

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第34卷第3號 1997年 8月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 34, No. 3, August 1997

## 알루미늄샌드위치 초고속 카훼리의 구조설계

백점기\*, 이용욱\*\*

### Structural Design of Aluminum Sandwich High Speed Car-ferry

by

Jeom K. Paik\* and Yong W. Lee\*\*

#### 요 약

초고속선의 구조설계에 있어서 가장 중요한 요소중의 하나가 구조부재에 대한 경량화이며, 이 점에서 최근 알루미늄하니콤 샌드위치판이 초고속선의 선각재료로서 주목을 받고있다. 본 논문에서는 80미터급 초고속 카훼리에 대한 시설계를 통하여 알루미늄 샌드위치판의 초고속선의 선각재료로서의 유용성을 확인코져 한다. 이를위해, 먼저 사례연구 대상선박의 사양을 정하고, 기존의 알루미늄 보강판 방식과 샌드위치 방식으로 구조설계를 수행, 이들의 설계결과를 비교함으로써 샌드위치구조의 구조경량화 가능성을 검증코져 한다.

선박의 경제성을 검토하기 위해서 선박건조비 및 운항비를 포함한 전체비용을 두가지 방식에 대하여 정량적 비용분석을 수행코져 한다. 끝으로, 현재 초고속대형선의 선각재료로서 알루미늄하니콤 샌드위치판이 사용되지 못했던 원인과 앞으로 해결해야할 과제들에 대해서 고찰하였다.

#### Abstract

Aluminum-faced honeycomb-cored sandwich panels as hull plating can provide structural weight savings when compared with the conventional aluminum single panels. The aim of the present paper is to confirm the feasibility of the sandwich panels for the hull material of fast ferries through designing an 80m class proto-type fast passenger/car ferry. For the case study, the structural design for the same principal particulars using the aluminum single panels is also performed, and the design results for the two types will be compared to confirm the weight savings between the two construction methods.

---

발 표 : 1997년도 대한조선학회 춘계연구발표회('97. 4. 25.)

접수일자 : 1997년 1월 16일, 재접수일자 : 1997년 5월 2일

\* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

\*\* 정회원, (주)세모 조선사업본부

The economics of a ship, being comprised of the shipbuilding cost and ship operating cost, will require a cost analysis including a quantitative comparison between the two construction methods and the results of the cost analysis will be presented. Finally, the reasons why aluminum sandwich panels have not presently been used as the hull material for large size fast vessels will be discussed.

**기호설명**

|                 |                                       |          |  |
|-----------------|---------------------------------------|----------|--|
| $a$             | 판의 길이                                 | $I_s$    | $\sigma_e A_t s^2 / (0.001E)$                      |
| $A_w$           | 보강재의 웹 단면적                            | $K_1$    | MIL-HDBK-23A [12]에 정의된 샌드위치판내의 처짐계수                |
| $A_t$           | 보강재의 단면적                              | $K_2$    | MIL-HDBK-23A에 정의된 샌드위치판내의 면재 응력계수                  |
| $A_c$           | 유효 전단 면적                              | $K_3$    | MIL-HDBK-23A에 정의된 샌드위치판내의전단 응력계수                   |
| $b$             | 판의 폭                                  | $LCG$    | 선박의 중심   |
| $c_t$           | 상수                                    | $l_e$    | 유효길이   |
| $E$             | 재료의 종탄성계수                             | $L_R$    | 로이드 법규장 (Rule length)                              |
| $E_c$           | 코어의 종탄성계수                             | $k_m$    | $385 / (\sigma_A + \sigma_u)$                      |
| $E_{c1}$        | 1번째 요소의 압축탄성계수                        | $p$      | 설계 압력  |
| $E_f$           | 면재의 종탄성계수                             | $P$      | 작용 하중  |
| $E_h$           | i번째 요소의 인장탄성계수                        | $Q_R$    | 선각에 대한 설계 전단력                                      |
| $f_\sigma$      | 보강재의 한계 굽힘응력계수                        | $s$      | 보강재 간격   |
| $f_{\sigma eq}$ | cross-deck의 한계 등가응력계수                 | $s_b$    | 거더 간격  |
| $f_{\sigma V}$  | cross-deck의 한계 굽힘응력계수                 | $SSC$    | 특수선(special service craft)                         |
| $f_\tau$        | 보강재의 한계 전단응력계수                        | $t$      | 판두께  |
| $f_{\tau V}$    | cross-deck의 한계 전단응력계수                 | $t_f$    | 면재 두께  |
| $f_\delta$      | 처짐비(=길이/처짐량)                          | $t_b$    | 판두께  |
| $G$             | 재료의 전단탄성계수                            | $\omega$ | 로이드 규정에서의 운항계수                                     |
| $G_w$           | 재료의 횡전단탄성계수(transverse shear modulus) | $Z$      | 단면계수   |
| $h_c$           | 코어 높이                                 | $\delta$ | 처짐량  |
| $h_w$           | 보강재의 웹 높이                             | $\Phi_A$ | 로이드선급 특수선규칙[6] Pt. 7, Ch.3의 Table 3.1.1에 정의된 웹단면계수 |
| $I$             | 관성모멘트                                 | $\Phi_I$ | 로이드선급 특수선규칙 Pt. 7, Ch. 3의 Table 3.1.1에 정의된 관성계수    |
| $I_f$           | 면재의 관성모멘트                             | $\Phi_Z$ | 로이드선급 특수선규칙 Pt. 7, Ch. 3의 Table 3.1.1에 정의된 단면계수    |
| $I_j$           | i번째 요소의 관성모멘트                         |          |  |
| $I_b$           | 거더의 한계 관성모멘트                          |          |  |

|               |  |
|---------------|--|
| $\gamma$      | 로이드선급 특수선규칙 Pt. 7, Ch. 3의 1.14항에 정의된 볼록곡률 수정계수 |
| $\nu$         | 포아송의 비   |
| $\rho$        | 재료의 밀도   |
| $\sigma_a$    | 용접후 0.2% 최소 재료내력                               |
| $\sigma_A$    | 최소 항복응력  |
| $\sigma_{ci}$ | i번째 요소내의 압축응력                                  |
| $\sigma_d$    | 강력갑판에서의 선각거더 굽힘응력                              |
| $\sigma_{eq}$ | 등가응력   |
| $\sigma_{IC}$ | 셀간 좌굴응력  |
| $\sigma_k$    | 키일에서의 선각거더 굽힘응력                                |
| $\sigma_l$    | 선저 종보강재의 응력                                    |
| $\sigma_{MB}$ | 횡굽힘모멘트에 의한 응력                                  |
| $\sigma_{MT}$ | 비틀림모멘트에 의한 응력                                  |
| $\sigma_p$    | 선각의 최대 허용 굽힘응력                                 |
| $\sigma_t$    | 선저판내의 응력                                       |
| $\sigma_T$    | 재료의 인장강도                                       |
| $\sigma_{ti}$ | i번째 요소내의 인장응력                                  |
| $\sigma_u$    | 재료 인장강도  |
| $\sigma_w$    | 면재의 wrinkling stress                           |
| $\sigma_y$    | 재료 항복응력  |
| $\tau_a$      | 용접후 최소 재료 전단응력                                 |
| $\tau_c$      | 심재 전단응력 또는 거더웨브의 좌굴에 대한 한계 전단응력                |
| $\tau_{MBT}$  | 비틀림모멘트에 의한 굽힘전단응력                              |
| $\tau_{MT}$   | 비틀림모멘트에 의한 전단응력                                |
| $\tau_p$      | 최대 허용 평균 전단응력                                  |
| $\tau_T$      | 수직전단력에 의한 전단응력                                 |

## 1. 서론

최근의 초고속선은 고속화 및 대형화를 요구하고 있으며, 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 구조의 경량화가 필수적이다. 이를 만족시킬 수 있는 유망 선각 재료로서 고장력강, 알루미늄합금 및 복합재료(composite) 등이 주목을 받아왔다.

