

자동차 운반선 이동식 갑판의 Latch 보강 적정설계 연구

나용문[†]·채우기
현대중공업(주) 선체설계1부

Study for Support Structure of Lifiable Car Deck on PCTC

Yongmoon Na[†]·Wooki Chae
Hull Design Dep't 1, Hyundai Heavy Industries, Co. Ltd

Abstract

Now days, the demands of new type hull lines and optimum design in relation with the EEDI (Energy Efficiency Design Index) regulation and eco-friendly high efficiency vessel design are mandatory clauses in Euro financial crises era. Therefore, in correlation with the above, we tried to find the optimum results and revealed the alterations of supporting structure for liftable car deck latch on PCTC. Generally, PCTC (Pure Car & Truck Carrier) design has been performed by 2 pillar space model F. E analysis without vehicle loads on liftable car deck to evaluate the structural adaptability. So, we applied mentioned vehicle loads on pillar and side transverse web on model to compare with not applied model and performed the ultimate strength analysis of improved design for the safety evaluation.

Keywords : PCTC(자동차 운반선), Lifiable Car Deck (이동식 갑판), Latch(이동식 갑판지지 구조물)

1. 서론

최근 그리스 제정 위기 및 유로존 금융 위기로 파급된 급격한 선박 발주 감소 및 선가 하락, EEDI (Energy Efficiency Design Index) 발효를 앞둔 친환경 선박 및 선박유지비를 고려한 고효율 선박의 요구에 따라 모든 선종의 설계에서 새로운 선형과 저 중량 선박 설계의 필요성이 대두되고 있다.

연장선상으로 자동차운반선(Pure Car & Truck Carrier, 이하 PCTC)의 의장장비인 이동식갑판(Lifiable Car Deck) Latch 보강 구조의 강도평가를 통하여 의장장비 업체의 요구사항을 검토하고 대안을 제시, 적정설계의 방안을 마련하고자 하였다.

일반적으로 PCTC 설계시 수행하는 2개 기둥(Two Pillar Space) 간격의 화물창 구조해석에서는 이동식 갑판(Lifiable Car Deck)에 가해진 운송 차량의 하중이 고려된 조건은 생략하고 수행, 중앙 기둥(Pillar) 및 외판 횡 웨브(Side Transverse Web)의 부재치수(Scantling)를 검증하고 있어, 이를 고려한 구조해석으로 주요 부재의 응력상태 변화를 비교하고, 마지막으로 일부 구조의 최종강도해석을 통하여 안전성 평가를 수행하였다.

이번 연구를 통하여, 보강 설계의 개선 방안을 마련하고 구조 안전성 확보에도 노력하였다.

2. 개요

일반적인 PCTC(6500~8000 Unit Class)의 경우에 4개의 이동식 갑판을 배치하여 Main Car Deck 적재차량의 크기에 따라

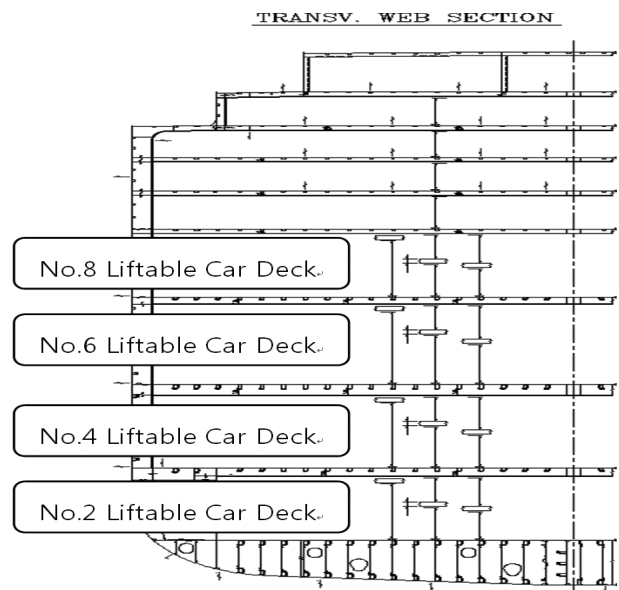


Fig. 1 전형적인 횡 웨브 단면도

[†] 교신저자 : muni28@hhi.co.kr, 010-5656-7893

이동식 갑판의 작업위치(Working Position)를 달리하여 적재하고 있으며, 주지하는 바와 같이 이동식 갑판의 경우는 흔히 승용차 정도의 작은 차량이 탑재되어 운반되고 있다. Fig. 1에 전형적인 횡 웹 단면도 (Transverse Web Section)에 이동식 갑판의 배치를 나타내었다.

