



세월호 선체처리계획 이행사업 기초자료 조사

글 : 세호마린솔루션즈(주) 류기수 상무, 박정규 이사, 강정식 부사장, 김영원 대표 /
ksryu@sehomarine.com, jgpark@sehomarine.com, jskang@sehomarine.com, ywkim@sehomarine.com

1. 서론



<그림 1 2024년 2월 9일 세월호 >

[그림 1]의 목포 신항만 부두에 거치되어 있는 세월호의 ‘참사 기억, 희생자 추모 및 안전 사회 건설을 위한 재난 예방·교육’을 담당하도록, 「세월호 선체조사위원회의 설치 및 운영에 관한 특별법」제43조에 따라 선체 조사위원회가 수립한 ‘세월호 선체처리계획 이행사업’의 설계·시공 일괄입찰을 위한 기초자료조사 및 입찰안내서 등을 작성하는 데 과업 목적이 있다.[1]

<표 1 과업수행내용>

과업	분야
조사업무	- 기초자료조사, 현지조사
계획업무	- 관련계획 검토, 설계기준 및 조건 검토 - 관계기관 협의, 자문 및 방침자료 작성

설계업무	- 분야별(토목, 선체, 건축, 콘텐츠) 설계 - 구조계산, 수량 및 공사비 산출 - 건설계획 수립, 기타 부대시설
수치모형실험	- 해수유동실험, 퇴적물이동실험 - 부유사확산실험
해역이용협의	- 해양물리조사 포함
세월호 선체 3D Scan 및 이동 시뮬레이션	- 선체 내·외부 3D Scan 및 모델 작성 - 선체 이동시뮬레이션(선체 이동로 지반안정해석 포함)(필요시)
관련 서류 및 기타자료 수집·작성	- 분야별 관계기관(부서) 인·허가 관련 협의사항 검토 및 이에 대한 관계 법규 등 검토, 입찰안내서 - 총사업비 협의자료 등 작성 및 관리, 별도 용역분(재해영향평가, 환경영향평가 등) 기술적 업무 지원
성과품(조감도 포함) 작성	- 도급자는 성과품 작성시「건설공사 용역관리지침」에서 정한 규정을 준수하여 작성 제출하여야 한다. - 과업 책임기술인은 용역 착수 이후부터「건설공사용역 관리지침」제18조의 규정에서 정한 과업일보를 작성하고, 본 과업 세부 참여 기술인에 대한 과업수행기록을 작성(실명 서명)하여 발주청 확인을 받아야 한다.
총괄관리	- 도급자는 내실 있고 합리적인 기초자료조사가 될 수 있도록 계획(변경), 발주, 설계, 시공, 유지관리 각 단계에서의 문제점 등을 사전에 파악하여 반영될 수 있도록 제시한다.

과업 수행 내용은 [표 1]을 충족해야 하며, 수행 기간은 착수일로부터 18개월 (540일간, 공휴일 등 휴지일수 포함)로 하고, 도급자는 다음 경우에는 발주청의 위임을 받은 계약담당공무원에게 서면으로 계약기간의 변경을 청구하여야 한다. 한편 설계 변경 조건은 발주청과 협의하여 변경을 요구할 수 있으며, 계약범위, 내용, 비용, 기간 등을 변경 또는 정산하여야 한다. 이때 도급자는 본 과업 준공 전 정산 항목에 대해서는 관련 증빙서류를 제출하여야 하며, 제반 변동사항에 대해서는 발주청에 즉시 보고하여야 한다.

