
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 29 卷 第 4 號 1992 年 11 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No.4, November 1992

新等價曲線보理論에 의한船體 Corner部의應力解析

張昌斗*, 羅昇洙**

Stress Analysis of the Corner Part of Ship Structures Using the New Equivalent Curved Beam Theory

by

Chang Doo Jang* and Seung Soo Na**

요 약

有限要素法을 利用하여 船體 corner部의 構造 解析을 하기 위해서는 많은 mesh로 分割해야 하기 때문에 解析 時間 및 作業 時間이 莫大하게 所要되므로 最適 設計로 擴張하기 위해서는 有限要素法の 非効率性を 排除하고 計算 時間이 적게 所要되는 새로운 解析方法의 開發이 切實하다.

지금까지 corner部의 構造 解析을 하기 위한 理論的 方法으로 等價의 曲線보 理論 및 wedge 理論이 使用되어 왔으나 船體와 같이 非對稱 荷重 및 非對稱 構造를 갖는 構造物에 대해서는 잘 맞지 않는 傾向이 있어 使用되고 있지 않는 實情이다.

本 研究에서는 이러한 점을 克服하기 위해 既存의 等價의 曲線보 理論에 非對稱 分布 荷重을 考慮하여 平衡 狀態에서 等價의 荷重이 되도록하고 非對稱 構造에 대해서도 對稱 構造物의 重疊에 의해 等價의 剛性を 갖도록 置換하여 어떠한 荷重 및 構造物이라도 應力을 近似하게 表現할 수 있는 新 等價 曲線보 理論을 定立하였으며 2部材 結合部 및 3部材 結合部에 대해 構造 解析을 遂行하고 membrane 要素를 使用한 有限要素法の 結果와 比較하여 그 有用성을 立證하였다.

Abstract

A new equivalent curved beam theory is developed for the analysis of the corner part of ship structures, in which effects of distributed loads and asymmetry with two or three connected parts are considered.

접수일자: 1992년 3월 16일, 재접수일자: 1992년 6월 12일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

** 정회원, 해사기술연구소(연구당시 대우조선(주))

Equivalent loads are obtained from equilibrium conditions between the distributed loads and the member forces and moments at the ends of curved beam. And an equivalent curved beam for the asymmetric structure is obtained by superposing the equivalent symmetric parts which have equivalent stiffness.

From the sample calculations, it is found that the results of the new equivalent curved beam theory are well agreed with those of finite element method using membrane elements with little computing time and sufficient accuracy.

1. 緒 言

船體와 같이 複雜한 形狀을 갖는 構造物의 構造 解析을 하기 위해서는 有限要素法이 널리 使用되고 있으며 특히 船體의 橫強度 解析時 modeling이 까다로운 corner部도 變斷面部 處理가 容易한 membrane 要素를 使用한 有限要素法을 利用하여 構造 解析을 遂行하고 있다.

그러나, 船體 corner部의 構造 解析시 解의 精度를 높이기 위해서는 많은 mesh로 分割해야 하기 때문에 解析 時間 및 作業 時間이 莫大하게 所要되어 橫強度 解析에 의한 最適 設計를 遂行한다면 엄청난 計算 時間이 必要하게 될 것이다.

따라서, 變斷面部의 影響을 考慮한 船體 構造의 構造 解析 및 最適 設計를 위해서는 前述한 有限要素法의 非經濟的인 面을 排除하고 計算 時間이 작게 걸리며 計算 精度도 좋은 理論의 方法에 의한 構造 解析을 遂行하는 것이 절실히 要求된다.

Corner部의 應力을 解析하기 위한 理論의 方法으로는 Terada[1]에 의한 等價의 曲線보 理論 및 Osgood [2]에 의한 wedge 理論이 있으며 이 理論들을 利用하여 빠른 時間內에 近似하게 corner部의 應力을 解析할 수 있다[3, 4, 7, 8].

그러나, 이 理論들을 船體에 適用하기 위해서는 非對稱 荷重 및 非對稱 構造物에 대해서도 解를 近似하게 表現할 수 있는 一般性이 있어야하나 既存의 理論들은 그러한 一般性的 缺如로 非對稱 荷重 및 非對稱 構造物에 대해서는 잘 맞지 않는 傾向이 있어 實際 船體 構造 解析時 거의 使用하지 않고 있는 實情이다.