현재, 대부분의 초고속선들이 알루미늄합금을 사용하여 건조되고 있는 데, 이는 선각중량 경량성, 해수에 대한 우수한 내식성 및 생산성 향상의 용이 등을 주요인으로 볼 수 있다 [1]. 각 조선소에서는 구조부재의 경량화 및 제조비 경감을 목적으로 다양한 압출재를 사용하여 왔지만, 이로인해 용접변형 감소 및 제조비 감소에는 기여를 했으나 구조 중량감소에는 미흡하였다 [2].

최근들어 일본의 신간센이나 프랑스의 TGV와 같은 여객운송을 목적으로 하는 고속열차의 설계 및 제조에 구조 중량의 경감을 위하여 하니콤 샌드위치 구조를 채택하고 있다. 또한, 선박부문에서도 비교적 적용이 용이한 칸막이, 조타대 및 내장 마감판넬에 이 재료의 사용이 증가하고 있으며, 그 적용범위 또한 확대되고 있다. 일본에서는 1993년에 알루미늄하니콤 샌드위치판을 사용하여 13미터급 쌍동선을 건조한 실적이 있는 데, 이것이 선박전체를 알루미늄하니콤판을 사용하여 선각을 건조한 최초의 사례이다 [3].

먼저, 본 연구에서는 초고속 대형선의 선각재료로 적합한 샌드위치판의 면재 및 심재를 조사하여 선정한 후, 이 재료를 사용하여 최대속력 45노트, 적재하중 300톤의 초고속 카페리의 구조설계를 수행토록 한다. 이에 앞서, 위의 샌드위치 설계와 동일한 규모를 갖는 기존의 알루미늄 보강판 방식의 설계를 수행한다. 이 두가지 방식의 구조설계 결과에 대한 비교를 통하여, 알루미늄 샌드위치판 방식의 유용성을 확인코져 한다.

위의 구조설계 결과를 기초로 선박건조비 및 운항비를 포함하여, 두가지 구조방식에 대하여 선박의 경제성을 검토한다. 또한, 선박의 규모가 증가함에 따라 비용변동추이를 조사한다. 끝으로, 현재 초고속대형선의 선각재료로서 알루미늄하니콤 샌드위치판이 사용되지 못했던 원인과 앞으로 해결해야할 과제들에 대해서 고찰한다.

## 2. 샌드위치 구조

기존의 선박구조는 Fig. 1의 (a)에서 보이는 바와 같이 늑골과 보강재들이 박판에 복잡하게 배치

된 구조였다. 이러한 구조형태는 많은 용접선(welding line)을 수반하며, 이것이 용접시 용접변형을 일으키는 요인이 될 수 있다. 따라서, 이를 방지하기 위해서 별도의 재료와 공수를 수반하게 된다. 뿐만아니라, 용접선의 증가는 피로파괴의 가능성을 더욱 증가시키는 요인이 되기도 한다.

Fig. 1의 (b)와 같은 알루미늄하니콤 샌드위치 판을 이용한 새로운 선각 구조방식은 위에서 언급했던 기존 구조방식의 문제점을 해소할 수 있다. 이 구조방식을 채용할 경우, 얻을 수 있는 잇점은 다음과 같다.

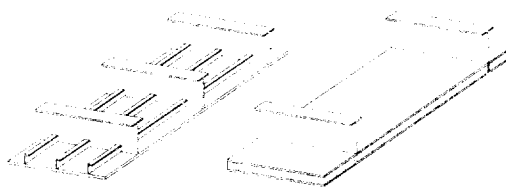
(1) 동일한 단면적으로 단면계수와 관성모멘트를 증가시킬 수 있다.

(2) 판에 보강재가 붙어있지 않기 때문에, 늑골과의 조립이 간단하여 용접선을 감소시켜 준다.

(3) 샌드위치판이 갖는 고강성과 용접선의 감소가 용접변형을 상당히 감소시켜 준다.

(4) 샌드위치판의 고강성이 늑골간격을 증가시켜주며, 이것이 결국 선각 중량경감으로 이어진다.

샌드위치판의 면재는 I빔의 플랜지와 같이 굽힘 응력을 감당하는 역할을 하여 한쪽 면재가 압축을 받을 때, 반대쪽 면재는 인장하중을 받게 된다. 심재는 I빔의 웨브와 같은 역할을 수행하여, 이에 작용하는 전단하중을 감당하며, 양 면재로 하여금 일정간격을 떨어뜨려 유지시켜줌으로써 강성을 증가시켜 주는 역할을 한다. 심재와 면재간의 접착재는 심재와 면재를 하나로 연결시켜주고 이 부재로 하여금 충분한 비틀림 및 굽힘강성을 갖도록 해준다.



(a) Conventional (b) Sandwich

Fig. 1 Systems of hull structure

Table 1 Physical properties of shipbuilding materials

| Property                       | Al. <sup>a</sup> | GRP <sup>b</sup> | Steel   |
|--------------------------------|------------------|------------------|---------|
|                                | 5083             |                  |         |
| Density(g/cm <sup>3</sup> )    | 2.66             | 1.80             | 7.85    |
| Mod.of elasticity(GPa)         | 69               | 21               | 206     |
| 0.2% proof stress(MPa)         | 165/135          | -                | 207     |
| Tensile strength(MPa)          | 300/240          | 380              | 410     |
| Shear strength(MPa)            | 80,000           | 70,000           | 225,000 |
| Specific strength <sup>c</sup> | 113/90           | 211              | 52      |
| Specific modulus <sup>d</sup>  | 25.9             | 11.7             | 26.2    |

Note :

a Unwelded/welded

b Glass/epoxy/multi-axial

c Tensile strength normalized by density(  $\sigma_T/\rho$  )

d Modulus of elasticity normalized by density(  $E/\rho$  )

### 2.1 면재

초고속선의 선각재료가 지녀야 할 요건에 대해서 조사되어 왔으며, 조사결과 알루미늄합금, 고장력강 및 복합재료가 유망한 재료인 것으로 알려져 왔다. 이 절에서는 기존의 조사결과를 토대로, 위의 세가지 재료중에서 초고속 대형선의 선각재료로 가장 우수한 재질을 선정코져 한다.

Table 1은 이 세가지 재료가 갖는 물성치를 보여주고 있으며, 복합재료는 사용섬유의 종류, 방향 및 조합에 따라서 큰 차이를 보이기 때문에 GRP 샌드위치 구조에서 흔히 쓰이는 에폭시 계열의 다축 유리섬유를 대상으로 하였다. 이 표를 통해서, 단위중량당 강도에서는 GRP가 아주 우수하지만, 단위중량당 탄성계수는 알루미늄합금의 45%에 지나지 않는다. 이는 하중이 작용할 때 강도는 충분하나 상대적으로 큰 변형을 수반할 수 있음을 나타내 준다.