이동식 갑판도 Main Car Deck와 같이 운송 차량의 안전한 운송을 위한 Deck Clear Height의 제약이 있으며, Main Car Deck와 같은 처짐 검토가 필요하다. 통상적으로 이동식 갑판의 처짐은 장비 Maker의 검토 및 관리 사항이며, 이의 지지 구조의 고정 부위에 Latch 라고 하는 의장장비에 의해 선체 주부재에 고정된다. Fig. 2는 중앙 기둥에 적용된 Working Position별 Latch 및 설치 형상을 나타내었다.

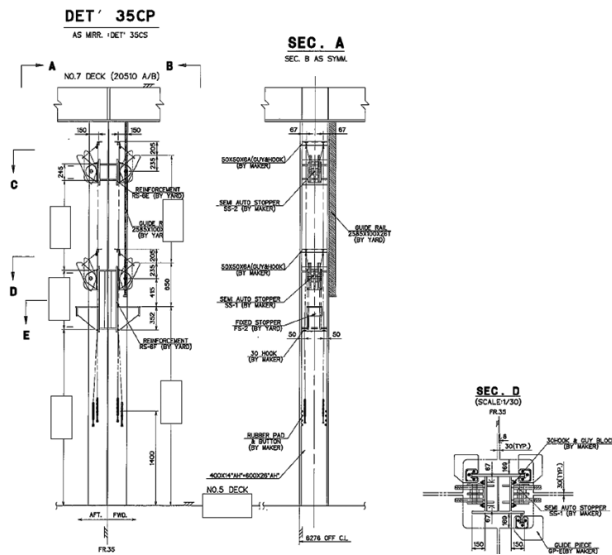


Fig. 2 Working Condition 별 Latch 형상 (Pillar)

Liftable Car Deck는 각 Latch 구조에 Vertical Force와 PCTC 운동성과 관련된 Rotation Force가 존재하게 되며, 보강부재가 Pillar 와 Side Transverse Web에 설치되어 Vertical Force를 받으며, Rotation Force의 경우는 장비 업체(일반적으로 M사, T사, S사 등등)의 고유한 Design에 따라 적용이 되고 있으나, 본 연구에 사용된 S사의 Design에는 별도의 구조를 배치하여 보강하고 있다. 이 보강구조는 Latch 위치와 다른 별도의 위치에 Anti-Rotation Bar를 설치하여 보강하고 있다.

따라서 본 연구에서는 Rotation Force를 고려하지 않았음을 밝혀둔다.

참고사항으로 초기 Maker 도면에는 Latch 보강구조의 두께 20.0 mm Mild steel을 적용한 보강구조를 제시하였으며, 이는 타 조선소에도 적용되었다.

Fig. 3은 실제 호선에 적용된 Liftable Car Deck의 실물사진이며, 상기 사진에서 Pillar에 붙어있는 구조가 Latch이며, 현재 Upper Working Position에 Liftable Car Deck가 Resting되어 있다.



Fig. 3 실제 호선에 적용된 Liftable Car Deck

본 연구에서는 국부 강도 해석, Global 강도 해석, 최종 강도 해석 순으로 진행을 하였으며, 각각의 해석에 사용된 상용 Program 은 KR SeaTrust, MSC Patran/Nastran, Abaqus이다.

3. 국부 강도 해석

국부 강도 해석에 적용된 총 국부해석 부위는 8곳 이며, 각각 4개의 Side Latch와 4개의 Pillar Latch로 구분된다.

M사의 이동식 갑판의 경우는 Lower Working Position에 각각의 Latch 구조를 별도로 적용하지만, S사는 Side Transverse Web의 경우 중구조물의 Latch 구조를 설치하여 시공하고 S사에서 검토를 하기 때문에 본 연구에서는 Pillar에 적용된 Lower Working Position만을 검토하였음.

