

선박에 의한 해상교량의 충돌취약도 해석 Collision Fragility Analysis of Offshore Bridge by Ship

조병일* · 김동현** · 오영민***
Byung Il Cho*, Dong Hyawn Kim** and Young Min Oh***

요 지 : 선박에 의한 해상교량의 충돌취약도 해석을 수행하였다. 확률변수를 충돌속도와 충돌각으로 하였으며 18,000DWT와 30,000DWT 설계선박에 대해 충돌해석을 수행하였다. 음함수 형태의 변위를 한계상태함수에 적용하기 위해 응답면 기법을 사용하여 충돌응답면을 구성하고 충돌속도를 2 m/s~7 m/s까지 총 6개 CASE에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석으로 계산한 파괴확률을 이용하여 충돌취약도 곡선을 표현하고 충돌속도에 대한 중간값과 대수표준편차를 계산하여 해상교량의 위험도를 나타내었다.

핵심용어 : 해상교량, 선박충돌, 응답면 기법, 신뢰성, 취약도, 위험도

Abstract : Collision fragility analysis of offshore bridge by ship was performed. Collision velocity and angle were chosen as random variables then collision of 18,000DWT and 30,000DWT ships with bridge was analyzed. Displacement response surface of bridge by ship collision was estimated by varying ship velocity from 2 m/s to 7 m/s. Using the result of reliability analysis, fragility curves of collision was established and risk of offshore bridge to collision velocity as median and log-standard deviation was presented.

Keywords : offshore bridge, ship collision, response surface method, reliability, fragility, risk

1. 서 론

해상교량과 해상교량을 통행하는 선박의 충돌사고는 해상교량과 선박의 손상에 의한 사회기반시설의 피해뿐만 아니라 선박에 적재된 화물의 도착지연으로 인한 피해 그리고 해상교량을 지나는 자동차와 자동차에 탑승한 사람들의 인명피해 등 수많은 피해를 발생시킨다.

AASHTO(2007)에서는 선박의 충돌사고에 대한 해상교량의 안정성을 확보하기 위해 해상교량에 대해 결정론적 평가기준 뿐만 아니라 확률론적으로 교량의 위험도를 평가할 수 있도록 기준을 제시하였다. 해상교량의 선박충돌 위험도 평가는 통항선박과의 충돌로 인한 해상교량의 안정성을 확률론적으로 평가하는 방법으로 IABSE(1993), Modjeski & Masters(1984), Prucz·W. B. Conway(1987), Larsen(1993)의 연구를 통해 선박충돌이 발생하는 교량의 부재의 위치에서 연간파괴빈도를 계산한 바 있다.

본 연구에서는 AASHTO의 확률이론에 근거한 해상교량의 충돌취약도에 대한 평가를 신뢰성 해석 LEVEL II 기법으로 해상교량의 파괴확률을 계산하고 통항선박에 대한 충돌취약도

를 확인하여 해상교량의 충돌취약도를 평가하였다.

2. 충돌 위험도 평가

2.1 응답면 기법

구조물에서 나타나는 응력, 변위등과 같은 특성은 구조적 또는 구조물을 구성하는 재료의 특성에 의해 나타나는 결과이다. 이러한 explicit한 특성의 변동성을 고려하기 위해 포화설계법(saturated design)으로 응답면을 구성하였다(Haldar & Mahadevan, 2000; Huh, 1999). 포화설계법에서 응답면을 구성하기 위해 필요한 구조해석을 Fig. 1에 표시한 위치(Design Points)에서 수행한다.

그림의 각 위치를 수식으로 표현하면 다음과 같다,

$$X_i = X_{iC} \pm h_i \sigma_{X_i} I_i \quad (1)$$

여기서, i 는 확률변수의 번호, X 는 응답면에서의 구조해석점, X_{iC} 는 중심점이고, h_i 는 응답면 확장계수, σ 는 확률변수의 표준편차, I_i 는 코드화된 변수이다. 응답면의 확장계수 h_i 는 비

*군산대학교 해양산업공학과(Dept. of Ocean Science & Engineering, Kunsan National Univ.)