Table 2 Ranking of shipbuilding materials for large sized high speed vessel

| Items                     | Weight | Al.       | GRP       | Steel     |
|---------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| Light weight              | 5      | ⊙         | ○         | △         |
| Strength                  | 2      | △         | ○         | ⊙         |
| Hull flexibility          | 2      | ○         | △         | ⊙         |
| Resistance to corrosion   | 3      | ⊙         | ⊙         | △         |
| Maintenance & repair ease | 1      | △         | ○         | ⊙         |
| Fire protection           | 2      | ○         | △         | ⊙         |
| Shipbuild. cost           | 2      | ○         | △         | ⊙         |
| Recirculation             | 1      | ⊙         | ×         | ○         |
| <b>Total score</b>        |        | <b>60</b> | <b>49</b> | <b>55</b> |

Note :

- ⊙ excellent (score 4)
- good (score 3)
- △ normal (score 2)
- × incompetent (score 1)

Table 2는 이들 선각재료들중에서 정량적으로 우수성을 예측하기 위한 것으로서, 먼저 각 항목별로 중요도에 따라 1에서 5까지의 가중치를 부여하고, 각 항목에 대해서는 만족도에 따라 1에서 4까지 점수를 부여하여, 가중치에 각 항목별 점수를 곱한 것을 누계를 계산하였다. 알루미늄합금의 경우 경량성, 내식성, 폐선처리에서 우수함을 알 수 있으며, GRP의 경우, 내식성은 우수하나 재료의 재순환이 어렵기 때문에 폐선처리가 곤란하고 80미터 이상의 대형선에 적용된 실적이 없기 때문에 설계위험이 내재한다. 고장력강의 경우는 강도, 유지보수비, 내화성 및 건조선가 등에서 우수함이 인정되나, 경량성 측면에서 여타 재료에 비해 불리하다. 종합하여 볼 때, 초고속 대형선의 선각재료로서 알루미늄합금, 강, 복합재료의 순으로 우수함을 알 수 있다. 만일, 저속 대형선의 경우라면 경량성이 중요한 요소가 되지 않기 때문에 강이 가장 우수한 요소가 될 수 있겠고, 초고속

소형선이라면 종강도 및 설계위험도가 문제가 되지 않고, 건조선가도 가장 싸질 수 있기 때문에 GRP가 가장 우수한 재료가 될 수 있다.

## 2.2 심재

Table 3은 샌드위치 구조에서 주로 사용되고 있는 심재들의 물성치를 보여주는 표이다. 현재까지 샌드위치 구조를 채택해서 초고속선을 건조했던 실적을 살펴보면, 대부분의 경우가 면재가 GRP이고, 심재로서 PVC foam을 사용하였으며, 선박의 규모로는 55미터 이하의 비교적 소형선박이 그 적용대상이었다 [4].

Table 3 Core material properties

| Items                       | Core type | Balsa | PVC foam | Al. H/C <sup>a</sup> | Nomex H/C |
|-----------------------------|-----------|-------|----------|----------------------|-----------|
| Density(kg/m <sup>3</sup> ) |           | 96.0  | 80.0     | 83.2                 | 32.0      |
| Shear strength(MPa)         |           | 1.9   | 1.0      | 2.4                  | 0.7       |
| Compressive strength (MPa)  |           | 6.5   | 1.2      | 4.6                  | 1.0       |

Note : a Abbreviation for Honeycomb Core

Table 3을 살펴보면, 동일한 심재비중하에서 알루미늄하니콤 심재가 압축 및 전단강도에 있어서 우수함을 보여주고 있으며, 이러한 우수한 특성 때문에 구조적으로 경량화를 요구하는 수송수단의 부재에 이 심재의 사용이 급증하고 있다 [5]. 따라서, 본 연구에서는 사례연구의 대상인 80미터급 초고속 카페리의 선각재료로서의 심재에 알루미늄하니콤을 적용하였다.

## 3. 사례 연구 - 쌍동선

알루미늄하니콤 샌드위치구조의 유용성을 확인하기 위하여, 최근 초고속 여객선으로서 시장규모가 급성장하고 있는 80미터급 쌍동형 카페리를 대상으로 사례 연구를 수행하였다.

3.1 대상 선박 사양

대상 선박은 최대속력 45노트의 80미터급 쌍동형 카페리로서, 그 상세 사양은 아래 표와 같다.

Table 4 Principal particulars for candidate ferry

| Property                 | Units  | Specification |
|--------------------------|--------|---------------|
| Length overall           | m      | 80.0          |
| Length perpendiculars    | m      | 71.5          |
| Breadth overall          | m      | 22.4          |
| Demi-hull breadth (max.) | m      | 5.0           |
| Depth (up to main deck)  | m      | 7.0           |
| Draft (fully loaded)     | m      | 2.52          |
| Displacement             | tonnes | 930           |
| Maximum speed            | knots  | 45            |

3.2 일반배치도

대상 선박은 여객과 승용차 및 버스의 수송이 가능하도록 설계되었으며, 이에 관한 일반배치도는 Fig. 2와 같다.

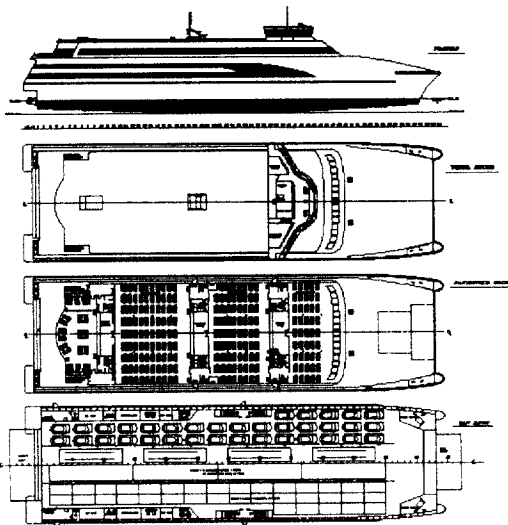


Fig. 2 General arrangement for candidate catamaran passenger/car ferry

이 선박은 슬래밍 하중과 해수압을 감당하는 wet deck와 승용차와 버스가 적재되는 주갑판 및

선루갑판으로 이루어져 있다. 차량은 선수와 선미에 있는 선수램프와 선미램프를 통해 출입된다. 주갑판에는 총 8열로 100대의 승용차를 적재하거나, 70대의 승용차와 8대의 버스를 적재할 수 있다. 이 갑판의 중앙은 11톤의 축하중을 견딜 수 있도록 하였으며, 양 측은 1.4톤의 축하중을 가진 차량을 적재할 수 있도록 하였다. 승객은 선루갑판상에 배치되도록 하였으며, 거주구는 네 개의 라운지로 구분되었으며, 각 라운지에는 주방과 화장실이 별도로 되어있다.

3.3 선형

본 사례연구를 위하여 대상 선박의 선형으로 기존의 라운드빌지형의 선형을 채택하였으며, 각 등분선별 단면은 Fig. 3과 같다.

