

보이론을 이용한 예인 및 계류설비 보강재에 작용하는 응력의 계산기법

신찬호, 변상호 (한국선급)

1. 서론

예인 및 계류에 사용되는 설비의 강도에 대해서는 기국정부의 의장수 산정법 또는 IACS Unified Requirement(이하 UR) A1 에 따라 선박의 횡단면, 측면적의 크기에 따른 의장수 등급을 산정하여 해당 선박에 요구되는 앵커, 앵커 체인, 예인 로프 및 계류 로프의 강도를 결정하고 있다. 또한, 예인/계류 로프의 선박의 고박점이 되는 블라드, 로프의 각도를 바꾸어 주는 chock, fairleader, stand roller 등도 예인/계류 로프의 절단강도를 견딜 수 있는 안전사용하중의 설비가 배치되게 된다.

선박의 갑판에 설비가 배치될 경우, 해당설비에 가해지는 하중을 고려하여 갑판하부에 적절한 보강구조를 설계하게 되는데, 이런 보강구조에 대해서 선급규칙에서는 명확한 규정이 없었고 주로 실적선 자료를 바탕으로 한 조선소 또는 설계사의 경험적 설계방법에 의존하여 왔다. 예인 및 계류작업은 선박의 일생동안 지속적으로 수행하는 작업이고, 예인 및 계류와 관련된 크고 작은 사고들이 보고됨에 따라 설비 및 선체구조의 안전성을 검증해야 할 필요성은 선사 등에 의해 지속적으로 제기되어 왔다.

예인과 계류작업의 안전성을 확보하기 위한 필요성에 따라 IMO에서는 SOLAS II-1 Reg.3-8 'Towing and mooring equipment'를 새로 제정하고 IMO 산하의 Maritime Safety Committee는 2005년 5월의 80차 회의에서 MSC/ Circ.1175 'Guidance on

Shipboard Towing and Mooring Equipment'를 SOLAS II-1 Reg.3-8의 적용을 위한 권고사항으로 채택하였다. 동 Circular에는 예인 및 계류에 사용되는 설비의 강도뿐만 아니라 하부보강구조에 대해서도 허용응력을 규정하고 있다. IACS에서는 MSC/Circ.1175를 바탕으로 해서 강제부식추가, 갑판상 화물의 측면적 산입과 관련한 내용을 추가하여 IACS UR A2 를 제정하였고 IACS선급의 입급선에 대해서 적용하도록 하고 있다.

예인 및 계류설비에 가해지는 하중의 크기 및 방향은 UR A2에서 명확히 규정하고 있고, 설비 자체의 안전성 검증과 관련해서는 안전사용하중을 규정한 국제산업규격 또는 기국정부가 인정하는 규격을 인정하고 있으므로 설계에 무리가 없다. 반면 갑판하부의 보강구조의 안전성 검증과 관련해서, UR A2에서 허용응력은 규정하고 있으나, 각 구조부재에 발생하는 응력의 크기를 계산할 방법은 구체적으로 제시되어 있지 않다. 여러 가지 계산법 중에 구조부재에 발생하는 응력의 크기를 계산할 수 있는 가장 확실한 방법은 직접구조해석을 수행하는 것이다. 실제로 국내 중대형 조선소의 경우, 자사의 표준적인 선박에 대해서 인력과 시간을 투입하여 직접구조해석을 통해 하부보강구조의 안전성을 확인하고 있다. 하부보강구조의 안전성을 검토해야 하는 선급단체의 입장에서는 직접구조해석 결과를 통해 안전성이 검증되기를 희망하며, 필요 이상의 지나친

보강을 방지하기 위해서라도 직접구조해석을 수행하도록 유도하고 있다.

그러나, 모든 선박에 대해서 직접구조해석을 수행하려면 많은 시간과 노력을 투자해야 하고, 경우에 따라서는 직접구조해석의 경험이 부족할 수도 있으며 결국 외부업체에 의뢰해야 하는 경우가 발생하므로 설계자들이 시간적, 금전적 지출의 어려움을 호소하는 경우가 많다. 이에 따라 직접구조해석에 대한 대안으로 구조부재에 발생하는 응력을 수계산으로 구해내기 위한 시도는 설계자 및 검사원들에 의해 지속적으로 시도되어 왔으나, 종/횡의 추가보강재가 인접하는 기존의 갑판구조와 연결되는 복잡한 구조에 있어서 역학적 직관을 이용한 수계산만으로 접근해서는 만족스러운 결과를 얻기가 어렵다. 또한, 역학 계산결과의 검증이 반드시 수반되어야 하는데, 이를 위해서는 결국 직접구조해석으로 돌아갈 수 밖에 없게 되는 난점이 있다. 즉, 수계산만으로는 충분히 신뢰할 만한 응력계산의 결과를 얻기가 어렵다.