**군산대학교 해양건설공학과(Corresponding Author: Dong Hyawn Kim, Dept of Coastal Construction Eng., Kunsan National Univ., Miryong, Kunsan, Jeonbuk 573-701, Korea, welcomed@naver.com)

***한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI)

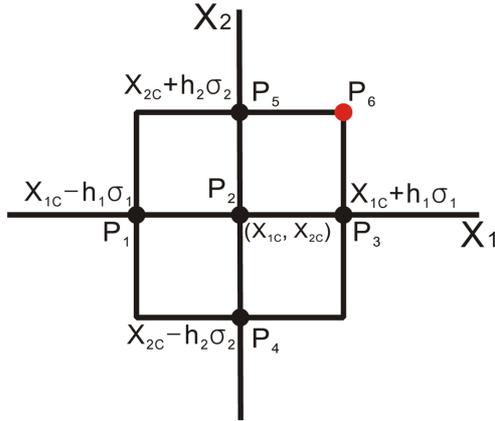


Fig. 1. Design points of RSM.

Table 1. Coded variable of design points

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
I_1	-1	0	1	0	0	1
I_2	0	0	0	-1	1	1

선형성이 클수록 작은 값을 사용하고 선형성이 클수록 큰 값을 사용하며 대략 1.0내외의 값을 사용해도 무방하다(Huh, 1999; Rajashekhar & Ellingwood; 1993). 코드화된 변수는 구조해석점의 위치를 결정하는 것으로 두 개의 확률변수를 사용할 경우 Table 1과 같이 총 6개의 구조해석점에 대한 값을 사용한다.

일반적으로 설계변수의 개수가 k 일 때 구조해석점의 총 수 (p)는 다음과 같다.

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (2)$$

구조해석점에서 구한 p 개의 응답을 이용하여 n 개의 확률변수를 가진 응답면을 추정하고자 할 때 2차의 근사다항식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i x_i + \sum_{i=1}^n c_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

여기서 c_0, c_i, c_{ii}, c_{ij} 는 각각 응답면 함수의 계수이다.

2.2 신뢰성 평가

신뢰성 해석은 LEVEL II 기법 중에서도 파괴점 부근에서 일차근사를 이용하여 신뢰도지수를 결정하는 일계신뢰도법(Hasofer and Lind, 1974)을 사용하였다. 신뢰성 해석을 위한 한계상태 함수는 식 (4)와 같다.

$$g(X) = R - S \quad (4)$$

여기서, R 은 저항함수, S 는 하중함수이다. 한계상태함수가 음의 영역인 경우 즉, $g(X) \leq 0$ 인 상태를 파괴로 정의한다.

AFOSM방법을 사용하기 위해서는 다음 식 (5)와 같이 확률변수를 평균이 0, 표준편차가 1인 표준정규분포 확률변수로 정

규화 하는 방법을 사용한다.

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

위와 같이 정규화된 각 확률변수는 평균이 좌표의 원점으로 통일되게 변환되므로 파괴확률의 산정이 용이해진다. 변환된 좌표공간 상에서 원점과 한계상태 즉, $g(X) = 0$ 인 면까지의 최단거리는 신뢰도 지수와 같으며 파괴점과 다음의 관계에 있다.

$$x_i^* = -\alpha_i \beta \quad (6)$$

여기서 α_i 는 확률변수의 민감도계수로 식 (7)과 같다.

$$\alpha_i = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_{x^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)_{x^*}^2}} \quad (7)$$

민감도계수를 구하기 위해서는 파괴점을 사전에 알고 있어야 하나 초기에는 평균값에서 민감도계수를 구하고 신뢰도지수를 반복계산하면 매우 빠르게 수렴된 신뢰도지수를 구할 수 있다.