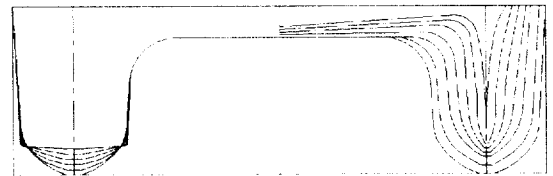


Fig. 3 Hull form of the case-catamaran

3.4 선박 구조 및 재료

대상 선박은 두 개의 단동 선체와 종방향으로 일곱 개의 수밀구역으로 구성되었으며, 양 단동 선체사이에 연결구조(flat cross-structure)가 위치해 있다.

알루미늄보강판 방식에는 알루미늄합금 5083H321 및 6082T6를 사용하였고, 주갑판은 1.2미터 간격의 갑판트랜스버스위에 보강재가 붙은 보강판 방식으로 되어있다. 선박의 종방향 중심선으로부터 3.5미터 떨어진 거리에는 종격벽이 설치되며, 각 단동선체 중앙에도 종격벽이 설치된다. 이 선박의 구조중량을 줄이기 위해 압출재를 많이 사용하였다. 여기에 사용되는 알루미늄합금의 물성자료는 로이드 선급규정에 준하였으며, 그 내용은 Table 5와 같다.

Table 5 Mechanical properties of aluminum alloys in MPa

| Property                           | 5083   | 6082   |
|------------------------------------|--------|--------|
| 0.2% proof stress (unwelded)       | 215    | 240    |
| 0.2% proof stress (welded)         | 165    | 135    |
| Modulus of elasticity              | 69,000 | 69,000 |
| Allowable stress                   | 165    | 112    |
| Ultimate tensile stress (unwelded) | 300    | 280    |
| Ultimate tensile stress (welded)   | 240    | 160    |

알루미늄 샌드위치 설계에서도 알루미늄보강판 방식의 설계에서와 동일한 알루미늄합금을 사용하였고, 면재의 최소두께로는 2.5mm를 선정하였다. 이 설계에 사용된 재료의 사양은 Table 6과 같다.

Table 6 Used materials for aluminum sandwich construction

|        |                             |                                     |
|--------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Facing | material                    | aluminum alloy<br>5083H321 / 6082T6 |
|        | thickness(mm)               | 2.5/3.0/3.5/4.0/4.5/5.0             |
| Core   | material                    | aluminum honeycomb<br>3003H19       |
|        | density(kg/m <sup>3</sup> ) | 54.4/83.2/100/130                   |
|        | height(mm)                  | 25 / 50 / 60                        |

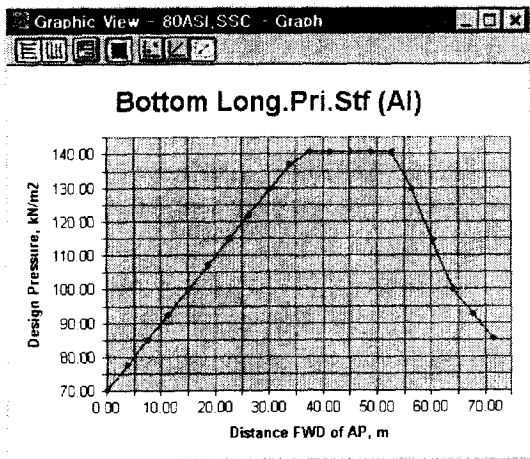


Fig. 4 Example view for calculation of design loads

### 3.5 하중조건 및 설계하중

대상 선박에 대한 구조 설계에 있어서 입력자료로 사용될 하중조건 설정 및 설계하중의 계산은 로이드 선급에서 개발한 SSC 소프트웨어를 사용하였으며, Table 7은 대상 선박에 대한 하중조건들을 보여주고 있다. 또한, Fig. 4에는 이 소프트웨어를 사용하여 선저 종거더에 대한 설계하중에 대한 계산 결과를 보여 주고 있다.

## 4. 구조설계

객관적인 비교를 위하여 먼저, 이와 동일한 선박규모와 동일한 조건하에서 기존의 알루미늄보강판 방식으로 고속선에 관한 선급규정에 의거, 구조설계를 수행하였다. 다음, 알루미늄합금을 면재로 하고 알루미늄하니콤을 심재로 하는 알루미늄하니콤 샌드위치판을 사용하여 직접계산 방식에 의거, 구조설계를 수행하였다.

설계 계산은 기본적으로 로이드 선급의 특수선 규정 [6]에 준하여 수행하였다.

### 4.1 구조설계 요건 (structural requirements)

선각 구조를 종거더나 횡능골과 같은 1차부재와 판요소로 분리할 수 있으며, 본 설계에 적용한 제약조건은 다음과 같다.

#### 4.1.1 알루미늄보강판 방식의 판요소

보강판에 대한 설계 제약조건은 다음과 같다.

(1) 판의 최소 두께

$$t_p = \omega \sqrt{k_m (c_1 \sqrt{L_R} + c_2)} \quad (1)$$

(2) 판의 굽힘응력

$$t_p = 22.4 s \gamma \beta \sqrt{\frac{p}{f_\sigma \sigma_a}} \quad (2)$$

(3) 보강재의 요건

$$Z = \Phi_z \frac{p s l_e^2}{f_\sigma \sigma_a} \quad (3)$$

$$I = \Phi_I f_\delta \frac{\rho s l_e^3}{E} \quad (4)$$

$$A_w = \Phi_A \frac{\rho s l_e}{f_\tau \tau_a} \quad (5)$$

(4) 보강판의 탄성좌굴응력에 대한 제약조건  
로이드선급 특수선규칙 Pt. 7, Ch. 7, Sec. 4의  
제약조건에 준함

Table 7 Loading condition for candidate vessel

| Property                | Units             | Entered | Derived |
|-------------------------|-------------------|---------|---------|
| Allowable speed         | knots             | 45.0    |         |
| Deadrise angle          | deg               | 21.0    |         |
| Density                 | kg/m <sup>3</sup> | 1,025   |         |
| Displacement mass       | ton               | 930     |         |
| Displacement volume     | m <sup>3</sup>    |         | 907     |
| Draught                 | m                 | 2.52    |         |
| Froude number           |                   |         | 1.7     |
| Girth distance          | m                 | 3.5     |         |
| In contact with water   |                   | yes     |         |
| Long centre gravity     | m                 | 29.0    |         |
| Maximum air gap         | m                 | 4.2     |         |
| Maximum wave height     | m                 | 3.3     |         |
| Operational height      | m                 | n/a     |         |
| Relative vertical speed | knots             |         | 3.9     |
| Significant wave height | m                 |         | 2.0     |
| Surviving wave height   | m                 |         | 2.6     |
| Taylor's Quotient       |                   |         | 5.3     |
| Bread. of hull at LCG   | m                 | 8.9     |         |
| Vertical accel. at LCG  | g                 |         | 0.7     |
| Volumetric speed no.    |                   |         | 22.4    |
| Waterline length        | m                 | 71.5    |         |

#### 4.1.2 알루미늄 샌드위치 구조의 판요소

알루미늄 샌드위치판에 대한 설계 계산을 적용할 수 있는 선급규정이 아직까지는 개발되어 있지 않기 때문에, 횡압을 받는 샌드위치판 설계에 있어서 하니콧 샌드위치 이론 [7] 및 MIL-HDBK-23A [12]를 적용하였다.

