

# 선박의 비대칭 단면 특성에 대한 연구

정준모<sup>1,†</sup>, 김영훈<sup>2</sup>  
인하대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
경남대학교 조선해양IT공학과<sup>2</sup>

## Study on Section Properties of Asymmetric-Sectioned Vessels

Joonmo Chung<sup>1,†</sup>, Younghun Kim<sup>2</sup>  
Dep't of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University<sup>1</sup>  
Dep't. of Naval Architecture, Ocean & IT Engineering, Kyungnam University<sup>2</sup>

### Abstract

This paper presents definition of symmetry of a ship section where three symmetries are proposed: material, geometric, and load symmetries. Precise terminologies of centroid, moment plane, and neutral axis plane are also defined. It is suggested that force vector equilibrium as well as force equilibrium are necessary condition to determine new position of neutral axis due to translational and rotational mobility. It is also stated that new reference datum of ENMP(elastic neutral moment plane), PNMP(fully plastic moment plane), ENAP(elastic neutral axis plane), and INAP(inelastic neutral moment plane) are required to define asymmetric section properties such as second moment of area, elastic section modulus, yield moment, fully plastic moment, and ultimate moment. Since collision-induced damage and flooding-induced biaxial bending moment produce typical asymmetry of section, the section properties are calculated for a typical VLCC. Geometry asymmetry is determined from ABS and DNV rules and two moment planes of 0/30 degs are assumed for load asymmetry. It is proved that the property reduction ratios directly calculated from second moment of area are usually larger than area reduction ratio. Reduction ratio of ultimate moment capacity shows almost linearly proportional to area reduction ratio. Mobility of elastic and inelastic neutral axis planes is visually provided.

**Keywords** : Material symmetry(재료 대칭), Geometry symmetry(형상 대칭), Load symmetry(하중 대칭), Elastic neutral moment plane(ENMP, 탄성 중립 모멘트 평면), Fully plastic neutral moment plane(PNMP, 완전 소성 중립 모멘트 평면), Elastic neutral axis plane(ENAP, 탄성 중립축 평면), Inelastic neutral axis plane(INAP, 탄성 중립축 평면), Damage(손상)

## 1. 서론

상선을 비롯한 거의 대부분의 선종에 있어서, 선박 단면의 대칭성은 선박 좌표계(x : 선미에서 선수 방향, y : 우현에서 좌현 방향, z : 선저에서 갑판 방향)를 기준으로 y평면에 대칭을 의미한다. 대부분의 선박은 통상적으로 약간의 비대칭성을 가지고 있지만, 거의 대칭으로 간주된다.

그러나 선박 단면의 대칭성은 엄밀하게 재료 대칭성, 형상 대칭성, 하중의 대칭성을 모두 만족하는 경우에만 대칭 단면으로 간주될 수 있으며, 각각의 정의는 다음과 같다.

- 재료 대칭: 단면을 이루는 판 요소(plate unit) 또는 보강판 요소(stiffened panel unit 또는 stiffened plate unit)의 재료가 y평면에 대칭일 경우 재료 대칭. 예를 들어 좌현과 우현에 사용된 재료가 서로 다를 경우 재료 대칭이 될 수 없음.
- 형상 대칭: 단면을 이루는 판 요소(plate unit) 또는 보강판 요소의 형상이 y평면에 대칭일 경우 형상적 대칭. 예를 들어 총돌

또는 좌초로 인하여 선박의 일부가 손상된 경우에는 형상 대칭이 될 수 없음.

- 하중 대칭: y평면에 대칭 하중이 작용할 경우 하중 대칭. 선체에 작용하는 임의의 평면에 작용하는 모멘트의 경우 모두 비대칭 하중으로 간주되지만, 예외적으로 수직 굽힘 모멘트(새깅 모멘트 또는 호깅 모멘트)는 대칭 하중으로 간주될 수 있음. 수평 굽힘 모멘트도 대칭 하중이 될 수 없음.

그러나 대부분의 선종에 있어서 동일 단면의 재료 비대칭을 찾아보기는 어려우며, 선박의 폭방향에 대한 중량의 분포 또는 외력의 분포를 대칭으로 간주하기 때문에, 비대칭은 통상적으로 형상 비대칭을 의미하기도 한다.

총돌과 같이 선체에 큰 손상(major damage)을 경험한 선박의 경우 심각한 형상 비대칭성을 가지는데 반하여, 좌초의 경우 선저부에 대칭적인 손상을 가질 가능성이 크거나, 대칭 손상으로 가정한다.

IMO(1995)와 IMO(2003)는 탱커의 중대사고시 원유유출량을

산정하기 위한 손상의 크기를 통계 자료에 기반하여 정의한 바 있는데, 충돌의 경우 비대칭 손상, 좌초의 경우 대칭 손상을 가정하였다. IMO(1997)과 IMO(1966)에는 구획의 결정 및 복원성 계산을 위하여 손상의 크기를 제시하고 있는데, 충돌의 경우 비대칭 손상, 좌초의 경우 대칭 손상을 가정하였다. ABS(1995)는 잔류 종강도를 예측하기 위하여 충돌 및 좌초로 인한 손상을 모두 비대칭으로 가정하였다. 반면 DNV(2009)의 선박건조규칙을 살펴보면 충돌의 경우 비대칭 손상, 좌초의 경우 대칭 손상을 가정하였다.

