

# 교량의 선박충돌 에너지 산정

## Estimation of Ship Collision Energy with Bridge

이성로\*                      강성수\*\*  
Lee, Seong Lo              Kang, Sung Soo

### ABSTRACT

The kinetic energy during ship collision with bridge piers is released as the permanent deformations of structure and friction between the impact surfaces. So the ship collision energy is estimated from the equations of motions for ship-pier collisions which include the influence of the surrounding water, different impact angles and impact locations. The normal impact energy and tangent impact energy at a collision location and angle can be transformed into the normal impact force and friction force acting on the structure. Also the kinetic energy after collisions is calculated from the linear and angular impulse of ship collisions. The collision energy absorption system such as the protective structures for bridges is designed by evaluating the damage portions of ship and structure during the ship-structure collisions varying from the soft impact to hard impact and then the estimation of it will be suited for the design of protective measures.

### 1. 서론

선박충돌과 관련된 많은 연구는 주로 선박과 선박과의 충돌이나 선박의 좌초 등을 주요 연구대상으로 하고 있으며 1950년대말부터 조선공학 분야에서 활발하게 수행되었다. 교량구조물의 충돌에 대해서는 해동시 유빙이나 홍수시 부유물들에 의한 충돌하중에 대하여 교량의 하부공을 보호하는 시설의 설계정도에 대하여 연구되었다. 그러나 1960년부터 전 세계적으로 많은 나라에서 발생한 선박 및 바지선의 교량충돌사고 기록자료 들을 보면, 항로상 선박통행량의 급격한 증가, 항로를 통과하는 교량의 계획 및 건설 사례 증가, 1960년 이래 25년 이상 교량 설계시 선박 충돌하중 미고려, 교량의 불충분한 선박통과 소요폭 등의 요인으로 선박충돌 사고가 많이 발생함을 알 수 있다(Frandsen, 1983, 1991). 이러한 사고들로 인해 항로를 가로지르는 교량의 안전성 확보에 관심이 모아지게 되었고 여러나라에서 기존 교량의 선박충돌에 대한 취약성 평가, 신설 교량에 대한 설계기준 정립, 선박충돌에 대한 규약과 시방서 개발과 관련한 연구가 수행되었다(NPRA(1982), TC(1982), USNRC(1983), Knott (1990), Frandsen(1991)). 특히 1980년 미국의 플로리다에서 발생한 Sunshine Sky Bridge의 붕괴사고로 인하여 선박과 해상교량의 하부구조와의 충돌에 대한 연구가 활성화되었다.

선박충돌에 대한 해석은 2개의 부분, 즉 외부역학 및 내부역학의 해석으로 나누어진다. 외부역학에서는 충돌선박의 강체운동과 주변 유체의 효과를 고려함으로써 충돌에 의한 충격량과 에너지소산을

\* 정회원, 목포대학교 건축조경토목공학부 토목공학전공 · 교수

\*\* 정회원, 목포대학교 대학원 토목공학과 · 박사과정

다루며 내부역학에서는 충돌시 선체의 파손에 의해 소산되는 에너지에 의한 손상과 구조응답을 해석한다. 위의 두가지 역학문제는 독립적으로 수행할 수 있다.

외부역학에 대한 연구는 Petersen and Pedersen(1981), Simonsen(1997), Suzuki et al.(2000) 등에 의해 수행되었으며, 운동방정식 또는 에너지보존법칙, 운동량 원리를 이용하여 선박충돌에 의한 에너지 소산을 해석하였다. 본 논문에서는 교각에 선박이 항로를 이탈하여 충돌하는 경우 충돌위치, 충돌각도, 충돌면에서의 마찰에 따라 충돌에너지를 계산하는 방법에 대한 연구를 수행하고 계산결과를 비교 검토하고자 한다. 또한 충돌 전후의 운동에너지 산정과 충돌에너지 산정에 대한 이론적 해석결과와 도로 교 시방서의 기준을 비교 검토하고, 또한 선박충돌에 의한 에너지가 교각에 작용하는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 선박충돌에 대한 역학

선박의 운동은 그림 1에서와 같이 서징(surging), 스웨잉(swaying), 요잉(yawing), 히빙(heaving), 피칭(pitching), 롤링(rolling)의 6가지 성분으로 구성된다. 이 중에서 서징, 스웨잉, 요잉의 수평면내의 운동성분에 대해 선박과 교각의 운동방정식을 구성하여 선박 충돌 전후의 에너지 변화를 얻을 수 있다.