2.3 충돌취약도

취약도(fragility)는 임의의 하중에 대해서 구조시스템에 정의한 손상수준 이상의 손상이 발생할 확률을 나타내는 도표로 임의의 하중과 구조시스템의 관계를 확인할 수 있다. 이러한 임의의 하중에 대한 조건부 확률을 계산하기 위해 취약도는 손상발생 유무를 통계자료나 구조해석을 통해 계산한다. Shinozuka 등(2002)은 취약도 곡선을 식 (8)과 같이 대수정규분포함수의 누적확률의 형태로 나타내어 표현하였다.

$$F_k(v) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{v}{c_k} \right)}{\zeta_k} \right] \quad (8)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적확률분포함수이며 v 는 선박의 충돌속도, c_k 와 ζ_k 는 각각 $F_k(v)$ 에 대한 누적확률분포의 중간값과 대수표준편차이다.

하지만 본 연구에서는 확률변수의 변동성을 고려한 신뢰성 해석으로 파괴확률을 직접 계산하기 때문에 취약도 계산을 위해 충돌속도에 대한 초과확률을 중복하여 추정할 필요가 없다. 따라서 신뢰성 해석으로 구한 총 k 개의 파괴확률 $P_{f_k}(v)$ 를 식 (9)식에 적용하여 파괴확률과의 오차가 최소가 되는 최적화 방법을 사용함으로써 해상교량의 충돌취약도를 추정할 수 있다(김 등, 2009).

$$\min \sum_{i=1}^n \left[\Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{v}{c_k} \right)}{\zeta_k} \right] - P_{f_k}(v_i) \right]^2 \quad (9)$$

3. 수치예제

3.1 충돌모델

충돌과 같은 짧은 시간에 발생하는 문제를 해석하기 위해 explicit method를 사용하는 ANSYS/LS-DYNA로 충돌해석을 수행하였다. 해상교량은 충돌이 발생하는 교각과 상판, 케이블을 Solid 164번 요소와 beam 161번 요소, link 167번 요소를 사용하여 10,419개의 요소로 모델링하였다. 또한 설계선박은 Shell 163번을 사용하여 충돌이 발생하는 선수부를 유한요소로 그 이후부터 선미부까지를 강체 요소를 사용하여 18,000DWT 설계선박과 30,000DWT 설계선박은 각각 882개, 1260개의 요소로 모델링 하였다.

해상교량은 평균수심이 23 m인 구조물로 가정하였으며 기초의 바닥 가장자리 4곳을 완전 고정하여 회전과 이동을 제한하였다. 그리고 상판과 케이블을 rigid link 요소로 연결하여 충돌의 영향을 표현하기 위해 회전과 이동이 자유롭도록 설정하였다. 설계선박은 만선으로 가정하여 각 선박에 18,000ton과 30,000ton의 부가질량을 부가하였고 충돌 시 발생하는 충돌력은 선박에 의한 영향이 지배적이므로 본 연구에서는 유체의 영향을 고려하지 않았다. 충돌모델의 제원과 물성치는 Table 2~3과 같고 설계선박과 해상교량을 모델링하여 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2. Geometry of the ships

DWT	Length	Width	Depth	Fully Draft
18,000	161 m	23.6 m	12.5 m	9.6 m
30,000	185 m	27.5 m	16.0 m	11.0 m

Table 3. Material property of the models

Material property	Offshore bridge	Designed ship	Girder	Cable
Elastic modulus (kgf/m^2)	2.92E+9	2.1E+10	2.1E+10	2.0E+10
Density (kgf/m^3)	2500	7850	9813	8635
Poisson's ratio	0.17	0.3	0.3	0.3