이와 같은 선체의 손상은 파공으로부터 침수를 유발하고, 이는 선박의 횡경사(heeling)를 부가적으로 유발하므로, 선체에 작용하는 수직 굽힘 모멘트와 수평 굽힘 모멘트의 합력(moment resultant)이 선체에 작용하게 된다. 즉 선체의 손상은 선체 단면의 형상 비대칭을 유발하고, 이로 인한 횡경사는 하중 비대칭을 유발하는 것이다.

Smith and Pegg(2003)는 HALIFAX급 프리게이트(frigate)를 대상으로 비손상 및 손상 선박의 모멘트 합력에 따른 잔류 종강도를 평가한 바 있지만, 비대칭성으로 인한 중립축의 변동성을 고려하지는 않았다. 즉 모멘트 작용 평면이 중립축과 같으며, 중립축은 항상 도심을 통과한다는 가정을 하였다.

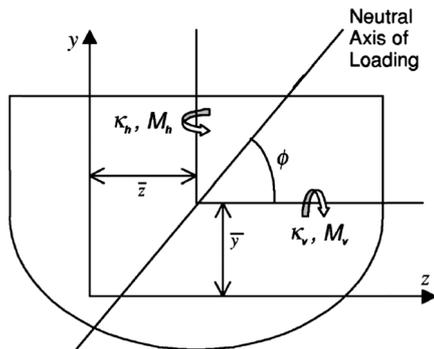


Fig. 1 Orientation, neutral axes positions, and direction of loading(Smith and Pegg, 2003)

Cho and Lee(2005)도 Smith and Pegg(2003)의 연구와 거의 동일한 접근법을 사용하여 손상 후 선박의 잔류 종강도를 평가한 바 있으나, 중립축은 모멘트 작용 평면 평행하다는 가정을 벗어나지 않았다.

Paik et al.(1998)은 ABS(1995)에서 제시한 비대칭 손상을 대칭 손상으로 가정하여, 즉 좌우현에 모두 손상을 가정하여, 잔류 종강도를 해석적으로 예측한 바 있다. Wang et al.(2002)도 ABS(1995)에서 제시한 손상을 가정하고 선박의 단면계수를 계산하여 잔류 종강도를 예측하였다.

이와 같이 많은 연구자들이 이러한 비대칭성을 가지는 선박의 종강도를 정의하는데 어려움을 극복하기 위하여 중립축을 가정하거나 대칭 손상을 가정하여 연구를 수행하여 왔지만, 본 연구에서는 이러한 가정을 극복하기 위하여 중립축의 변동성, 모멘트 평면의 정의에 대하여 기술하여 보고자 한다. 현재 국제해사기구(IMO, international maritime organization)에서 개발중인 신개념 선박

건조 기준(GBS, goal based standard)에 의하면, 기능적 요건(functional requirement)으로서 손상 후 선박의 잔류 종강도(residual longitudinal strength)를 필수적으로 요구하고 있으며, 조속한 시일 내에 TIER IV에 해당하는 공통 구조 규칙에 잔류 종강도의 허용치가 제시될 가능성이 크다. 따라서 본 연구는 손상 선박의 잔류 종강도를 정량적으로 예측하는 기반 기술이 될 것으로 예측한다.

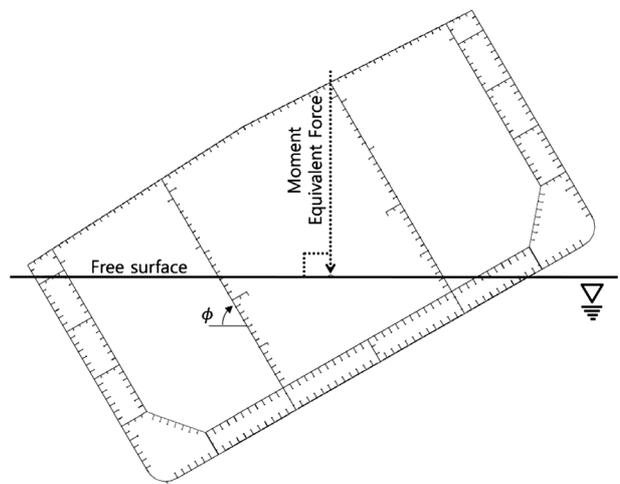
## 2. 도심, 모멘트 평면, 중립축 평면의 정의

### 2.1 도심(centroid)

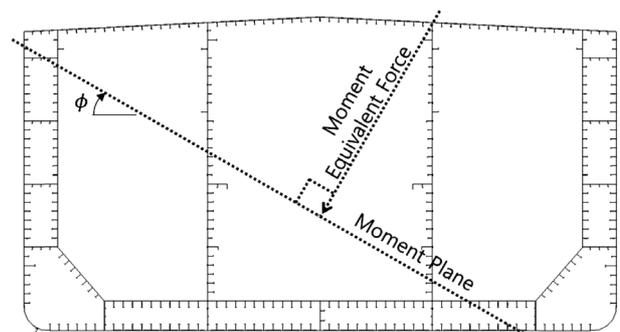
도심은 단면에 작용하는 하중 및 재료의 비대칭성에 무관하며, 단면적의 중심을 의미한다.