계산을 쉽게하기 위하여 경계조건을 사변 단순 지지로 설정하였다. 이 조건을 실제보다 안전계수를 크게 해주는 안전측의 설계가 되며, 또한, 4.1.1절의 선급에서 적용하는 조건보다도 안전측의

설계가 된다.

(1) 판의 처짐량

$$\delta = \frac{2 K_1 \rho b^4 (1 - \nu^2)}{E t_f (h_c + t_f)^2} \quad (6)$$

(2) 면재의 허용응력

$$\sigma_f = \frac{K_2 \rho b^2}{(h_c + t_f) t_f} \quad (7)$$

(3) 심재의 전단응력

$$\tau_c = \frac{K_3 \rho b}{(h_c + t_f)} \quad (8)$$

(4) 셀간 좌굴응력

$$\sigma_{IC} = \frac{2E}{(1 - \nu^2)} \left( \frac{t_f}{D} \right)^2 \quad (9)$$

(5) 면재의 wrinkling응력

$$\sigma_w = \frac{1}{2} (G_w E_c E_f)^{1/3} \quad (10)$$

#### 4.1.3 1차부재 (primary stiffener)

1차 부재에 대한 제약조건은 두 구조방식에 공통적으로 적용하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

(1) 웨브의 최소두께 요건

(2) 보강재의 요건 : 4.1.1항과 동일

(3) 1차부재의 탄성좌굴응력에 대한 제약조건

$$I_p = \frac{0.35 s^4 \rho I_s}{l^3 s} \quad (11)$$

(4) 거더웨브의 전단좌굴에 대한 제약조건

$$\tau_c = 3.62 \left( 1.335 + \frac{h_w}{l_p} \right) E \left( \frac{t_p}{s} \right) \quad (12)$$

#### 4.2 구조 계산 (structural scantlings)

##### 4.2.1 알루미늄보강판

(aluminum single panel)

알루미늄보강판 및 1차부재에 대한 구조 계산은 로이드 선급규정의 SSC 프로그램 [8]을 이용, 전



술한 4.1.1항 및 4.1.3항의 제약조건에 준하여 계산 되었으며, Fig. 5는 사례연구 대상선박의 구조설계에 대한 계통도를 보여 주고 있다. Table 8은 이 프로그램을 이용하여 선저 외판에 대한 계산결과를 보여 주고 있다.

Fig. 6는 구조 국부계산 결과를 이용하여 만든 선체 모델이다.

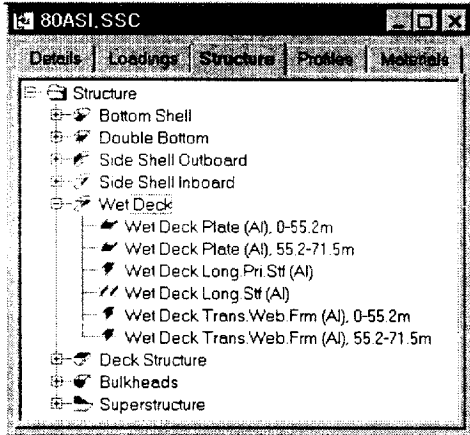


Fig. 5 Tree view of case catamaran

Table 8 Scantling results for bottom shell plate

| Property             | Units             | Entered | Derived | Rule |
|----------------------|-------------------|---------|---------|------|
| Alloy                |                   | 5083    |         |      |
| Below tangent. point |                   | Yes     |         |      |
| Design pressure      | kN/m <sup>2</sup> |         | 266.6   |      |
| Distance from AP     | m                 | 32.0    |         |      |
| Height above base    | m                 | 0.486   |         |      |
| Panel aspect ratio   |                   |         | 4.2     |      |
| Panel breadth        | mm                |         | 285     |      |
| Panel length         | mm                | 1,200   |         |      |
| Slamming zone        |                   | Yes     |         |      |
| Stiffener spacing    | mm                | 285     |         |      |
| Thickness            | mm                | 9.00    |         | 8.80 |

4.2.2 알루미늄 샌드위치판 (sandwich panel)

알루미늄 샌드위치판에 대한 구조 계산은 3.5절에서 구한 설계하중과 4.1.2, 4.1.3항의 설계 조건

요건 및 로이드 SSC규정의 Part 8, Ch.7의 설계 제약조건을 이용하여 수행되었다. 단, 자중 11톤의 버스가 탑재되는 주갑판의 중앙부에 대해서는 유한요소해석을 병행하였다.

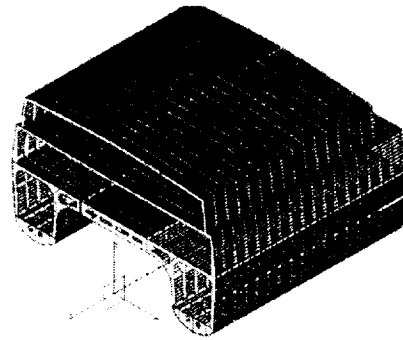


Fig. 6 Model of case catamaran

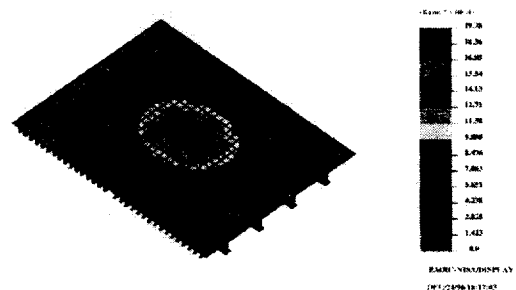


Fig. 7 Example of FE analysis for aluminum single construction under wheel loading

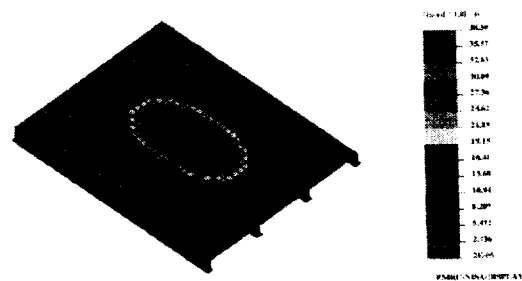


Fig. 8 Example of FE analysis for aluminum sandwich construction under wheel loading

### 4.2.3 주갑판에 대한 유한요소해석

Fig. 7과 Fig. 8은 주갑판의 중앙영역, 즉, 비스가 적재되는 곳에 대한 두 구조방식에 대한 FEM NISA-II 프로그램을 이용한 해석 결과를 각각 보여주고 있다. 비교대상 영역은 7.0m × 5.4m이다. 알루미늄 보강판 방식의 구조에서는 6절점 3차원 쉘요소를 사용하였으며, 샌드위치 구조에서는 6절점 3차원 쉘요소 및 6절점 샌드위치 쉘요소를 사용하였다.

해석 결과는 두 경우 모두다 중앙부의 하중이 작용하는 곳에서 처짐이 가장 크게 발생하였고, 두 경우 모두 처짐이나 응력측면에서 선급에서 제시하는 허용한계를 벗어나지 않았다. 이에 대한 결과와 Table 9에 잘 나타나 있으며, 이 표에서도 알 수 있듯이 처짐과 응력은 비슷한 상태에서 소요중량은 샌드위치구조의 경우가 약 30%의 중량경감이 가능함을 알 수 있었다.

