

부유물 충돌을 고려한 교각의 홍수 취약도 해석 기법

김현준¹, 심성한^{*}

¹울산과학기술원 도시환경공학부

Flood fragility analysis of bridge piers in consideration of debris impacts

Hyunjun Kim¹, Sung-Han Sim^{*}

¹School of Urban and Environmental Engineering, UNIST

요약 본 연구에서는 홍수 시 부유물의 충돌하중을 고려하여 교각의 홍수 취약도 곡선을 도출하였다. 자연재해에 의해 불가피하게 발생하는 사회기반시설물의 손상 또는 기능 손실은 심각한 인명피해 뿐만 아니라 국가적으로 사회적, 경제적 손실을 불러올 수 있다. 따라서 국가주요시설물을 재난으로부터 효과적으로 유지관리하기 위해 취약도 곡선은 중요한 도구로 사용되고 있다. 특히 한국은 산지 지형이 많이 형성되어 있고 하절기에 강수량의 2/3 이상이 집중되어, 홍수 피해 가능성이 매우 높다. 홍수 시 교각 파괴의 주원인으로는 부유물의 충돌과 하상세굴이 있는데, 부유물의 충돌은 여러 가지 불확실성으로 인하여 상대적으로 연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 FERUM-ABAQUS 기반의 취약도 해석 시스템을 도입하여, 홍수 시 부유물의 충돌에 대한 교각의 취약성을 평가하였다. 교각의 취약도 해석을 효과적으로 수행하기 위하여 한계상태함수, 손상도 지수, 확률변수, 유한요소모델, 취약도 해석 소프트웨어 시스템을 주로 고려하였으며, 가속도 및 변위 응답해석을 통하여 모델 상태를 확인하였다. 다음으로는 홍수 시 부유물 충돌에 발생 가능한 다양한 파라미터를 기반으로 교각의 취약도 곡선을 성공적으로 도출하였다.

Abstract This research developed a flood fragility curve of bridges considering the debris impacts. Damage and failures of civil infrastructure due to natural disasters can cause casualties as well as social and economic losses. Fragility analysis is an effective tool to help better understand the vulnerability of a structure to possible extreme events, such as earthquakes and floods. In particular, flood-induced failures of bridges are relatively common in Korea, because of the mountainous regions and summer concentrated rainfall. The main failure reasons during floods are reported to be debris impact and scour; however, research regarding debris impacts is considered challenging due to various uncertainties that affect the failure probability. This study introduces a fragility analysis methodology for evaluating the structural vulnerability due to debris impacts during floods. The proposed method describes how the essential components in fragility analysis are considered, including limit-state function, intensity measure of the debris impact, and finite element model. A numerical example of the proposed fragility analysis is presented using a bridge pier system under a debris impact.

Keywords : Bridge, Debris Impact, Fragility Analysis, Pier

1. 서론

자연재해에 의해 불가피하게 발생하는 사회기반시설

물의 손상 또는 기능 손실은 심각한 인명피해 뿐만 아니라 국가적으로 사회적, 경제적 파장을 불러올 수 있다. 따라서 국가 주요 시설물을 재난으로부터 효과적으로 유

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원 (15SCIP-B065985-03)에 의해 수행됨.

*Corresponding Author : Sung-Han Sim(UNIST)

Tel: +82-52-217-2816 email: ssm@unist.ac.kr

Received March 16, 2016

Revised (1st April 12, 2016, 2nd May 2, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

지관리하기 위한 목적으로 취약도 곡선(Fragility Curve)은 중요한 도구로 인식되고 있다.

