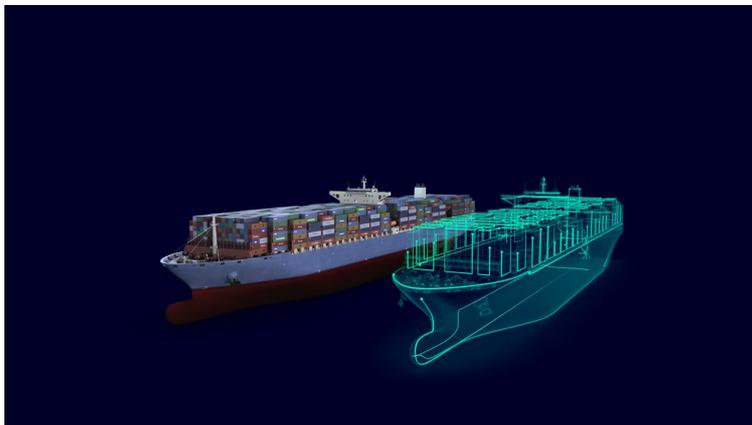


디지털 트윈 선박과 초대형 컨테이너선 물리모델에 대해 - 유탄성 선체 피로해석 연구 동향을 중심으로 -

글 : 한국해양대학교 박준범 교수 / jbpark@kmou.ac.kr

최근 선박설계의 기술적 변화는 매우 빠르게 이루어지고 있으며, 주된 요인으로 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서 제시하는 자율운항선박과 친환경 연료 추진 선박이라 할 수 있다. 또한 선박의 설계부터 제작, 운항에 걸치는 생애 전주기를 관리하는 디지털 트윈 기술도 기술적 변화를 이끄는 요소라 할 수 있다. 이러한 기술들이 현실화가 가능한 이유는 다양한 센서를 통해 취득된 빅데이터 그리고 이를 학습하여 결과를 분류하거나 예측하는 인공지능 기술의 발전 때문이다.

수십 년간 경제의 규모가 커지면서 점차 대형화된 선박을 요구하게 되었으며, 그 요구에 맞는 선박이 안전하게 운항할 수 있도록 선체 설계 기술은 고전물리학 기반의 이론과 시뮬레이션 및 실험과 실선검사 및 실선계측을 기반으로 발전해 왔다. 디지털 트윈 선박은 선체에 설치된 센서로부터 데이터를 취득하고 선체설계 기술이 반영된 물리모델을 결합하여 선박의 상태 및 정비와 운항 지원하는 3D 통합 정보 가상선박 모델이다(손명조, 이정렬, 2018). 지금까지 발전해 온 선체 물리모델은 매우 성공적이라 할 수 있지만, 새로운 현상들이 발생하였을 때 물리모델이 이를 설명하지 못한다면, 실제 운항하는 선박에서 취득된 데이터로부터 원하는 선내 위치의 상태를 파악하는데 한계가 있을 것이다.



디지털 트윈 컨테이너 선박 예시 (출처 : SIEMENS)

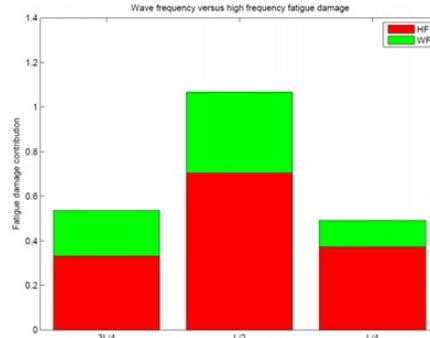
컨테이너 선박의 유탄성 응답에 관한 연구는 2010년 전후로 국내외에서 활발하게 이루어졌다. 이는 컨테이너 선박이 대형화되면서 높이 대비 길이가 길어지고 특성상 매우 큰 화물창 입구를 가지고 있어 선박의 고유주파수 낮아지면서 파랑하중에 의한 가진 주파수와 공진을 일으켜 기존의 선체설계에서 고려되지 않은 유탄성 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 또한 이러한 현상이 선박의 안전에 어떠한 영향을 미치는지를 평가할 필요가 있었다. 유탄성 응답은 크게 휘핑(Whipping)과 스프링잉(Springing)으로 구분하는데, 휘핑은 선수/선미 쪽에 극한 하중이 작용하여 선체 과도응답이 발생하는 것을 말하며, 스프링잉은 지속적인 파랑하중에 의한 선체 공진현상을 말한다. 전자는 주로 선체의 최종강도(Ultimate strength)에 관련이 있고, 후자는 선체의 피로강도(Fatigue strength)와 연관이 있다.

