골조구조 해석과 판 요소 해석의 결합을 활용한 개구부 강도평가 시스템 개발

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

인하공업전문대학 선박해양시스템과^{*}
대우조선해양㈜ 구조설계 2팀^{**}
한국선급엔지니어링㈜^{***}
인하대학교 선박해양공학과^{****}

Development of Strength Evaluation System Using the Combined Grillage and Shell Element for the Strength around the Opening

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

Inha Technical College, Ship and Ocean System^{*}
DSME, Structural Design Team 2^{**}
Korean Register Engineering^{***}
Inha University, Naval Architecture and Ocean Engineering^{****}

Abstract

A ship is composed of many grillage structures especially the deck which is consists of primary girders, transverse and longitudinal members. Several holes are arranged on these primary members for pipes, vents, etc. which cause stress concentration due to the discontinuity of the member. It is not easy to get the stress values around all these holes because of the huge amount of time necessary for computations. In this paper, a simple method to compute for the stress around the holes is suggested. This method is composed of two steps which are grillage analysis for primary members and detailed stress analysis using the results of the grillage analysis. This method is made for the design of the primary members with openings supporting the deck structure.

※Keywords: Primary member(주구조부재), Refined mesh method(상세분할법), Grillage(격자), Stress influence factor(응력영향계수), Opening(개구)

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

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

1. 서 론

1.1 연구 배경

선박구조는 판과 보강재로 이루어진 격자구조(Grillage)가 주종을 이루고 있으며, 특히 갑판구조는 주부재인 거더(Girder)와 프레임(Frame) 및 보강재의 조합으로 이루어진 전형적인 격자구조이다. 이들 지지부재 중 주구조부재인 거더 및 프레임에는 다수의 개구(Opening)가 존재한다. 이들 개구부는 설계 단계에서 엄밀한 강도 평가를 수행하지 못하는 실정이며, 상세 설계단계에서 엔진룸(E/R) 및 거주부 등에 선주와 선급의 요구에 의하여 보강 및 설계변경 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 이에 따른 설계 변경 비용 및 공정 지체의 문제가 다수 발생하고 있다.

그러나 개구부 근방의 응력상태 및 강도를 평가하기 위해서는 개구부의 상세모델을 포함하는 갑판 전체의 상세 구조해석이 필요하다. 이상적으로는 3 차원 쉘(Shell)요소 기반의 유한요소 해석이 적절하지만, 해석에 필요한 요소의 개수는 현존하는 전산기 기억 장치와 계산 속도를 감안하면 불가능하다.

이러한 개구부의 국부 응력의 강도를 평가하기 위하여 김형진 등(2000)이 개구와 슬롯(Slot)의 거리에 대한 연구를 수행하였으나 개구부의 크기를 3 가지로만 가정하여 응력의 변화를 살펴보는 수준에 머물렀다. Seno 등(2003)이 선박의 건조 중에 발생한 개구부에 대한 문제점을 보고하였으나 효율적인 강도 평가 방안을 제시하지는 못하였다. 또한 Kim et al.(2002)이 access opening 주위의 응력에 대한 평가를 수행하였으나 기초 연구 수준에 머물러 있다. Hughes(1983)도 선체를 보 요소로 치환하여 간략하게 접근한 시도가 있었으나 상세 해석이 필요한 개구부의 강도 평가에는 부적절한 방법이다.

이러한 이유로 현재 국내외 조선소에서는 개구부의 강도 평가를 효과적으로 수행할 수 있는 현실적인 설계 방법에 대한 수요가 늘고 있다(Seno 등 2003).

1.2 연구 목적

본 논문에서는 선박구조 설계에 사용하기 위해 가능한 사용자가 쉽게 적용할 수 있도록 격자구조 및 개구 근방의 해석모델을 자동화하여 설계 단계에서 개구부 형상을 설계할 수 있는 시스템과 방법을 개발하고자 한다. 특히 3 차원 shell 요소에 의한 유한요소 해석 모델의 구현 불가능을 극복하면서 정확성과 효율성을 동시에 갖춘 강도평가 절차 및 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위하여 계산 시간이 짧고 효율성이 뛰어난 격자(Grillage) 모델과 shell 요소 기반의 유한요소해석 모델을 결합한 강도 평가 절차와 해석 시스템을 제안하고자 한다. 각 모델의 용도를 다음과 같이 정하였다.

- 격자구조해석(Grillage Analysis) 모델: 주구조부재인 거더와 프레임을 격자구조로 이상화하여 구조하중을 계산한다.
- 상세구조해석(Refined Strength Analysis) 모델: 격자구조의 단부 해석 결과(구조 하중)를 경계조건으로 가정하여 개구 근방에서의 상세 유한요소 해석을 수행한다.