국부 강도 해석을 위한 Vertical Loading은 Maker 도면에 나타난 각 이동식 갑판의 값 중 가장 큰 값을 Upper Working Position에 적용하였고, Stowed Position의 경우는 각 이동식 갑판의 무게 중 가장 큰 값을 적용하였다. 적절한 국부 강도 평가를 위하여 평가부위의 Mesh Size는 되도록 100mm×100mm를 유지 하였고 경계조건은 2 Pillar Space Model의 끝 부위에 Symmetric 조건을 적용하였으며 Loading Condition은 Table 1과 같이 정하였다.

Fig. 4 과 Fig. 5는 경계 조건과 하중 조건을 나타내었다.

Table 1 Loading Condition

L/C.	No. 2 Deck.		No. 4 Deck.		No. 6 Deck.		No. 8 Deck.	
	AFT.	FWD.	AFT.	FWD.	AFT.	FWD.	AFT.	FWD.
1.	S.	S.	S.	S.	S.	S.	S.	S.
2.	A.	S.	A.	S.	A.	S.	A.	S.
3.	B.	S.	B.	S.	B.	S.	B.	S.
4.	A.	B.	A.	B.	A.	B.	A.	B.

비고) S: Stowed Position, A: Lower Working Position, B: Upper Working Position

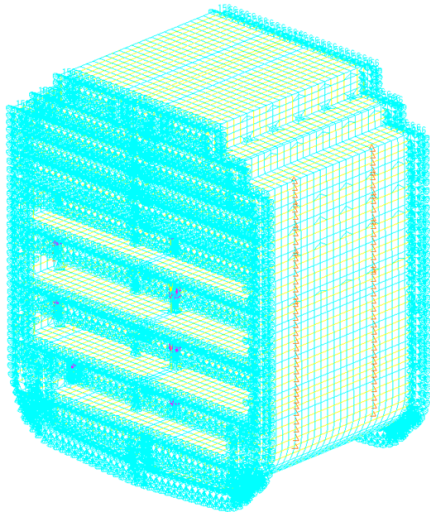


Fig. 4 Boundary Condition

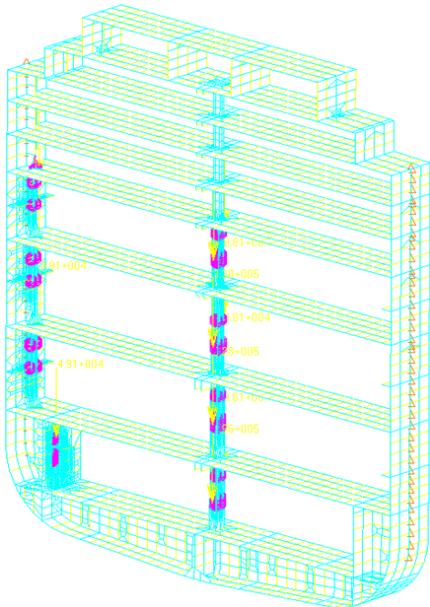


Fig. 5 Loading Condition (L/C 2)

이상과 같은 조건으로 구조해석을 수행하였으며, Table 2와 같은 Stress Level을 보였다. 본 연구에서 사용한 Allowable Stress Level은 Mesh Size와 Maximum Loading의 적용을 고려하여 강재의 Minimum Yield Stress를 적용하였으며, 이 결과는

Table 2 von-Miss Stress in way of Lifiable Car Deck Loading

L/C	No.2 Deck		No.4 Deck		No.6 Deck		No.8 Deck	
	SIDE	PILLAR	SIDE	PILLAR	SIDE	PILLAR	SIDE	PILLAR
1	73.1	27.8	22.9	35.8	18.8	34.7	36.2	33.4
2	36.7	91.9	19.1	117	21.4	148	30	122
3	67.6	103	78.9	135	83.2	153	108	121
4	36.7	89.8	63.7	142	83.2	164	108	129

von-Mises Stress: N/mm²

Latch 보강의 적정 Scantling 으로 조정하여 수행한 결과 값이다. 초기 Maker 도면에서는 Stowed, Lower and Upper Working Position의 Scantling을 같이 통일해서 적용하였으나 개선된 Scantling은 Stowed, Lower and Upper Working Position의 Scantling을 달리하여 적용하였다.

