

갑판지지 웹 구조에서의 개구부 상세설계기준 정립

김성찬^{†*}, 이경석^{**}, 송재영^{***}, 김경수^{****}

인하공업전문대학 선박해양시스템과^{*}
대우조선해양(주) 구조설계부^{**}
한국선급엔지니어링(주)^{***}
인하대학교 선박해양공학과^{****}

Detail-design Guidance for the Openings on the Web Structure Supporting
the Deck

Sung-Chan Kim^{†*}, Kyung-Seok Lee^{**}, Jae-Young Song^{***} and Kyung-Su Kim^{****}

Inha Technical College, Ship and Ocean System^{*}
DSME, Dept. of Structure Design^{**}
Korean Register Engineering^{***}
Inha University, Naval Architecture and Ocean Engineering^{****}

Abstract

There are a lot of openings, holes and slots in ship structural members. It is not easy to solve the troubles around the openings adequately at the detail design stage, because there are a lot of concerning locations. There are not also clear design rules of classification societies and it is not possible to apply direct calculation for all the concerning members. Therefore, it is necessary to set up simplified approach such as a standard or guidance in order to decide the opening design quickly. For this study, guidance and regulations of each classification and several companies were surveyed. Grillage analysis and the refined mesh method were used to evaluate the strength around hole considering boundary condition and more detailed member arrangement. As a result, the standard for opening design was established and verified.

※Keywords: Hole design(개구부 설계), Opening design(개구부 설계), Standard(표준), Guidance(기준), Stress Concentration factor(응력집중계수)

접수일: 2007년 10월 22일, 승인일: 2007년 10월 24일

†교신저자: schankim@inhac.ac.kr, 032-870-2171

1. 서론

1.1 연구배경

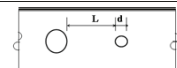
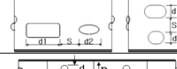
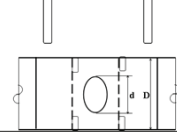
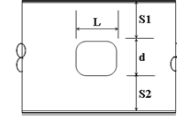

최근 조선소에서는 건조 척수가 증가하면서 상세설계에 있어서의 개선에 많은 관심을 가지게 되었고, 선체 기본구조설계에 국한하여 적용되던 CAE 또한 생산성 향상을 위한 건조공법 개발과 기관부 및 선미부에서의 설계 개선 등 상세설계에도 광범위하게 적용되기 시작하였다. 그 중 개구부는 선박의 품질을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 김형진 등(2000)이 개구와 슬롯(Slot)의 거리에 대한 연구를 수행하였으나 개구의 크기를 3가지의 큰 Opening 을 대상에 대하여 응력의 변화를 살펴보았으나 기관부나 선미부의 개구와는 설계 특성이 다르다. Seno 등(2003)이 선박의 건조 중에 발생한 개구부에 대한 문제점을 보고하였으나 선박 전체에 대해 효율적인 강도 평가 방안을 제시하지는 못하였다. 또한 Kim et al.(2002)이 Access Opening 주위의 응력에 대한 평가를 수행하였으나 기초 연구 수준에 머물러 있다.

특히 기관부 및 거주구 등에는 Pipe 설치, 전선 다발, 공기순환 및 응력집중완화 등을 위해 많은 Hole, Opening 및 Slot이 존재한다. 이들의 설계를 위해 적용 가능한 각 선급의 규정이 아직까지도 정확하게 규정되어 있지 않은 상황이다. 특히, 선박에서 개구의 숫자는 헤아릴 수 없을 정도로 많기 때문에 관심 대상이 되는 모든 개구를 포함하는 전선(Full Ship) 해석을 수행하는 것은 현재의 기술로는 적용이 불가능하다. 따라서 기관부 및 거주구 등의 개구부 설계를 위한 별도의 설계 기준은 설계 시수의 절감 뿐만 아니라 개구 설계 품질을 향상시키는데 매우 시급한 기술요구사항이다.