본 연구를 통하여 보이론을 이용하여 하부보강구조의 응력계산식 및 하부보강재의 강도요구식을 유도하고, 실적선을 바탕으로 한 가상선체에 대한 직접구조해석을 수행하여 유도한 응력계산식 및 하부보강재의 강도요구식의 유효성을 검증하고자 하였다.

2. 하중 및 경계조건의 특성

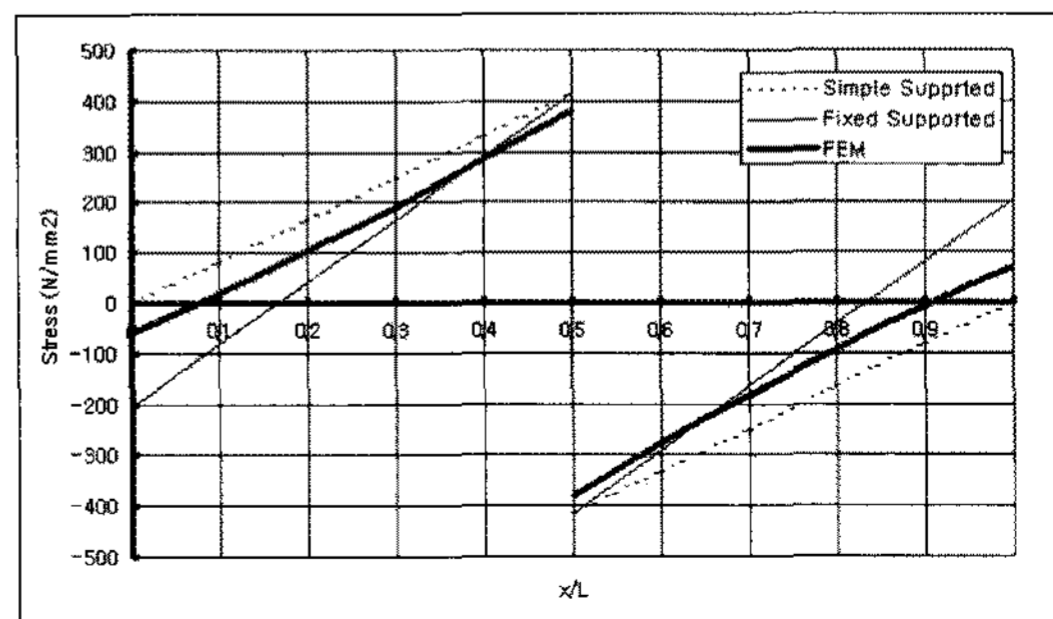
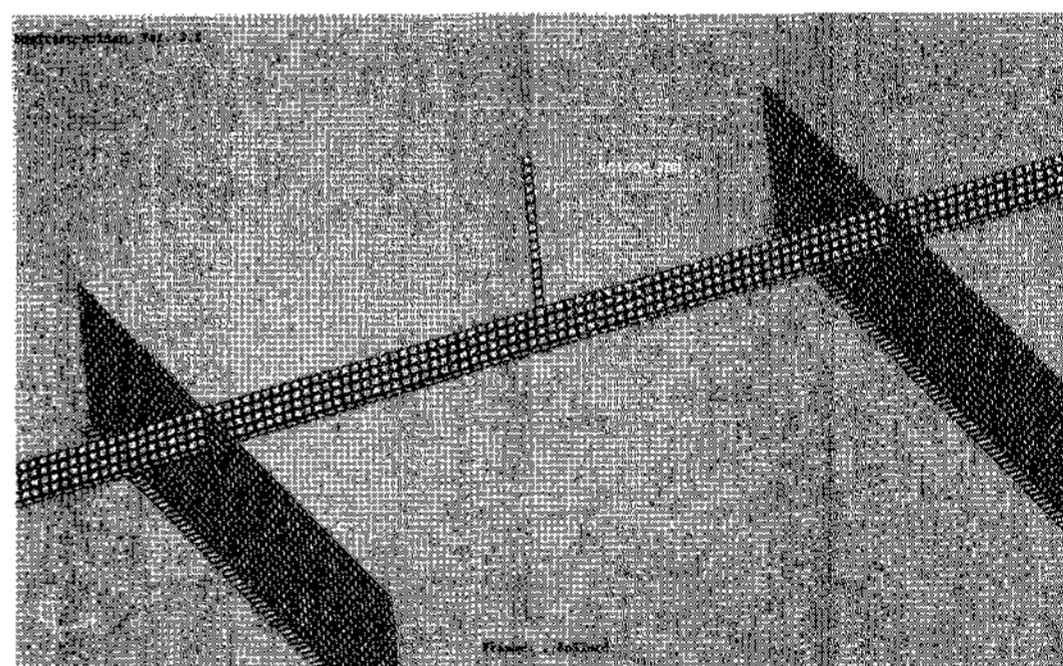
선급규칙에서는 범선압력을 받는 일반보강재에 대해서 양단고정지지보로 가정하고 단부에서 발생하는 최대굽힘응력을 기준으로 보강재의 단면계수요구식을 규정하고 있다. 반면 계류설비 보강재에는 모멘트 형태의 하중이 전달된다. 아래와 같이 span의 중앙에 모멘트를 가하고 구조해석을 수행하여 양단단순지지보 또는 양단고정지지보 경계조건의 역학계산결과와 응력을 비교하였는데, 어느쪽 경계조건으로도 FEM 해석결과와 유사한 응력결과를 얻