〈표 2 설계업무 기준〉

구분	내역
일반 사항	- 기존 자료를 충분히 검토하고, 이를 근거로 기초조사용역 방향 설정의 기초 자료로 활용 - 선체 안전성 확보방안, 장비운용계획, 탐방을 위한 수리계획 및 공간확보, 선체 거치 후 유지, 보수 등에 대한 방안 설계·필요 비용 산정 - 최적방안 검토 및 비용 산정을 위한 전문가(또는 전문기관, 업체) 자문을 통한 충분히 신뢰도 확보 - 선체 중량 및 무게중심 재검토와 전문가(또는 전문기관, 업체)를 통한 신뢰도 확보
선체 내부 설계	- 선체 내·외부 활용방안에 대해 재검토하고 선체의 안전성 감안한 수리방안을 설계 - 선체 내부 탐방 공간 등 확보 방안에 대해 설계
선체 이동시 선체 내·외부 보강 설계	- 자문을 통한 충분한 신뢰도를 확보 - 이동 전 안전성 확보가 필요한 대상에 대한 보강방안 검토, 제시 - 선체 구조 검토(유한요소해석 등) 시 선수부 파단부 등에 대한 면밀한 검토 - 선체 이동시 선체에 무리한 외력 등으로 인한 선체 파단부에 추가적인 찢어짐 등에 주의하여 구조설계 - 선체 이동 1년 전부터 이동에 따른 선체 내부 보강, 지반보강, SPMT 장비규격 선정 등을 사전에 검토하여 대책을 수립
선체 내부 자재 및 장비 정리	- 선체 내부의 자재 및 장비에 대한 기 정리된 내용을 검토하고, 목록표를 작성 - 선체 내부의 불필요한 자재 및 장비에 대한 목록표도 작성하여 관리
선체 거치 전·후 보강 등 설계	- 선체 거치 전·후에 발생할 수 있는 위험요소에 대한 검토 및 이에 대한 보강방안을 수립 - 선체 거치 후 예상되는 문제점을 나열하여 이에 대한 대책을 수립 - 선체 거치 후 제반여건에 따른 선체변화에 대한 안전을 확보하기 위한 전반적인 안전 모니터링 시스템을 구축
선체이동 모듈트랜스포터 (SPMT) 운용 설계	- 선체 육상이동을 위한 최적의 이동장비 수요와 안전성을 확보한 장비 배치계획을 수립 - 장비의 효율성과 적정성을 고려하여 장비운용에 대한 계획 수립 - 선체이동구간에 대해 관계기관, 단체, 민원 사전협조 및 인허가 협의 방안을 검토·제시
선체 영구보존을 위한 방안수립	- 선체부식 방지에 대한 적절한 처리방안을 강구하고, 영구적인 존치를 위한 준비사항을 검토 - 선체의 유지, 보수에 대하여 지속적인 관리방안을 검토하여 체계적인 관리방안을 수립하고 설계
	선체 잔여물(스테빌라이저 등)에 대한 복구방안을 수립하여 제시하여야 한다.

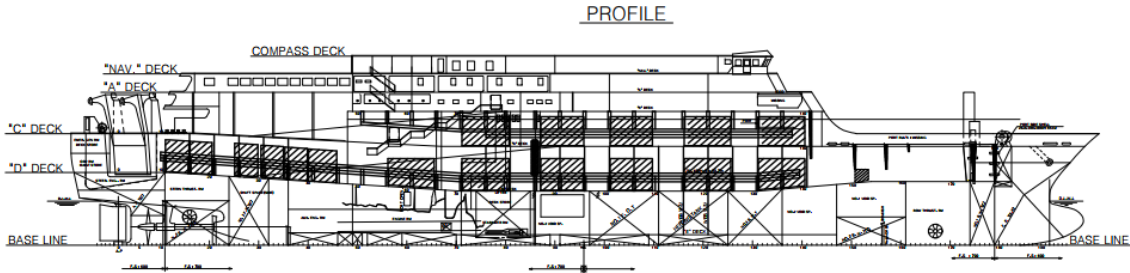
구체적으로 [표 1]의 내용 중 선체 분야 설계업무에 대한 발주처의 최소 요구치는 [표 2]에 기술되어 있으며, 해수와 대기에 노출되어 전

선 상태로 온전히 인양된 사례가 세계적으로 흔치 않다. 따라서 용역 입찰 건 진행했던 내용을 선박 기본 설계 관점에서 고찰한다.

2. 본 론

2.1 일반사항

대형 선박 사업은 신조(New ship)와 개조(Repair ship) 용도로 진행되며, 인양 후 육상 거치 목적의 설계 과정은 신조를 바탕으로 추가 필요한 공정을 개조 일정에 부합되도록 감안하여야 한다. 대형 선박의 주요 구획 및 성능은 발주처 요구를 만족시킨 초기 일반배치도 (Sketched general arrangement) 기반으로, 모든 항목이 입급 선급과 국제 협약 등에 부합되어야 한다.