변경된 두께는 Maker Recommendation 20.0mm 대비 많게는 8mm~4mm까지 두께 개선이 가능하였고 또한, 결과에 의하면 더 많은 개선이 가능하나 인접구조의 강재 적용의 통일을 위하여 적정의 결과를 얻어서 실 호선에 적용하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에 Stress Plot을 예로 나타내었다.

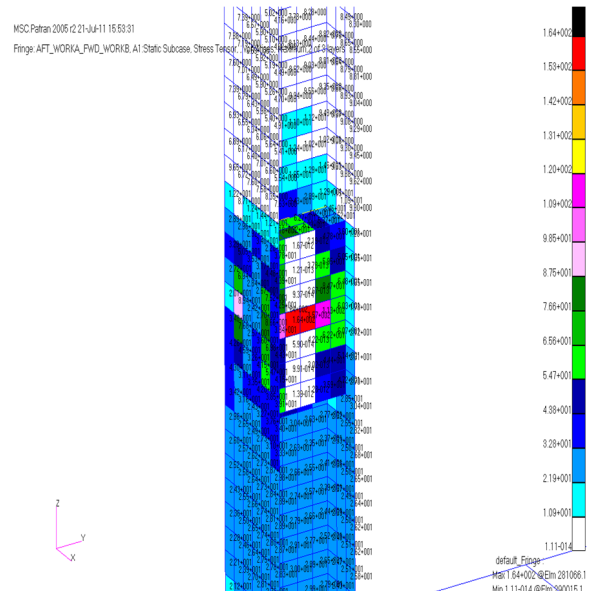


Fig. 6 von-Mises Stress of Pillar

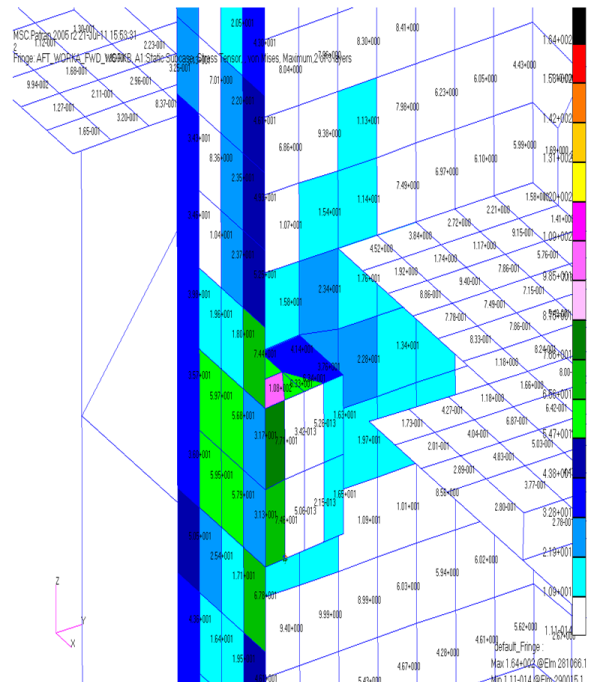


Fig. 7 von-Mises Stress of Side Web

Table 2와 같이 국부 Loading에 의한 Stress는 보강구조를 변경하더라도 그리 높은 수치의 Stress 경향은 나타나지 않았다.

따라서 국부 Model에 Global Loading을 적용하여 중요부위에 Stress 변화가 어떻게 변화하는지 알아보았다.

4. Global 강도 해석

일반적으로 PCTC는 중요부위의 Fatigue Stress가 민감한 설계 인자이기 때문에 Global Model에 Lifiable Car Deck Loading을 적용하여 Fatigue Stress에 취약한 부위의 Stress 변화를 통해 Lifiable Car Deck Loading이 미치는 영향을 알아보고자, 국부 Model에 Global Loading을 적용한 경우와 Global Loading에 Lifiable Car Deck Loading을 더한 경우를 비교하여 Stress의 증감을 알아보았다.

Global Loading은 당사 호선 설계 당시 KR 선급과 협의한 사항대로 적용하여 발표한 “자동차운반선의 구조안정성 평가(1)” (al. 최종일)을 참조 적용하였으며, Model의 Boundary 조건과 Loading Condition은 Table 3과 같다.