따라서, 本 研究에서는 이러한 難點을 克服하기 위해 既存의 等價의 曲線보 理論[1]에 外力을 考慮하여 平衡 狀態에서 等價의 荷重이 되도록하고 非對稱 構造物에 대해서도 對稱 構造物의 重疊에 의해 等價의 剛性이 되도록 置換하여 어떠한 荷重 및 어떠한

構造物이라도 應力을 近似하게 表現할 수 있는 新 等價 曲線보 理論을 定立하였다.

本 理論의 妥當性을 確認하기 위해 2部材 結合部 및 3部材 結合部에 대해 構造 解析을 遂行하여 membrane 要素를 使用한 有限要素法의 結果와 比較 檢討하고 實際 船體 構造 解析에도 適用하여 그 有用性을 確認하고자 한다.

2. 曲線보 理論 [10,11]

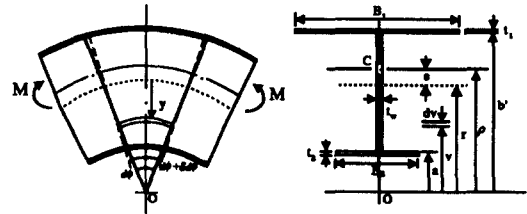


Fig.1 Shape of curved beam(with flange)

Fig.1에서 보인 것 같이 曲線보가 양단에서 굽힘 moment M을 받을 경우 梁의 각도 $d\phi$ 는 $d\phi + \delta d\phi$ 만큼 變形하게 되는데 이때 中立軸에서 y만큼 떨어진 位置에서 曲線보의 軸方向 變形率 및 應力을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{2y(\delta d\phi / 2)}{(r-y)d\phi} = \frac{y\delta d\phi}{(r-y)d\phi} \tag{1}$$

$$\sigma_x = E\epsilon = \frac{Ey\delta d\phi}{(r-y)d\phi} \tag{2}$$

兩端에서 굽힘 moment M만을 받고 있는 경우 다음의 平衡 條件式을 滿足하여야 한다.

$$\int_{\sigma_x} dA = \frac{E\delta d\phi}{d\phi} \int \frac{y}{r-y} dA = 0 \tag{3}$$

$$\int_{\sigma_x} y dA = \frac{E\delta d\phi}{d\phi} \int \frac{y^2}{r-y} dA = M \quad (4)$$

여기서, $y=r-v$, $dA=\overline{tdv}$ 라 놓고 (3), (4)式에 代入 하면

$$\int \frac{y}{r-y} dA = \int \frac{r-v}{v} dA = r \int \frac{dA}{v} - \int dA = 0 \quad (5)$$

$$r = \frac{A}{\int \frac{dA}{v}} = \frac{A}{\int_a^{b'} \frac{tdv}{v}} \quad (6)$$

$$= \frac{A}{\int_{a-t_2}^a \frac{B_2 dv}{v} + \int_a^{b'} \frac{t_w dv}{v} + \int_{b'}^{b'+t_1} \frac{B_1 dv}{v}}$$

$$\int \frac{y^2}{r-y} dA = -\int y dA + r \int \frac{y}{r-y} dA = (\rho-r)A \quad (7)$$

(4) 및 (7)式으로 부터

$$\frac{E\delta d\phi}{d\phi} = \frac{M}{A(\rho-r)} \quad (8)$$

(8)式을 (2)式에 代入 하면

$$\sigma_x = E\epsilon = \frac{y}{r-y} \frac{E\delta d\phi}{d\phi} = \frac{M}{A(\rho-r)} \frac{y}{r-y} \quad (9)$$

中立軸에서 r-a만큼 떨어진 位置에서 曲線보의 軸方向 應力을 구하면

$$\sigma_x|_{y=r-a} = \sigma_a = \frac{M}{A(\rho-r)} \frac{r-a}{a} \quad (10)$$

(6)式에서 $r=\rho A/A'$ 라 놓고 이것을 (10)式에 代入 하면

$$\sigma_a = \frac{M}{\rho(A'-A)} \left(\frac{\rho}{a} - \frac{A'}{A} \right) \quad (11)$$

