

해상교량의 선박 충돌 위험도 해석 Collision Risk Analysis of Offshore Bridge

조병일¹, 김동현², 심재설³, 김두기⁴

Byung il Cho¹, Dong Hyawn Kim², Jae Seol Shim³, Doo Kie Kim⁴

1. 서 론

해상교량 설계 시 여러 가지 경우의 하중을 가정하여 구조해석을 실시하게 된다. 대부분의 하중의 경우 설계기준에서 제시한 조건 및 설계식을 이용하여 해석에 반영한다. 하지만 선박 충돌에 관한 항목에 대해서는 도로교 설계기준(2005)에서는 선박과 충돌할 우려가 있는 경우에는 선박에 의한 충돌을 설계에 고려하여야 한다고 간단하게 명시되어 있고 항만 및 설계기준(2005)에서는 접안에 의한 선박충돌에 대해서만 명시되어 있어 실제 선박 충돌에 대한 조건을 적용하기 위해서는 AASHTO등과 같은 외국의 설계기준서에서 제시한 충돌 산정식을 사용할 수 밖에 없다. 아직까지는 선박과의 충돌로 인한 피해사례가 많지 않다. 하지만 화물선, 유조선 및 기타 대형선박의 경우 해상교량의 외부하중으로 고려할 경우 선박의 질량이 크기 때문에 한번의 충돌 사고일 지라도 해상교량에 큰 피해를 줄 수 있다. 또한, 해상교량의 선박과의 충돌 사고사례가 산업이 발달하는 지역 및 해상교역이 활발한 곳에서 발생하기 때문에 피해는 선박과 해상교량 뿐만 아니라 다른 부가적인 피해도 나타날 수 있다.

선박에 의한 충돌해석의 경우 국내의 설계기준서에는 제시되어 있지 않기 때문에 부득이하게 미국의 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)에서 제

시한 충돌력 산정식을 이용하여 충돌해석을 수행하여 비교검토가 이루어졌다.

본 연구에서는 ANSYS LS-DYNA를 사용하여 설계선박과 해상교량을 구조해석 하였으며 충돌 위험도 해석을 하기 위해 구조해석 과정에서 나온 결과를 확률론적 방법인 신뢰성 해석을 수행하여 해상교량의 파괴확률을 산정하였다. 또한 신뢰성 해석을 통해 계산한 신뢰도 지수를 이용하여 충돌 위험도 해석을 수행하였다.

2. 구조해석

2.1 설계선박 및 해상교량 모델

구조해석의 범위는 설계선박을 3,789TEU급, 2,067TEU급, 1,240TEU급으로 선정하였으며 이를 DWT급으로 변환할 경우, 선박의 적재중량톤수(DWT)는 각각 55,000DWT급, 30,000DWT급, 18,000DWT급으로 계산할 수 있다 (선박충돌 시뮬레이션을 통한 사장교 주탑부 응답해석, 김주영외, 2006).

$$DWT = \frac{TEU}{0.0689} \quad (1)$$

여기서, DWT = Deadweight Tonnage
TEU = Twenty Foot Equivalent Unit

각 선박의 제원은 Table 1과 같다.

1 발표자: 군산대학교 해양산업공학과 석사과정

2 군산대학교 해양건설공학과 교수

3 한국해양연구원 기후연안재해연구부

4 군산대학교 토목환경공학부 토목공학전공 교수

Table 1. Principal dimensions of designed ships

TEU	Length	Width	Depth	Fully Draft
3,789	218m	32.3m	17.0m	12.9m
2,067	185m	27.5m	16.0m	11.0m
1,240	161m	23.6m	12.5m	9.6m

설계선박은 Fig.1-Fig.3과 같으며 해상교량과 충돌이 발생하는 지점인 선수부를 자세하게 묘사하였으며 그 나머지 부분은 강체로 모델링하여 화물을 싣을 수 있는 곳으로 표현하였다. 또한, 부가질량요소로 화물량을 표현하여 선박을 이상화하였다.

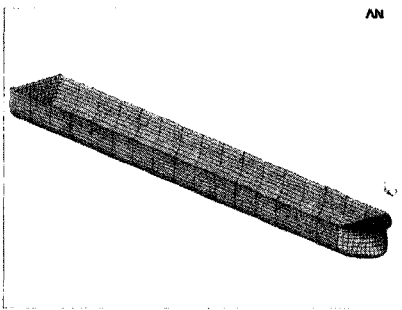


Fig. 1. FE model of designed ship (3,789TEU)

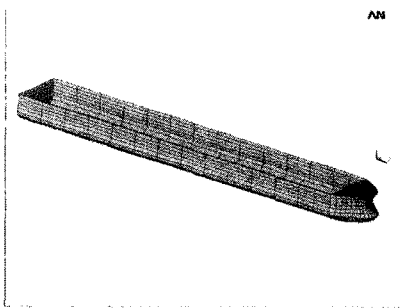


Fig. 2. FE model of designed ship (2,067TEU)

