

신뢰성 평가 기반의 선박충돌 위험도 해석 Risk analysis of ship collision based on reliability assessment

조병일¹, 김동현², 심재설³, 김두기⁴
Byung-Il Jo¹, Dong-Hyawn Kim², Jae-Seol Shim³ and Doo-Kie Kim⁴

1. 서 론

국내·외의 지리적 특성 또는 지역사업과 맞물려 연도교와 연륙교등의 해상교량이 건설되고 있다. 이러한 해상교량의 증가는 비록 빈번하게 발생하지는 않으나 선박과 해상교량의 충돌에 대한 위험성을 내포하게 된다. 교량과 선박의 충돌에 대한 대표적인 사고사례는 1980년 미국 플로리다에서 발생한 Sunshine Skyway Bridge의 붕괴사고로 기상악화와 선박운항자의 실수로 인하여 교량상판이 붕괴되고 35명의 사망자가 발생하였다. 이러한 사고의 영향으로 AASHTO에서는 선박충돌에 대해 제시하고 있으며 또한 선박에 의한 충돌 위험도에 대해 확률적으로 접근하고 있다. 이러한 선박충돌위험도에 대해 국외에서는 아직 선박충돌위험도에 대한 확률론적 접근보다는 결정론적 해석방법을 통하여 해상교량의 선박충돌에 대한 안정성 평가가 연구되었으며 국내에서는 이성로 등(2004)에 의해 AAHSTO에서 제시한 연간과피빈도를 이용하여 선박충돌위험도를 평가하였다.

하지만 AASHTO에서 제시한 연간과피빈도는 식(1)과 같이 다양한 조건에 대한 자료가 준비되어 있을 때 정확한 확률론적 위험도 평가가 이루어지기 때문에 장기적인 관점에서 지속적인 자료수집이 이루어져야 한다.

$$AF = N \cdot PA \cdot PG \cdot PC \quad (1)$$

여기서, AF 는 선박 충돌에 의한 교량 부재 파괴의 연간빈도, N 은 형태, 크기 및 하중조건에 의해 분류된 수로를 이용하는 연간 선박의 수, PA 는 선박의 항로이탈확률, PG 는 항로를 이탈한 선박이 교각이나 상판과 충돌할 기하학적 확률, PC 는 항로를 이탈한 선박과 충돌할 때 교량이 파괴될 확률을 나타낸다.

식(1)에서와 같이 PC (파괴확률, P_f)를 제외한 항은 실측자료가 필요하며 AASHTO에서 PC (파괴확률, P_f)를 간단히 설명하고 있기에 본 연구에서는 확률론적 신뢰성 해석기법을 사용하여 해상교량과 1,024TEU 선박과 2,067TEU 선박 두 종류의 선박을 통해 PC (파괴확률, P_f)를 계산하고 해상교량의 충돌위험도를 평가하였다. 또한, 이러한 결과를 이용하여 선박이 해상교량을 안전하게 통행할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 연구이론

2.1 응답면 기법

동적구조해석에서 나타나는 구조물의 응답은 음함수 형태이다. 여기서 음함수라는 것은 선박과 구조물의 특성(탄성계수, poisson's ratio, density등)에 의해서 나타나는 것으로 변위나 응력 등과 같이 신뢰성 해석에 필요한 성능함수가 확률독립변수가 아니고 종속변수라는 것을 뜻한다. 따라서 이러한 종속변수를 신뢰성해석에 적용하기 위해 응답면 기법을 사용하여 설계점에서의 구조해석을 수행하였다.

1 군산대학교 대학원 박사과정
2 군산대학교 해양건설공학과 교수
3 한국해양연구원 기후연안재해연구부 책임연구원
4 군산대학교 토목공학과 교수

응답면 기법의 설계점은 확률독립변수를 충돌 속도(v)와 충돌각(θ)으로 하였으며 교차항(cross term)을 고려하였다. 여기서 설계점의 수가 너무 많을 경우 구조해석의 횟수가 증가하기 때문에 다음과 같은 계산을 통하여 구조해석의 횟수를 결정하였다(Haldar 등 2000). 또한, 식(2)로 구한 설계점의 위치는 Fig.1과 같다.