여기서, $\rho = (a+b')/2$

$$A' = B_2 t_2 \frac{\rho}{a} + \rho t_w \ln \frac{b'}{a} + B_1 t_1 \frac{\rho}{b'}$$

$$A = B_1 t_1 + B_2 t_2 + t_w (b' - a)$$

다음에 橫斷面에 압힘 moment M과 同時에 垂直力 P가 作用하는 경우 中立軸에서 r-a만큼 떨어진 位置에서 曲線보의 軸方向 應力을 구하면 線形 重疊法 理論에 의해 다음과 같이 된다.

$$\sigma_a = \frac{M}{\rho(A'-A)} \left(\frac{\rho}{a} - \frac{A'}{A} \right) + \frac{P}{A} \quad (12)$$

3. 等價의 曲線보 理論[1]

3.1 2部材 結合部인 경우

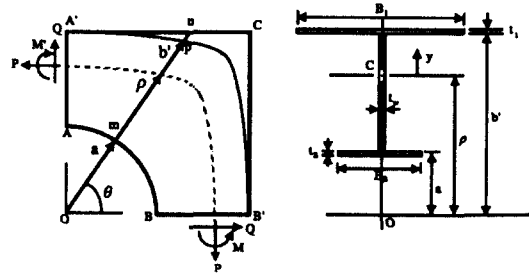


Fig.2 Equivalent curved beam model(2-connected beam)

Fig.2에서 보인것과 같이 等價의 曲線보가 端部에 moment(M), 軸力(P) 및 剪斷力(Q)을 받는 경우 bracket 안쪽 edge에 發生하는 應力은 曲線보 理論에서와 마찬가지로(12)式을 利用하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_a = \frac{M_\theta}{\rho(A'-A)} \left(\frac{\rho}{a} - \frac{A'}{A} \right) + \frac{P_\theta}{A} \quad (13)$$

$$M_\theta = M - P \rho(1 - \cos \theta) + Q \rho \sin \theta$$

$$P_\theta = P \cos \theta + Q \sin \theta$$

여기서, 等價의 外徑 b'는 Fig.3에서 보인 것같이 應力 函數를 利用하여 角度 變化에 따른 等價의 外徑을 주는 η를 구하고 이것을 利用하여 等價의 外徑 b'를 다음과 같이 구한다.

$$\eta = \frac{\overline{mp}}{\overline{mn}} = \frac{b' - a}{b/\cos\theta - a} \quad (14)$$

$$b' = \eta(b/\cos\theta - a) + a \quad (15)$$

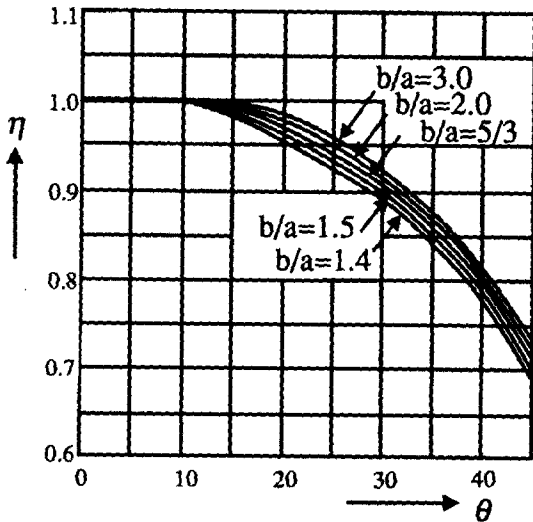


Fig.3 Equivalent outer radius(b')

3.2 3部材 結合部인 경우

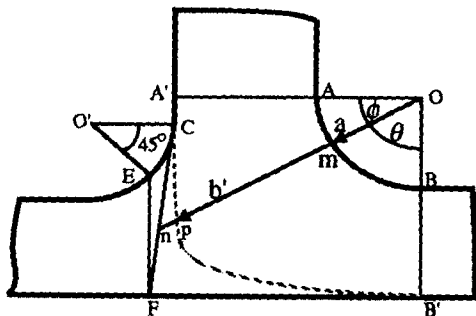


Fig.4 Equivalent curved beam model(3-connected beam)

Fig.4에서 보인 것같이 3部材 結合部인 경우 等價의 曲線보 理論을 適用하기 위해서는 3部材 結合部를 等價의 剛性을 갖는 2部材 結合部로 置換하는 過程이 必要하다. 3部材 結合部를 2部材 結合部로 置換하기 위해서는 한 部材가 나머지 두 部材에 미치는 影響을 表現하기 위해 반대쪽 半徑의 45度까지를 포함한 CA'ABB'F를 對象으로 하여 앞에서 구한 η 를 適用하여 等價의 外徑 b' 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$b' = a + \eta \overline{mn} \tag{16}$$

이때 3部材 各 端部에서 發生하는 斷面力은 Fig.