1.2 관련규칙 및 표준 현황

선박에서의 개구(Hole) 설계를 규정한 현재의 각 선급간 규칙을 비교 정리하여 Table 1 에 정리하였다. 대상 선급으로는 ABS(ABS 2001), DnV(DnV 1999), LR(LR 1996)이며, 선급간 설계 규칙이 상이하고, 특별히 규정되어 있지 않은 항목도 많음을 알 수 있다. 명시된 선급 규칙 마저

Table 1 Summary of design rules

형상	치수	ABS	DNV	LR
	L	-	$\geq 4d$	-
	D	$\leq D/4$	-	-
	S	-		
	D	-	$\leq D/2$	0.1D or 75mm (Greater) Max. D/4
	D	-	-	$\leq D/4$
	L	-	-	$\leq D$ or 0.6S (greater)
	S1	$\geq D/3$	-	-
	S2	-	-	$\geq 0.4D$
	D, S	-		
	R	-	-	$\leq 0.25d$ or 75 (less)

도 화물창 영역에 적용되는 규칙이므로, 화물창에 비해 국부하중이 상대적으로 작은 선미부와 기관실 및 거주구에 적용하기에는 설계 변수의 범위가 매우 다르다. 이경석 등(2005a)이 기관실 및 선미부에서 상세설계에 적용되는 Hole 간 간격의 현황과 선급 룰 또는 조선소 내부에 적용되는 표준과의 괴리 및 문제점을 지적한 바 있다. 몇 척의 선박 개구부 사례를 검토하고, 이미 설계된 개구가 직접 해석에 의한 강도 표준은 만족하고는 있지만, 선급 또는 규정에서 정한 개구의 설계 조건을 만족하지 못하는 모순을 가지고 있음을 보고하였다.

1.3 연구의 목적

본 논문에서는 원유 운반선과 컨테이너 운반선을 대상으로 Hole 배치에 관한 현황과 문제점을 살펴보기 위하여 현재의 각 선급 규칙을 정리하였고, 조선소에서 적용하고 있는 설계표준을 비교하여 그 차이점을 분석하였다. 각 규칙 및 표준 등은 선박의 화물창에 적용되는 경우이며 선미부, 기관실 및 거주구 등에 적용하기에는 형상과 하중의 크기가 다름을 확인하였다. 따라서 본 연구에

서는 기관부 및 선미부에 존재하는 개구의 특징 형상을 분석하고 그에 따른 새로운 조선소 자체 설계표준안을 제안하고자 한다. 설계 표준안을 제정하기 위해 원형 및 사각형 Opening 에 대한 설계 Parametric Study 을 수행하였고, 이를 바탕으로 설계를 위한 지침을 제안하였다.

새로운 설계표준 개발을 위해서는 선박의 종류, 위치, 웹 크기, 개구형상 및 크기를 설계 변수(Parameter)로 정한 후 변수에 따른 응력 변화를 파악하기 위한 3 차원 모델 기반의 구조해석과정을 사용하여야 한다. 그러나 현재의 3 차원 모델 기반의 구조 해석 기법을 사용하면 원하는 설계 변수의 변화를 반영하기 위해서 몇 년 이상의 기간이 필요하므로 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 김성찬 등(2007)이 제안한 Grillage 해석과 Opening 주위의 요소 자동 생성 상세해석을 혼합한 방법을 이용하고자 한다. 제안된 방법은 3 차원 모델의 정확성과 Grillage 모델의 효율성을 동시에 얻을 수 있으므로, 설계 표준 제정에 필요한 개구 주위의 상세한 응력집중현상을 파악하고 설계 변수의 변화에 따른 응력 변화를 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 Grillage 해석과 3 차원 해석 모델이 혼합된 해석시스템을 이용하여 개구의 설계 변수를 실 설계 범위에서 변화시키면서 Parametric Study 를 수행하였고, 그 결과로 선미부, 기관실 및 거주구의 개구 상세설계에 사용할 수 있는 새로운 설계표준을 제안하고자 한다.