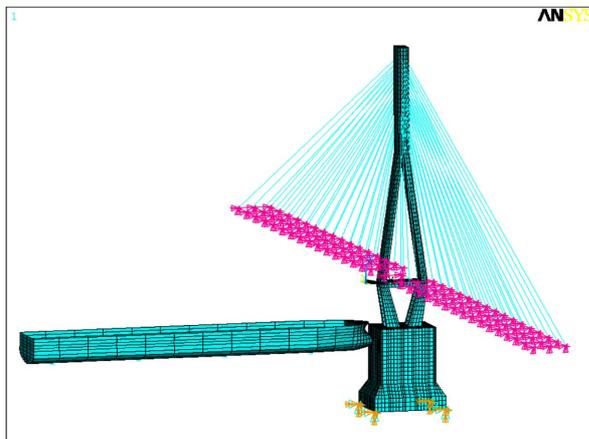
3.2 충돌해석 결과

충돌에 의해 해상교량의 상판에서 나타나는 변위를 확인하기 위해 충돌해석에 사용한 확률변수를 충돌속도(v)와 충돌각(θ)으로 정의하였으며 확률변수는 표준정규분포를 따른다고 가정하였다. 통계자료에 의한 두 확률변수의 변동성을 고려하여야 하지만 실제 충돌속도에 대한 자료가 부족한 상황에서 충돌속도(v)의 표준편차를 각각 1 m/s로 설정하여 2 m/s~7 m/s까지 각 CASE에서 해상교량의 거동을 확인하였다. 그리고 설계선박과 해상교량이 직각으로 충돌할 경우($\theta=0^\circ$), 파괴위험이 가장 클 것으로 판단되어 충돌각의 평균과 표준편차를 정의하였다.

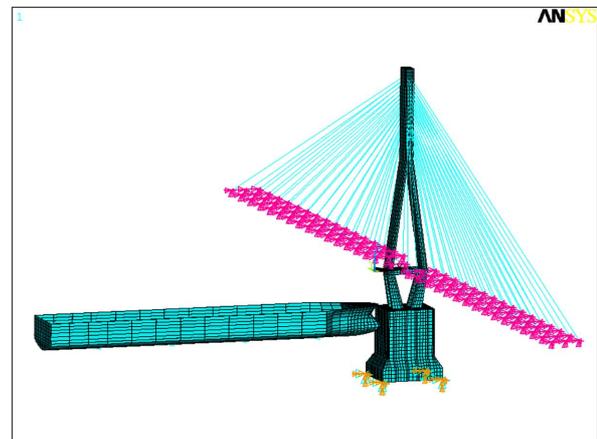
Table 4는 각 CASE의 충돌속도와 충돌각의 평균과 표준편차를 나타낸다. 접촉 시 발생하는 마찰력을 고려하기 위해 마찰계수를 0.3으로 정의하고 상판에 나타나는 변위를 6초까지 해석하여 확인하였다. Fig. 3은 CASE I에서 해석한 결과의 충돌속도로 충돌 시 거더에서 발생하는 최대변위를 나타낸 그림으로 18,000DWT 설계선박의 경우 거더 부근이 아닌 교각 상부에서 최대변위가 발생하였으며 30,000DWT 설계선박은 거더 부근에서 최대변위가 발생하는 것을 확인하였다.

Table 4. Distribution of random variables

CASE	Collision velocity (m/s)	Collision angle ($^\circ$)
I	N(2, 1)	N(0, 15)
II	N(3, 1)	N(0, 15)
III	N(4, 1)	N(0, 15)
IV	N(5, 1)	N(0, 15)
V	N(6, 1)	N(0, 15)
VI	N(7, 1)	N(0, 15)



(a) 18,000DWT



(b) 30,000DWT

Fig. 2. FEM model of offshore bridge with ships.