취약도 해석(Fragility Analysis)의 대표적인 결과물인 취약도 곡선은 보통 재난의 강도를 나타내는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration), 풍속(Wind Velocity), 유속(Water Velocity)등의 손상도 지수에 대한 구조물의 파괴확률을 나타낸다. 해석적 방법은 파괴확률을 계산하는데 있어 가장 널리 사용되는데, 이는 사용된 기법에 따라서 해석적 기법과 시뮬레이션 기법으로 구분된다[1]. 해석적 기법은 재난 및 구조물과 관련된 주요 인자들로 표현된 수학적 함수를 이용하여 짧은 시간에 취약도 해석이 가능하지만, 각 불확실성 변수들의 범위를 가정하는데 있어 오차를 동반할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 반면 시뮬레이션 기법은 다수의 해석 결과를 통해서 파괴확률을 계산하는데, 신뢰할만한 결과를 얻기 위해서는 많은 시뮬레이션이 필요하다는 한계점을 가지고 있다.

현재까지의 취약도 해석은 여러 가지 자연재해 중 일반적으로 피해지역이 광범위하고 피해규모가 큰 지진에 대해서 많이 연구되어 왔다[2,3]. 하지만 미국에서 1989년도부터 2000년도까지 500여개 교량의 붕괴 원인을 조사한 결과, 지진으로 인한 교량 붕괴가 3.38%, 홍수, 세굴, 부유물 충돌 등의 수재해로 인한 교량 붕괴가 52.88%로 지진에 비해서 교량 파괴의 주된 원인임이 확인되었다[4]. 특히 한국은 산지 지형이 많이 형성되어있기에 이로 인한 하상경사가 크며, 하절기에 강수량의 2/3 이상이 집중되어 하상 불안정성에 의한 홍수 피해 가능성이 매우 높다[5]. 실제로 지난 10년간 홍수로 인한 국내 교량 피해는 연평균 100여건에 육박하며, 그 피해액은 연간 2천억 원에 달하고 있다[6].

홍수 시 교량 파괴의 원인은 대표적으로 하상경사에 의해 떠내려 온 부유물과 교각의 충돌로 인한 피해와, 빠른 유속으로 인하여 교각 하단부에 형성되는 와류로 인하여 발생하는 하상세굴로 구분된다. 하지만 부유물의 충돌 하중의 여러 가지 불확실성으로 인하여, 세굴에 의한 교량 피해만 중점적으로 연구되고 있다[7]. 특히 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS와 신뢰성해석 소프트웨어인 FERUM(Finite Element Reliability Using Matlab)을 이용하여 신뢰성해석을 수행하는 연구를 기반으로[8], 홍수 시 세굴에 대한 교량 구조물의 파괴확률을 도출하는 연구도 진행되었다[9]. 하지만 강원도 지역의 경우 교량 피해는 부유물의 충돌이 주된 원인이었다

데, 그 중에서도 통수공간이 좁은 소규모 교량의 경우에는 부유물 충돌에 매우 취약한 특성을 보였다. 따라서 홍수 시 부유물의 충돌에 의한 교량 안전성을 평가하고 피해를 최소화하기 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 홍수 시 부유물의 충돌에 의한 교량의 취약도 해석기법을 제안한다. 부유물의 충돌을 실제와 유사하게 고려하기 위하여 비선형성을 포함한 교량의 유한요소 모델을 제작하고, FERUM-ABAQUS기반의 취약도 해석 시스템을 적용하였다.

2. 신뢰성 해석 기법

본 연구에서는 교량의 3차원 유한요소 모델을 사용하므로 시뮬레이션 기법을 사용할 경우 해석시간이 많이 소요되므로 해석적 기법이 더 적합하다. 그 중 가장 널리 사용되는 FORM(First Order Reliability Method)을 선택하였으며, 본 장에서는 이에 대해 간략히 소개하고자 한다.