Table 9 Comparison of analyzed results

| Construction Items        | Aluminum Single         | Aluminum Sandwich       |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Plating elements</i>   |                         |                         |
| - plating, mm             | 8.0                     | 2*4.0 <sup>a</sup>      |
| - stiffeners/core         | L170*50*12/8            | H83.2/80                |
| <i>Primary stiffeners</i> |                         |                         |
| - stiffeners              | T400*150*18/12          | ←                       |
| - spacings                | 1.2m                    | 1.8m                    |
| Total weight (kg)         | 1,152                   | 827                     |
| <i>Deflection</i>         |                         |                         |
| maximum, mm               | 2.0                     | 3.8                     |
| span/deflection           | 3,500(625) <sup>b</sup> | 1,840(150) <sup>b</sup> |
| Von Mises stress (MPa)    | 27.3                    | 22.0                    |

Note :

- a. This means that each of upper and lower skin facing thickness is 4 mm.
- b. Symbol \* represents limiting deflection defined by the rule.

### 4.3 중앙단면도

Table 10과 Fig. 9는 두가지 구조방식에 따른 중앙단면의 설계결과를 비교하여 보여주고 있다. Table 10으로부터 키일로부터 중립축의 위치가 샌드위치구조의 경우가 작기 때문에 호깅 및 새깅모멘트가 작용할 때, 강력갑판과 선저에 작용하는 응력을 평균케하여 발생시키기 때문에 구조적으로 더 유용함을 볼 수 있다. 이러한 상황은 36미터급 공기부양식 쌍동선에 관한 중앙단면 설계결과에서도 나타난 바 있다 [9].

Table 10 Structural design results at midship

| Items  | Construction | Single | Sandwich |
|--|--------------|--------|----------|
| Distance of N.A. from B.L.(m)                  |              | 5.66   | 5.36     |
| Section mod. at strength deck(m <sup>3</sup> ) |              | 1,946  | 1,792    |
| Section modulus at keel(m <sup>4</sup> )       |              | 1,730  | 1,789    |
| Stress at deck,sagging(MPa)                    |              | -15.9  | -17.3    |
| Stress at keel,sagging(MPa)                    |              | 17.9   | 17.3     |
| Stress at deck ,hogging(MPa)                   |              | 23.2   | 25.1     |
| Stress at keel.hogging(MPa)                    |              | -26.1  | -25.2    |
| Web frame spacing(m)                           |              | 1.2    | 1.8      |
| Plating mass per unit enpth(kg/m)              |              | 2,797  | 2,359    |
| Web frame mass per unit length (kg/m)          |              | 1,296  | 1,124    |
| Total mass per unit length (kg/m)              |              | 4,093  | 3,483    |

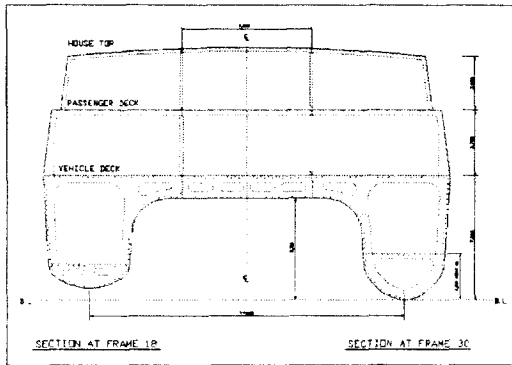
앞서 언급했던 바와 같이, Fig. 9의 중앙단면설계는 선박의 전체적인 규모와 제원은 동일하다. 샌드위치 구조에 사용된 재료의 사양은 Table 6와 같다.

Table 10의 중앙단면 설계결과에서도 샌드위치 구조의 경우가 15%정도의 구조중량을 경감시키면서 발생하는 최대응력도 3%정도 줄일 수 있음을 알 수 있다.

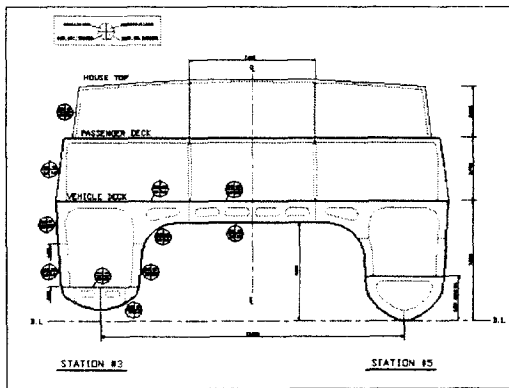
### 4.4 종강도

Table 11 및 Table 12는 중앙단면에서의 굽힘 응력과 전단응력을 로이드 선급규정을 이용하여

검토한 결과이다. 두 경우 모두 허용응력범위안에 모두 만족함을 알 수 있다.



(a) ASI construction



(b) ASA construction

Fig. 9 Midship sections designs for case ferry

### 5. 구조 중량 비교

앞장에서는 두가지 구조방식에 의해서 구조설계를 수행하였다. 이러한 구조설계 결과를 바탕으로 두 방식에 의한 구조중량을 손쉽게 계산할 수 있다. Table 13은 선각 및 상부구조 각각에 대해서 부재 종류별로 두가지 구조방식에 의한 구조중량을 보여주고 있다. 이 표로부터, 샌드위치방식의 경우가 15%의 중량경감 효과가 있음을 보여준다. 이는 앞서의 중앙단면에서의 중량 비교결과와도 잘 일치함을 보여준다.

샌드위치구조의 경우 절감되는 중량인 약 50톤은 보강판구조 선박의 경하중량의 약 8%에 해당하는 것으로, 이는 동일한 추진기관을 사용할 경우 500명 이상의 승객을 더 태우거나, 1.4톤 승용차를 35대 이상을 더 실을 상태에서 동일한 속력을 낼 수 있다는 것을 의미한다. 또는, 동일한 적재 하중의 조건이라면 동일한 선속을 내기 위해서 더 낮은 출력의 추진기관을 사용함으로써 장비비와 사용연비의 감소로 선박관리비를 절감할 수 있다.

샌드위치구조의 설계에서 이와같은 구조중량의 절감이 가능한 것은 앞서도 검증된 알루미늄 샌드위치판의 강성이 뛰어나기 때문이다.

Table 11 Strength check for bending and shear of aluminum single construction

| Criteria  | Compo. Stress | Allow. Stress |
|---|---------------|---------------|
| <b>Bending strength</b>                                 |               |               |
| $\sigma_k + \sigma_l + \sigma_t < 1.2 \sigma_b$         | 69.1          | 23.2          |
| $\sigma_d < \sigma_b$                                   | 129.6         | 108.0         |
| <b>Shear strength</b>                                   |               |               |
| $\frac{Q_R}{A_\tau} \leq \tau_b$                        | 7.6           | 62.4          |
| <b>Strength of cross-deck structures</b>                |               |               |
| <b>-Total direct stress</b>                             |               |               |
| $\sigma_{MB} + \sigma_{MT} + \sigma_d < f_{\sigma g} V$ |               |               |
| head sea  | 21.0          | 132.0         |
| beam sea  | 92.4          | 132.0         |
| quartering sea  | 112.0         | 132.0         |
| <b>-Total shear stress</b>                              |               |               |
| $\tau_T + \tau_{MBT} + \tau_{MT} < f_{\tau g} V$        |               |               |
| head sea  | 6.0           | 76.2          |
| beam sea  | 12.7          | 76.2          |
| quartering sea  | 59.6          | 76.2          |
| <b>-Equivalent stress</b>                               |               |               |
| $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} < 1.2 f_{\sigma g} \sigma_a$ |               |               |
| head sea  | 25.3          | 163.4         |
| beam sea  | 95.0          | 163.4         |
| quartering sea  | 152.3         | 163.4         |

6. 경제성

두 가지 구조에 대한 사례연구 대상선박에 대한 구조중량 비교결과에서 샌드위치구조의 경우가 약 50톤의 중량을 경감할 수 있음을 알 수 있었다. 이 장에서는 선박건조비 및 운항비용을 종합적으로 검토할 경우, 경제성 측면에서 어떠한 구조방식이 유리한 지를 객관적으로 검토코져 한다.