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

여기서, p 는 설계점의 수, k 는 확률변수의 수이다.

응답면의 위치, 즉 각각의 구조해석점의 위치는 식(3)으로 계산하여 찾을 수 있다.

$$X_i = X_C \pm h_i \sigma_{X_i} x'_i \quad (3)$$

여기서, i 는 독립확률변수의 수이고, X 는 응답면에서의 구조해석점, X_C 는 중심점이고, h 는 응답면의 확장계수, σ 는 독립확률변수의 표준편차, x' 은 coded variable이다.

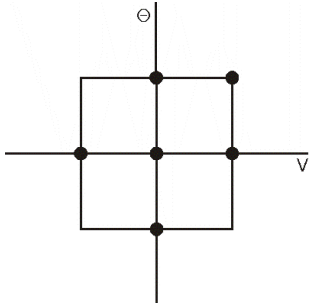


Fig. 1. Design points of RSM

Fig.1은 위에서 설명한 충돌각과 충돌속도에 대한 응답면을 도시하고 있으며 각각의 설계점에서 구조해석을 수행하여 2차 다항식의 응답면 함수를 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$f(X') = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i x'_i + \sum_{i=1}^k c_{ii} (x'_i)^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k c_{ij} x'_i x'_j \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

여기서, x'_i 는 i 번째 확률독립변수이고 k 는 확률독립변수의 수, c_0, c_i, c_{ii}, c_{ij} 는 각각 응답면 함수의 계수이다.

따라서, 식(4)를 이용하여 본 연구의 응답면 함수를 정의하면 식(5)와 같다.

$$f(v, \theta) = c_0 + c_1 v + c_2 \theta + c_{11} v^2 + c_{22} \theta^2 + c_{12} v \theta \quad (5)$$

식(5)의 $c_0, c_1, c_2, c_{11}, c_{22}, c_{12}$ 는 최소자승법을 이용한 회귀분석을 통하여 구할 수 있으며 각각의 응답면 함수의 계수는 식(6)의 계산한다.

$$C = (X^T X)^{-1} X^T f(v, \theta) \quad (6)$$

여기서,

C 는 $[c_0, c_1, c_2, c_{11}, c_{22}, c_{12}]^T$, X 는 $[1, v, \theta, v^2, \theta^2, v\theta]^T$, $f(v, \theta)$ 는 충돌각과 충돌속도에 따른 해상교량의 응답이다.

2.2 LEVEL II - AFOSM

신뢰성 해석의 LEVEL II 해석기법은 모든 확률변수가 서로 독립인 정규분포를 갖는다는 가정 하에 각각의 확률변수의 평균과 표준편차를 이용하여 성능 함수를 정의하고 파괴확률을 산정하는 방법으로 AFOSM(개선된 일계이차모멘트법)은 반복계산에 의한 파괴점 부근에서 근사치를 계산하기 때문에 MCS와 비교했을 때 유사한 결과가 나타난다.

신뢰성해석의 한계상태함수는 식(7)과 같이 정의하며 선박과 해상교량의 충돌로 인하여 해상교량의 거더가 충돌진행방향으로 0.3m를 초과할 경우 파괴된다고 가정하였다.

$$g(X) = R - S \quad (7)$$

여기서, R 은 저항함수, S 는 하중함수이다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 저항함수(R)를 충돌진행방향의 허용변위(D_{all}) 0.3m로 정의하고 하중함수(S)는 식(6)과 같이 구조해석을 통해 나타난 해상교량의 최대변위를 응답면 함수로 근사화하여 식(8)로 표현하였다.

$$D_{max} = c_0 + c_1 v + c_{11} v^2 + c_2 \theta + c_{22} \theta^2 + c_{12} v \theta \quad (8)$$