### 2.2 모멘트 평면(moment plane)

선체가 자유수면 대비  $\phi$ 만큼 횡경사된 경우, 선체에 작용하는 수직 굽힘 모멘트(여기서는 항상 중력 가속도 방향으로 작용하는 힘에 의한 모멘트를 의미)는 자유 수면과 항상 직교한다(Fig. 2 (a)



(a) after heeling of ship section



(b) after reverse rotation of ship section

Fig. 2 Definition of moment plane

참조). 선체의 회전 대신에 모멘트 유발 하중(moment equivalent force)을 역회전(reverse rotation)시키면, 이로 인한 모멘트는 항상 모멘트 평면(moment plane)에 작용하며, 모멘트 평면은 항상 모멘트 유발 하중에 직교한다(Fig. 2 (b) 참조). 즉 대칭 단면과 비대칭 단면의 경우, 모멘트 평면은 모멘트 유발 하중에 항상 직교한다. Fig. 2는 항상 대칭 선박을 보여주었지만 전술한 바와 같이 하중이 비대칭이므로, 비대칭 단면으로 간주되어야 한다.

### 2.3 중립축 평면(neutral axis plane)

단면에 작용하는 하중으로 인하여 단면의 어떤 요소도 비탄성(인장의 경우 항복, 압축의 경우 좌굴을 의미)을 경험하지 않을 때 압축과 인장으로 인한 모멘트 평형을 이루는 평면을 탄성 중립축 평면(elastic neutral axis plane, ENAP)으로 정의한다. 재료 대칭 가정하에서 탄성 중립축 평면은 항상 도심을 통과하지만 모멘트 평면과 항상 평행하지는 않다. 전술한 3가지 대칭성이 모두 만족하는 경우에 탄성 중립축 평면은 도심을 통과하면서 모멘트 평면과 평행하다.

반면 단면 요소의 일부 또는 전체가 비탄성을 경험할 경우 모멘트 평형을 이루는 평면을 비탄성 중립축 평면(inelastic neutral axis plane, INAP)으로 정의한다. 단면을 이루는 요소는 모멘트가 유발한 압축 하중이 가해질 경우 항복에 도달하기 전에 좌굴을 경험하므로 인장 하중이 가해질 경우 달리 비대칭적인 평균 압축 강도(average compressive strength) 특성을 나타낸다(Fig. 3 참조). 이러한 이유로 비탄성 중립축 평면은 일반적으로 도심을 통과하지 않으며(중립축의 이동) 또한 모멘트 평면과 평행하지 않을 수 있다(중립축의 회전).

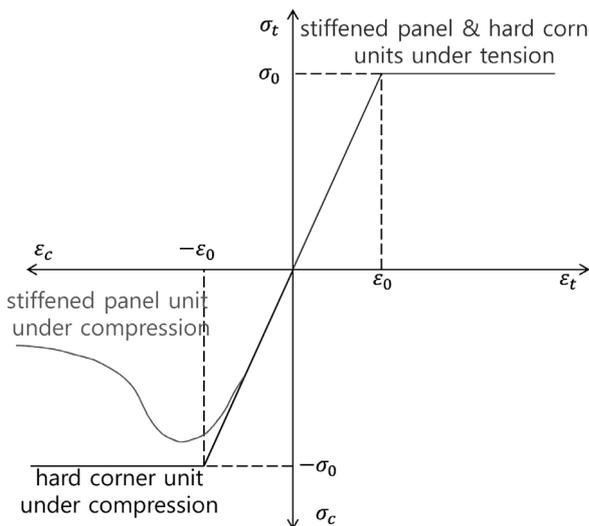
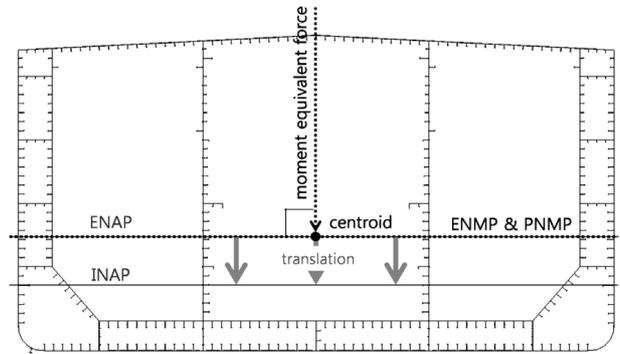


Fig. 3 Asymmetry in average compressive and tensile strengths of stiffened panel elements

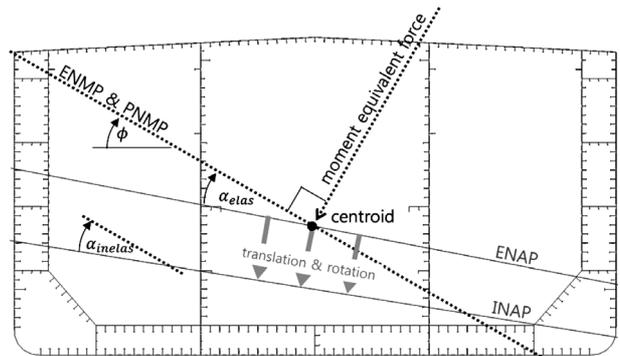
### 2.4 중립축 평면의 이동(translation)과 회전(rotation)

단면이 재료 대칭, 항상 대칭, 하중 대칭을 모두 만족하는 경우,

보강판 요소의 평균 압축 강도 비대칭성은 중립축의 이동만을 유발한다. Fig. 4 (a)는 이러한 상태에서 새깅 모멘트( $\phi = 0\text{deg}$ )가 작용할 경우 중립축의 이동을 나타내며, 탄성 중립축 평면과 비탄성 중립축 평면은 항상 모멘트 평면과 평행하다.