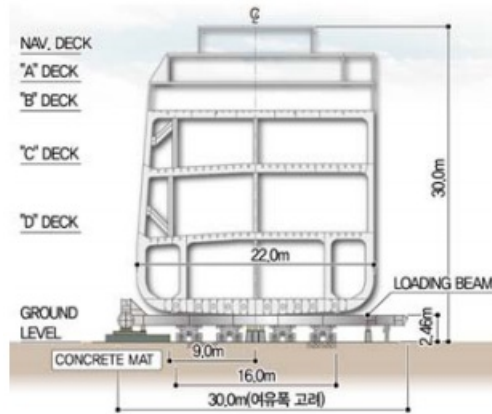
〈그림 2 일반배치도 (출처 : 세월호 선체처리계획 이행사업 기본계획 수립 설계도)〉

[그림 2]의 세월호 인양 상태를 반영한 일반배치도와 [그림 1]의 현 상황을 반영하여 신조 설계 공정으로부터 기초자료 조사를 수행하였다.

〈표 3 초대형원유운반선 구조설계 공정〉

공정		세부 내역
도면	중앙횡단면도	<ul style="list-style-type: none"> - Typical Web Section - Ordinary Web Section - Aft Web of OT BHD Section - FWD Web of OT BHD Section - Aft & FWD Web of Swash BHD Section - OT BHD Section - Swash BHD Section - No.1, 2 & 3 Horizontal Stringer
	강재배치도	<ul style="list-style-type: none"> - C.L. Elevation - Inner L. BHD Elevation - Outboard L. BHD Elevation - Upper Deck Plan - No.1, 2 & 3 Horizontal Stringer
	외판전개도	<ul style="list-style-type: none"> - Shell Expansion - Transom Section
계산서	중앙횡단면도	<ul style="list-style-type: none"> - General - Longitudinal Member - Primary Member - Bulkhead - Sloshing - Fatigue - Welding
	강재배치도와 외판전개도	<ul style="list-style-type: none"> - General - Aft End - Engine Room - Fore End - Hold Part - Hull Girder Envelope Curve - Hull Girder Shear Force Curve
계산서	강재배치도와 외판전개도	<ul style="list-style-type: none"> - Bow Impact Force - Bottom Slamming Force - Green Sea Force
구조해석		<ul style="list-style-type: none"> - Introduction - Cargo Hold Structure Strength Analysis - Local Structure Strength Analysis - Appendix
피로해석		<ul style="list-style-type: none"> - Lower Hopper Fatigue Analysis
선각물량추정		<ul style="list-style-type: none"> - Aft End Part - Engine Room Part - Fore End Part - Hold Part - Accommodation

[표 3]의 신조 만재톤수 300,000톤인(약칭 300K) 초대형원유운반선(Very Large Crude Oil Carrier) 구조 설계 내역을 기반으로 필요한 항목에 대해 검토하였다.



<그림 3 중앙횡단면도 [2]>

[그림 3] 세월호 구조는 현재 거치된 위치로부터 모듈트랜스포터(Self Propelled Module Transporter)에 상차되어 계획된 장소까지 이동되어야 하며, 좌현의 B deck에서 D deck 구간의 보강재는 해저면에서 인양 시 설치되었던 부재이다.



<그림 4 이동노선 평면 [2]>

세월호는 2017년 4월 11일부터 목포신항만 철재 부두에 임시 거치되었고, 2018년 5월 10일 [그림 1]과 같이 직립되어 (가칭)국립세월호생명기억관 부지까지 선체 반입 안이 [그림 4]와 같이 계획되어 있다. 그리고 세월호 선체 보존·처리 계획서의 최종 주요 내용은 다음과 같다.[2]

- 파손된 선체 상태를 최대한 그대로 보존
- 선체의 공간을 교육의 장, 기억의 장, 추모의 장, 치유의 장 등으로 활용
- 선체 내부 활용을 위한 근거 법령인 “건축법[3]”의 아래 조항을 근거로 선박으로 간주하여 ‘선박안전법’으로 검토되었음

· 제6조의2(특수구조 건축물의 특례) 건축물의 구조, 재료, 형식, 공법 등이 특수한 대통령령으로 정하는 건축물(이하 “특수구조 건축물”이라 한다)은 ~ 제21조부터 제25조까지, ~ 제68조 및 제84조를 적용할 때 대통령령으로 정하는 바에 따라 강화 또는 변경하여 적용할 수 있다. <개정 2019. 4. 23., 2019. 4. 30.>