국부 Model에 Table 3과 같은 Loading과 Boundary Condition을 적용하면 Allowable Stress를 설정하는데 CSR (Common Structural Rule)과 같이 Mesh Size별 명확한 기준이 없기 때문에 결과의 판단을 위하여 Load Case 별 Stress 값의 비교만을 나타내었다.

Table 3 Loading & Boundary Condition for Hold Analysis

하중 상태	Coord		Displacement			Rotation		
	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z		
1 하부 갑판의 최대 하중 상태	1	0	0	0	0	1	1	
2 상부 갑판의 최대 하중 상태	1	0	0	0	0	1	1	
3 벨리스트 상태	0	0	0	0	0	0	0	
4 횡방향 비대칭 하중	0	1	0	0	0	0	0	
5 종방향 비대칭 하중	0	0	1	0	0	0	0	
6 침수 상태	0	0	0	0	0	0	0	

(Notes) 1 : Fixed 0 : Free

비고) Line L: No.5 Deck End, Line S: Side Shell End

Fig. 8과 Fig. 9는 Loading Case 1의 Global Loading 적용 Case와 Local Loading을 추가한 Case를 같이 보여주고 있다.

상기의 결과를 분석한 결과 Lifiable Car Deck Loading에 Global Loading을 추가하더라도 Latch 보강부재의 Stress의 명확한 변화가 나타나지 않아 Latch 보강의 개선된 구조는 적합함을 알았으며, 중요부위 중에서 Fatigue Strength에 민감한 각 Pillar와 Main Car Deck Connection부위를 비교하고자 한다.

Table 4는 von-Mises Stress의 변화 값을 나타내었으며, Lifiable Car Deck Loading은 Working Position B (Upper Position)의 Loading을 적용하였다.

Table 4의 결과에 따라 적용된 Mesh Size를 고려할 때 증가분의 Stress로는 실적 호선에 계산된 Fatigue Life에 문제를 야기할 정도의 값은 나타나지 않았다. 특히 증가분의 범위에 나타날 수 있는 Fatigue Life의 감소분은 실적 적용 Design 여유가 있었다.

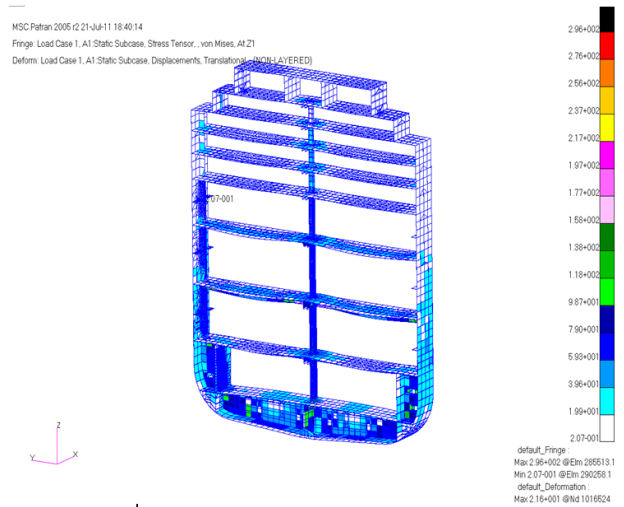


Fig. 8 von-Mises Stress of L/C 1

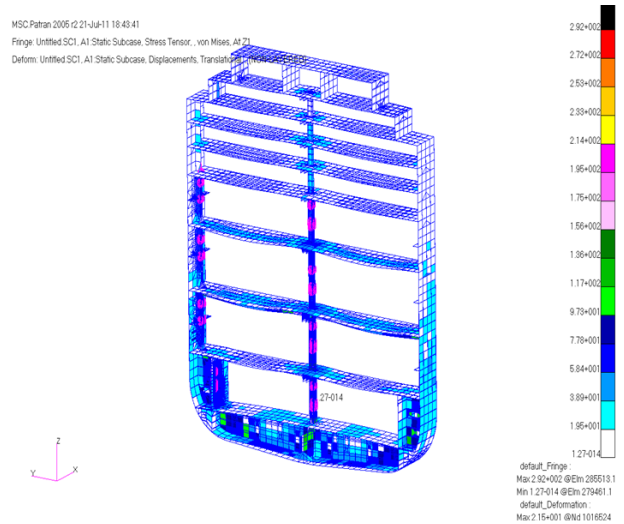


Fig. 9 von-Mises Stress of L/C 1 (inc. Latch Loads)