(a) three symmetries



(b) force asymmetry

Fig. 4 Mobility of neutral axis plane and neutral moment plane

3가지 대칭성 중에서 한 가지라도 만족하지 못하는 경우, 보강판 요소의 평균 압축 강도 비대칭성은 중립축의 이동과 회전을 동시에 유발한다. Fig. 4 (b)는 임의 각도로 모멘트 합력( $\phi \neq 0 \& 180 \text{ degs}$ )이 작용할 경우 중립축의 이동과 회전을 나타내며, 탄성 중립축 평면은 도심을 통과하지만 모멘트 평면과 평행하지 않다(모멘트 평면에서  $\alpha_{elas}$  만큼 회전). 비탄성 중립축 평면은 도심을 통과하지도 않고, 모멘트 평면과 평행하지도 않으며 탄성 중립축 평면과도 평행하지 않다(모멘트 평면에서  $\alpha_{inelas}$  만큼 회전). 이동과 회전한 중립축은 통상적으로 모멘트 평면으로부터의 이동량과 회전량으로 정의하는 것이 편리하다.

탄성 중립축 평면의 경우 이론적인 해를 얻을 수 있지만, 선체를 구성하는 보강판 요소에 대한 적분 과정이 복잡하다. 비탄성 중립축 평면의 경우 이론적인 해를 도출하는 것은 불가능하며 시행착오 탐색을 통하여 찾을 수 있다(Boresi et al., 1992).

일종의 간이해석법인 증분 반복법(Incremental-iterative approach, 통상 Smith법으로 불림)은 Smith(1977)에 제안되어 현재 IACS CSRs(2010a and 2010b)에 채택되어 사용되는 선체 중강도 평가 방법이다. IACS CSRs(2010a and 2010b)에는 3가지 대

칭성을 가정하고 중립축의 이동을 탐색하는 방법이 제시되어 있는데, 탄성 중립축 평면과 비탄성 중립축 평면을 구분하지 않는다. 즉 작용 곡률의 증가에 따른 비탄성 효과의 개시를 인지할 필요 없이, 단면의 압축 파트와 인장 파트에서 발생한 하중 평형 여부만 판정하면 탄성과 비탄성을 구분할 필요 없이 중립축을 탐색할 수 있기 때문이다. 그러나 중립축의 이동과 회전 후 위치를 찾기 위해서는 하중의 평형과 하중 벡터의 평형을 동시에 만족해야 한다. 즉 압축 파트의 하중 도심과 인장 파트의 하중 도심을 연결하는 모멘트 벡터는 모멘트 평면과 항상 직교한다는 하중 벡터 평형 조건이 추가되어야 한다(Boresi et al., 1992).

### 2.5 단면 속성의 기준 평면

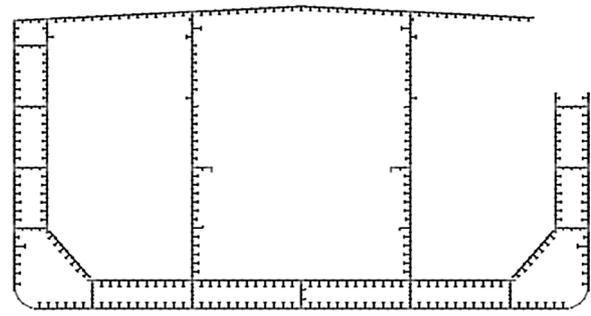
단면 속성은 통상 면적 2차 모멘트(second moment of area), 탄성 단면 계수(elastic section modulus), 항복 모멘트(yield moment), 완전 소성 모멘트(fully plastic moment) 등을 의미한다. 중립축의 이동과 회전은 면적 2차 모멘트, 항복 모멘트, 완전 소성 모멘트와 같은 단면 속성에 대한 기준 평면에 대한 정의를 혼동스럽게 만들 수 있다. 예를 들어 면적 2차 모멘트는 면적에 대한 물리량이지만 모멘트에 저항하는 특성을 나타내므로 탄성 중립축에 대한 값으로 정의하는 것이 바람직하다. 그러나 회전이 발생한 탄성 중립축을 구하기 위한 과정이 복잡하고, 하중의 증가에 따른 면적 2차 모멘트가 변동적이다. 따라서 도심을 통과하고 모멘트 평면과 평행한 가상의 탄성 중립 모멘트 평면(elastic neutral moment plane, ENMP)을 정의하고 이 평면에 대한 면적 2차 모멘트를 도출하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 따라서 면적 2차 모멘트를 이용하여 도출되는 탄성 단면 계수, 항복 모멘트도 탄성 중립 모멘트 평면에 대하여 정의되어야 한다.

반면 완전 소성 모멘트의 경우, 재료 대칭성을 유지한다면, 탄성 중립 모멘트 평면에 대하여 압축 파트와 인장파트의 모멘트 평형을 이루어야 한다. 따라서 이론적으로는 완전 소성 중립 모멘트 평면(fully plastic neutral moment plane, PNMP)은 탄성 중립 모멘트 평면과 동일하다.