해석적 기법을 사용하여 구조물의 파괴확률을 계산하기 위해서는, 먼저 구조물 및 재난의 주요 인자를 수학적으로 표현한 한계상태함수(Limit State Function)의 정의가 필요하다. 정의된 한계상태함수를 기반으로 구조물의 파괴를 판단할 수 있는데, 이는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(v_1, v_2, \dots, v_n) = R - S \quad (1)$$

v_1, v_2, \dots, v_n 은 확률변수, R 과 S 는 각각 수용력(Capacity)과 수요량(Demand)을 나타낸다. 예를 들어, 과다응력에 의한 콘크리트 부재 파괴의 경우 수용력은 콘크리트의 강도, 수요량은 콘크리트 부재에 부하되는 응력을 나타낸다. 즉, 콘크리트에 부하되는 응력이 이를 수용할 수 있는 강도보다 높을 경우 파괴가 일어나게 된다. 일반적으로 구조물은 여러 가지 부재의 복잡한 연결로 구성되어 있기에, 부재와는 다르게 매우 작은 파괴확률 값을 가진다. 따라서 이에 대해 인지하기가 쉽지 않아 신뢰성 지수를 보편적으로 사용하고 있다. 신뢰성 지수는 구조물의 확률변수를 평균과 분산을 이용하여 무차원으로 표준화하고, 변환된 범위에서의 확률 값을 나타낼 수 있도록 정의된다. 이를 기반으로 다음과 같이 표준화

변수 Z_R 과 Z_S 를 정의할 수 있다.

$$Z_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}, Z_S = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad (2)$$

표준화 변수를 이용하여 앞서 표현한 수용력 및 수요량 R 과 S 를 다시 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \mu_R + Z_R \sigma_R, S = \mu_S + Z_S \sigma_S \quad (3)$$

표준화 변수로 표현된 수용력 및 수요량을 기반으로 한 한계상태함수는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$g(Z_R, Z_S) = (\mu_R - \mu_S) + Z_R \sigma_R - Z_S \sigma_S \quad (4)$$

따라서 $g(Z_R, Z_S) = 0$ 은 Fig.1와 같이 (Z_R, Z_S) 로 표현되는 이차원 공간에서 직선으로 나타나게 되고, 신뢰성지수인 β 를 R 과 S 의 평균과 표준편차를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있게 된다[10].

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (5)$$

만약 R 과 S 가 정규분포를 가지고 서로 상관되어 있지 않다면, 앞서 계산된 신뢰성지수를 이용하여 파괴확률을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f), P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

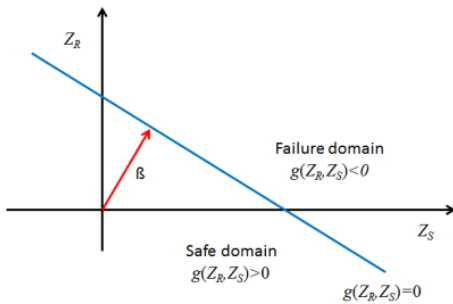


Fig. 1. Reliability analysis in standardization space

대표적인 신뢰성해석 소프트웨어인 FERUM에는 파괴확률을 계산하기 위한 여러 가지 방법들을 내재하고 있는데, 그 중에서 한계상태 함수를 선형으로 가정하는 FORM과 2차함수로 가정하는 SORM(Second Order Reliability Method)이 널리 사용된다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 FORM을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

3. 충돌에 의한 교량 취약도 해석

홍수 시 부유물의 충돌에 의한 교량 취약도 해석을 효과적으로 수행하기 위해, 본 연구에서는 한계상태함수, 손상도 지수, 확률변수, 유한요소 모델, 취약도 해석 소프트웨어 시스템을 주로 고려하였다. 홍수 시 부유물 충돌에 의한 교각 취약도 해석을 수행하기 위해, 먼저 부유물의 충돌에 의한 구조물의 파괴 기준이 필요하다. 구조물의 파괴를 판단할 한계상태함수는 [11]이 사용한 모델트 기반 함수로 정의하였다.

$$M_{rd} - M_E = 0 \quad (7)$$

M_{rd} 는 저항 휨 모멘트(Resistance Bending Moment), M_E 는 부유물의 충돌로 인하여 변화된 휨 모멘트(Bending Moment)를 나타낸다. 즉, 부유물의 충돌로 인하여 교각 하단부의 휨 모멘트가 증가하는데, 변화된 휨 모멘트가 저항 휨 모멘트에 도달하는 순간 파괴가 일어난다고 판단한다.