하지만 스프링잉에 대한 연구동향을 살펴보면, 스프링잉을 반영한 물리모델은 지속적으로 모니터링을 하여 선박의 피로손상을 예측하는 디지털 트윈 선박에 사용하기에는 명확하지 않은 점들이 있어 보인다.

컨테이너선에 대한 실선계측(FSM, Full Scale Measurement) 연구결과에서 전체 피로손상에서 유탄성 진동에 의한 피로손상 기여분을 보면, Kahlet al. (2014)은 4,600TEU 선박에서 37%, LLOYD'S, R. (2022)는 6,000TEU 선박에서 30%, Storhaug, G. (2014)는 8,600TEU 선박에서 55%~60%, Kim, Y., et al. (2018a)은 9,400TEU 선박에서 2절점과 3절점 수직굽힘 모드만 고려했을 때 41%~45% 정도로 추산하였다. 10,000TEU 이상의 선박에 대하여, Kim, Y., et al. (2018b)은 13,000TEU 선박에서 2절점 수직굽힘 모드가 지배적으로 보고 40%~50%, Kahlet al. (2014)은 14,000TEU 선박에서 57%로 추산하였다. 선박의 설계방침 및 국부강성의 차이가 있기 때문에 일관성 있는 결과를 기대할 수는 없겠지만, 선박의 규모가 커짐에 따라 유탄성 진동에 의한 피로손상 기여분의 경향을 파악하기 어려운 부분이 있다.

모델테스트 연구논문들을 검토해 보면, 다양한 해상상태에 대한 실험을 수행하였으나 실선계측 결과와 일관성이 경향을 정리할 수 없

었다. 하지만 의미 있는 결과로 Storhaug, G., et al. (2010)는 아래의 그림과 같이 피로손상의 기여가 선박의 중앙부에서 크고 선수/선미 쪽에서는 줄어드는 결과를 도출하였다. 이는 DNV선급의 절차서에서도 아래 식 (1)과 같이 초과확률을 갖는 파랑굽힘모멘트 (Wave vertical bending moment) 분포, $M_{w,j}(x)$,를 사용하여 비슷한 경향을 반영하려 한 것으로 보인다 (DNV, 2021).



<Total fatigue damage for the three cross sections (Storhaug, G., et al. (2010))>

$$f_{d,j}(x) = \frac{M_{w,j}(x)}{\max(M_{w,j}(x))} \quad (1)$$

선박의 유탄성 수치 시뮬레이션 연구논문은 매우 활발하게 이루어졌으며, 많은 연구자들이 시간영역 또는 주파수 영역에 대하여 1차원 또는 3차원 모델을 사용한 수치 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다(Price and Temarel, 1982, Jensen and Dogliani, 1996, Wu and Moan, 1996, Malenica et al., 2003, Kim et al., 2009). Drummen, I., et al. (2008)은 수치 시뮬레이션을 통하여 흥미로운 결론을 제시하였는데, 스프링잉에 대한 피로손상은 비선형 효과를 고려하는 것보다 선형 해석이 더 좋은 결과를 준다는 것이다. 이와 일맥상통하게 LR선급과 BV선급의 절차서를 보면 선형 스프링잉 해석을 사용하도록 제시하고 있으며, ABS선급도 완전 비선형 해석이 아니지만 선형과 2차(second-order) 스프링잉 해석을 요구하고 있다(ABS, 2017, LLOYD'S, R., 2018, Veritas, B., 2015).

각 선급이 배포한 절차서들의 방법론을 분석해 보면 각각의 차이와 장단점을 파악하는 것은 어렵지 않으나, 그 절차들의 근거가 무엇인지는 쉽게 파악할 수 없다. 선형 스프링잉 해석을 제시한 선급의 방법론이 유탄성 진동에 의한 피로손상의 선박 길이방향 분포가 위에서 제시한 분포를 갖는지를 확인해야 할 필요가 있다. 즉, 이론적 접근으로 인한 결과가 실선계측 경향과 맞는지 검토해야 한다. 하지만 관련 연구는 찾아볼 수 없었다.