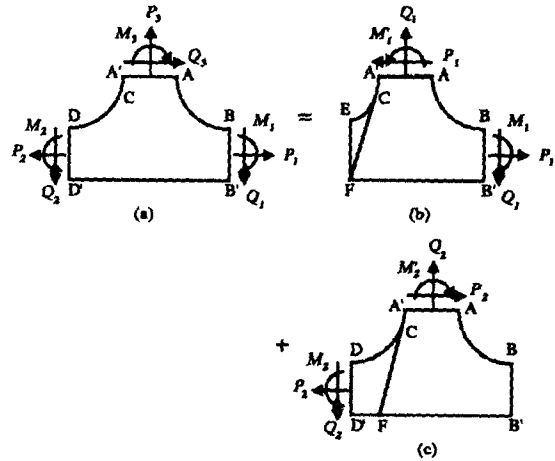


Fig.5 Member force and moment distribution

5에서 보인 것같이 (a)에서의 斷面力을 (b), (c)의 경우로 나누어 생각한다.

(b)의 경우 AB面에서 作用하는 굽힘 moment 및 軸力은

$$\begin{aligned} M_{\theta AB} &= M_1 - P_1 \rho (1 - \cos \theta) + Q_1 \rho \sin \theta \tag{17} \\ P_{\theta AB} &= P_1 \cos \theta + Q_1 \sin \theta \end{aligned}$$

(c)에서와 같이 한쪽 斷面에만 斷面力이 作用하는 경우 Fig.6에서 보인 것같이 實驗을 통하여 얻어진 結果를 利用하여 다음과 같이 그 影響을 나타낸다.

$$\begin{aligned} M_{\phi AB} &= -k(\phi) [M_2 \overline{r} + Q_2 \rho (1 - \cos \phi) + P_2 \rho \sin \phi] \tag{18} \\ P_{\phi AB} &= k(\phi) [Q_2 \cos \phi - P_2 \sin \phi] \end{aligned}$$

따라서 (a)의 경우 軸方向 應力은 (b)와 (c) 경우를 合해 다음과 같이 구할 수 있다.

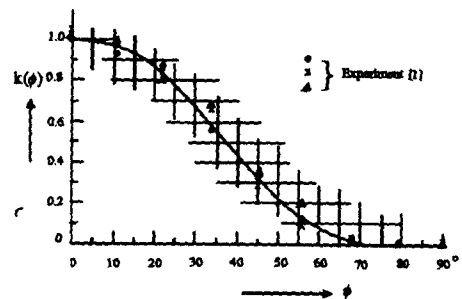


Fig.6 Effective coefficient for $k(\phi)$

$$\sigma_{(a)} = \sigma_{(b)} + \sigma_{(c)} \tag{19}$$

4. 新 等價 曲線보 理論

4.1 2部材 結合部인 경우

앞에서 구한 等價의 曲線보 理論에서와 같은 方法으로 等價의 外徑을 구하기 위해 Fig.3에서 보인 η 를 導入하여 보간법을 使用하지 않고 回歸 分析을 통하여 가장 잘 맞는 式을 구하면 다음과 같다.

$$\eta = 1 - 0.1182(b'/a)^{-0.2273} \theta^{2.686}/10000 \tag{20}$$

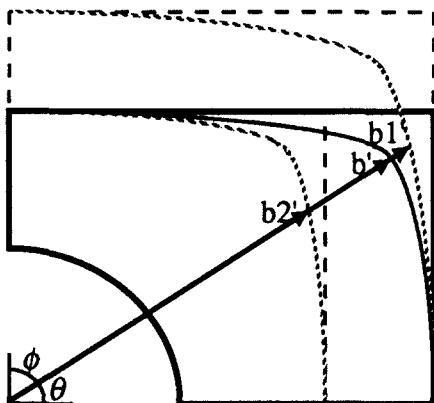


Fig.7 Equivalent outer radius for asymmetric structure

또한 Fig.7에서 보인 것같이 兩端部가 非對稱 構造物인 경우 假想의 2개의 크기가 다른 對稱 構造物로 置換한 후 重疊法을 利用하여 等價의 外徑을 다음과 같이 구한다.