따라서, 식(7)에 허용변위(D_{all})와 식(8)의 구조해석에 의해 나타난 최대변위(D_{max})를 대입하면 최종적으로 본 연구에서 사용된 한계상태함수를 식(9)로 표현할 수 있다.

$$g(v, \theta) = D_{all} - (c_0 + c_1 v + c_{11} v^2 + c_2 \theta + c_{22} \theta^2 + c_{12} v \theta) \quad (9)$$

2.3 충돌취약도

취약도 곡선은 구조물의 손상 발생 유무와 관계없이 하중을 변화시키며 구조해석을 여러 번 수행하여 설계변수의 확률적 변동성을 간접적으로 고려하는 방법이다(Shinozuka, M, et al, 2002).

취약도는 해상교량이 한계상태를 초과할 확률을 충돌속도의 함수로 표현하며 k 번째 손상단계에 대한 해상교량의 취약도를 다음과 같은 대수정규분포함수로 나타낸다.

$$F_k(v) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{v}{c_k} \right)}{\zeta_k} \right] \quad (10)$$

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

선박충돌에 대한 총 n 번의 구조해석을 수행하여 각 해석에서 구조설계변수의 확률적 변동성을 부여한다.

$$L = \prod_{i=1}^n [F_k(v_i)]^{x_i} [1 - F_k(v_i)]^{1-x_i} \quad (11)$$

여기서, x_i 는 해상교량의 손상 유무에 따라 손상이 발생하면 1, 손상이 없으면 0을 입력하여 각각의 손상과 무손상의 확률을 누적시키고 대수함수의 경우 단조증가함수이므로 식(11)을 최대화하는 최우도함수는 다음과 같다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^n [x_i \ln F_k(v_i) + (1-x_i)(1-F_k(v_i))] \quad (12)$$

식(10)의 중간값과 대수표준편차는 식(12)의 $\ln L$ 을 최대화하는 최적화 문제로 풀 수 있으며 다음의 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k} = \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n_k) \quad (13)$$

본 연구에서는 Shinozuka 등 (2007)이 연구한 취약도 이론에 신뢰성 해석에 의한 파괴확률을 이용하여 해상교량의 파괴확률에 대해 최소가 되는 최적화 문제로 파괴확률에 대한 충돌취약도 곡선을 fitting하였

다(Park. et al, 2008)

$$F_k(v) = \min \sum_{i=1}^n \left[\Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{v}{c_k} \right)}{\zeta_k} \right] - P_{f_k}(v) \right]^2 \quad (14)$$

2.4 선박충돌해석

응답면에서의 최대변위(D_{max})를 구하기 위해 충돌각과 충돌속도를 Table 1의 조건으로 구조해석을 수행하였다. 설계선박의 선수부는 유한요소모델을 사용하고 나머지 선체부분은 강체모델로 모델링하였으며 부가질량요소를 사용하여 만재선박으로 가정하였다. 해상교량은 Fig 2에서와 같이 충돌이 발생하는 교각과 케이블, 거더를 모델링하였다.

Table 1. Probability variables

	μ	σ
Angle (θ)	0°	±15°
Velocity (v)	2m/s~7m/s	1m/s

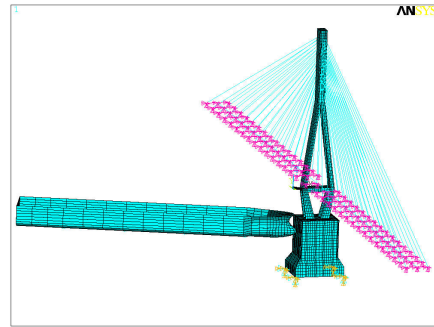


Fig. 2. Analysis model

설계선박과 해상교량의 제원 및 물성치를 다음과 같이 정리하였다.