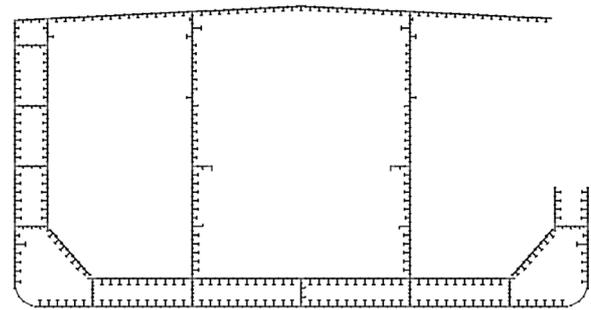
또한 선박의 종강도를 나타내는 모멘트-곡률관계를 기술할 경우, 탄성 중립축 평면(ENAP) 또는 비탄성 중립축 평면(INAP)에 관한 값으로 정의하는 것이 물리적으로 타당하다. 그러나 전술한 바와 같이 탄성과 비탄성의 경계를 나누기보다, 하중 평형과 하중 벡터 평형을 만족하는 중립축 평면을 탐색하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 이러한 평면을 포괄적 의미의 비탄성 중립축 평면(INAP)으로 정의하였다. 즉 선박의 종강도를 나타내는 모멘트를 INAP에 관한 값으로 정의하였다.

## 3. 사례 연구 : VLCC 단면 속성

Fig. 5는 318K VLCC를 나타내고 있으며, 주요 치수와 제원은 Table 1에 나타내었다. 단면에 사용된 요소의 항복 응력, 탄성 계수, 프야송비는 235MPa, 206GPa, 0.3으로 가정하였다. 보강판 요소의 평균 압축 강도는 IACS CSR(2010a and 2010b)에 정의



(a) ABS



(b) DNV

Fig. 5 Asymmetrically damaged section of a VLCC

Table 1 Principal dimensions(unit : m)

|          |        |
|----------|--------|
| $L_{BP}$ | 320.00 |
| $B$      | 60.00  |
| $D$      | 30.50  |
| $T_{SC}$ | 22.50  |
| $a$      | 5.68   |

$L_{BP}$  : 수선간장(length bet. perpendiculars)  
 $B, D$  : 선폭, 깊이  
 $T_{SC}$  : 구조강도 만재흘수(scantling draft)  
 $a$  : 프레임 간격

Table 2 Calculated section properties for zero deg. moment plane(unit : mm, N, deg)

|                   | Intact    | Damaged (ABS) | Damaged (DNV) |
|-------------------|-----------|---------------|---------------|
| $A_I$             | 1.046E+07 | 9.902E+06     | 9.322E+06     |
| $C_y$             | 5.100E-01 | 1.585E+03     | 3.471E+03     |
| $C_z$             | 1.289E+04 | 1.205E+04     | 1.177E+04     |
| $I_{ENMP}$        | 1.315E+15 | 1.191E+15     | 1.189E+15     |
| $Z_{ENMP,c}$      | 6.916E+10 | 5.998E+10     | 5.908E+10     |
| $Z_{ENMP,t}$      | 1.027E+11 | 9.946E+10     | 1.017E+10     |
| $M_{ENMP,0}$      | 1.625E+13 | 1.410E+13     | 1.388E+13     |
| $M_{ENMP,p}$      | 2.497E+13 | 2.279E+13     | 2.211E+13     |
| $M_{ENAP,u}$      | 1.636E+13 | 1.421E+13     | 1.284E+13     |
| $\alpha_{elas}$   | 0.000E+00 | 3.400E+00     | 5.400E+00     |
| $\alpha_{inelas}$ | 0.000E+00 | 1.800E+00     | 4.000E+00     |
| $p_{inelas,y}$    | -9.32E+03 | -1.02E+04     | -1.11E+04     |
| $p_{inelas,z}$    | 5.194E+03 | 4.683E+03     | 4.283E+03     |

된 공식을 적용하였다.

하중의 비대칭성을 유발하기 위하여 횡경사 각도(모멘트 평면)가 0도(새김)와 30도인 경우에 대하여 연구를 수행하였다. 전술한 바와 같이 형상 비대칭은 선박의 손상을 의미하며, 본 연구에서는 ABS(1995)와 DNV(2009)에서 제시하는 충돌에 의한 손상을 가정하였다(Fig. 5 참조). Table 2와 Table 3은 각각 횡경사각이 0도 및 30도일 경우 단면 속성을 나타낸다.

Table 3 Calculated section properties for 30 deg. moment plane(unit : mm, N, deg)

|                   | Intact    | Damaged (ABS) | Damaged (DNV) |
|-------------------|-----------|---------------|---------------|
| $A_t$             | 1.046E+07 | 9.902E+06     | 9.322E+06     |
| $C_y$             | 5.100E-01 | 1.585E+03     | 3.471E+03     |
| $C_z$             | 1.289E+04 | 1.205E+04     | 1.177E+04     |
| $I_{ENMP}$        | 2.085E+15 | 1.690E+15     | 1.563E+15     |
| $Z_{ENMP,c}$      | 6.917E+10 | 6.201E+10     | 5.698E+10     |
| $Z_{ENMP,t}$      | 8.266E+10 | 6.684E+10     | 6.013E+10     |
| $M_{ENMP,0}$      | 1.625E+13 | 1.457E+13     | 1.339E+13     |
| $M_{ENMP,p}$      | 2.894E+13 | 2.510E+13     | 2.232E+13     |
| $M_{ENAP,u}$      | 1.790E+13 | 1.550E+13     | 1.380E+13     |
| $\alpha_{elas}$   | -1.98E+01 | -1.66E+01     | -1.34E+01     |
| $\alpha_{inelas}$ | -2.18E+01 | -2.10E+01     | -1.92E+01     |
| $p_{inelas,y}$    | -7.59E+03 | -8.42E+03     | -9.60E+03     |
| $p_{inelas,z}$    | 5.273E+03 | 4.838E+03     | 4.195E+03     |