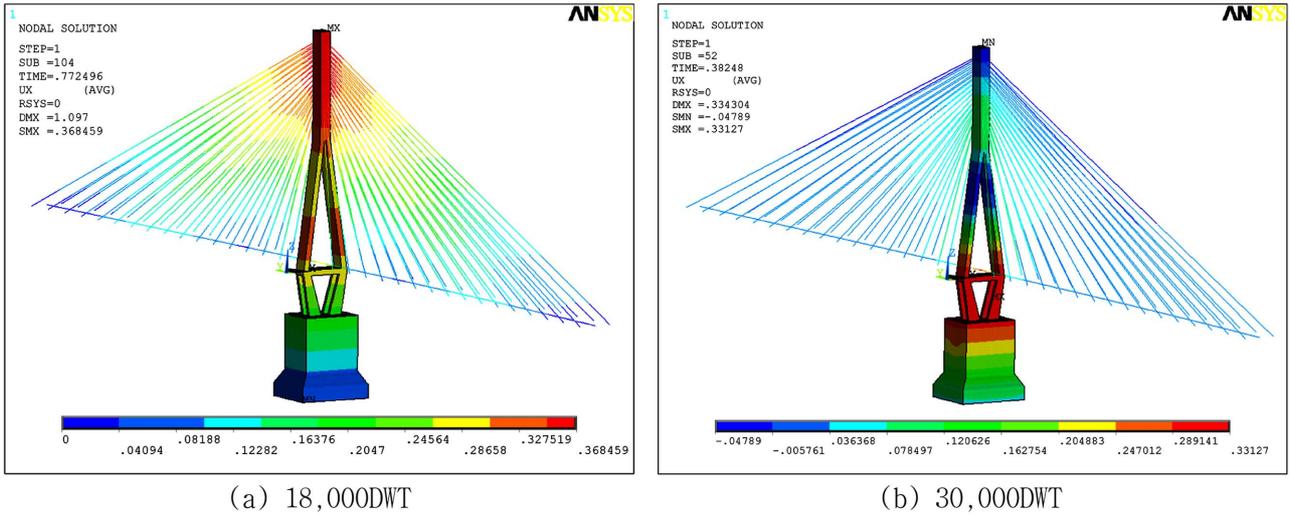


Fig. 3. Max displacement - CASE I.

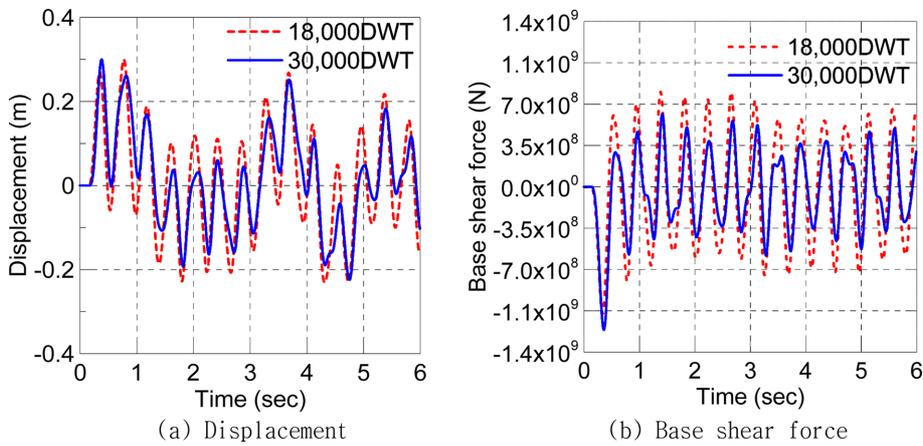


Fig. 4. Dynamic response of bridge (collision velocity: 2 m/s).

Fig. 4는 CASE I의 평균과 표준편차를 갖는 예제에서 파괴점(충돌속도, 충돌각)의 정보를 적용하여 구한 해상교량 상판의 변위와 선박충돌에 의해 나타나는 밀면 전단력이다. 밀면 전단력은 케이스 기초 바닥의 구속된 4곳의 충돌진행방향의 지점반력을 합하여 구하였다. 변위와 밀면 전단력이 0으로 나타나는 구간은 두 구조물간에 접촉이 되지 않아 충돌이 발생하지 않은 것을 의미한다. 18,000DWT 설계선박의 변위와 밀면 전단력은 약 0.8초와 약 0.4초 정도에서 최대변위와 최대 밀면 전단력이 발생하고 30,000DWT 설계선박의 변위와 밀면 전단력은 약 0.4초, 약 0.3초 정도에서 나타났다. 최대변위와 최대 밀면 전단력의 비교에서는 30,000DWT 선박의 경우가 18,000DWT 선박보다 크게 나타나지만 약 0.5초 이후의 변위와 밀면 전단력은 18,000DWT 선박에서 더 커진 경향이 나타났다. 2 m/s의 충돌속도에서 각 설계선박에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 수립한 결과가 18,000DWT에서는 충돌속도가 4.70 m/s이고 30,000DWT에서는 4.11 m/s로 나타나 18,000DWT 설계선박에 의한 충돌속도가 더 크다. 하지만 설계선박이 30,000DWT보다 작기 때문에 충돌 시 나타나는 변위와 밀면

전단력은 충돌속도와 설계선박의 중량과 관련이 있을 것으로 사료된다.