2. 표준 정립을 위한 Parametric Study

2.1 설계 변수 정의 배경

일반적으로 Hole 을 갖는 부재는 구조 형상의 불연속으로 인하여 Hole 주위에 응력집중 현상이 생긴다. 응력집중은 Hole 의 형상, 크기, Hole 간 간격 및 작용하중의 형태에 따라 그 값이 달라진다. 또한 분할된 유한 요소의 크기에 따라 계산된 응력 값의 편차가 심하기 때문에 이 응력집중에 의한 최대응력을 유한 요소법에 의하여 구하기 위해서는 적절한 수준의 요소분할(Mesh Size)이 요

구된다. 또한 선체구조와 같이 다양한 하중을 받는 부재에 대한 Opening 주위에서의 응력집중을 파악하기 위하여는 Hole 의 형상과 작용하중에 대한 Parametric Study 는 필수적이라 판단된다.

그러나 실선 3 차원 모델에서의 Parametric Study 결과를 정리하여 표준화하기에는 부재치수 및 관련 요소의 변화가 매우 다양하여 모든 경우에 대한 계산수행이 불가능하기 때문에 단순부재의 결과에 근거한 표준화 수행이 합리적이라고 판단된다. 단순부재의 표준화를 수행하면, 단순부재에 대한 다양한 검토가 가능하고, 이 결과를 통하여 실선의 검증 및 설계표준 작성이 용이하게 된다.

단순부재의 표준화를 위해서 사각형 및 원형 Hole 에 대하여 Hole 의 각 단부 및 Hole 이 존재하는 부재의 윗단 및 아랫단에서의 길이, Hole 의 깊이 및 폭에 대한 Case 별 Parametric Study 를 수행하였고, 이 Parametric Study 결과를 이용하여, Hole 의 형태 및 하중 형태에 대한 SIF(Stress Influence Factor) D/B 를 만들었다. 설계표준 제정을 위해 수행한 Parameter 를 Table 2 에서 나타내었다. 선종, 위치, 개구형태, 개구 사이즈, 웹 크기 및 여섯 가지 설계인자에 따른 해석 경우 수는 수만 가지 이상이나 현실 가능한 범위에서 경우의 수를 줄이기 위한 노력을 통하여 삼백여 개의 경우에 대한 해석을 수행하여 결과를 정리하였다.

2.2 해석 시스템 특성

앞장에서 언급한 바와 같이 E/R 과 선미부의 갑판구조에서 Longitudinal Girder 와 Transverse Web 용 Grillage 해석을 자동으로 수행할 수 있는 전용 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에서는 기본적인 기하학적인 수치의 입력을 통하여 해석 모델을 자동 생성하여 Grillage 전용 프로그램을 사용하여 구조해석을 수행하고 부재의 단부 뿐 아니라, 부재 내부의 임의의 위치에서 Shear Force 및 Bending Moment 를 쉽게 구할 수 있도록 하였다. 그리고 D/B 에서 추출할 수 없거나 직접 Stress Influence Factor 를 구하고자 하는 경우(이경석 2005b)Hole 주변의 요소를 자동생성 시키기

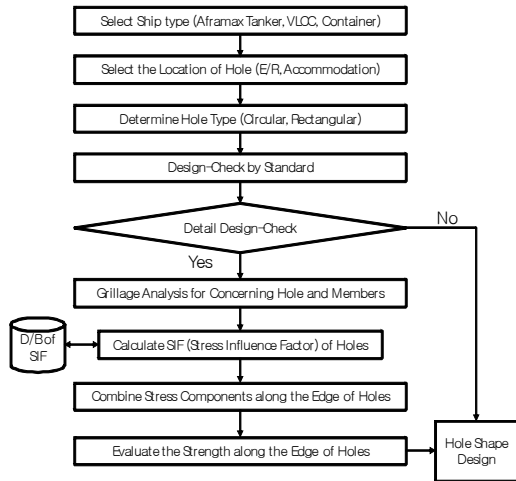


Fig. 1 Calculation procedure for opening design

위한 프로그램을 MSC/PATRAN PCL(Patran command language) 언어를 사용하여 작성하였다(MSC 2001). 상기에 기술한 전체적인 과정은 Fig. 1 에 나타내었고, 이에 따른 과정을 통해 설계표준을 작성하였다.