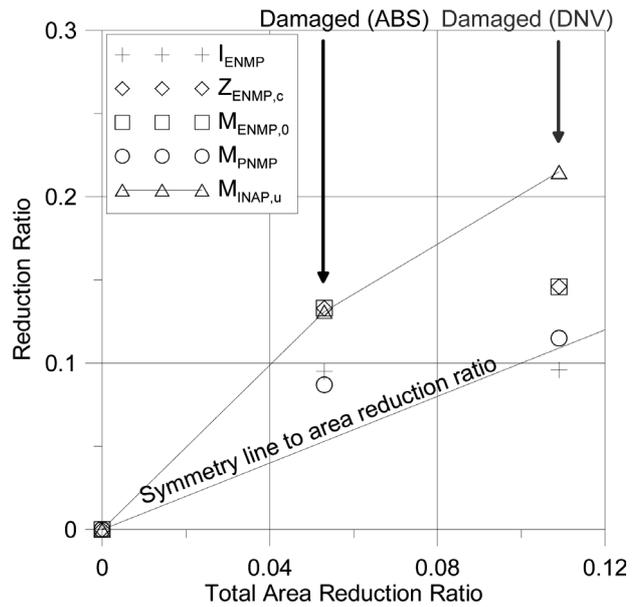
여기서

- $A_t$  : 전체 단면적
- $C_y$  : 중심선(center line, CL)부터 도심까지 수평 거리
- $C_z$  : 기선(base line, BL)부터 도심까지 수직 거리
- $I_{ENMP}$  : 탄성 중립 모멘트 평면에 관한 면적 2차 모멘트
- $Z_{ENMP,c}$  : 탄성 중립 모멘트 평면에 관한 압축 파트의 탄성 단면 계수
- $Z_{ENMP,t}$  : 탄성 중립 모멘트 평면에 관한 인장 파트의 탄성 단면 계수
- $M_{ENMP,0}$  : 탄성 중립 모멘트 평면에 관한 항복 모멘트
- $M_{ENMP,p}$  : 완전 소성 중립 모멘트 평면에 관한 완전 소성 모멘트
- $M_{ENAP,u}$  : 비탄성 중립축 평면에 관한 최종 굽힘 모멘트
- $\alpha_{elas}$  : 모멘트 평면과 탄성 중립축 평면이 이루는 각도
- $\alpha_{inelas}$  : 모멘트 평면과 비탄성 중립축 평면이 이루는 각도
- $p_{inelas,y}$  : 중심선부터 비탄성 중립축 평면이 통과하는 임의의 점까지의 수평 거리
- $p_{inelas,z}$  : 기선부터 비탄성 중립축 평면이 통과하는 임의의 점까지의 수직 거리

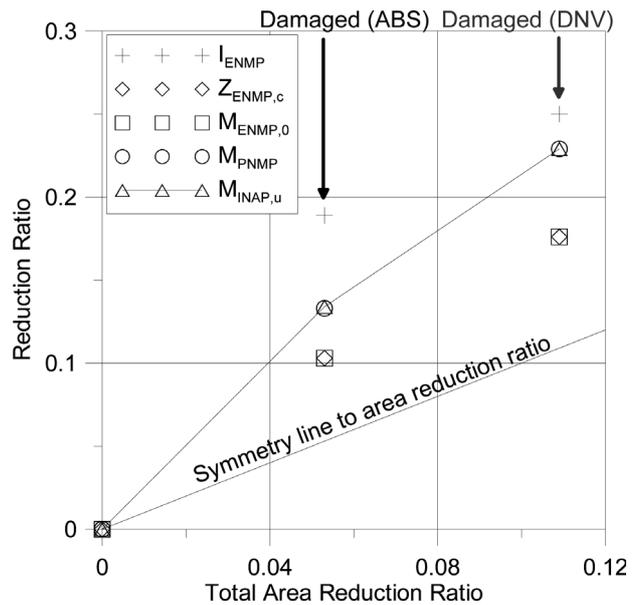
이때  $\alpha_{inelas}$ ,  $p_{inelas,y}$ ,  $p_{inelas,z}$ 을 산정하기 위하여 최외곽 보강판 요소의 평균 압축 변형률이 항복 변형률의 5배에 상응하는 굽힘 곡률의 크기로 가정하였다. IACS(2010a and 2010b)의 경우 비손상 선박에 대하여 항복 변형률의 3배에 상응하는 곡률을 계산 중

로 곡률( $\kappa_{INAP,u}$ )로 산정하지만 하중의 비대칭 또는 형상 형상의 비대칭으로 인하여 최종 굽힘 모멘트( $M_{INAP,u}$ )에 상응하는 최종 굽힘 곡률( $\kappa_{INAP,u}$ )이 증가하는 점을 감안하여 계산 종료 곡률을 증가시킨 점에 대하여 산정하였다.