본 연구에서는 홍수 시 부유물 충돌에 발생 가능한 다양한 파라미터를 기반으로 취약도 해석을 수행하였다. 홍수 시 강수량 및 부유물의 종류에 의하여 충돌력이 변화되고, 이로 인한 교량의 파괴확률이 달라진다. 따라서 충돌해석에 사용되는 부유물은 강재(Steel), 주철(Cast Iron), 나무(Wood) 3가지를 사용하였고, 각각의 경우에 다양한 유속을 고려하였다. 사용된 부유물의 질량은 785kg, 685kg, 585kg 로서, 표준화된 값을 이용하였다. 또한 확률변수로는 콘크리트와 강재의 탄성계수 및 밀도가 고려되었으며, 이의 평균 및 표준편차 값은 Table 1에 도식하였다.

Table 1. Mean and standard deviation of random variables

Random variable	Mean	Standard deviation
Concrete elastic modulus (GPa)	19	5%
Concrete density (kg/m ³)	2400	9%
Steel elastic modulus (GPa)	200	4%
Steel density (kg/m ³)	7850	1%

홍수 시 교각에 부유물이 충돌할 경우, 교각의 상태나 부유물의 특성에 따라서 교각의 일부가 파괴되는 현상이 발생되기도 한다. 본 연구에서는 보다 현실적인 부유물 충돌에 의한 교각의 응답 해석을 위하여 콘크리트 압축 손상(Compression Damage)을 비선형으로 고려하였다 [12]. 유한요소 해석 중 특정 요소가 손상될 경우, 해당 요소를 제외하고 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 구조물의 취약성을 효과적으로 분석하기 위하여 University of California, Berkeley에서 개발된 확률기반 신뢰성해석 소프트웨어인 FERUM 과 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS를 연동하여 취약도 해석을 수행하는 시스템을 사용하였다[9]. 시스템의 작동 흐름도는 Fig. 2에 도식하였다. FERUM-ABAQUS 기반의 취약도 해석 시스템은 Python-based Interface로 제작되었으며, FERUM과 ABAQUS의 연결을 통해 서로의 입출력을 자동으로 반영하여 파괴확률을 계산할 수 있도록 설계 되어있다. 즉, FERUM의 신뢰성 해석을 수행하면서 확률변수들의 입력 값이 정해지고, 이는 ABAQUS 상에서 제작된 유한요소모델에 반영되어 응답해석을 수행한다. 그 후 응답해석 결과를 ABAQUS에서 FERUM으로 다시 전송하는 과정을 반복하여 손상도 지수에 대한 구조물의 파괴확률을 계산하게 된다.

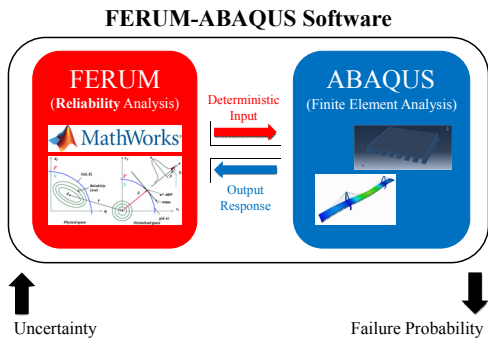


Fig. 2. FERUM-ABAQUS system

4. 수치해석 및 해석결과

홍수 시 부유물의 충돌에 의한 교량의 취약도 해석을 위해 유한요소 모델의 수치해석을 수행하였다. 사용된 교각 구조물과 이에 충격하중을 가할 부유물은 Fig. 3에 도식하였다. 해석에 사용된 교량은 대구광역시에 위치한 000 교량의 설계도면을 참고하였으며, 교량 전체의 유한요소 모델을 파괴확률 산정에 이용할 경우 신뢰성 해석에 과도하게 시간이 소요되므로 부유물 충돌 시 교량 파괴모드에 가장 큰 영향을 미치는 교각을 선정하여 상세 모델링하였다.