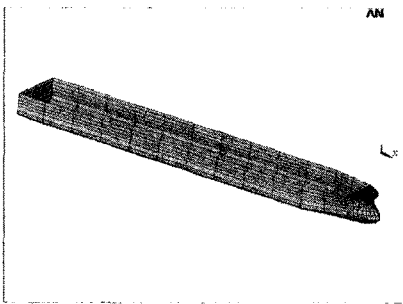


Fig. 3. FE model of designed ship (1,240TEU)

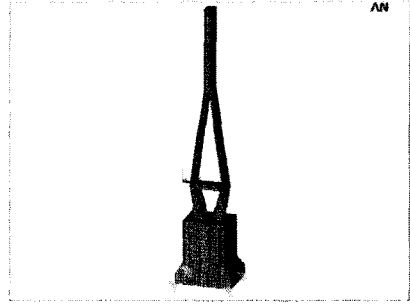


Fig. 4. FE model of Pylon

충돌해석은 implicit method에서와 같이 강성을 계산하는 게 아니라 explicit method로 충돌 시 발생하는 내력을 순차적으로 절점에서 절점으로 계산하기 때문에 implicit method의 계산시간보다 많은 시간이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig.4와 같이 충돌이 발생하는 주탑만을 모델링하고 기초케이스의 가장 자리의 4곳을 완전 구속하여 구조해석을 수행하였다. 그리고 설계선박과 해상교량의 물성치는 Table.2와 같다.

Table 2. 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

2.2 해석조건 및 결과

충돌해석 시 확률변수를 충돌각과 충돌속도로 하여 1m/s~8m/s까지 Fig.1~Fig.3의 선박을 대상으로 구조해석을 수행하였다. 각각의 확률변수는 다음의 Table.3과 같다.

Table 3. Probability variables of collision angle and velocity

	μ	σ
Angle (θ)	0°	15°
Velocity (v)	1m/s~8m/s	1m/s

차량통행이 이루어지는 거더에서 충돌에 의한 변위가 허용변위를 초과할 경우에는 해상교량의 피해 및 인명피해가 발생할 수 있다. Fig. 5의 위치를 거더가 놓이는 곳으로 가정하여 굽은 점의 절점에서의 변위를 확인하였다.

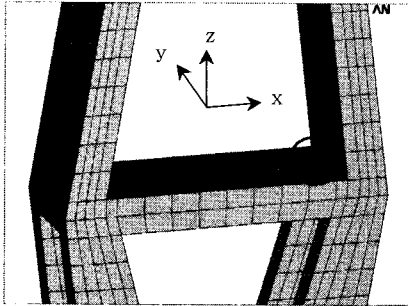


Fig. 5. Measured point for displacement

Fig. 6 ~ Fig. 8은 충돌속도에 따른 변위를 나타내며 속도가 증가할수록 변위가 증가함을 알 수 있다.

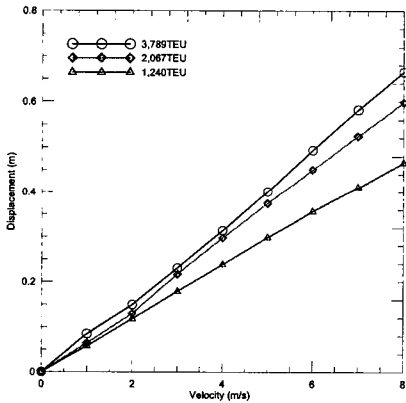


Fig. 6. Displacement of Pylon ($\theta = -15^\circ$)

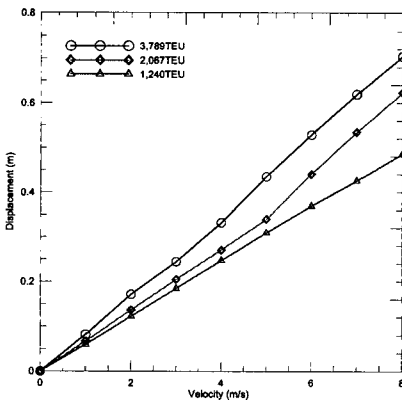


Fig. 7. Displacement of Pylon ($\theta = 0^\circ$)

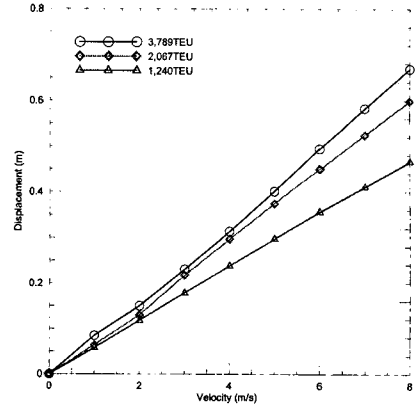


Fig. 8. Displacement of Pylon ($\theta = 15^\circ$)