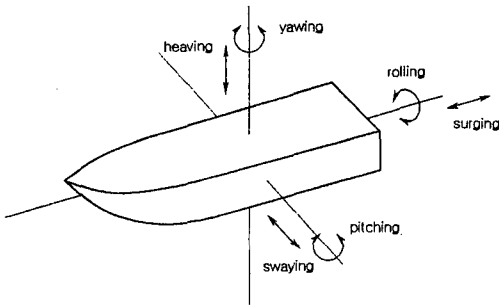


그림 1. 선박의 운동 성분

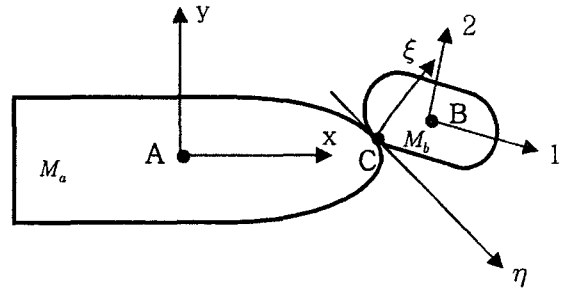


그림 2. 선박-교각 충돌해석을 위한 좌표

그림 2에서와 같이 선박의 질량중심 A에서 직교 좌표축을  $x, y$ 라 하고 교각의 질량중심 B에서 직교 좌표축을 1,2라 할 때, 질량  $M_a$ 의 선박(A)이  $x$ 방향으로  $V_{ax}$ ,  $y$ 방향으로  $V_{ay}$ 의 속도로 교각(B)의 C 점에서 충돌하는 경우를 고려하면, 충돌점(C)에서 접선의 직각방향( $\xi$ 축)과 접선방향( $\eta$ )으로 충격력이 전달되며, 선박은  $\xi$ 방향으로 반발하고  $\eta$ 방향으로 미끄러진다. 이 때 선박은 손상을 받으면서  $x$ - $y$  좌표축에서 직진운동, 병진운동과 질량중심점에서 회전운동을 한다. 대부분의 충돌에너지는 선박의 소성변형(대변형)과 마찰을 통해 소산되며, 부분적으로 탄성변형과 유체정역학 에너지로 변환된다. 그리고 교각에서는 구조물 재료의 파쇄(crushing), 기초파손의 형태로 에너지가 변환된다.

Woisin(1971)은 질량  $M_a$ 의 선박이  $V_{ax}$ 의 속도로 강체에 정면충돌( $V_{ay} = 0$ )할 때 충돌에너지를 계산하기 위해 Minorsky의 식을 수정하여 다음과 같이 제안하였다.

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_a + \Delta M}{M_a} \cdot M_a V_{ax}^2 \quad (1)$$

여기서,  $\Delta M$ 은 선박주위의 물의 영향을 고려한 것으로  $\frac{M_a + \Delta M}{M_a}$ 을 수리동적질량계수로 표현한다.

선박충돌 에너지( $E_i$ )는 충돌각 ( $\alpha[0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ]$ )에 따라 변화하며 충돌점에서  $\xi$ 방향과  $\eta$ 방향으로 방출된다. 즉,  $E_i = E_\xi + E_\eta$ 의 관계가 성립한다.  $E_\xi$ 와  $E_\eta$ 는  $\xi$ 방향의 반발계수  $e$ 와 선박의 교각 충돌 전후의 상대속도  $\dot{\xi}(t), \dot{\eta}(t)$  [ $0 \leq t \leq T$ ]에 의해 계산되는  $\xi$ 방향과  $\eta$ 방향의 에너지이다.

충돌후 선박의 x방향, y방향 속도 및 각속도는 선박충돌에 대한 선역적(linear impulse)과 각역적(angular impulse)으로부터 계산되며, 이로부터 선박의 충돌후 운동에너지도 계산한다.

### 3. 선박-교각 충돌 해석

선박이 항로를 이탈하여 항로를 가로지르는 교각의 교각과 충돌하는 경우 정면으로 충돌하는 것이 가장 큰 충돌에너지를 유발하게 되며 교각에 큰 피해를 주게 된다. 그러나 표류하는 선박의 경우 정면 충돌 이외에도 충돌각이 변하거나 충돌점이 선수(이물(bow))에서 벗어나는 경우도 고려할 수 있다. 선박과 교각이 충돌할 때 발생하는 충돌에너지와 충돌 전후의 선박 운동에너지를 계산하기 위한 해석예제는 다음과 같다.