을 수 없다.

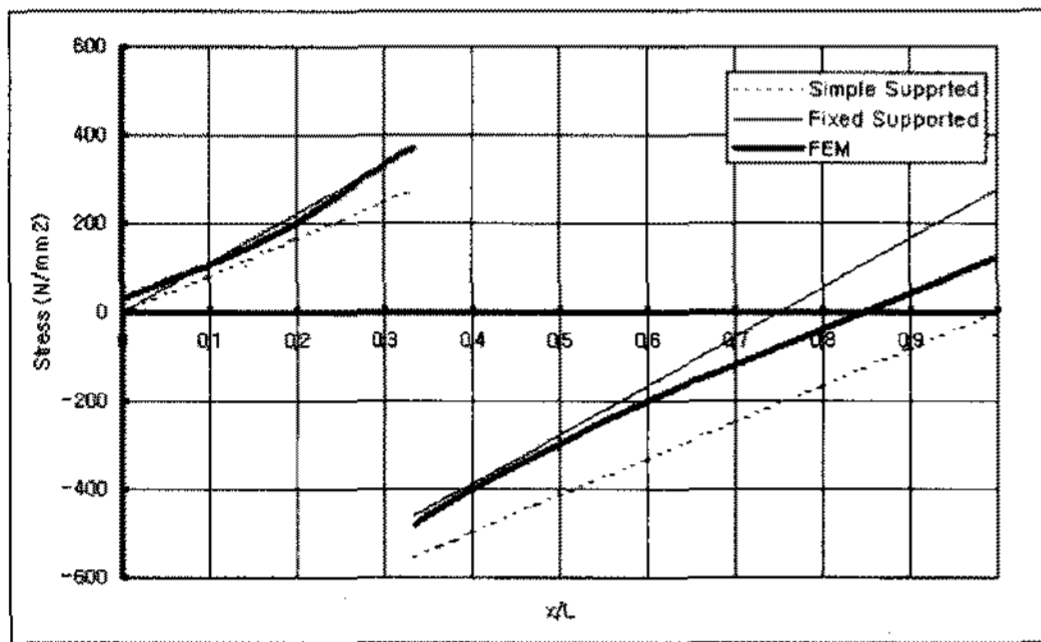
다만 응력 curve 의 기울기는 simple supported 경계조건이 잘 반영하고 있고, 0.3L~0.7L 구간의 응력값은 fixed supported 조건이 FEM결과와 대체로 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 내용을 종합하여 simple supported 조건보다는 fixed supported조건이 중앙구간에서 실제응력값을 잘 유추하는 것으로 판단하였다.