3.3 신뢰성 해석

충돌해석으로 구한 결과를 이용하여 한계상태를 정의하기 위해 응답면을 정의하여야 한다. 응답면의 함수는 2차의 근사함수로 가정하여 충돌해석에서 구한 결과를 선박충돌에 의해 나타나는 교량의 상판변위가 충돌방향(x축)으로 0.3 m의 허용변위를 초과할 경우 파괴되는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 사용한 한계상태함수는 다음의 식 (10)으로 정의하였다.

$$g(v, \theta) = D_{all} - D_{max} = 0.3 - (c_0 + c_1v + c_2\theta + c_{11}v^2 + c_{22}\theta^2 + c_{12}v\theta) \quad (10)$$

$g(v, \theta)$ 는 충돌속도(v)와 충돌각(θ)의 함수로 표현된 한계상태함수이고 D_{all} 은 상판의 허용변위, D_{max} 는 선박충돌에 의해 나타나는 상판의 충돌진행방향에 대한 최대변위이고 $c_0, c_1, c_2, c_{11}, c_{22}, c_{12}$ 는 응답면 계수이다.

일계신뢰도법을 통하여 구한 확률변수, 충돌속도(v)와 충돌

Table 5. Sensitivity of random variables

CASE	Collision velocity	18,000DWT		30,000DWT	
		α_v	α_θ	α_v	α_θ
I	2 m/s	-9.999675E-1	8.062123E-3	-9.987044E-1	-5.088809E-2
II	3 m/s	-9.998684E-1	-1.622425E-2	-9.999995E-1	-1.024746E-3
III	4 m/s	-9.999997E-1	-8.323226E-4	-9.999992E-1	1.278682E-3
IV	5 m/s	-9.999998E-1	-6.541420E-4	-9.999400E-1	-1.095346E-2
V	6 m/s	-9.999996E-1	-9.457213E-4	-9.998524E-1	1.718288E-2
VI	7 m/s	-9.999998E-1	-6.418032E-4	-4.656039E-1	8.849932E-1

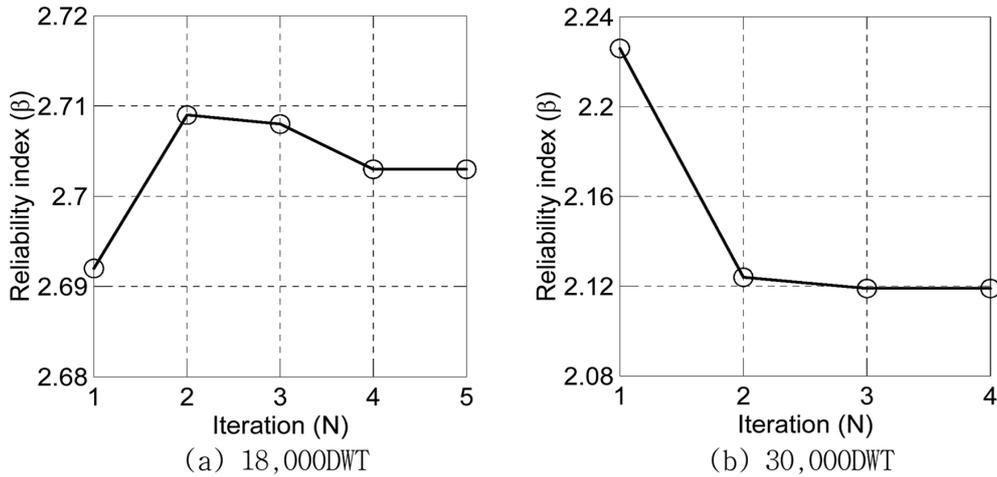


Fig. 5. Reliability index at mean velocity of 2 m/s.