· 제23조(건축물의 설계) ① 제11조 제1항에 따라 건축허가를 받아야 하거나 제14조 제1항에 따라 건축신고를 하여야 하는 건축물 또는 「주택법」제66조 제1항 또는 제2항에 따른 리모델링을 하는 건축물의 건축 등을 위한 설계는 건축사가 아니면 할 수 없다. ④ 국토교통부장관이 국토교통부령으로 정하는 바에 따라 작성하거나 인정하는 표준설계도서나 특수한 공법을 적용한 설계도서에 따라 건축물을 건축하는 경우에는 제1항을 적용하지 아니한다. <개정 2013. 3. 23.>

2.2 선체 기본설계 주요 사항

세월호는 로로여객선(Ro-Ro passenger ship)으로 일본 나가사키의 Hayashikane 조선소에서 1994년 4월 1일 진수된 운항선을 (주) 청해진해운이 2012년 10월 8일 도입하여 개조하였으며[4], 현재 거치된 상태의 기본 사양(Principal dimension)은 다음과 같다[5].

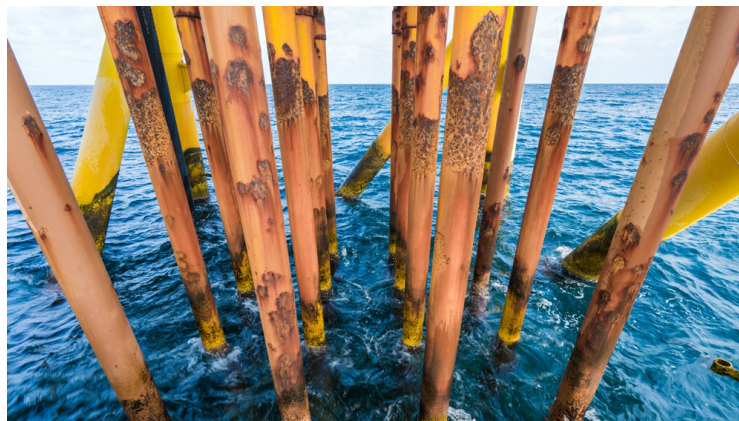
- 전장 ; 145.60 m / 선장 ; 132.00 m
- 형폭 ; 22.00 m
- 형심(건현) ; 7.67 m / 형심(구조) ; 14.00 m
- 흘수(기본) ; 6.25 m / 흘수(구조) ; 6.40 m

그리고 2017년 인양되어 대기에 노출된 상태로 유지되고 있기에 통상 년 0.3mm 부식(Corrosion)이 발생하며, 국부적인 과도한 진행도 감안하여야 한다. 따라서 구조 판재와 보강재 연결부에 대한 세심한 사전 검토가 필요하며, 현장 공기를 포함한 일정이 작성되었다.

<표 4 선체처리 구조설계 공정>

공정	공기(단위 : 개월)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
선행 공정									
도면	중앙횡단면도								
	강재배치도								
	외판전개도								
계산서	중앙횡단면도								
	강재배치도와 외판전개도								
구조해석									
선각물량추정									
발주처/선급 검토									
발주처 추가 협의									
후행 공정 보조									

선행 공정인 3D 스캐닝(3D Scanning)이 포함된 [표 4]가 검토되어, 해안가 영구 거처 장소인 ‘(가칭)국립세월호생명기념관’으로 개관된다. 이를 위해 먼저 선박의 유지보수 측면에서 부식 여유치(Corrosion addition)에 대한 고려가 우선되어야 한다.



<그림 5 해풍에 의한 부식 예시 (출처 : 인터넷)>

[그림 5]와 같이 부식에 따른 구조 부재 용접 결합부 용착량 감소와 복원성 계산서(Trim & stability booklet)의 실제정수굽힘모멘트 (Actual still water bending moment) 변화를 감안하여, 이행사업 계약 단계에서 발주처와 보강 일정 및 방안을 협의해야 한다.

<표 5 설계 굽힘모멘트(Designed bending moment)>

경우	설계 굽힘 모멘트
표준선	- 대양 항해, 항내 및 평형수 교체 조건 중, 최대 발생 예상 수치에 조선소 실적 감안함 - 공통구조규칙(Common structural rules)의 최대설계정수굽힘모멘트(Maximum design S.W.B.M.)는 최대실제정수굽힘모멘트의 105%를 넘을 필요 없음
특이선1	- 발주처에서 지정한 최대설계정수굽힘모멘트는 건조사양서(SPEC)에 명기하며, 표준선 대비 추가분(Extra cost)은 계약 시 선가에 반영됨
특이선2	- 부유식원유저장시설(Floating Petroleum & Storage Offloading) 등은 건조 후 출항하여 심해에서 원유 채굴하는 동안, 주기적인 선대 입항 선거 검사(Dry-docking inspection) 불가한 해양 구조물임 - 따라서, 계약 시 발주처에서 설치해역 상황을 감안하여 최대설계정수 및 파랑굽힘모멘트 결정하며, 통상 부식여유치도 상향하여 설정됨 - 이에 따라, 초기에 선각 물량 상승분을 정확히 예측하여 재화중량 손실 없도록 기본설계 수행되어야 함