2. 강도 평가 절차

본 연구에서는 deck girder 및 transverse 에 존재하는 hole 주변의 강도 해석을 주요 대상으로 가정하여 해석 절차를 제시하였다(Fig. 1).

단순 보 구조에서 shear force 와 bending moment 분포는 보 이론으로 쉽게 구할 수 있다. 그러나 hole 주변의 응력집중을 고려하여 응력을 구하고자 하는 경우에는 보 전체를 판 요소로 모델링하여 구해야 하는 번거로움이 있다. 특히 격자구조와 같이 구조부재에 의해 지지되는 경우는 정확한 응력을 구하는 것이 쉽지는 않다. 따라서, Fig. 2 와 같이 보 이론과 유한 요소법을 결합한 해석을 수행하면 쉽게 hole 주변의 응력집중현상을 파악할 수 있다. 즉 보 이론에 의해 개구 근방에서의 전단력 및 굽힘 모멘트를 구하여 개구 주변의 상세 해석 모델의 양단하중조건으로 적용하여 개구부 주위의 응력을 구한다. Fig. 2 에서 w , SFI ,

BM , F_x 는 각각 분포 하중 (Uniform Load), 전단력(Shear Force), 굽힘 모멘트(Bending Moment), 그리고 축력(Axial Force)을 말한다. 이를 바탕으로 해석 절차를 정리하면 다음과 같다.

- (1) Grillage 모델: 구조에 발생하는 전단력과 굽힘모멘트를 계산한다.
- (2) 상세해석 부위 결정: 갑판을 지지하는 주강도 부재에 개구가 있는 위치를 상세해석을 하고자 하는 부재로 지정한다(Fig. 2). 지정된 위치의 양단에서 전단력과 굽힘모멘트를 구한다.
- (3) Shell 기반의 상세구조 모델: 전단력 및 굽힘모멘트를 구하여 개구 주변의 상세 해석 모델의 양단 하중조건으로 개구부 주위의 자동생성된 상세 해석 모델에 적용하여 응력을 구하고 강도 평가를 실시한다. 상세 유한요소 해석을 간편하기 지원하기 위하여 PCL(PATRAN Command Language) (MSC 2001)을 이용한 Hole 자동 Mesh 프로그램을 개발하였다.
- (4) 응력 해석 실시: 자동 생성된 단위하중 하에서의 데이터를 사용하여 구조해석을 수행한다.
- (5) SIF(Stress Influence Factor) 계산: 구조해석 결과를 검토하고, 각 단위 하중 하에서의 SIF 를 구한다.
- (6) 국부 하중에 의한 응력 값과 (2)에서 구한 shear force, bending moment 값과 (5)에서 구한 SIF 를 이용하여 조합응력을 구한다.

Fig. 1 Procedure of analysis system

Fig. 2 Scheme of calculating the stress around the openings

3. 상세 구조 해석 과정

앞 장에서 언급한 보 이론을 적용하면 개구 근방에서의 전단력 및 굽힘 모멘트를 구할 수 있다. 이러한 구조 하중을 후 개구 주변의 상세 유한요소 해석 모델의 양단하중조건으로 적용하여 개구부 주위의 응력을 구한다.

따라서, 상세해석이 필요한 opening 부분을 선택한 후 판 두께의 크기를 가진 shell 요소로 재분할하여 유한요소해석 모델을 구성하였다. 상세해석 모델에 필요한 경계조건은 좌측 단부를 완전고정으로 하고, 하중으로는 우측 단부에 전체 구조에서의 전단력, 굽힘 모멘트 및 축방향 하중을 작용시키고, 상부 plate면에 분포하중을 작용시킴으로써 전체구조와 동등한 경계 조건을 부여하였다. 우선, 아래와 같이 네 가지 구조하중의 단위력에 의한 개구부의 응력해석을 수행하였다.

- Case 1: 단위 분포하중($w=1$)
- Case 2: 단위 전단력($SF=1$)
- Case 3: 단위 모멘트($BM=1$)
- Case 4: 단위 축하중($F_x=1$)

대상 구조물의 응력 상태가 선형이므로 위의 네 조건에 대한 해석을 수행한 후에 각 요소의 응력 조합을 수행하면 된다.