각(θ)에 따른 민감도 계수를 Table 5에 나타내었다. 민감도 계수는 음의 값을 가질 때 하중에 영향을 미치는 설계변수이고 양의 부호는 저항에 영향을 미치는 설계변수를 의미한다. 충돌속도의 경우 음의 값을 가지므로 하중에 영향을 주는 설계변수임을 확인할 수 있다. 또한 7 m/s의 30,000DWT 선박에 대한 민감도계수가 다른 경향을 보이므로 동일한 설계선박을 이용하여 충돌속도가 8 m/s일 때의 민감도와 신뢰도 지수를 계산하여 7 m/s일 때의 결과와 비교하였다. 8 m/s일 때의 민감도 계수 α_v , α_θ 는 각각 -2.864824E-1, 9.580854E-1로 나타났으며 신뢰도 지수는 -2.9206로 나타났다. 7 m/s일 때의 30,000DWT 선박에 대한 결과와 비교했을 때 충돌속도의 영향은 감소하고 충돌각의 영향이 커지는 것을 확인하였다.

Fig. 5는 CASE I의 충돌속도와 충돌각에 대한 6개의 설계점 위치에서의 충돌해석으로 얻은 결과를 이용하여 한계상태 함수를 정의하고 수렴할 때까지 얻은 신뢰도 지수의 수렴곡선이다. 4~5번의 반복으로 신뢰도 지수가 수렴하였으며 Table 6에 CASE별로 수렴한 신뢰도 지수와 파괴확률을 나타내었다.

Table 6. Results of reliability analysis

CASE	Collision velocity	18,000DWT		30,000DWT	
		β	P_f	β	P_f
I	2 m/s	2.7030	0.0034	2.1190	0.0171
II	3 m/s	1.7040	0.0442	1.1170	0.1320
III	4 m/s	0.7010	0.2415	0.1170	0.4534
IV	5 m/s	-0.2983	0.6173	-0.8828	0.8113
V	6 m/s	-1.2983	0.9029	-1.8829	0.9701
VI	7 m/s	-2.2985	0.9892	-2.4928	0.9937

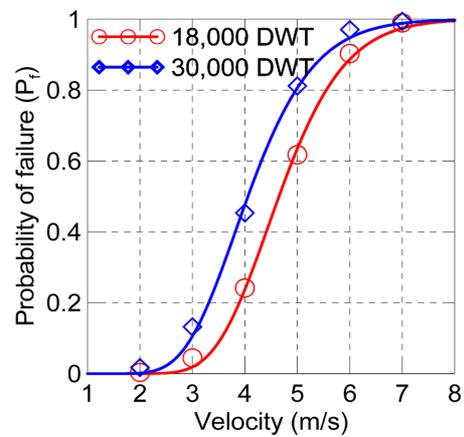


Fig. 6. Fragility curve of offshore bridge.

3.4 충돌취약도 분석

해상교량의 파괴확률을 이용하여 각 선박의 충돌속도에 대한 충돌취약도를 추정하였다. Fig. 6은 파괴확률로 추정한 취약도 곡선을 보여주고 있으며 각 선박의 충돌속도에 대해 3 m/s에서 5 m/s까지의 구간을 살펴보면 파괴확률이 다른 구간에 비해 기울기가 증가함을 알 수 있으며 편차가 작아서 충돌속도에 민감함을 알 수 있다. 그리고 6 m/s 이상의 충돌속도에 대해서는 계산된 파괴확률이 90% 초과하는 것을 추정할 수 있다. Table 7은 충돌취약도 곡선의 중앙값과 대수표준편차로 파괴확률이 50%일 때의 충돌속도를 나타낸다.