선박에 비대칭성을 유발하는 모멘트 평면의 변동이 있더라도 단면적은 변동적이지 않으므로, 손상으로 인한 단면적 감소율과 기타 물리량의 감소율을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 비손상 선박에서 손상 선박으로의 가정에 따른 단면적 감소율 대비  $I_{ENMP}$ ,  $Z_{ENMP,c}$ ,  $M_{ENMP,0}$ ,  $M_{PNMP}$ ,  $M_{INAP,u}$ 의 감소율을 나타낸다. 대부분의 단면 속성은 단면적 감소율보다 심하게 감소하는 것을



(a) moment plane = 0 deg



(b) moment plane = 30 deg

Fig. 6 Area reduction ratio vs. reduction ratios of other section properties

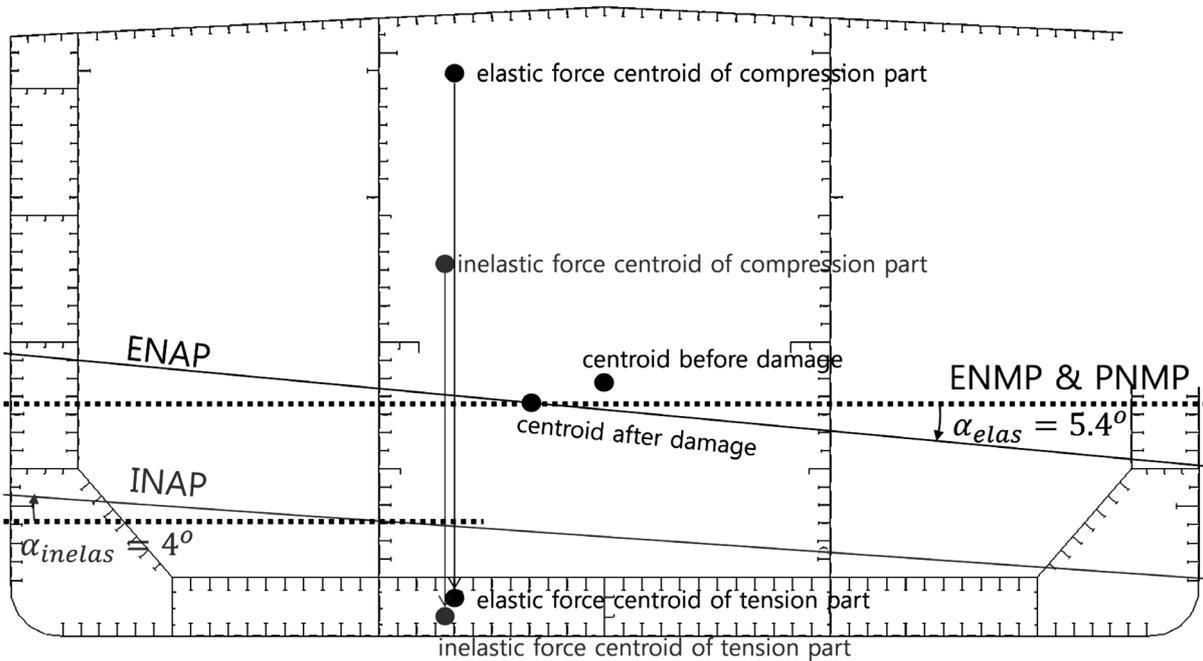


Fig. 7 History of translation and rotation of neutral axis plane

확인할 수 있다.

모멘트 평면의 회전으로 인한 형상 비대칭(Fig. 6 (b))은 손상으로 인한 형상 비대칭(Fig. 6 (a))보다 면적 2차 모멘트의 감소율을 크게 하는 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 모멘트 평면의 회전으로 인한 형상 비대칭(Fig. 6 (b))은 최외곽 보강판 요소까지의 거리를 증가시키므로, 압축 파트의 탄성 단면 계수 감소율은 면적 2차 모멘트의 감소율을 만큼 크지 않았다.

또한 모멘트 평면의 회전으로 인한 형상 비대칭(Fig. 6 (b))은 완전 소성 모멘트를 상당히 감소시키는 것으로 나타났다. 모멘트 평면의 회전은 최종 굽힘 모멘트에 크게 기여하지 않음을 확인할 수 있으며, 단지 손상의 크기로 인한 단면적 감소율에 상당히 비례적임을 확인할 수 있다.

최종 굽힘 모멘트가 단면적에 근사적으로 비례한다는 사실은 선체의 잔류 강강도를 예측하기 위한 매우 중요한 정보를 제공해 준다. 주어진 손상에 대하여 잔류 강강도를 간이적으로 예측하기 위한 지표가 되기 때문이다. 그러나 모멘트 평면의 심각한 회전, 좌초로 인한 손상, 타 선종 적용 여부 등에 대한 연구가 좀 더 보완될 필요가 있다.

Fig. 7은 DNV(2009)가 제시하는 선측 손상에 대하여 모멘트 평면이 0도인 경우, 중립축이 이동성을 나타낸다. Table 2에 나타난 바와 같이 탄성 중립축 평면은 모멘트 평면과 5.4도의 각도를 이루고 있으며, 비탄성 중립축 평면은 4도의 각도를 이루고 있다. 만약 모멘트 평면이 30인 경우 탄성 중립축 평면과 비탄성 중립축 평면은 더욱 불일치하게 됨을 Table 3로부터 알 수 있다.