아래 그림에서 양단고정지지보로 가정한 경우, span의 중앙부를 벗어난 범위에서는 응력계산의 오차가 커지는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 계류설비의 실제 위치에 관계없이 가장 큰 응력이 발생하는 span상의 위치에 굽힘모멘트가 작용하는 것으로 가정하고 응력식을 유도하여 이를 기준으로 하부보강구조를 설계한다면 가장 안전한 접근이 될 것이다.

span상 임의의 지점에 굽힘모멘트를 가하는 양단고정지지보에서, 가장 큰 굽힘응력을 유발하는 경



우는 굽힘모멘트가 span(L)/3 위치에 가해진 경우이다. 이를 다시 구조해석결과와 비교해 보면 다음과 같다.

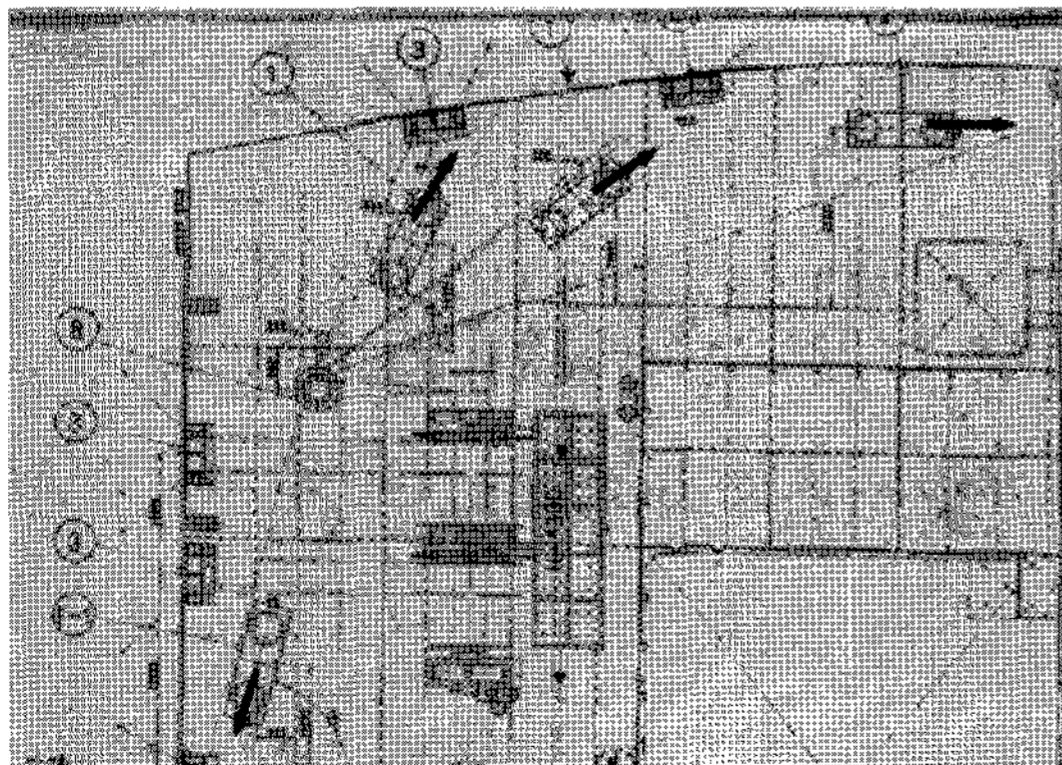


상기와 같은 내용을 종합하여 양단의 지지조건은 FEM결과와 비교적 잘 일치하는 양단고정지지보를 적용하였고, 양단고정지지보일 때 최대굽힘응력이 발생하는 L/3 지점에 굽힘모멘트가 작용하는 것으로 가정하고, 계류설비 하부보강재에 작용하는 응력을 계류설비별로 각각 계산하였다.