3. 신뢰성 해석

선박과의 충돌 시 거더에서 나타나는 충돌진행방향(x-axis)변위를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

신뢰성 해석에서 한계상태함수는 식 (2)와 같이 정의한다.

$$g(X) = R - S \quad (2)$$

여기서, $g(X)$: 한계상태함수

R : Resistance Function

S : Loading Function

저항함수(R)를 해상교량의 허용변위를 0.3m로 가정하여 설정하였으며 하중함수(S)는 식 (3)과 같이 근사함수로 가정하였다.

$$D_{max} = Av + Bv^2 + C\theta + D\theta^2 + E\theta + F \quad (3)$$

여기서, v 와 θ 는 각각 충돌속도와 충돌각이다. 저항함수에 허용변위(D_{all})를 대입하고 하중함수에 최대응력(D_{max})을 대입하면 최종 한계상태함수는 식 (4)와 같다.

$$g(X) = D_{all} - (Av + Bv^2 + C\theta + D\theta^2 + E\theta + F) \quad (4)$$

여기서, $A \sim F$ 는 응답면함수의 계수이다.

이와 같이 신뢰성 해석을 수행하여 Fig.9와 같은 신뢰도 지수를 갖는 결과를 얻었다.

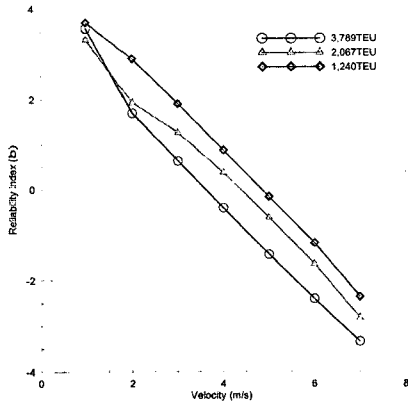


Fig. 9. Reliability index

4. 충돌취약도

Fig. 9의 신뢰도 지수를 이용하여 해상교량의 선박 충돌에 의한 파괴확률(P_f)을 계산할 수 있으며 파괴확률을 누적분포함수로 나타내면 취약도 곡선을 얻을 수 있으며 Table 4가 Fig. 10의 취약도 곡선의 중간값과 대수표준편차를 나타낸다.

Table 4. Median and log-standard deviation

	Median	log-standard deviation
3,789TEU	3.5532 m/s	0.2629 m/s
2,067TEU	4.3093 m/s	0.2332 m/s
1,240TEU	4.8005 m/s	0.1996 m/s

5. 결 론

Explicit method를 이용하는 ANSYS LS-DYNA 범용구조해석프로그램을 이용하여 설계선박과 해상교량의 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석을 통하여 해상교량의 거더에서 나타나는 변위를 확인하고 신뢰성 해석을 통한 신뢰도 지수를 계산하였다. 최종적으로 본 연구의 목표인 충돌취약도를 확인하여 해상교량의 안정성을 갖도록 충돌속도를 규정하였으며 선박충돌에 의한 해상교량의 위험도를 계산하였다.

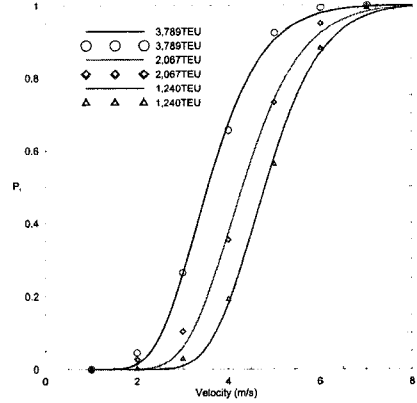


Fig. 10. Fragility curve

참고문헌

- (주)태성에스엔이, FEA 사업부, 제5판 유한요소해석 입문과 선형해석, (주)태성에스엔이, 2006
- 도로교 설계기준, (사)한국도로교통협회, 2005
- 케이블강교량설계지침(안), 토목학회, 2006
- 항만 및 어항 설계기준, 해양수산부, 2005
- EXPLICIT DYNAMICS WITH ANSYS/LS-DYNA, (주)태성에스엔이, 2007
- 김주영외 4명, 선박 충돌 시뮬레이션을 통한 사장교 주탑부 응답해석, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 pp.1763-1768, 2006
- 신철식, 항만구조물의 충돌에너지 산정기법, 대한토목학회지 제55권 제2호 pp.111-118, 2007, 2
- 조의경, 고광오, 김종성, 선박과 교량의 충돌 해석, 한국강구조학회지 제16권 3호 pp.56-65, 2004, 9
- ANSYS LS-DYNA USER'S GUIDE
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005
- Daryl. L. Logan, Third edition A first course in the finite element method, Books/cole, 2002
- DAVID RONALD GAYLORD-COWAN, Numerically efficient nonlinear dynamic analysis of barge impacts on bridge piers, a thesis of master of engineering, 2004