2.3 설계 형상의 특성화

각 설계 변수에 대한 기하학적인 모식도를 Fig. 2 에 표시하였다. 설계변수로서 단부와 개구의 거리, Edge 와 개구의 간격, 두 개의 개구가 존재할 때 수평간격, 수직으로 배치된 개구 사이의 간격 등이다. 각 설계 변수의 내용을 Table 2 에 정의하였다. 설계 변수의 조합은 약 2900 가지 이상의 Parametric Study 를 수행하였으며, 결과의 한가지 예를 Fig. 3 에 보였으며, 각 변수들에 대한 최대 von-Mises stress 가 허용응력을 초과하지 않는 변수들의 범위를 구하여 표준을 작성하였다. 개구가 수평 및 수직으로 배치되는 경우 생산공정상 문제가 발생하지 않을 조건을 감안하여 설계표준을 작성시 반영하였다.

통상 불연속부와 응력집중부는 요소의 크기에서 응력의 차이가 나며 요소의 크기와 응력은 반비례한다. 요소의 크기에 따른 응력 기준은 선급 규칙에 명확하게 기술되어 있지 않으나, 본 연구

에서는 Table 3 과 같이 각 선급이 제시한 기준을 이용하여 구조해석 결과의 평가에 활용하였다. Table 3 에서 t, s, 6 y, 6 t 는 각각, 요소 두께, 종늑골 간격, 항복 강도, 최종강도이다.

판 요소 중심에서의 등가응력 (von-Mises stress)의 허용값은 1.56 y (352 N/mm²), Opening Edge 에서의 최대 축응력의 허용값은 6 t (400 N/mm²)로 정하고, Opening 주위 요소에 대한 모든 응력을 평가하였다. 또한 최근에 새로운 통일 규칙을 제정하고 있는 JTP/JBP 규칙 (안)의 평균 응력(Average Stress)을 응력분포에 적용하여 확인하였다.

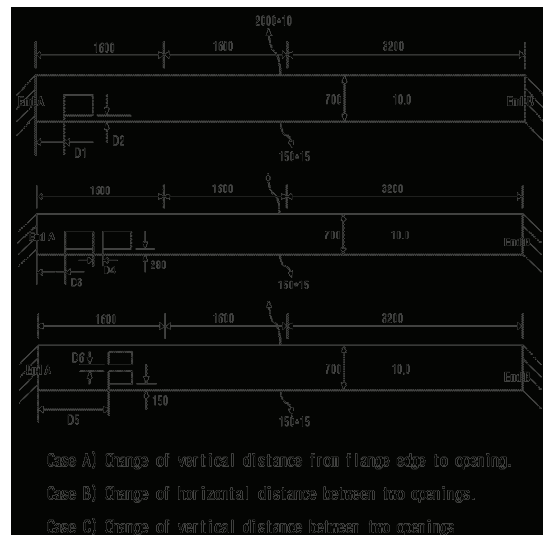


Fig. 2 Parameters for the hole design

Table 2 Design parameters

항 목	내 용
선 종	AFRAMAX Tanker, VLCC, Container
위 치	선미부, 기관실, 거주구
개구 형태	원형, 사각형
개구 크기	대, 중, 소
웹브 크기	대, 중, 소
설 계인자	개구의 단부에서의 위치(D1,D3,D5) 개구의 Edge 에서 거리(D2) 개구간 수평간격(D4) 개구간 수직간격(D6)

Table 3 Allowable stress for detailed analysis

Guidance/Code	Mesh size(*)	Allowable value(**) [N/mm ²]
ABS	t x t	1.5·6 _y or 6 _t
LR	t x t	1.5·6 _y
DNV	t x t	400
JTP (DNV 2007)	t x t	1.2·6 _y for average stress 1.7·6 _y for max. stress
JBP (DNV 2006)	s/8 - t x t	280 for average stress
ASTM Pressure vessel code	-	(1.5 - 2.0)·6 _y