3. 계류설비 하부보강재에 작용하는 응력계산

(1) 볼라드

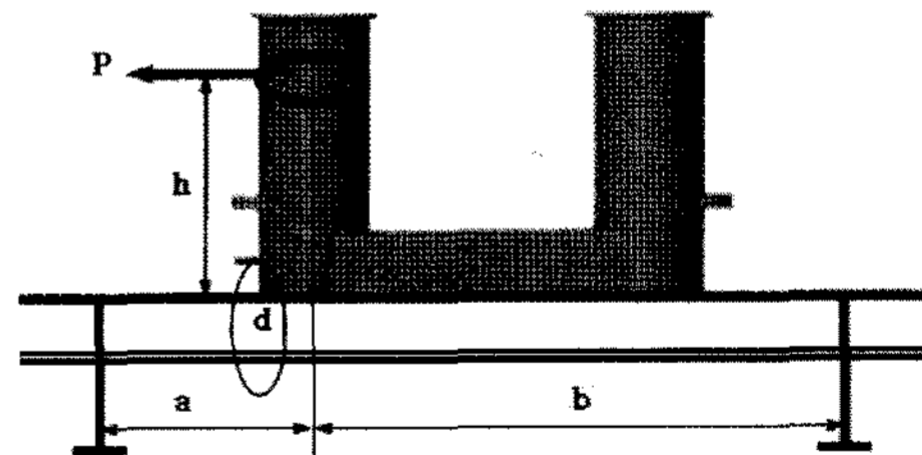
선박에 사용되는 bollard는 chock, fair leader 또는 stand roller 등과 mooring rope로 연결되어 사용되므로 bollard에 부가되는 하중의 방향은 chock, fair



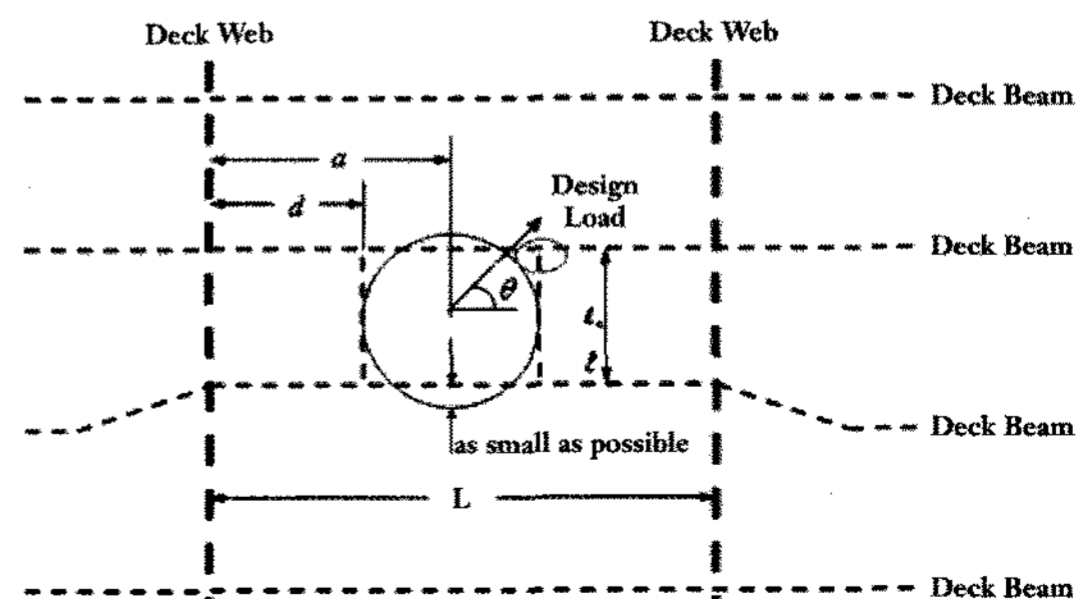
leader 또는 stand roller와의 연결방향이 된다. 볼라드의 긴 변이 하중의 방향과 평행하게 배치되는 것이 볼라드 자체 및 보강구조의 강도면에서 가장 안정적이므로 일반적으로 이를 반영하여 설계된다. 따라서 하중의 방향은 상기 그림과 같이 bollard의 긴 변의 방향으로 가정하였다.

하부구조와 볼라드의 연결상태, 즉 볼라드를 지지하는 갑판보의 방향과 bollard의 긴변의 방향(하중의 방향)에 따라 아래 3가지 배치로 분류하여 굽힘응력식과 전단응력식을 유도하였고 최대굽힘응력은 볼라드의 seat가 끝나는 'd' 지점에서 발생함을 알 수 있다.

