 경우의 발생확률은 $P_{eq} \cdot P_{fn}$ 이 된다. 여기서, C_{instl} 는 면진시스템 설치/운영관련 비용, $C_{rep}^{(1)}$ 는 면진시스템 적용시 지진발생 후 구조물 수명유지를 위해 요구되는 유지보수비용, $C_{loss}^{(1)}$ 는 면진시스템 적용시 지

진발생으로 갑작스러운 구조성능저하로 인해 발생하는 피해 비용을 말한다. 또한, P_{eq} 는 구조물 수명기간내에 지진 발생 확률을 의미하며, P_{fn} 은 면진시스템이 지진 발생시 그 기능을 적절히 수행하여 구조물의 손상이 발생하지 않을 확률을 의미한다. 결과적으로 면진시스템 적용으로 발생하는 기대비용(expected monetary value) C_A 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_A = (C_{instl} + C_{rep}^{(1)} + C_{loss}^{(1)})P_{eq} \cdot P_{fn} + (C_{instl} + C_{rep}^{(0)} + C_{loss}^{(0)})P_{eq}(1 - P_{fn}) + C_{instl}(1 - P_{eq}) \quad (3)$$

비슷한 방법으로 면진장치가 적용되지 않을 경우의 기대비용 C_{NA} 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{NA} = (C_{rep}^{(0)} + C_{loss}^{(0)})P_{eq} \quad (4)$$

여기서, 상첨자 "(0)"는 비면진과 관련된 변수를 의미한다. 따라서, 면진시스템 적용에 따른 비용이득 C_{ben} 은 다음과 같다.

$$C_{ben} = C_{NA} - C_A \quad (5)$$

식 (3)과 (4)의 변수들의 불확실성을 고려한다면, 면진시스템이 비용이득을 발생시킬 확률 P_{ben} 은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{ben} = P(C_{ben} > 0) \quad (6)$$

Poisson Process에 의해 구조물의 수명 기간의 지진발생 확률 P_{eq} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{eq} = 1 - \exp[-v \cdot t_{life}^{(0)}] \quad (7)$$

여기서, v 는 지진의 발생빈도이다. 구조물의 수명 $t_{life}^{(0)}$ 와 지진발생 후 구조물 수명유지를 위해 요구되는 유지보수비용 $C_{rep}^{(0)}$, $C_{rep}^{(1)}$ 을 각각 LN(50years; 10years), LN(50; 10), LN(1; 0.2)으로 가정하고, $C_{loss}^{(1)}$ 을 0으로 고려한다면, 면진시스템 미적용으로 인한 지진발생시 갑작스러운 구조성능저하로 인해 발생하는 피해 비용 $C_{loss}^{(0)}$ 에 따른 비용이득 C_{ben} 의 확률분포는 Fig. 9에서 보는 바와 같다. 여기서, LN(a:b)는 평균값 a 와 표준편차 b 를 갖는 Lognormal 분포를 의미한다. Fig. 9에서 C_{ben} 이 0보다 큰 확률분포 영역이 Eq. (6)의 P_{ben} 값이다.

Table 3에서는 지진의 발생빈도 $v=1/1000$, $1/5000$, $1/10000$ 와 $C_{loss}^{(0)}=10$, 100 , 1000 인 경우 $P(C_{ben} > 0)$ 계산 결과를 제시하고 있다. 이는 비면진으로 인해 발생하는 피해가 클수록, 그리고 지진의 발생확률이 커질수록, 면진에 의한 비용이득을 얻을 확률이 커질 수 있다는 것을 보여준다.

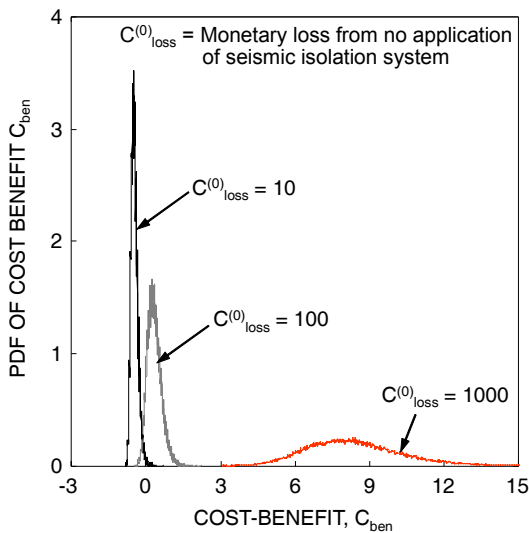


Fig. 9 Probability density function of cost-benefit for $P_{fn}=0.9$; $P_{eq}=1/5000$

Table 3 Probability that seismic isolation system will provides cost-benefit $P(C_{ben} > 0)$ for $P_{fn}=0.9$

$C_{loss}^{(0)}$ \ v	1/1000	1/5000	1/10000
10	0.9998	0.0045	0.0001
100	0.9999	0.9002	0.0215
1000	0.9999	0.9999	0.9999

5. 결 론

본 연구에서는 원전구조물의 생애주기 성능분석에 있어서 특징을 분석하고, 면진시스템이 적용될 경우 원전구조물의 생애주기성능에 있어서 미치는 영향을 평가하였다. 면진시스템은 구조물의 수명기간 중 지진의 발생확률이 높으며, 지진으로 인한 피해발생시 그로 인한 경제적 손실이 큰 경우 적용이 타당하며, 보다 정량적인 평가를 위해서는 지진발생확률, 지진발생으로 인한 구조물의 피해량과 범위가 적절히 평가 되기 위한 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 과제입니다(No. 2011T100200081).