Table 2. Principal dimensions of designed ships

TEU	Length	Width	Depth	Fully Draft
1,240	161m	23.6m	12.5m	9.6m
2,067	185m	27.5m	16.0m	11.0m

Table 3. Material properties of pylon and designed ships

	Material properties	Value
Designed ship	Elastic Modulus	2.1E+10 kgf/m ²
	Poisson's ratio	0.3
	Density	7850 kgf/m ³
	Thickness	0.05m
Pylon	Elastic Modulus	2.92E+9 kgf/m ²
	Poisson's ratio	0.17
	Density	2500 kgf/m ³
	Pressure Strength	350kgf/cm ²

3. 결 과

한계상태함수에 하중함수를 응답면에서 구한 변위로 하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 설계선박의 충돌속도가 빨라질수록 Fig.3과 Fig.4에서와 같이 신뢰도 지수는 감소하게 되고 그에 따라서 파괴확률은 증가하게 된다. 결과적으로 선박과 해상교량의 충돌해석에서 충돌속도는 매우 민감한 영향을 끼치게 되며 20%의 파괴확률까지 해상교량이 안정하다고 가정할 경우 선박의 속도는 3m/s를 초과할 때 위험한 상태에 이르게 되는 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 두 선박에 대한 해상교량의 취약도에 대한 중간값과 대수표준편차는 Table 4에 나타내었다.

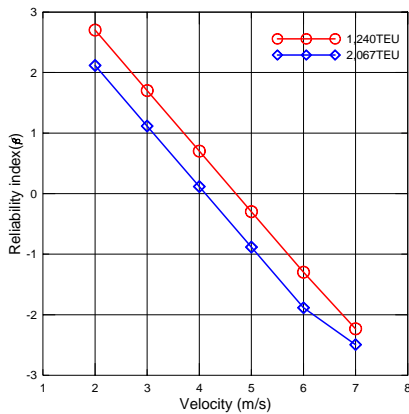


Fig. 3. Reliability index

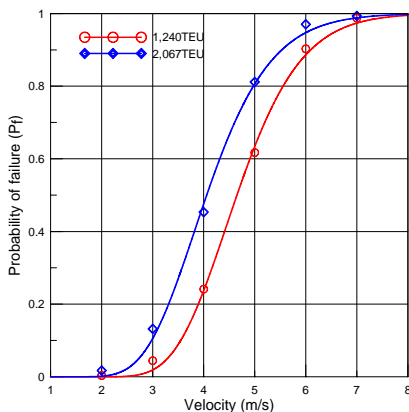


Fig. 4. Fragility curves

Table 4. Median and log-standard deviation

	Median	log-standard deviation
1,240TEU	4.6511 m/s	0.2110 m/s
2,067TEU	4.0583 m/s	0.2415 m/s

4. 결 론

AASHTO에서 제시한 파괴확률 대신 신뢰성 해석 기법을 적용하여 파괴확률을 계산하고 충돌위험도를 취약도 곡선으로 나타내었다. 취약도 곡선에 의해 나타난 결과로 해상교량의 허용변위를 초과할 파괴확률이 20% 이하일 때 해상교량이 안정하다고 가정할 경우에는 충돌속도가 1,240TEU와 2,067TEU 선박에 각각 약 3.9m/s, 약 3.3m/s를 초과하면 안된다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 이성로, 이계희, 이완수 (2004), 교량의 선박충돌 에너지 산정, 대한토목학회, 제24권 5A호 pp951-960
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2005), American Association of State Highway and Transportation Officials
- Haldar, A.& Mahadevan, S (2000), Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis, JOHN WILEY & SONS, INC.
- Shinozuka, M, Feng, M. Q., Kim, H. K., Uzawa, T., Ueda, T. (2002), STATISTICAL ANALYSIS OF FRAGILITY CURVES, Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA
- J. N. Park, Peeranan Towashirapom, James I. Craig, Barry J. Goodno (2008), Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures, Engineering Structures 31 (2009) 125-137