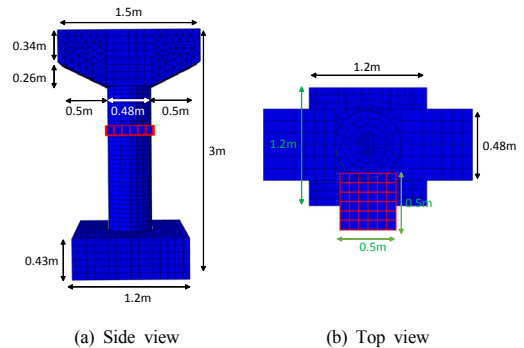


Fig. 3. Finite element model of bridge pier and debris

본 해석에서는 부유물의 충격에 의한 교각 구조물의 응답 해석이 주된 목적이기에, 부유물의 형태는 기본적인 정사각형 모양으로 설계하였다. 교량 상판은 교각과 면진받침으로 연결되어 있는데 상판의 단면형상에 의해 횡방향 강성이 교각에 비해 크다가 가정할 수 있으므로, 교량 상판은 질량만을 갖는 강체로 모델링하였다. 콘크리트 안에 배근된 철근은 실제 철근콘크리트의 거동과 유사하게 모델링하기 위하여 내장요소(Embedded Element)를 사용하였고, 각 부재의 연결부위는 타이접합(Tie Constraints)을 이용하여 실제 구조물처럼 접합된 것처럼 모델링하였다. 또한 부유물의 충돌에 의한 교각의 효과적인 응답해석을 위하여, 충돌이 발생할 위치는 유한요소모델 상에서 메쉬(Mesh)를 작게 모델링하여 정확한 응답을 추정할 수 있도록 하였다.

현실적인 충돌 해석을 수행하기 위하여 앞서 언급한 콘크리트의 비선형 손상모델을 이용하였다(Fig. 4). 이는 해석에 사용된 유한요소 모델에 반영되어 부유물 충돌 시 실제와 비슷한 응답 결과를 측정하는 것이 가능하게 한다.

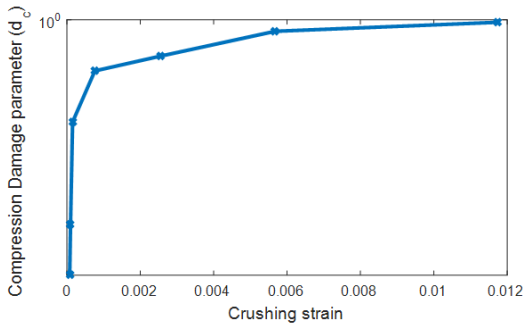


Fig. 4. Concrete compression damage parameter

교각의 취약도 해석을 수행하기 전에, 앞서 유한요소 모델에 반영하였던 콘크리트 비선형성 손상 및 모델 상태 확인을 위하여 가속도와 변위응답해석을 하였다. 응답해석의 측정 위치는 Fig. 5에 도식한 바와 같이 교각의 부유물 충돌 지점으로 지정하였다. 부유물의 충돌지점은 교각 높이의 절반에 해당되는 1.5m 높이로 현실적인 수위로 인하여 부유물이 충돌하도록 설계하였다. 부유물의 충돌로 인한 가속도 응답은 Fig. 6에 변위 응답은 Fig. 7에 각각 도식하였다.