Table 4 von-Mises Deviation of Two Local Model

L/C	No. 2 Deck		No. 4 Deck		No. 6 Deck		No. 8 Deck	
	DECK	PILLAR	DECK	PILLAR	DECK	PILLAR	DECK	PILLAR
1	+8	0	+7	-4	+4	-2	+4	0
2	+8	-1	+8	-4	+9	-2	+4	-3
3	+5	-1	+7	-4	+5	-2	+4	-3
4	+7	-2	+4	-3	+9	+1	+5	+4
5	+8	-2	+7	-9	+10	-3	+7	-12
6	-7	+2	-7	+4	+8	+1	+4	-3
7	-7	+6	-6	+7	-8	+2	+5	-3

비고) von-Mises의 증감 (N/mm²)

5. 최종 강도 해석

현재 Latch 보강구조의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 Pillar 한 구역을 설정하여 Pillar 상부에 Global Loading에서 가장 큰 값의 Applied Load를 갖는 L/C 4 (Compression Force)와 L/C 7

(Tension force)의 경우에 한하여 최종강도 평가를 해보았다.

구조물의 탄성 거동을 해석하는 경우에는 변위와 외력은 서로 비례 관계에 있다. 이러한 선형 관계로 가정할 수 있는 경우는 재료의 응력-변형을 관계가 선형이고, 하중이 상대적으로 작거나 구조물이 상대적으로 강하여 발생하는 변위가 미소하여 기하학적 형태가 변하지 않는 경우이다.

구조물에 상대적으로 큰 외력이 작용하면 연성(Ductility)이 큰 재료의 경우에는 항복이 일어나고, 취성(Brittle)이 큰 재료의 경우에는 균열이 생겨 응력-변형을 관계가 선형으로 되지 않는다. 이러한 경우 구조물의 거동을 해석하기 위해서는 더 이상 선형-탄소성 해석에 의존할 수 없고 소성 영역을 고려할 수 있는 재료 비선형 해석을 수행해야 한다.

구조물에 상대적으로 큰 변형이 발생하여 구조물의 기하학적 형태가 변하여 변위-변형을 관계가 비선형이 되는 경우, 변형률과 변위 사이의 관계식에서 미소 변형해석에서 무시했던 고차 항을 포함시켜 그 거동을 표현해야 하는 경우, 경계조건이 계속 변화하여 경계 조건을 미리 정할 수 없는 접촉 문제의 경우 등에서는 기하학적 비선형 해석이 필요하게 된다.

비선형 해석의 기본적인 특징은 해를 얻기 위하여 반복 계산 및 증분 처리가 요구 되는데, 구조물에 있어서 비선형 효과는 주로 재료 비선형과 대회전에 기인하여 생긴다. 경계 조건이 변해감에 따라 비선형 효과가 나타나는 경우는 접촉 문제에서 볼 수 있다. 이것들의 거동은 비선형 요소를 이용하여 표현된다.

비선형 효과를 극대화 시키는 것이 가능한 경우는 계산의 효율 측면에서 선형 요소와 비선형 요소를 혼합하여 사용하는 것이 가능하다.

구조물이 대변위와 대회전을 일으키면 기하학적 비선형성을 갖게 된다. 기하학적 비선형성은 두 가지 관점에서 구별되는데, 첫째는 초기 변위와 초기 응력이 존재에 의한 강성의 증가이고, 두 번째는 하중의 변화에 따른 변위의 함수인 추종력 이다.

재료 비선형 효과는 소성, 비선형, 탄성, 크리프(Creep), 점탄성 등 여러 가지의 영역으로 분류될 수 있다. 비선형 해석은 구조물의 거동에 관하여 보다 깊은 이해가 필요하다. 무엇보다도 해석에 고려할 비선형성이 무엇인지를 결정해야 한다. 하중이 작용하고 있는 상태에서 접촉이 일어나 구속 조건이 변하는 경우는 경계 비선형 문제로 분류되어 갭(Gap) 요소 또는 면 접촉 알고리즘이 필요하게 된다. 재료 비선형성은 재료의 특성에 따라 구분지어지나 재료 비선형 효과는 구조물의 치수와 구조물의 경계조건에 관련되어 있기 때문에 대변위에 대한 특별한 제한은 없다. 다만 하중-변위 곡선 상에서 어느 하중 크기에서 위험 영역에 도달하는가를 조사할 필요가 있다.