본 해석과정에서 우측 단부에서의 하중과 국부하중을 단위하중으로 적용하여 hole 주변의 응력을 구하여 SIF 를 구해두면 보다 범용적인 활용이

Fig. 3 Component loads for detailed model

Table 1 Nomenclature of stress components

하중 조건	SIF	응력 요소
Case1	k_1	$\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \sigma_{xy1}$
Case2	k_2	$\sigma_{x2}, \sigma_{y2}, \sigma_{xy2}$
Case3	k_3	$\sigma_{x3}, \sigma_{y3}, \sigma_{xy3}$
Case4	k_4	$\sigma_{x4}, \sigma_{y4}, \sigma_{xy4}$

가능하다(Peterson 1973). 최종적인 조합응력은 다음 식으로 표현되며 Fig. 3으로 모식화하였다.

$$\begin{aligned}\sigma_{Tx} &= \sigma_{x1} \cdot w \cdot k_1 + \sigma_{x2} \cdot SF_1 \cdot k_2 + \sigma_{x3} \cdot BM_1 \cdot k_3 + \sigma_{x4} \cdot Fx_1 \cdot k_4 \\ \sigma_{Ty} &= \sigma_{y1} \cdot w \cdot k_1 + \sigma_{y2} \cdot SF_1 \cdot k_2 + \sigma_{y3} \cdot BM_1 \cdot k_3 + \sigma_{y4} \cdot Fx_1 \cdot k_4 \\ \sigma_{Txy} &= \sigma_{xy1} \cdot w \cdot k_1 + \sigma_{xy2} \cdot SF_1 \cdot k_2 + \sigma_{xy3} \cdot BM_1 \cdot k_3 + \sigma_{xy4} \cdot Fx_1 \cdot k_4\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 BM_1 , SF_1 , Fx_1 는 각각 단위 굽힘 모멘트, 단위 전단력, 단위 축력을 의미한다. 위의 식에서 사용한 SIF와 응력 요소는 Table 1에 설명하였다.

4. 적용 예제

우선 본 연구에서 사용한 grillage 해석 모델의 정확성은 동일한 구조 형상에 대하여 3차원 유한요소 모델과 grillage 모델의 결과를 각각 비교하여 동일함을 확인한 후 grillage 모델을 적용하였다. Grillage 모델링의 기법과 정식화에 대해서는 Hughes(1983)가 기술 모델을 이용하였으며 grillage 모델의 정확성을 증명하였다.

선박의 기관실 구조에서 많이 발견되는 전형적인 web에서의 개구 배치를 Fig. 4에서 보여주었다. 통상 기관실 및 거주구 등에는 파이프 및 각종 전선다발 등이 통과하는 개구 뿐 아니라 공기의 순환 및 응력집중 회피 등을 위한 작은 개구도 존재한다. 여러 가지 형태의 개구에 대한 적용성

을 파악하기 위해 Table 2의 갑판지지구조와 개구 형태에 대한 강도평가를 수행하였다. 기관실과 선미부 갑판에서 deck transverse 및 deck girder가 Table 2와 같은 위치를 가지면서 Table 3과 같은 Hole 치수에서의 조합응력을 계산하여 강도를 평가하였다. Deck load는 20 kN/m^2 를 적용하였으며, deck transverse 및 deck girder의 끝 단에서 주변구조에 고정되어 있다고 가정하였다.

Table 2 Size and locations of holes

적용 예시	위치 및 크기
Case1	- No. 2와 No.3 Transverse 사이에 있는 No.2 Girder에 존재 - 위치: 왼쪽 girder 단부에서 $0.3L$ 에 위치 - 크기: 지름 200 mm의 원형 Hole
Case2	- No. 2와 No.3 Transverse 사이에 있는 No.2 Girder에 존재 - 위치: 왼쪽 Girder 단부에서 $0.7L$ - 크기: $353 \times 483 \times 61.5R$ 인 사각형 Hole
Case3	- 단부와 No.1 Girder 사이에 있는 No.2 Transverse에 존재 - 위치: 왼쪽 Transverse 단부에서 $0.2L$ 및 $0.257L$ 두 개의 원형 Hole - 크기: 지름 63 mm와 200 mm 원형 Hole 두 개
Case4	- No. 1와 No.2 Girder 사이에 있는 No.2 Transverse에 존재 - 위치: 왼쪽 Transverse 단부에서 $0.2L$ 및 $0.363L$ 원형 및 사각형 Hole - 크기: 지름 63mm 원형, $353 \times 483 \times 61.5R$ 사각형 Hole.

Fig. 4 Typical opening arrangement

Table 3 Dimensions of girder and transverse

특성	Girder	Transverse web
개수	3	2
길이 (m)	8.4	12.8
간격 (m)	3.2	2.4
Deck 두께(mm)	10	10
크기(mm)	700*10+200*12	1700*10+150*11
Stiffener 개수	3	3
Stiffener 면적 (cm ²)	11.87	11.87
Stiffener I (cm ⁴)	674	674

Fig. 5 Grillage model and hole Locations

4.1 Grillage 해석결과

본 grillage 구조에 대한 모델 형상은 Fig. 5 에 나타내었으며 3 차원 형상을 grillage 로 치환하기 위한 방법은 Hughes(1983)이 제시한 방법을 이용하였다. 본 구조해석 모델은 Table 3 과 같은 데이터가 주어지면 자동 생성될 수 있도록 구성하였으며, 전용 grillage 해석 프로그램으로 작성하였다. 구조해석 결과로 shear force 분포를 Fig. 6 에 나타내었으며 bending moment 분포를 Fig. 7 에 나타내었다.