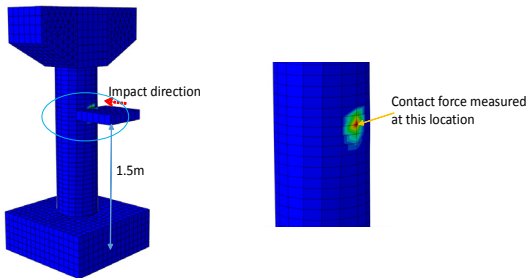


Fig. 5. Simulation setup for debris impact

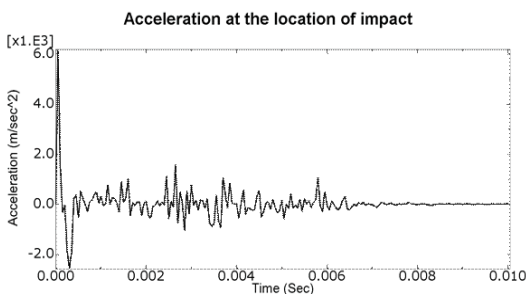


Fig. 6. Acceleration response

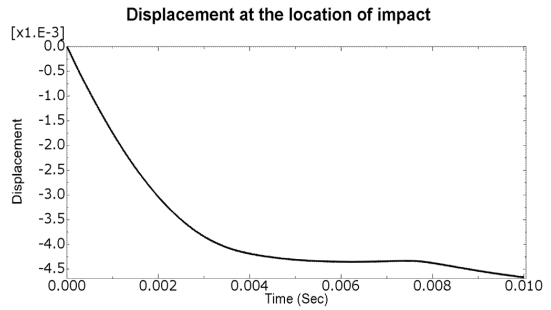


Fig. 7. Displacement response

가속도 응답을 통해서 부유물의 충돌이 일어난 바로 직후에 최대 가속도 값을 확인하였고, 변위 응답을 통해서 충돌이 일어난 후 콘크리트의 비선형성으로 인하여 일정한 변위가 발생함을 확인하였다. 또한 부유물 충돌 후 교각의 충돌지점을 구성하고 있는 요소들이 파괴되었음을 Fig. 8를 통하여 확인하였다. 이를 통해서 앞서 고려하였던 콘크리트의 비선형성 및 모델 특성이 효과적으로 적용되었음을 확인하였다.

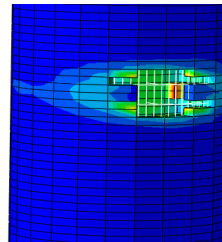


Fig. 8. Damage of finite elements after debris impact

부유물의 충돌에 의한 교각의 취약도 해석을 위하여, 충돌이 발생한 후에 교각 하단부에서의 휨 모멘트를 측정하여 교각의 파괴확률을 계산하였다. 파괴확률을 계산할 때 손상도 지수로는 부유물의 질량과 속도를 고려하였으며, 취약도 해석의 결과로 도출된 취약도 곡선은 Fig. 9에 도식화하였다. 취약도 곡선을 통해서 부유물의 질량이 증가할수록 교각의 파괴확률이 높아진다는 것을 확인하였다. 즉, 동일한 속도의 부유물에 대해서 이의 질량이 증가할수록 교각의 파괴확률이 높아진다. 또한 부유물의 속도가 높아질수록 구조물의 파괴확률이 높아진다는 해석결과를 확인하였다. 해석 결과를 바탕으로 교각의 홍수 시 부유물 충돌에 의한 취약도를 성공적으로 평가하였고, 부유물의 충돌을 방지할 수 있는 대책이 필요함을 확인할 수 있었다.