일반적으로, 고속선의 경우 선박의 규모가 증가함에 따라 전체 재료비중에서 선각재료비가 차지하는 비중은 점차 감소하며, Fig. 10은 80미터 카페리급에서 각 항목별 재료비가 차지하는 비율을 보여주는 그래프이다. 여기서 선각재료비가 점하는 비율은 약 9%임을 알 수 있다 [10].

샌드위치 구조방식의 경우, 보강판 방식에 비하여 웨브프레임의 간격이 커짐에 따라서 웨브프레

임의 개수가 감소하였고 종방향의 2차보강재가 필요없게 되었지만, 샌드위치 방식이 채택되지 않은 초기 상태에서는 알루미늄하니콤파를 제조하는 데 필요한 비용은 훨씬 크다고 생각될 수 있다. 따라서, 여기서는 샌드위치 방식의 경우 선각재료비가 보강판 방식에 비하여 65%가 많은 비용이 소요된다고 가정하였다. 그러나, 전체 재료비중에서 선각재료비가 미치는 영향은 앞서 살펴본 대로 9%에 지나지 않기 때문에 결과적으로 전체 재료비는 약 6%정도 증가요인이 된다. 이에 대한 결과는 Fig. 11에 나타나 있다.

선박건조비중 인건비측면에 대하여 고려해 보면 다음과 같다. 샌드위치 방식의 경우, 늑골과 샌드위치판을 연결할 경우 복잡한 연결구조를 가져야 하기 때문에 부분적으로 공수가 증가하고 샌드위치판끼리 연결시에도 판의 양쪽에서 작업이 이루

Table 12 Strength check for bending and shear of aluminum sandwich construction

| Criteria   | Stress Factor |           |
|--|---------------|-----------|
|  | Actual        | Allowable |
| <b>Bending strength</b>  |               |           |
| -Resultant compressive stress                                    |               |           |
| $\sigma_{ci} = \frac{E_{ci} y_i M_R}{\sum (E_i I_i)} < \alpha_s$ |               |           |
| at strength deck/sagging   | 0.11          | 0.33      |
| at keel/hogging  | 0.11          | 0.33      |
| -Resultant tensile stress  |               |           |
| $\sigma_{ti} = \frac{E_{ti} y_i M_R}{\sum (E_i I_i)} < \alpha_s$ |               |           |
| at strength deck/hogging   | 0.16          | 0.33      |
| at keel/sagging  | 0.07          | 0.33      |
| <b>Shear strength</b>  |               |           |
| $\frac{Q_R}{A_\tau} 10^{-3} \leq \alpha_s \tau_u$                | 0.05          | 0.33      |
| <b>Strength of cross-deck structure</b>                          |               |           |
| $\frac{Q_R}{A_\tau} 10^{-3} \leq \alpha_s \tau_u$                | 0.02          | 0.33      |

Table 13 Structural weight comparison between aluminum single and sandwich construction in ton

| Item            | Al.                      |              |       |
|-----------------|--------------------------|--------------|-------|
|                 | Single                   | Sandwich     |       |
| Hull            | plating & stiffner frame | 159.4        | 141.0 |
|                 |                          | 76.8         | 69.3  |
|                 | sub total                | 236.2        | 210.3 |
| Super-Structure | plating & stiffner frame | 67.7         | 61.7  |
|                 |                          | 41.3         | 23.0  |
|                 | sub total                | 109.0        | 84.7  |
| <b>Total</b>    | <b>345.2</b>             | <b>295.0</b> |       |

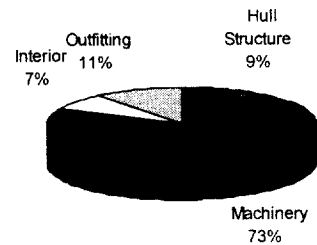


Fig. 10 Material cost distribution for 80m class car/passenger ferry

어저야 하기 때문에 이 부문에서의 인건비의 상승은 피할 수 없다. 그러나, 샌드위치방식은 기본적으로 웹프레임의 갯수가 감소하기 때문에 용접라인이 줄며, 2차 종보강재가 없기 때문에 늑골과 보강재간에 복잡한 형상으로 컷팅하고 다시 용접할 필요가 없게 하여준다. 이는 결과적으로 양 구조방식간에는 인건비 부문에서는 큰 차이가 없다고 가정할 수 있도록 해준다.

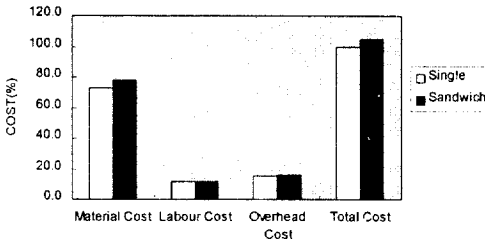


Fig. 11 Cost comparison of shipbuilding

따라서, 전체 선박건조비는 약 5%의 선가 증가요인이 발생하였다 (Fig. 14 참조). 그러나, 실제의 경우, 선박 중량의 감소는 선박운항비의 감소를 의미하므로 이 두가지 측면을 모두 고려할 필요가 있다.

Table 15는 이와같은 측면에서 선박의 경제성을 종합적으로 검토할 수 있는 방법으로, 보강판 방식을 100이라 두었을 경우, 샌드위치 방식의 상대적 중량과 비용을 나타낸 표이다. 분석결과, 샌드위치 방식의 경우가 선가는 5%정도 높지만, 단위 적재하중당 비용이 10%이상 절감됨을 알 수 있다. 따라서, 선박의 경제성 측면에서 샌드위치 방식이 경쟁우위에 있음을 알 수 있다. 여기서, 상대적 적재하중당 비용에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\text{Relative Deadweight Price} = \frac{\text{Relative Price}}{\text{Relative Deadweight}}$$

한편, 고속선의 경우 선박의 중량을 경감시킬 때 kg당 US40-60의 가치가 있다고 알려져 있다 [10], 여기서 평균치인 50을 취할 경우, 50톤의 절

감이 가능한 샌드위치 구조방식의 경우, 약 250만 불의 가치창출이 가능하다. 따라서, 보강판 구조로 된 대상 선박의 가격을 2,000만불로 가정할 경우, 샌드위치 구조 선박의 가격은 2,094만불이 되며, 결국 150만불이상의 경제적 이득이 발생한다.