Fig. 6 Example of shear force distribution

Fig. 7 Example of bending moment distribution

Table 4 Shear force and bending moment at both ends of the refined mesh model

CASE	위 치	Shear Force (kN)	Bending Moment (kN-m)
1	0.092L	-43.16	78.22
	0.508L	20.78	89.40
2	0.292L	-12.44	91.57
	0.917L	83.56	38.23
3	0.063L	-114.60	-221.5
	0.469L	-114.60	-72.55
4	0.063L	0	122.20
	0.469L	0	122.20

Table 4 에서는 개구부 주변 해석을 위해 택하는 상세해석 모델범위에서의 shear force 및 bending moment 값을 나타내었다.

4.2 SIF 계산

자동 생성된 개구 주위의 상세구조해석 모델에 단위하중을 사용하여 구조해석을 수행하면 local load, axial load, shear force, bending moment 하중에 대한 SIF 를 구할 수 있다. 각 사례 별 계산 결과 중 CASE1 에 대한 각 SIF 값을 단위 하중 하에서 Von-Mises Stress Influence Factor 분포를 Fig. 8 에 보였다.

Fig. 8(a) SIF distribution for unit local load

Fig. 8(b) SIF distribution for unit axial load

Fig. 8(c) SIF distribution for unit shear force

Fig. 8(d) SIF distribution for unit bending moment

4.3 조합 응력 계산

Hole 주변의 상세 조합응력은 앞 절에서 제시한 grillage 해석의 구조 하중 값과 Stress Influence Factor를 합하여 구한다. 다음의 Fig. 9는 계산 예로서 CASE1~ CASE4 에서 hole 주변에 분포하는 축 방향 응력 분포를 보이고 있으며 Peterson(1973)의 응력집중 해석결과와 동일함을 알 수 있다. 이는 hole 의 경계선에 축력 하중과 응력을 계산하기 위해 유한요소 모델로 사용된 바(Rod)에 작용하는 응력을 표시한 것이다. 각 최대 조합응력의 결과는 Table 5 에 나타난 것과 같다. 구해진 응력 값은 통상 피로 해석 등에 사용되는 국부 해석 3 차원 모델의 것과 동일함을 확인하였다.

Fig. 9(a) Combined stress distribution(CASE 1)

Fig. 9(b) Combined stress distribution(CASE 2)

Fig. 9(c) Combined stress distribution(CASE 3)

Fig. 9(d) Combined stress distribution(CASE 4)

Table 5 Summary of combined stresses

Case	Max. Stress (N/mm ²)	Min. Stress (N/mm ²)
1	80.9	29.2
2	194.9	222.7
3	124.9	130.8
4	134.6	107.0

5. 결 론

본 논문에서는 개구부를 갖는 선체 부재의 설계를 위한 강도 평가 방법으로써 grillage 와 유한 요소법을 결합한 모델을 제안하였고 이에 따른 해석 시스템을 개발하였다.

제안된 방법을 이용하여 개구부를 갖는 갑판지지 주부재의 강도를 계산한 사례를 보였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- Grillage analysis 프로그램과 자동 mesh 생성 프로그램을 이용하여 개구부의 SIF 값을 효과적으로 구할 수 있는 방안을 제시하였다.
- SIF 값을 응용하여 얻은 조합응력의 결과를 활용하여 개구부 근처의 응력을 효과적으로 얻을 수 있는 절차를 제시하였다. 무수히 많은 선체부재에서의 개구부 주변 강도평가에 손쉽게 적용 가능할 것으로 판단된다.

- 본 논문의 결과로 선미부와 기관실 그리고 거주구의 갑판지지 주부재에 있는 개구 등의 설계에 응용할 수 있는 예제를 보였다.
- 개구부를 갖는 다양한 선체 구조 부재의 설계표준화 방안의 수립이 가능하도록 하였다.

참 고 문 헌

- 김형진, 김남우, 윤명철, 2000, “ Access Opening 과 Slot 와의 거리분석,” 선박구조연구회 논문집, 제 14 권, 제 2 호, pp. 313-318.
- Seno J., 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, pp. 75-90.
- Hughes, O.F., 1983, Ship Structural Design, SNAME.
- Kim, N.W., Kim, W.S. and 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.
- MSC, 2001, Visual Nastran 2001 Quick Reference Guide, MSC.
- Peterson, R.E., 1973, Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York.

< 김 성 찬 >

< 이 경 석 >