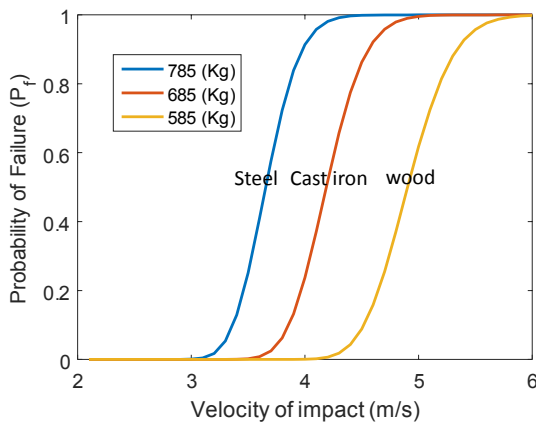


Fig. 9. Fragility curve of bridge pier

5. 결론

본 연구에서는 홍수 시 부유물의 충돌에 의한 현실적인 취약도 해석 수행을 위하여 한계상태함수, 손상도 지수, 확률변수, 유한요소 모델을 주로 고려하고, Python 기반 인터페이스로 FERUM-ABAQUS를 연동하여 취약도 곡선을 성공적으로 도출하였다. 취약도 해석 결과를 통해서 부유물의 속도 및 질량 증가가 교량 구조물의 파괴확률과 높은 관련성을 가지고 있다는 것을 확인하였다. 본 연구를 기반으로 대표적인 사회기반시설물인 교량의 홍수 시 안전성을 평가하고, 이에 대한 효과적인 유지점검 및 관리가 가능할 것으로 기대한다.

References

[1] Y.-J. Lee, D. S. Moon, "A new methodology of the development of seismic fragility curves," *Smart Structures and Systems*, 14(5), pp. 847-867, November, 2014.

[2] D. H. Lee, H. G. Hong, Y. S. Chung, "Seismic Performance based Fragility Analysis of Bridge Structure in terms of Soil Conditions," *Korea Concrete Institute*, pp. 73-76, May, 2008.

[3] J. M. Jeon, J. K. Shin, J. Y. Shim, D. H. Lee, "Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridge Piers According to Damage State," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 1695-1705, December, 2014.

[4] K. Wardhana, F. C. Hadipriono, "Analysis of Recent Bridge Failures in the United States," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17(3), pp.

144-150, August, 2003.

[5] U. G. Yeo, J. G. Gang, "Field Investigation of Bridge Scours in Small and Medium Streams (1)," *Journal of Korea Water Resources Association*, 32(1), pp. 41-47, February, 1999.

[6] K. S. Kwak, J. H. Park, M. K. Chung, H. S. Woo, "Bridge Scour Prioritization and Management System (1) -System Development-," *Korean Society of Civil Engineers*, 26(2), pp. 187-195, March, 2006.

[7] G. G. Prasad, S. Banerjee, "The Impact of Flood-Induced Scour on Seismic Fragility Characteristics of Bridges," *Journal of Earthquake Engineering*, 17(6), pp. 803-828, January, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2013.771593>

[8] Y.-J. Lee, J. Song, "Finite-element-based system reliability analysis of fatigue-induced sequential failures," *Reliability Engineering & System Safety*, 108, pp. 131-141, December, 2012.

[9] J. Lee, Y.-J. Lee, H. Kim, S.-H. Sim, J. M. Kim, "A new methodology development for flood fragility curve derivation considering structural deterioration for bridges," *Smart Structures and Systems*, 17(1), pp. 149-165, December, 2015.

[10] A. M. Hasofer, N. C. Lind, "Exact and invariant second-moment code format," *Journal of the Engineering Mechanics division*, 100(1), pp. 111-121, 1974.

[11] D. Mestrovic, D. Cizmar, L. Miculinic, "Reliability of concrete columns under vehicle impact," *In Tenth International Conference on Structures Under Shock and Impact*, pp. 157-165, May, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.2495/SU080161>

[12] T. Jankowiak, T. Lodygowski, "Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model," *Foundations of civil and environmental engineering*, 6(1), pp. 53-69, June, 2005.

김 현 준(Hyunjun Kim)

[준회원]



- 2016년 2월 : UNIST 도시환경공학부 (토목공학 석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : UNIST 도시환경공학부 박사과정

<관심분야>

구조동역학, 구조물 건전성 모니터링, 취약도해석

심 성 한(Sung-Han Sim)

[정회원]



- 2002년 2월 : KAIST 건설및환경 공학과 (토목공학 석사)
- 2011년 5월 : Univ. of Illinois 토 목환경공학과 (토목공학 박사)
- 2011년 7월 ~ 2015년 8월 : UNIST 도시환경공학부 조교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : UNIST UNIST 도시환경공학부 부교수

<관심분야>

구조동역학, 구조물 건전성 모니터링, 스마트 센서, 취약도 해석