해상교량의 충돌위험도를 감소시키는 방안에는 충돌이 예상되는 교각을 외부하중에 견딜 수 있도록 설계 시 고려하는 방

Table 7. Median and Log-standard deviation of fragility curve

Designed ships	Median	Log-standard deviation
18,000DWT	4.6504 m/s	0.2108 m/s
30,000DWT	4.0585 m/s	0.2417 m/s

법과 통항위치 주변에 충돌방지공을 설치하는 방법이 있다. 이러한 방법들은 선박과의 충돌을 방지하기 위해 해상교량 건설 시, 건설비용의 증가를 가져오기 때문에 건설비용을 증가시키지 않고도 해상교량의 안정성을 효율적으로 높이는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 해상교량의 안정성을 효율적으로 평가하기 위해 신뢰성 해석으로 계산한 파괴확률로 충돌취약도 곡선을 추정하고, 충돌취약도로 선박이 통항속도를 제어하여 해상교량과의 충돌 시 충돌위치에 있는 교각의 충돌위험을 낮추는 것이다. 예를 들어, 해상교량의 충돌에 의한 파괴확률이 10%라고 가정했을 때 몇 개의 대표적인 설계선박의 충돌취약도 곡선을 추정하고 그 결과를 가지고 10% 이하가 되는 파괴확률의 충돌속도를 제시하는 방법이다. 따라서 Fig. 6의 취약도 곡선으로 확인해 보면 18,000DWT와 30,000DWT 설계선박에 대한 해상교량의 파괴확률이 10%가 되는 충돌속도는 각 설계선박에 대해 약 3.5 m/s, 약 3 m/s가 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 해상교량과 선박의 충돌로 인한 교량의 취약도를 신뢰성 해석기법에 의하여 추정하였다. 선박충돌로 인한 교량의 동적응답은 충돌속도 및 충돌 각도 등의 음함수로 표현되므로 이를 양함수로 변화하기 위하여 응답면 기법을 이용하였다. 수치해석 결과 선박 크기별 취약도 곡선을 구하였으며 이를 이용하여 통항선박의 속도를 제어할 수 있는 근거를 제공하였다.

본 연구에서 2개의 확률변수를 사용하여 확률론적 신뢰성 해석을 수행하였지만 향후 해상교량의 재료물성치에 대한 확률변수도 확률론적 신뢰성 해석에 추가하여 위험도 평가가 이루어질 경우 보다 정확한 평가가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 군산대학교 교수장기국외연수경비의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

김동현, 이일근, 조병완 (2009). 고속도로 시설물의 풍하중 위험도 해석. 한국강구조학회 논문집, 21(6), 553-561.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2007). AASHTO LFRD Bridges Design Specifications SI Units, 4th Edition.

Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). Probability concepts in engineering planning and design. Vol I & II. John Wiley & Sons, Inc.

Haldar, A. and Mahadevan, S. (2000). Reliability assessment using stochastic finite element analysis. JOHN WILEY & SONS, INC.

Hasofer, A.M. and Lind, N.C. (1974). Exact and invariant second moment code format. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 100(1), 111-121.

Huh, J.W. (1999). Dynamic reliability analysis for nonlinear structures using stochastic finite element method, Doctor's thesis, Department of Civil Engineering & Engineering Mechanics, The University of Arizona.

International Association of Bridge and Structural Engineers. (1993). Ship collision with bridges and offshore structures. In International Association of Bridge and Structural Engineers Colloquium. 3 vols. Copenhagen, Denmark.

Larsen, O.D. (1993). Ship collision with bridges-The interaction between vessel traffic and bridge structures. IABSE Structural Engineering Document 4, IABSE-AIPC-IVBH, Zurich, Switzerland.

Modjeski and Masters, Consulting Engineer. (1984). Criteria for the design of bridge piers with respect to vessel collision in Louisiana waterways. Prepared for the Louisiana Department of Transportation and Development and the Federal Highway Administration, Harrisburg, PA, November 1984.

Prucz, Z. and Conway, W.B. (1987). Design of bridge piers against ship collision. Bridges and Transmission Line Structures. L. Tall, ed: American Society of Civil Engineers, New York, NY, 209-223.

Rajashekhhar, M.R. and Ellingwood, B.R. (1993). A new look at the response surface approach for reliability analysis. Structural Safety, 12, 205-220.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., and Kim, H.K., Uzawa, T. and Ueda, T. (2002). STATISTICAL ANALYSIS OF FRAGILITY CURVES. Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. NY, USA.

원고접수일: 2010년 1월 25일

수정본채택: 2010년 7월 7일(1차), 2010년 7월 22일(2차)

게재확정일: 2010년 7월 27일