참 고 문 헌

- Park, J.Y., Jan, K.S., Lee, H.P., Lee Y.H., Kim, H.** (2012) Experimental Study on the Temperature Dependency of Full Scale Low Hardness Lead Rubber Bearing, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 25(6), pp.533~540.
- Shin, Y.S., Pa, J.H., Lee, H.S., Ahn, Y.J.** (2005) Optimal Life-Cycle Cost Design of Steel Box Girders, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 18(4), pp.445~452.
- Cho, H.N, Min, D.H., Kwon, W.S.** (2002) Life-Cycle Cost Optimization of Steel Box Girder Bridges, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 15(4), pp.557~566.
- Ang, A.H.-S., and De Leon, D.** (2005) Modeling and Analysis of Uncertainties for Risk-informed Decisions in Infrastructures Engineering, *Structure & Infrastructure Engineering*, 1(1), pp.19~31.
- Arora, J.S.** (2004) *Introduction to Optimum Design*, Elsevier Academic Press.
- Burby, R., Deyle, R., Godschalk, D., Olshansky, R.** (2000) Creating Hazard Resilient Communities through Land-Use Planning, *Natural Hazards Review*, ASCE, 1(2), pp.99~106.
- EPRI** (2001) *Demonstration of Life Cycle Management Planning for Systems, Structures, and Components: With Pilot Applications at Oconee and Prairie Island*

- Nuclear Stations*, Technical Report-1000806, EPRI, Palo Alto, CA, USA.
- Frangopol, D.M., Lin, K.Y., Estes, A.C.** (1997) Life-cycle Cost Design of Deteriorating Structures, *Journal of Structural Engineering*, 123(10), pp.1390~1401.
- Frangopol, D.M., Liu, M.** (2006) Life-Cycle Cost and Performance of Civil Structures, *Article in McGraw-Hill 2006 Yearbook of Science and Technology*, McGraw-Hill, New York, pp.183~185.
- Furuta, H., Kameda, T., Nakahara, K., Takahashi, Y., Frangopol, D.M.** (2006) Optimal Bridge Maintenance Planning using Improved Multi-objective Genetic Algorithm, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2(1), pp.33~41.
- Hall, S.C.** (2004) Nuclear Plant Life Cycle Cost Analysis Considerations, *Proceedings of ICAPP'04*, Pittsburg, PA, USA.
- IAEA** (2002) *Safe and Effective Nuclear Power Plant Life Cycle Management Towards Decommissioning*, IAEA-Tecdoc-1305, IAEA, Vienna, Austria.
- Kammerer, A.M., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C.** (2012) *Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities: Draft for Comment*, USNRC, Washington, D.C.
- Kani, N.** (2008) Current State of Seismic-isolation Design, *Journal of Disaster Research*, 4(3), pp.175~181.
- Kelly, J. M.** (1986) Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4), pp.202~216.
- Lindell, M., Prater, C.** (2003) Assessing Community Impacts of Natural Disasters, *Natural Hazards Review*, 4(4), pp.176~185.
- Liu, M., Frangopol, D.M.** (2005a) Bridge Annual Maintenance Prioritization under Uncertainty by Multiobjective Combinatorial Optimization, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(5), pp.343~353.
- Liu, M., Frangopol, D.M.** (2005b) Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety and Life-cycle Cost, *Journal of Structural Engineering*, 131(5), pp.833~842.
- Moan, T.** (2005) Reliability-based Management of Inspection, Maintenance and Repair of Offshore Structures, *Structure & Infrastructure Engineering*, 1(1), pp.33~62.
- Neves, L.A.C., Frangopol, D.M., Cruz, P.J.S.** (2006a) Probabilistic Lifetime-oriented Multiobjective Optimization of Bridge Maintenance: Single Maintenance Type, *Journal of Structural Engineering*, 132(6), pp.991~1005.
- Neves, L.A.C., Frangopol, D.M., Petcherdchoo, A.** (2006b) Probabilistic Lifetime-oriented Multiobjective Optimization of Bridge Maintenance: Combination of Maintenance Types, *Journal of Structural Engineering*, 132(11), pp.1821~1834.
- Okasha, N.M., Frangopol, D.M.** (2009) Lifetime-oriented Multi-objective Optimization of Structural Maintenance Considering System Reliability, Redundancy and Life-cycle Cost using GA, *Structural Safety*, 31(6), pp.460~474.
- Orcesi, A., Frangopol, D.M.** (2011) Optimization of Bridge Maintenance Strategies based on Structural Health Monitoring Information, *Structural Safety*, 33(1), pp.26~41.

요 지

본 논문에서는 면진시스템이 원전에 적용될 경우 원전구조물의 생애주기 성능에 미치는 영향을 소개한다. 최근 내진설계와 더불어 강진발생 예상 지역에 적용을 목적으로 개발되는 면진시스템은 구조물을 장주기화하여 응답가속도를 줄이고 상대변위를 늘려줌으로써 구조물의 안전성을 증진시키는 것으로 알려져 있다. 따라서, 구조물의 안전성이 중요시되는 원전구조물에 면진시스템을 적용하기 위한 연구가 국내에서 진행 중에 있다. 본 연구에서는 원전구조물의 생애주기 성능분석에 있어서 특징을 분석하고, 면진시스템이 적용될 경우 원전구조물의 생애주기성능에 있어서 미치는 영향을 평가함으로써, 도출된 결과를 면진시스템 적용의 정량적인 타당성 평가에 활용할 수 있다.

핵심용어 : 원전구조물, 지진, 면진시스템, 생애주기관리, 비용이득