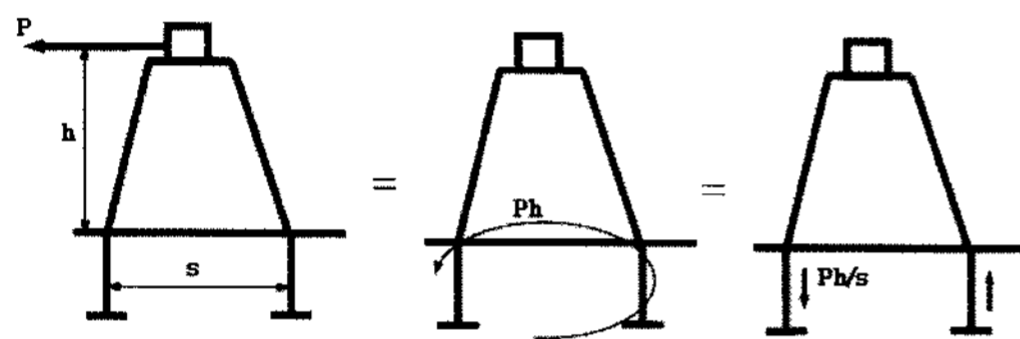
- Longitudinal Bollard : 볼라드 긴변이 갑판보와 평행한 경우
- Transverse Bollard : 볼라드 긴변이 갑판보와 수직인 경우
- Diagonal Bollard : 볼라드 긴변이 갑판보와 0~90° 각도인 경우



(2) 스탠드 롤러



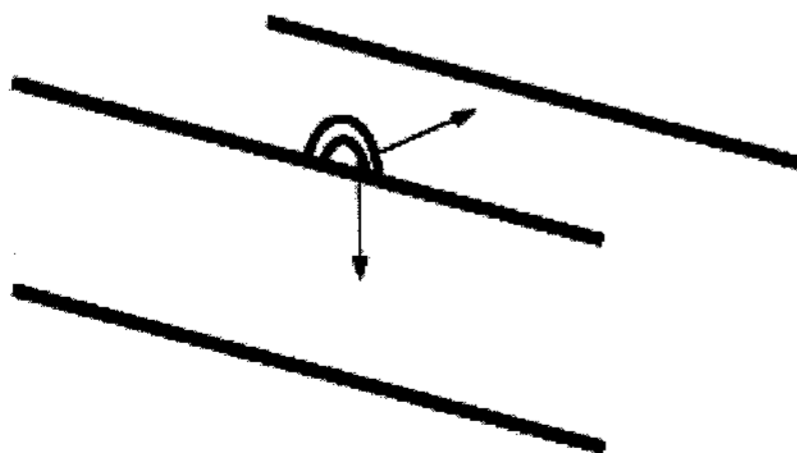
상기 그림과 같은 표준보강도에서 하중이 deck beam과 평행한 경우와 수직인 경우의 굽힘응력을 구해보면 두 경우 모두 deck beam과 carling의 교점 부근에서 deck beam과 나란한 방향의 최대굽힘응력이 발생한다. 따라서 경사진 하중이 주어지는 경우에는 하중의 수평, 수직 성분별로 굽힘응력을 별도로 계산하여 이를 합산하여 전체굽힘응력을 구할 수 있다. 또한 전단응력도 하중의 수직/수평 성분으로 분리하여 구한 후, 이를 합산하여 전체전단응력을 구하였다.



상기 그림과 같이 하중이 deck beam과 수직인 경우의 굽힘응력을 구하기 위해서 스탠드 롤러에 작용하는 힘을 갑판하 보강구조에 모멘트로 전달되고 보강재에 작용하는 짝전단력을 구하여 굽힘응력 및 전단응력을 구하였다.

(3) Chock & Fair Leader

chock 등의 하부보강구조 설계에 대해서는 아래 그림과 같이 선박의 폭방향과 수직방향으로 mooring rope가 배치된 상황이 worst case가 되며 이 경우 fleet angle은 90° 이고 $F_y = F_z = \text{Design Load}$ 가 된다. 또한, F_z 는 chock 또는 fair leader의 중앙부에 작용할 것이므로 2열로 배치된 하부보강재에는 $F_z/2$ 의 하중이 가해진다.