이번 연구에 적용된 최종강도 평가 방법은 “초대형 유조선 화물창 횡능골 구조의 최종 강도 해석”(al. 나용문)에 따라 평가하였다.

적절한 요소 크기를 결정하기 위해 수렴성 조사 (Convergence test)를 수행해야 하나, 보강 곡판의 최종강도 해석(al. 박형준, 2007) 논문을 참조하여 Mesh Size를 100×100mm의 4 절점 쉘 요소로 하고 물성치는 Perfectly Plastic 적용하고, 하중 증분과 호장법(Arc Length Method)을 적용하였다.

더하여, 최종강도의 결과를 쉽게 파악하기 위하여 Abaqus Program에서 RIKS Method로 계산시 제공되는 LPF (Load Proportionality Factor)를 이용하여 최종강도 평가를 하였다.

Fig. 10은 L/C 4와 L/C 7의 Loading & Boundary Condition 을 나타내었으며, Fig. 11~Fig. 14는 von-Mises Plot과 LPF Graph 을 나타내었다.

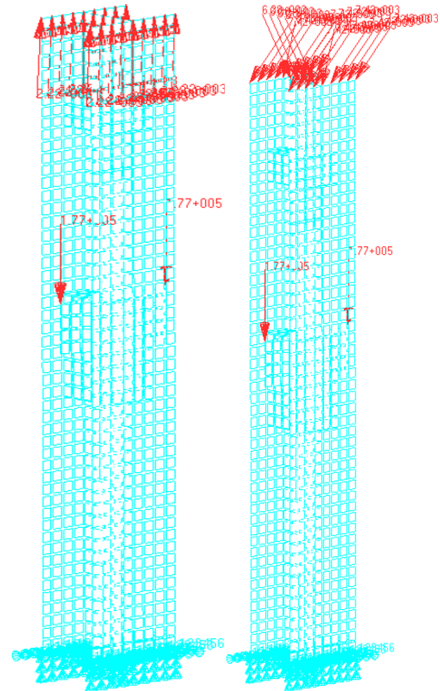


Fig. 10 L/C 4 Condition & L/C 7 Condition

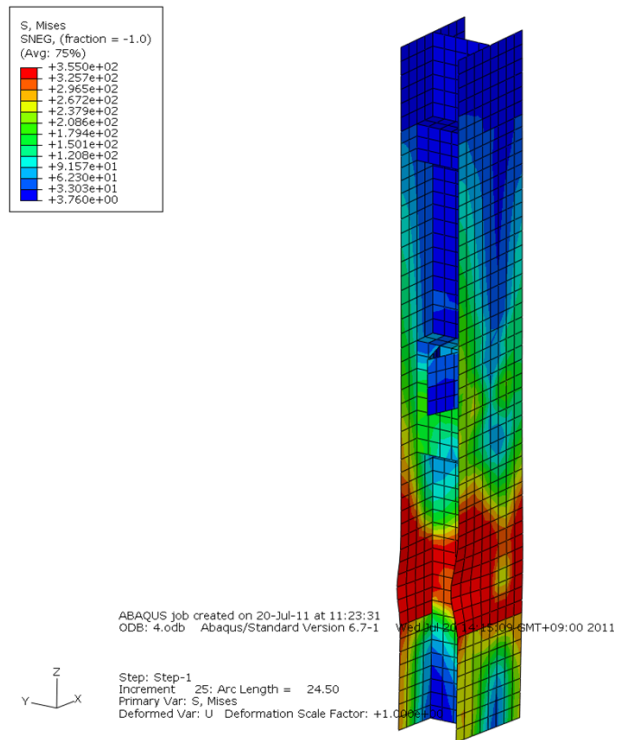


Fig. 11 Von-Mises Plot of L/C 4

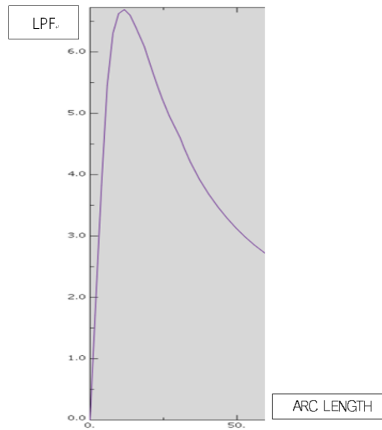


Fig. 12 LPF Graph of L/C 4

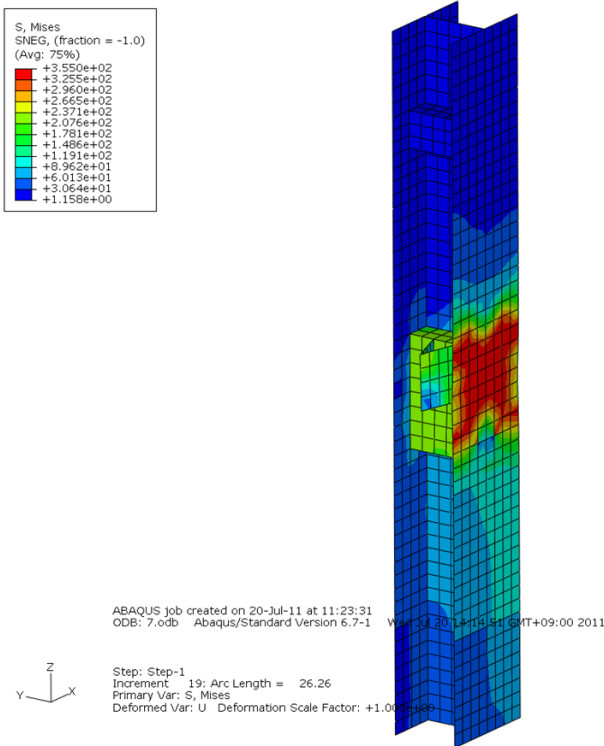


Fig. 13 Von-Mises Plot of L/C 7

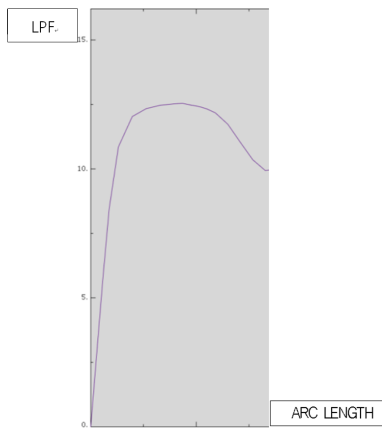


Fig. 14 LPF Graph of L/C 7