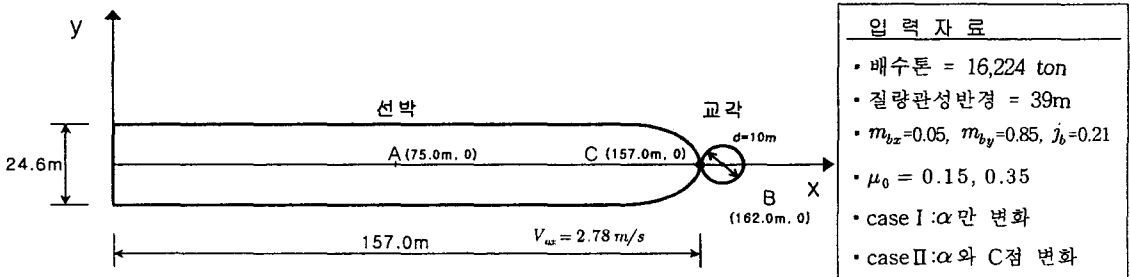


그림 3. 선박과 교각의 충돌해석 좌표계

그림 4는 해석예제의 시나리오에서 언급한 바와 같이 네가지 경우에 대해 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 4에서 보면 충돌에너지는 충돌각의 함수이면서 충돌면의 마찰계수에 따라 또한 충돌점의 위치에 따라 영향을 받는다. 선박이 정면충돌할 경우 선박의 운동에너지는 교각에 전부 전달된다. CASE I에서 마찰계수  $\mu_0 = 0.15$ 일 때 선박의 운동에너지는 충돌각이  $90^\circ \sim 82^\circ$ 의 범위에서 100% 교각에 충돌에너지로 전달되며, 마찰계수  $\mu_0 = 0.35$ 일 때는  $90^\circ \sim 70^\circ$ 의 범위에서 100% 전달된다. CASE II에서 보면 전체적으로 동일한 충돌각에서 CASE I에 비해 충돌에너지가 다소 크게 나타나고 있다. 충돌에너지는 충돌점의 위치에 따라서도 영향을 받고 있으며, 전체적인 경향은 CASE I과 유사하게 충돌각이 주요 영향인자임을 알 수 있다.

충돌에너지는 충돌면에서 법선방향의 에너지( $E_\xi$ )와 접선방향 에너지( $E_\eta$ )로 구분하는데 그림 5는 충돌 에너지의 변화를 충돌각에 대해 나타내고 있다. 선박충돌시 충돌면의 마찰계수  $\mu_0 = 0.35$ 인 경우 법선에너지가 근사적으로 정면충돌에너지의 50% 정도일 때 접선에너지는 최대값을 가지지만, 마찰계수  $\mu_0 = 0.15$ 인 경우에는 법선에너지가 정면충돌에너지의 55.9%(CASE II)~62.5%(CASE I)의 범위에서 접선에너지가 최대값을 가지고 있다. 충돌에너지는 교각 등 구조물에 작용하는 충격력과 직접적 관계가 있으므로 선박에 의한 마찰력과 측면충돌력을 교각에 동시에 재하시키는 경우에는 이러한 경향들을 고려할 필요가 있다. AASHTO에서는 하부구조물 설계시 측면충돌력만 고려하고 있으나 EUROCODE에서는 측면충돌력과 마찰력을 동시에 고려하도록 하고 있다.

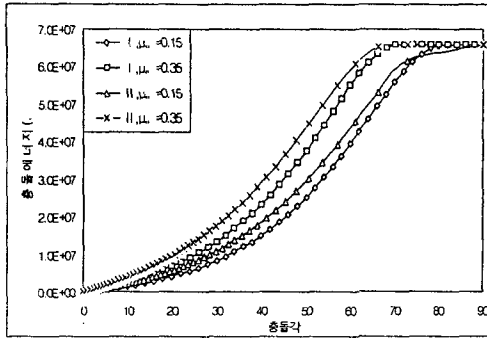


그림 4. 선박과 교각의 충돌에너지

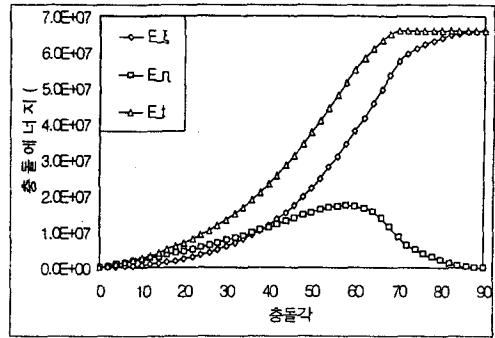


그림 5. 충돌에너지의 변화(case 1,  $\mu_0 = 0.35$ )

#### 4. 결론

본 연구에서는 선박과 교각이 충돌할 때 충돌 시나리오에 대한 충돌에너지, 운동에너지를 계산하였다. 선박과 교각의 충돌에너지는 충돌각, 충돌체의 질량과 충돌속도, 충돌면의 마찰계수가 주요변수이다. 또한, 교각의 형상에 따라 달라지게 되는 충돌점의 위치도 영향을 주며, 충돌점의 위치가 변하지 않는 경우에 비해 충돌에너지가 다소 증가하게 된다. 마찰계수가 클수록 운동에너지가 충돌에너지로 100% 전달되는 충돌각의 범위는 커지게 된다. 그리고 선박에 의한 마찰력과 측면충돌력을 교각에 동시에 재하시키는 경우에는 충돌면에서의 범선 및 접선에너지의 변화를 고려할 필요가 있다.

방호구조물의 설계는 하중과 에너지 흡수 능력을 각각 설계충돌하중 및 에너지와 비교하는 방식으로 이루어지므로 선박충돌 에너지의 산정은 교량의 선박충돌 방호시스템 설계시 응용할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10144-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. AASHTO, "Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges," February, 1991.
3. Larsen, O.D., "Ship Collision with Bridges," Structural Engineering Documents 4, IABSE, 1993.
4. Pedersen, P.T., Zhang, S., "On Impact Mechanics in Ship Collisions," Marine Structures 11, 1998, pp.429-449.
5. Woisin, G., "Ship-structural Investigation for the Safety of Nuclear Powered Trading Vessels," Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Volume 65, Berlin, Heidelberg, New York, 1971, p. 225-263.