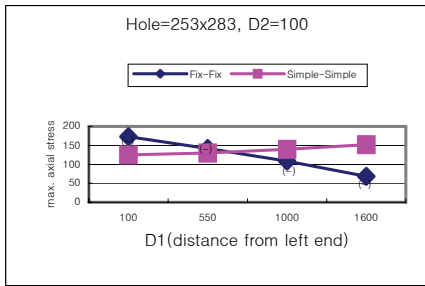


Fig. 3(a) Effect of D1 on the stress distribution

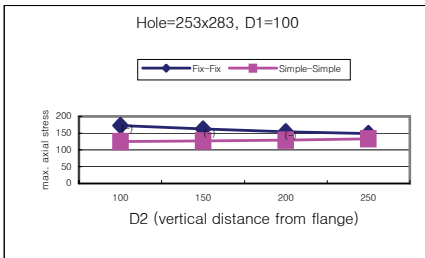


Fig. 3(b) Effect of D2 on the stress distribution

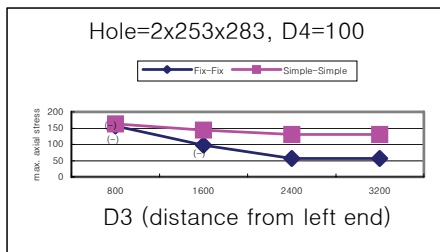


Fig. 3(c) Effect of D3 on the stress distribution

3. 설계 표준 안

Opening 에 대한 설계표준의 개발에는 Opening 의 다양한 기하학적인 형상 및 배치 위치 등을 체계화하고, 서로 다른 크기의 작용하중을 일률적으로 표준화하는 것에 어려움이 있다. 우선 Parametric Study 의 결과를 근간으로 다음과 같은 절차에 의하여 표준을 정립하였다.

1) 사각형 Hole 이 원형이나 타원형 Hole 보다 많은 응력을 유발한다. 원형 Hole 의 설계기준과 사각형 Hole 의 설계기준이 상충되는 곳은 사각형 Hole 을 기준으로 적용한다.

2) Hole 의 깊이와 길이는 상관관계가 있으므로 Hole 의 깊이를 변화하면서 각각의 가능한 길이를 구하였다.

3) Hole 이 단부에서 떨어진 길이와 Flange 및 상부 Plate 에서의 떨어진 거리는 최대 가능 크기의 Hole 을 기준으로 정하였다.

4) Hole 간 수평거리 및 수직거리는 최대 가능 크기의 Hole 2 개를 기준으로 정하였다.

5) 최대응력에는 Hole 의 깊이에 대한 영향이 Hole 의 길이 영향보다 크므로, 설계표준에서의 거리의 제한은 가능하면 Hole 의 깊이로 하였다.

여기에 각 선급의 규칙과 조선소에서 제한적으로 사용하는 설계표준 검토를 통하여 E/R 및 D/H 에 적합한 설계표준(안)을 구성하였다. 이렇게 구성된 설계표준(안)을 검증 과정을 여러 차례에 실제 설계과정에 반복 적용하고 이를 수정하여, 최종적으로 설계표준을 구성하였다 새로 제정한 설계 표준안은 선미부 및 기관실 및 거주구에 존재하는 종강도 부재를 제외한 보 거동을 하는 모든 거더, 웹, 트랜스버스에 적용할 수 있도록 완화된 표준이다. 종강도 부재인 경우는 기존의 선급 규칙, 사내표준에서 기술되어 화물창 영역에 적용되는 표준에 준하여 제정하였다.

횡부재에 존재하는 개구 설계표준은 Table 4 에 나타내었고 종강도가 존재하는 종부재에 존재하는 개구에 적용하는 새로운 설계표준은 Table 5 에 나타내었다.

Table 4 Design standard of opening design for transverse members

Item	Configuration (— : Plate, = : Flange) (D, t: Web depth & thickness)	Standard size or distance	비고
Hole depth (d) & length (ℓ)		1) $d \leq D/4$ 2) $\ell \leq D$	- Same for elliptical hole - $d \leq D/4$ for circular hole (d: hole diameter)
Vertical distance (S_2)		$S_2 \geq 0.4D$	
Horizontal distance (S_3)		$S_3 \geq (\ell_1 + \ell_2)/2$	- Distance between holes - Distance between hole and scallop - Distance between hole and slot
Gap distance (S_4)		$S_4 \geq (d_1 + d_2)/2$	