압축응력(L/C 4)의 경우는 LPF를 가지고 약식 평가 했을 때 두께단차 부위에서 주어진 Compression Loading에 약 6.5배의 최종강도를 가지고 있는 것으로 볼 수 있으며, Fig. 12에 나타낸 것과 같이 전형적인 Compression Graph를 보여주고 있다.

인장응력(L/C 7)의 경우는 Lifiable Car Deck Latch 보강구조와 인접한 Pillar Face Plate 부위에 주어진 Tension Loading에 약 10배 이상의 최종강도를 가지고 있는 것으로 판단되며, Fig. 12에 나타낸 것과 같이 전형적인 Tension Graph를 보여주고 있다.

물론 Pillar 부위의 최종강도 평가만으로 Latch 보강구조의 안정성 여부를 판단하는 것이 무리일수도 있으나 Latch 주위의 Stress 분포가 Pillar 부위에서 가장 높게 나타나므로 본 연구의 가치로는 타당하다 할 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통하여 PCTC Lifiable Car Deck의 Loading을 고려한 Latch 보강 Scantling을 평가하였으며, Lifiable Car Deck Loading을 화물창 구조 해석에 적용 수행하여 지금까지 적용되어 온 구조해석의 문제점 유무를 판단하였다.

또한 최종강도 해석을 통하여 어느 정도의 안정성을 가지고 있는지 알아보았다.

참고 문헌

최종일, 2011, “자동차운반선(PCTC)의 구조안전성 평가 (1)”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 7-11.
 나용문, 2011, “초대형 유조선 화물창 횡능골 구조의 최종 강도 해석”, 공학석사 학위 논문, 울산대학교 자동차선박 기술대학원.
 ABAQUS, 2004, ABAQUS/Standard User's Manual, Standard 6,4-1