대형선 기본 설계 시 출발점인 [표 5]의 굽힘모멘트에 대해 기술하였으며, 세월호는 ‘특이선 2’에 준해 검토하였다.



<그림 6 123K Shuttle tanker (출처 : 인터넷)>

‘특이선 2’ 사례로 [그림 6]은 북해 유정에 장기간 고정된 부유식원유저장시설과 하역지의 빙해 항로를 주기적으로 운항하며 원유 수송하는 셔틀탱커(Shuttle tanker) 광경이고, 일반 원유운반선에 다음의 기능이 대표적으로 추가된다.

- 채굴된 원유 적하역 기능의 선수부하역장치(Bow loading system)
- 부유식원유저장시설로부터 채굴 원유 이송 공정 중, 위치 유지를 위한 전방위 추진기(Azimuth thruster)

<표 6 123K Shuttle tanker 기본 사양>

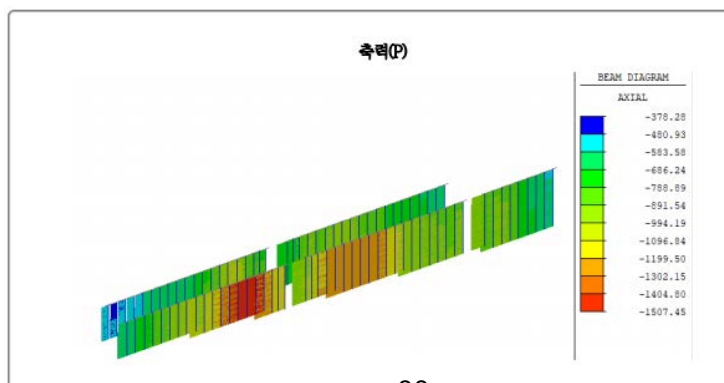
선주	국적	톤수	선속	인도일
선명	선급	선장	형폭	형심
KNOT	NORWAY	123K	15.1knot	2013.08.05
HILDA KNUITSEN	DNV	247.59m	46.0m	22.7m
				15.0m

[그림 6] 셔틀탱커는 [표 6] 사양으로 북극 한기 상황을 고려하여 선수부하역장치까지의 갑판 통행로가 밀폐 방한 구조화되어, 0.4L 연속하는 종통 부재로 설계되었다. 특히 헬리덱(Helideck)도 일부 갑판 통행로 구조화되어, 종강도(Hull girder strength)와 피로 강도(Fatigue strength)에 민감한 영향 받음을 주의하면서 증가 물량이 최소화되도록 설계되었다.

<표 7 설계 하중 조건>

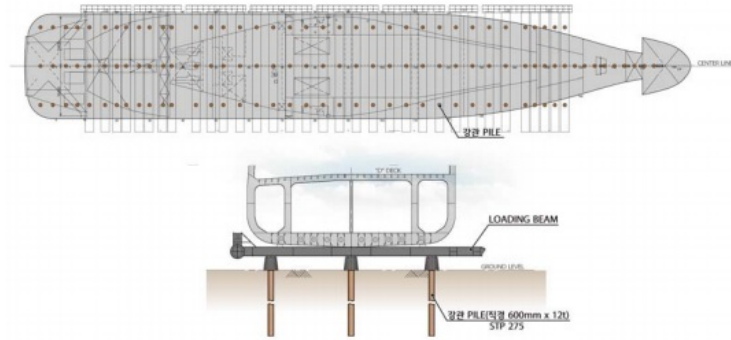
조건		설계 굽힘 모멘트
운항	대양	- 운항 상태에서 평형수창과 화물창 하중 중 최대치에 조선소 여유치 가중됨 - 파랑 하중은 선급 규정
	항만	- 운항 상태에서 평형수창과 화물창 하중 중 최대치에 조선소 여유치 가중되며, 파랑하중은 없음
평형수교체		- 선적항만 해역수의 규정된 미생물 처리된 평형수 입출수 과정에서 발생할 수 있는 가상의 인적 실수 상황(Human error)임

두 번째로 해상 운항하지는 않지만, 이동 및 최종적으로 (가칭)국립세월호생명기억관으로 기능함으로, [표 7]을 참고하여 항만 운항 조건의 안전을 감안하여 보수적으로 현재 구조 부재의 적합성 여부를 검토한다.