Fig. 7에는 중립축으로 분할된 압축 파트(상면) 및 인장 파트(하면)의 하중 도심을 나타내었다. 탄성 상태와 비탄성 상태의 하중 도심은 상당한 차이를 나타내며, 모멘트 평면과 항상 직교하는 것을 관찰할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 구조적 관점에서 선박 단면의 대칭성(또는 비대칭성)의 정의를 제시하였다. 선박 단면의 대칭성을 재료 대칭, 형상 대칭, 하중 대칭으로 분류하였고, 세 가지를 모두 만족하는 경우를 대칭 단면으로 정의하였다. 선박 단면 구조부재로 사용되는 재료는 대부분 동일하기 때문에, 형상 대칭과 하중 대칭이 중요한 문제로 인식되며, 특히 선박의 손상은 형상 비대칭을 유발하고, 손상 후 침수 환경사로 인한 모멘트 합력은 하중 비대칭을 유발하는 대표적인 현상이다.

본 논문에서는 손상 선박과 같은 비대칭 단면에 있어서 도심 모멘트 평면, 중립축의 정의를 제시하였다. 비대칭 단면 선박(손상 선박)이 모멘트 합력(비대칭 하중)을 경험할 때, 중립축은 모멘트 평면으로부터 이동과 회전을 하기 때문에, 중립축을 탐색하기 위해서는 압축 파트와 인장 파트의 하중 평형 조건과 하중 벡터 평형 조건의 필요성을 제시하였다.

비대칭 단면의 면적 2차 모멘트, 탄성 단면 계수, 항복 모멘트, 완전 소성 모멘트, 최종 굽힘 모멘트 등의 선박 단면 속성을 정의하기 위해서 탄성 중립축 평면(ENMP), 완전 소성 중립축 평면(PNMP), 탄성 중립축 평면(ENAP), 비탄성 중립축 평면(INAP)의 개념을 도입하였다.

대형 유조선(LCC)을 대상으로 하중 비대칭성(모멘트 평면의 회전)과 형상 비대칭성(선박의 손상)을 고려하여 단면 속성을 도출하고 비교 검토 하였다. ABS(1995)와 DNV(2009)에서 제시하는 충돌로 인한 선측 손상을 가정하였으며, 모멘트 평면이 0도 및 30도인 경우를 고려하였다. 손상으로 인한 면적 감소율보다 대부분의 단면 속성 감소율이 크게 나타났으며, 최종 굽힘 모멘트의 경우 비교적 면적 감소율에 비례하는 것으로 나타났다. 또한 손상

후 선박의 탄성 중립축과 비탄성 중립축의 이동과 회전을 가시화하여 제시하였다.

본 논문의 연구 내용은 Smith법을 이용한 손상 선박의 잔류 종강도 예측을 위하여 필수적으로 필요한 기반 기술로 사료된다. 추후 재료의 비탄성 효과와 중립축의 이동/회전을 동시에 고려할 수 있는 프로그램의 개발이 요구된다. 또한 모멘트 평면 효과, 좌초로 인한 손상 효과, 타 선종 적용 여부 등에 대한 연구가 좀 더 보완될 필요가 있다.

## 후 기

본 논문은 인하대학교 연구비 지원 과제의 일부로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- American Bureau of Shipping(ABS), 1995a. *Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Tankers*. [Online] (Updated July 1995) Available at: <http://www.eagle.org/> [Accessed June 2010].
- Boresi, A.P., Schmidt, R.J. & Sidebottom, O.M., 1992. *Advanced Mechanics of Materials Fifth Edition*, John Wiley & Sons: New York.
- Cho, S.R. and Lee, S.H., 2005. Residual Longitudinal Strength Analysis of Damaged Ships, *Proceeding of Autumn Meeting of SNAK*, pp.405-412.
- Det Norske Veritas(DNV), 2009. *Rules for Classification of Ships Part 3 Chapter 1*. DNV
- International Association of Classification Societies(IACS), 2010a. *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers*. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].
- International Association of Classification Societies(IACS), 2010b. *Common Structural Rules for Bulk Carriers*. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].

International Maritime Organization(IMO), 1966. *International Convention on Load Lines(IOLL) Annex B Annex I Chapter III*. IMO

International Maritime Organization(IMO), 1995. Interim Guidelines for Approval of Alternative Methods of Design and Construction of Oil Tankers under Regulation 13F(5) of Annex I of MARPOL 73/78, *Resolution MEPC*, 66(37). IMO

International Maritime Organization(IMO), 1997. *MARPOL 73/78 & 1984 Amend Annex I Chapter III Requirement for Minimizing Oil Pollution from Oil Tankers due to Side and Bottom Damages*. IMO

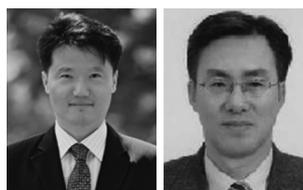
International Maritime Organization(IMO), 2003. Revised Interim Guidelines for the Approval of Alternative Methods of Design and Construction of Oil Tankers under Regulation 13F(5) of Annex II of MARPOL 73/78, *Resolution MEPC*, 110(49). IMO

Paik, J.K., Thayamballi, A.K. & Yang, S.H., 1998. Residual Strength Assessment of Ships after Collision and Grounding. *Marine Technology*, 35(1), pp.38-54.

Smith, C.S., 1977. Influence of Local Compression Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship Hull. *Proceeding of International Symposium on Practical Design in Shipbuilding (PRADS)*, 18-20 October, Tokyo Japan, pp.73-79.

Smith, M.J. & Pegg, N.G., 2003. Automated Assessment of Ultimate Hull Girder Strength, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 125, pp.211-218.

Wang, G., Chen, Y., Zhang, H. & Peng, H., 2002. Longitudinal Strength of Ships with Accidental Damages, *Marine Structures*, 15, pp.119-138.



정준모

김영훈