Table 15 Weight and cost comparison

| Items                      | Types           |                   |
|----------------------------|-----------------|-------------------|
|                            | Aluminum Single | Aluminum Sandwich |
| Relative structural weight | 100.0           | 85.4              |
| Relative cost of vessel    | 100.0           | 104.7             |
| Relative deadweight price  | 100.0           | 89.6              |

### 7. 대형선에서의 비용변동 추이

선박에 있어서 박판으로 될수록 용접변형이 일어나기 쉽고, 생산성이 떨어지며, 품질관리를 더 어렵게 만든다. 본 연구에서 대산선박으로 선정된 80미터급 쌍동선의 경우, 샌드위치판의 면재의 최소 두께를 2.5mm로 하였으며, 이는 용접성과 생산성을 고려한 것이다. 이 두께는 설계계산상의 필요한 부재두께보다 더 큰 값이다.

선박의 규모가 커짐에 따라, 샌드위치판에서의 최소두께는 커지며, 이는 결과적으로 용접변형의 감소, 생산성의 증가 및 품질관리의 용이를 의미하는 것이다. 뿐만아니라, 설계계산상의 부재두께와 실제 선정된 부재치수간의 차이가 작아짐을 의미하기 때문에 구조중량이 경감되는 추이는 증가할 수 밖에 없다.

결국, 선박이 대형화가 될 수록 샌드위치 구조의 채택이 가져다 주는 효과는 증가한다.

### 8. 향후 연구분야

초고속선에 알루미늄 샌드위치판을 적용하는 데 있어서 가장 어려운 점중의 하나가 곡면을 가진 판을 어떻게 효율적으로 제작해 내느냐였다. 그러나, 1993년 일본에서 이러한 곡면을 가진 샌드

위치판을 손쉽게 제작할 수 있는 프레스벤딩기술이 개발되었다 [11].

알루미늄하니콤판을 이용하여 시험선이 제작되어 운항중인 현 시점에 있어서, 이러한 구조방식을 더 규모가 큰 선박에 적용하는 데 가장 큰 어려운 점은 설계자가 고속선을 설계할 때 기준이 되는 선급규정이 개발되어 있지 않다는 점이다. 이것이 개발되기 위해서는 이 부문에 있어서 많은 연구결과가 축적되어야 한다. 또한, 이 샌드위치판을 연결할 수 있는 메카니즘에 대해서도 많은 연구를 필요로 한다. 이러한 설계에 있어서 기본적으로 수반이 되는 샌드위치판 간의 연결과 샌드위치판과 늑골간의 연결을 얼마나 생산성 높고 안전하게 제작할 수 있는지가 관건이 된다.

첫 번째 연결방법에 대해서는 현재, 브레이징을 이용하는 방법과 접착필름을 이용하는 두가지 방식이 있다. 먼저, 전자의 방법은 최초의 샌드위치방식의 선박에 적용된 방법으로, 후자의 방법에 비하여 강도 및 용접시 열변형 측면에서 유리한 방법이나, 현 단계에서 제작비면에서 더 부담이 크다. 또한, 이러한 판을 대형화하여 제작하기 위해서는 시설투자를 필요로 한다.

두 번째 연결방법에 대해서는 현재, MIG나 TIG를 이용한 용접법, 조인트와 특수접착제를 이용하는 방법 및 리벳이음 등을 생각할 수 있다. 이 방법들중에서 용접법이 강도측면이나 연결후 외관에 있어서 가장 유리하나, 용접시 발생하는 열이 심재에 영향을 주는 것을 어떻게 최소화하느냐가 관건이다. 이 부문에 대한 해결방법을 찾기 위해서 많은 연구와 실험을 체계적으로 수행할 필요가 있다. 뿐만아니라, 갑판과 측판이 만나는 gunwale부의 접합방법에 대해서도 연구되어져야 한다.

또한, 샌드위치 구조의 취약점 중의 하나인 박리(delamination)을 방지하기 위한 설계기술에 관한 연구도 병행되어야 한다.

## 9. 결론

이와같은 80미터급 카페리에 대한 두 방식의 구

조설계를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 알루미늄하니콤판 샌드위치판을 선각의 부재로 사용하여 80미터급 대상선박에 구조설계를 수행한 결과, 기존의 기존의 알루미늄 보강판 방식에서 보다 구조중량을 약 15%를 경감할 수 있었다. 여기서 경감된 50톤은 적재하중의 증가 또는 사용 기관 마력의 감소와 연비의 감소를 가져올 수 있어, 약 5%에 해당하는 선가의 증가는 경제적인 측면에서 유용한 투자임을 알 수 있었다.

2. 버스가 적재되는 카테르인 주갑판에 대해서 유항요소법을 이용하여 설계 및 해석을 수행한 결과, 샌드위치판을 이용한 경우가 비슷한 처짐과 응력이 생기는 상태에서 약 30%의 중량경감이 가능하였다.

3. 선박의 규모가 커짐에 따라서 상대 선가 및 상대 적재하중당 비용 측면에서 점점 유리해짐을 알 수 있었다.

4. 구조적으로 우수성이 확인된 알루미늄 샌드위치구조를 초고속 대형선의 선각에의 적용을 현실화하기 위해서는 효율적인 연결메카니즘의 개발 및 선급 규정의 개발이 선행되어야 하며, 이를 위해서는 이 부문에 대한 체계적인 연구와 실험이 수행되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 (주)세모와 재단법인 산학협동재단의 연구비 지원에 의해 수행된 것임.

## 참 고 문 헌

- [1] 강병운, 유정석, 김성환, 초고속선 선체설계를 위한 주요고려사항 고찰, 초고속선 WORKSHOP, 대한조선학회, 1992.
- [2] Matsuoka, K., "Study on weight Critical structure of Aluminum Alloy Ships in Japan," *Proc. of the 2nd Int. Forum on Aluminum Ships*, Session 4, 1995, pp. 1-18.
- [3] Kaneko, Y. and Takeuchi, K., "Design and Construction of a Seawater Survey Ship Built

- Using Aluminum Honeycomb Panels," *Proc. of 2nd Int. Conference on Fast Sea Transportation*, 1993, pp. 449-460.
- [4] Kristiansen, U., "The Use of FRP Sandwich, Proc. of Workshop about High Speed Craft," *The Society of Naval Architects of Korea*, August 1996, pp. 53-61.
- [5] Wiertz, A. "New Applications for Honeycomb in the Railcar Industry," *Proc. of National SAMPE Symposium and Exhibition*, Vol. 35, No. 1, 1990, pp. 226-233.
- [6] Lloyd Register (LR), *Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*, 1996.
- [7] Howard G. Allen., *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Pergamon press, 1969.
- [8] Lloyd Register, *Software for Special Service Craft*, Version 1.0, 1996.
- [9] Kim, Ho Kyung and Jang, Chang Doo, "The Optimum Structural Design of the High Speed Surface Effect Ship Using Composite Materials," *Proc. of The Society of Naval Architects of Korea*, November 1996, pp. 40-43.
- [10] Enlund, H., "Developing a Composite Hull for a Large High Speed Catamaran," *Proc. of the 11th Fast Ferry Conference, Paper No. 12, Hongkong, February 1995*, pp. 12.1-12.22.
- [11] Koichiro Okuto and Keizo Namba, "Development of Honeycomb Panels Press Bending Procedures," *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 174, December 1993, pp. 617-623.