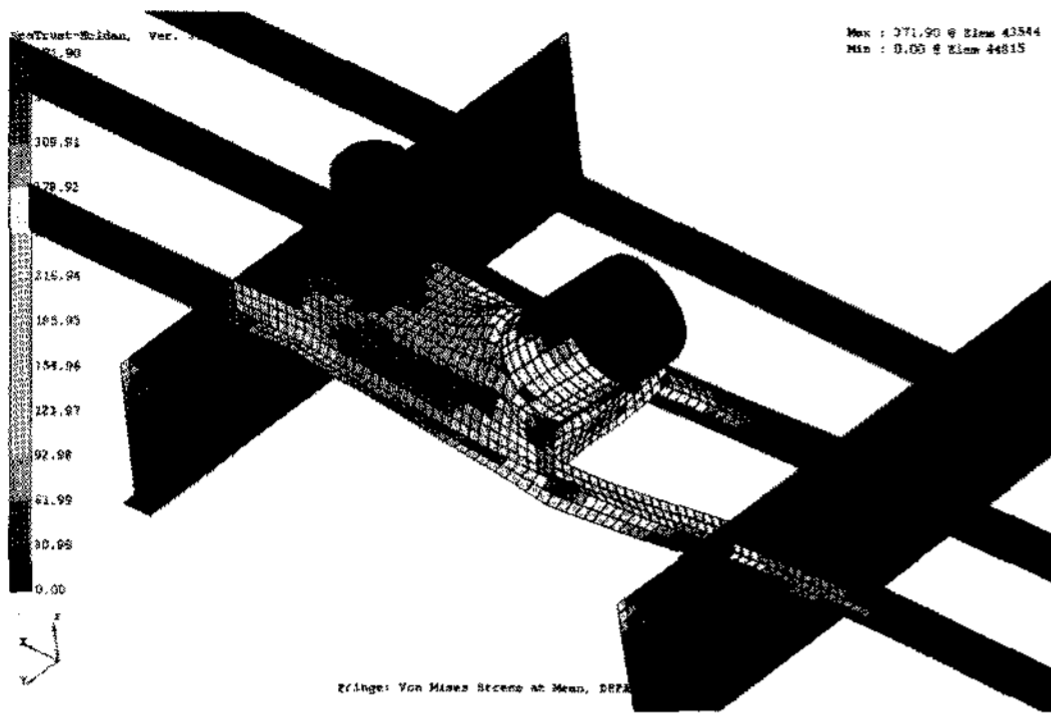
deck longi.(또는 carling)과 side shell longi.(또는 carling)과 연결되는 2열의 ‘ㄱ’자형 carling 배치를 표준으로 할 때, F_z 가 side shell 부근에 작용하는 순수압축문제이므로 하부 carling의 폭과 두께를 이용하여 압축응력을 계산할 수 있다.

4. 구조해석 결과비교

유도한 응력계산식의 검증을 위하여 실적선을 바탕으로 한 아래의 가상선체에 대한 구조해석을 수행하여 굽힘방향의 normal stress와 비교하였다. 비교에 사용된 가상선체의 요목은 아래와 같고 갑판과 보강재는 부식추가를 고려하여 아래 치수에서 각 2mm 감한 순두께, 순단면계수를 구하여 응력을 구하였고, 구조해석모델에서는 각 2mm 감한 순두께로 모델링하였다.

	갑판 두께	갑판보	갑판보 간격	거더 간격
다목적운반선	10	150×90×9(UA)	600	2800
유조선	12	150×100×9(UA)	700	2800
철강운반선	12	250×90×10/15(IA)	700	2800
자동차운반선	12	300×90×13×17(IA)	700	3500
컨테이너선	12	300×90×11×16(IA)	700	3500

각 해석모델은 하부보강구조의 구조형태 및 하중 조건에 따라 deck transverse, deck girder 등의 1차 지지부재의 범위로 이상화하였고, 판 및 보강재의 웹 및 플랜지에 대하여 50×50 mm 크기를 기본으로 한 판요소(shell element)로 모델링하였다. 1차 지지부재는 deck beam 및 하부보강용 carling에 비해 강성이 매우 크므로 1차지지부재 및 외판의 각 절점에서의 변위를 제한하였다. 실제로 선미부 또는 선수부의 갑판구역 전체를 모델링한 구조해석결과를 보면 예인 및 계류설비의 하중에 의한 응력발생의 범위는 대체로 1차지지부재의 범위를 벗어나지 않는 결과를 보인다.