4. 결론

본 연구를 통하여 기관실과 선미부, 거주구에 있는 Opening 의 설계 기준을 제시하였다. 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 통상 선급 규칙 및 문헌상에 존재하는 기준은 화물창에 존재하는 Hole 관련 규칙이기에 본 논문에서 대상으로 하는 구조부재에 적용하기에는 무리가 있으며, 과도한 설계가 됨을 알 수 있었다.
- 현재 설계에서 적용하고 있는 현황은 선급규칙과 각 조선소 내부의 표준이 있음에도 불구하고 현실에 맞지 않기 때문에 적용하고 있지 않으며 표준을 적용할 경우 많은 부분에서 표준을 만족하고 있지 않음을 알 수 있다

Table 5 Design standard of opening design for longitudinal members

Item	Configuration (— : Plate, = : Flange) (D, t: Web depth, thickness)	Standard size or distance	Etc
Hole depth (d) & length (ℓ)		1) $\ell \leq D$ for $d \leq D/2$ 2) $\ell \leq 1.5D$ for $d \leq D/3$ 3) $\ell \leq 2D$ for $d \leq D/4$	- Same for elliptical hole - $d \leq D/2$ for circular hole (d: hole diameter)
Horizontal distance (S_1)		$S_1 \geq 2d$	
Vertical distance (S_2)		$S_2 \geq d/4$ Min. St	
Gap distance (S_3)		$S_3 \geq (d_1 + d_2)/2$ Min. St	- Distance between holes - Distance between hole and scallop - Distance between hole and slot
Gap distance (S_4)		$S_4 \geq (d_1 + d_2)/4$ Min. St	

• 따라서 현실적이며 적용 가능한 표준 개발이 필요하며 본 과제에서 관련 표준을 개발하였으며 그 유용성을 검증하였다. 본 표준은 지속적인 데이터 확보 및 Case Study 를 통하여 보완해야 할 것이다.

- 이상적인 표준개발을 위해서는 모든 선종 모든 경우의 형상에 대한 충분한 연구를 통하여 준비해야 하나 한정된 시간과 자료를 가지고 그 모든 것을 수행할 수 없기에 현재 조선소에서 많이 사용하는 경우에 한정하여 개발하였으므로 특수한 경우 보다 쉽게 Opening 주변 강도를 검토할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 본 연구의 결과와 기존의 설계 사례(이경석 2000a)를 비교하여 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- 김성찬, 송재영, 이경석, 김경수, 2007, "골조구조해석과 판요소해석의 결합을 활용한 개구부 강도평가 시스템 개발," 대한조선학회 논문집, 제 44 권, 제 6 호, pp. 605-612.
- 김형진, 김남우, 윤명철, 2000, " Access Opening 과 Slot 와의 거리분석," 선박구조연구회 논문집, 제 14 권, 제 2 호, pp. 313-318.
- 이경석, 송재영, 김경수, 김성찬, 김만수, 김정희, 권정민, 2005a, " E/R 및 선미부에서의 hole 간 간격의 현황과 문제점," 해양공학회 추계논문 발표회, pp. 27-31.
- 이경석, 송재영, 김경수, 홍기섭, 김성찬, 김정희, 권정민, 2005b, " Refined mesh method 에 의한 opening 주변의 강도평가," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 29-34.
- Seno Jojo, 김광수, 박형근, 홍성근, 2003, " Design concepts for Openings and attachments to structural members from the lessons learned on BP thunder Horse Project," 대우조선기술, 제 57 권, 제 2 호.
- ABS, 2001, Rules for Building and Classing Steel Vessels, Part5, American Bureau of Shipping.
- DNV, 1999, Classification Notes, Det Norske Veritas.
- DNV, 2006, Common Structural Rules for Bulk Carriers, Det Norske Veritas.
- DNV, 2007, Common Structural Rules for Oil Tankers, Det Norske Veritas.
- Kim, N.W., Kim, W.S., Paik, Y.M. ,2002, "Structural Analysis in Vicinity of Access Opening," Proceedings of sixteenth Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Gobe, pp. 167-178.
- LR, 1996 Ship Right, Structural Design Assessment Procedure, Lloyd Register of Shipping.
- MSC, 2001, Visual Nastran 2001 Quick Reference Guide, MSC.



< 김성찬 >



< 이경석 >