유탄성 진동에 의한 피로손상 연구들을 검토해 보았다. 성공적인 디지털 트윈 선박이 구현되기 위해서는 실시간으로 선박의 유탄성 진동에 의한 피로손상을 예측하는 물리모델이 합리적으로 구현되어야 한다. 선박의 제한된 위치에서 설치된 센서로부터 취득한 빅데이터와 연동되어 선박의 상태를 모니터링할 수 있는 수준의 물리모델이 구축되기 위한 추가적인 연구가 필요해 보인다.

마지막으로 저자는 해기사를 양성하는 대학에 근무하면서 실제 초대형 컨테이너 선박을 승선하는 졸업생들과 스프링잉 현상을 경험하는 여부를 개인적으로 물어본 적이 있었다. 이를 경험해 봤다는 해기사도 있고, 운항 중에 그러한 현상을 느끼지 못했다는 해기사도 있었다. 일관적이지 않은 응답이기는 하나, 발생의 빈도를 고민해볼 필요가 있다는 생각이 든다. 또한 실선계측 결과 자체는 스프링잉이 발생한 데이터를 위주로 분석한 것은 아닌지 의문이 든다. 위험은 분명히 존재하지만 실제 빈도가 예상과 다를 수 있을 수 있으며, 이는 빅데이터 측면에서 오랜 기간 스프링잉의 발생빈도 및 발생환경을 분석하는 것도 의미가 있지 않나 생각해 본다.

참고문헌

- ABS (2017). "GUIDANCE NOTES ON SPRINGING ASSESSMENT FOR CONTAINER CARRIERS AND ORE CARRIERS." Houston, US.
- DNV (2021). "Fatigue and ultimate strength assessment of container ships including whipping and springing." Class Guideline(30.12).
- Jensen, J. J. (2009). "Stochastic procedures for extreme wave load predictions-wave bending moment in ships." Marine Structures 22(2): 194-208.
- Kahl, A., et al. (2014). Whipping investigations based on large-scale measurements and experimental fatigue testing. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE.
- Kim, Y., et al. (2018a). "Analysis on the full scale measurement data of 9400TEU container Carrier with hydroelastic response." Marine Structures 61: 25-45.
- Kim, Y., et al. (2018b). "On the torsional vibratory response of 13000 TEU container carrier-full scale measurement data analysis." Ocean Engineering 158: 15-28.
- Kim, Y., et al. (2009). "Analysis of hydroelasticity of floating shiplike structure in time domain using a fully coupled hybrid BEM-FEM." Journal of Ship Research 53(01): 31-47.
- LLOYD'S, R. (2018). "Global Design Loads of Container Ships and Other Ships Prone to Whipping and Springing." Lloyd's Register.
- Price, W. and P. Temarel (1982). "The influence of hull flexibility in the antisymmetric dynamic behaviour of ships in waves." International Shipbuilding Progress 29(340): 318-326.
- Senjanovi, I., et al. (2008). "Investigation of ship hydroelasticity." Ocean Engineering 35(5-6): 523-535.
- SIEMENS. "해양 구조 해석: 진정한 디지털 트윈을 위한 시뮬레이션 및 테스트 통합." from <https://webinars.sw.siemens.com/ko-KR/structural-analysis>.
- Storhaug, G. (2014). "The measured contribution of whipping and springing on the fatigue and extreme loading of container vessels." International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 6(4): 1096-1110.

Storhaug, G., et al. (2010). Consequence of whipping and springing on fatigue and extreme loading for a 13000TEU container vessel based on model tests. 11th International Symposium on practical design of ships and other floating structures, Rio de Janeiro, Brazil.

Veritas, B. (2015). "Whipping and Springing Assessment, Rule Note NR 583 DT R00 E." Paris, France.

Wu, M. and T. Moan (1996). "Linear and nonlinear hydroelastic analysis of high-speed vessels." *Journal of Ship Research* 40(02): 149-163.

손명조, 이정렬 (2018). "디지털 트윈 기반의 선박 건조 및 관리." *대한조선학회지* 55(3): 21-25.