응력결과비교(Bollard, 강도요구식의 계산결과 - 구조해석결과)

		Longi. B.	Trans. B.	Diago. B.
Tanker	Formula	265	333	297
	FEM Result.	297	382	329
	Formula/FEM	0.89	0.87	0.90
MPC	Formula	231	241	292
	FEM Result.	233	264	334
	Formula/FEM	0.99	0.91	0.87
PPC	Formula	210	225	
	FEM Result.	274	249	
	Formula/FEM	0.77	0.90	
Steel Carrier	Formula		265	
	FEM Result.		298	
	Formula/FEM		0.89	
Container Ship	Formula	285	310	
	FEM Result.	359	394	
	Formula/FEM	0.79	0.79	

응력결과비교(Stand roller, 강도요구식의 계산결과 - 구조해석결과)

		Longi. Load Beam	Trans. Load Beam	Diago. Load Beam
Small Tanker	Formula	71	311	268
	FEM Result.	92	406	346
	Formula/FEM	0.77	0.76	0.77
MPC	Formula	90	397	221
	FEM Result.	112	418	245
	Formula/FEM	0.80	0.95	0.90
PPC	Formula	170	578	519
	FEM Result.	206	682	627
	Formula/FEM	0.83	0.85	0.83

응력결과비교(Chock 등, 강도요구식의 계산결과 - 구조해석결과)

		Carling(σ)
Tanker	Formula	225
	FEM Result.	225
	Formula/FEM	1.00
MPC	Formula	108
	FEM Result.	107
	Formula/FEM	1.00
PPC	Formula	168
	FEM Result.	201
	Formula/FEM	0.84
Container Ship	Formula	227
	FEM Result.	272
	Formula/FEM	0.83

아래의 프로그램이 사용되었다.

- SeaTrust-Holdan version 3.4 for pre/post processor
- MSC.Nastran 2004 for solver

볼라드, 스탠드 롤러, Chock & Fair leader에 대해 유도된 식과 구조해석결과를 비교하였다. 응력식에 의한 응력값은 구조해석 응력값의 77~100% 범위에 분포해 있고 평균적으로 약 90%인 것으로 보인다. 보강재의 face는 2~3열의 element로 분할하였는데, web에 인접한 1개의 element에서만 고응력이 나타나고 자유변쪽의 element에서는 상대적으로 낮은 응력이 나타난다. 보이론을 이용한 응력식에서는 굽힘에 의한 응력이 face의 단면을 따라 균등하게 배분된다는 가정을 하고 있으므로 구조해석 결과에서 상대적으로 큰 응력이 나타나는 것으로 생각된다.

5. 허용응력

IACS UR A2, A 2.2.5 (3)에 따르면, 유한요소해석 또는 적절한 역학적 계산에 의한 응력값이 다음을 넘지 않아야 한다.

- Normal stress: 100% of the specified minimum

yield point;

- Shearing stress: 60% of the specified minimum yield point

상세구조해석결과에 비해 유도된 응력식이 응력을 과소평가하므로 재료의 항복강도의 80%를 허용치로 하였다. 전단응력의 경우 허용치가 항복강도의 60%이므로 보정치 약 80%를 추가 고려하여 항복강도의 50%를 허용응력으로 하였다.

6. 결 언

각 계류설비별로 보강재에 대한 치수요구식은 구조해석 이전단계에서 치수를 개략적으로 결정할 수 있는 지침을 제공하고, 중소형선박에 있어서 구조해석이 불가능한 경우 치수산정을 위한 간이식으로 활용될 수 있을 것이다.

다만 역학적 직관에 의한 수계산 기법으로 접근

할 경우, 필연적으로 구조의 단순화와 여러 가정들을 수반할 수 밖에 없는 한계가 있지만, 가혹한 조건을 반영하도록 하는 보수적인 접근을 통하여 불확실성을 해소하고자 하였다. ⚓

변 상 호 | (사)한국선급 선임검사원



- 1974년생
 - 2008년 충남대 석사
 - 관심분야 : 선체구조
 - 연락처 : 042-869-9422
 - e-mail : shbyun@krs.co.kr
-