<그림 7 하부 강관 PILE 부재력도(축력) [2]>

세월호는 30여 년 전의 일본 건조선이기에 공통구조규칙(Comman structural rules)의 선급 규정(Prescriptive rule check)으로 재설계 후, 한국선급의 전후처리기(Modeller) Seatrust와 구조계산기(Solver) Nastran을 통한 구조해석(Fine element mesh analysis) 검증으로 구조안정성을 확인한다. 참고로 [그림 7]의 신항만 거치된 상황의 기존 간이구조해석 내역을 첨부하였다.



<그림 8 강관 파일 시공 및 최종 거치상태 [2]>

다음으로 [그림 8]과 같이 매립지에 설치된 강관 상부의 최종 보강된 선체 전단 하중에 대하여 좌굴(Buckling)되지 않도록, 충분한 안전도(Safety factor)의 반목 배치(Docking plan) 확인이 필요하다. 그리고 선행공정으로 강재의 부식 및 확산을 막기 위해 부식 조건이 발생하지 않도록 조치해야 한다. 산소, 수분 및 전해질 등의 존재로부터 완벽하게 차단하기 위한 밀폐 구조와, 적절한 도장이 시공되어야 한다. 세월호는 오랜 기간 해저면에 침수되어 선체 표면에 염분이 고착되어 있다. 따라서 밀착된 염분을 제거하기 위해 고압수로 세척해야 하지만, 접착력이 강한 염분을 완벽하게 세척하기는 어렵다. 또한 구조적으로 현장 공정 접근이 어려운 선체 내부에도 염분이 존재한다. 이 때문에 강재 표면의 도장 전처리가 중요하며, Blasting 또는 Power Tool 등 조치할 수 있는 전체 일정을 고려하여야 한다.



<그림 9 평형수창(Ballast tank) 부식 예시 (출처:Amtech consultants)>

특히 [그림 9]와 같이 파공(Hole), 모서리 등의 도막 형성이 취약한 구간에서부터 부식이 발생함을 감안하여, 도장 시공은 사전에 면밀히 검토되어야 한다.

3. 결론

'세월호 선체처리계획 이행사업 기초자료 조사'의 선체 부문 견적을 진행하며, 대형 선박의 선각 개조 설계에 대한 전반적인 검토를 수행하였다.



<그림 10 美 9·11 희생자 사진 [6]>

아울러 [그림 10] 해외 재난 대처 사례를 되새기며, 글을 맺는다.

“9·11 추모 박물관을 찾는 방문객들이 파운데이션홀에 위치한 일명 '마지막 철제빔(last column)'을 바라보고 있다. '마지막 철제빔'은 9개월간 진행된 9·11 쌍둥이 빌딩 테러 현장 복구 및 수습 작업 마지막 날에 철거됐다. 현장에 투입된 복구 인력들이 희생자를 애도하는 글과 카드 등을 남겼다. 오른쪽으로 보이는 벽은 쌍둥이 빌딩 기초를 세울 때 맨해튼 서쪽 허드슨 강물이 스며드는 것을 방지하기 위해 쌓은 콘크리트 제방으로 그라운드 제로에 들어선 추모 박물관 벽으로 그대로 활용했다.”

참 고 문 헌

- [1] 나라장터, [2023년 세월호 선체처리계획 이행사업 기본계획], <https://www.g2b.go.kr/>
- [2] 해양수산부, [세월호 선체처리계획 이행사업 기본계획 용역 보고서], <https://www.mof.go.kr/>
- [3] 국토교통부, [건축법], <https://www.moleg.go.kr/>
- [4] 조상래, [8년여의 세월호 사고원인 규명 활동 결과의 정리와 분석], <https://www.snak.or.kr/>
- [5] 세월호후속대책추진단, [세월호 선체처리계획 이행사업 기본계획 수립 설계도], <https://www.mof.go.kr/>
- [6] 박봉권, [미 9·11 희생자 3천명 사진...옛가락처럼 흰 철제빔도], <https://www.mk.co.kr/>