$$b' = b_1' + (b_2' - b_1') \theta/90^\circ \tag{21}$$

여기서, b_1' : θ 方向의 等價의 外徑

b_2' : ϕ 方向의 等價의 外徑

앞에서 구한 等價의 外徑 b' 를 利用하여 Fig.8에서 보인 바와 같이 兩端部에 moment(M_1), 軸力(P_1), 剪斷力(Q_1) 및 外力을 받고 있는 경우 bracket 안쪽 edge에 發生하는 應力을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_a = \frac{M_\theta}{\rho(A' - A)} \left(\frac{\rho}{a} - \frac{A'}{A} \right) + \frac{P_\theta}{A} \tag{22}$$

$$M_\theta = M_1 - P_1(L_1 - y_{12} - \rho_1 \cos\theta) + Q_1 \rho_1 \sin\theta + (w_1 + w_{m1}) L_1 \tan\theta (\rho_1 \sin\theta - \bar{y}_1)/2$$

$$P_\theta = P_1 \cos\theta + Q_1 \sin\theta + (w_1 + w_{m1}) L_1 \tan\theta \sin\theta/2$$

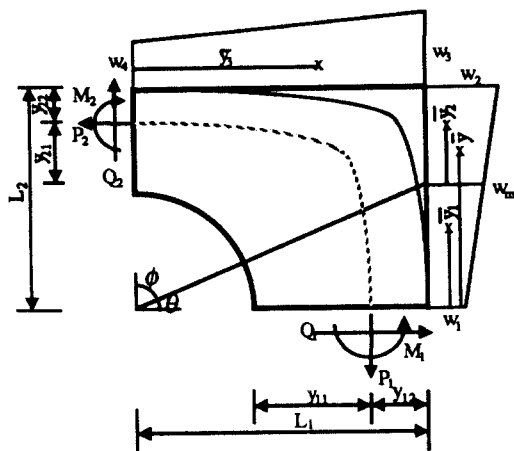


Fig.8 Equivalent curved beam model with external loads

4.2 3部材 結合部인 경우

既存의 等價의 曲線보 理論에서와 같이 3部材 結合部를 等價의 剛性을 갖는 2部材 結合部로 置換하는 것은 마찬가지 이지만 等價의 外力을 表現하기 위해 Fig.9, 10에서 보인 것같이 나머지 한 部材에 作用하는 荷重을 2部材 結合部와 連結된 곳에서의 等價의 荷重으로 置換하는 것이 다르다.

等價의 曲線보 理論에서와 같이 端部에 給힘 moment, 軸力, 剪斷力 및 外力을 받고 있는 경우 bracket 안쪽 edge에 發生하는 應力은 다음 式으로 주어진다.

$$\sigma_a = \frac{M_\theta}{\rho(A' - A)} \left(\frac{\rho}{a} - \frac{A'}{A} \right) + \frac{P_\theta}{A} \tag{23}$$

$$M_\theta = M_1 - P_1(L_1 - y_{12} - \rho_1 \cos\theta) + Q_1 \rho_1 \sin\theta + (w_1 + w_{m1}) L_1 \tan\theta (\rho_1 \sin\theta - \bar{y}_1)/2 + (w_3 + w_{r1}) L_1 \tan\theta (\rho_1 \sin\theta - \bar{y}_{r1})/2 - S B_1 \tan\theta (B_1 - \rho_1 \cos\theta)$$

$$P_\theta = P_1 \cos\theta + Q_1 \sin\theta + (w_1 + w_{m1}) L_1 \tan\theta \sin\theta/2 + (w_3 + w_{r1}) L_1 \tan\theta \sin\theta/2 + S B_1 \tan\theta \cos\theta$$

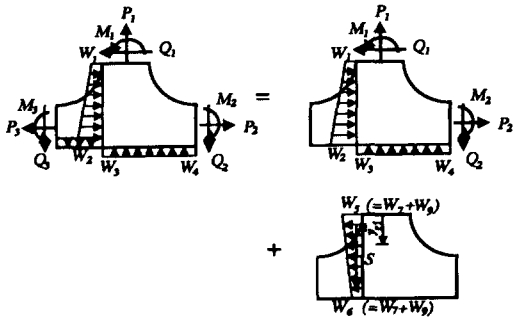


Fig.9 Equivalent load distribution(1)

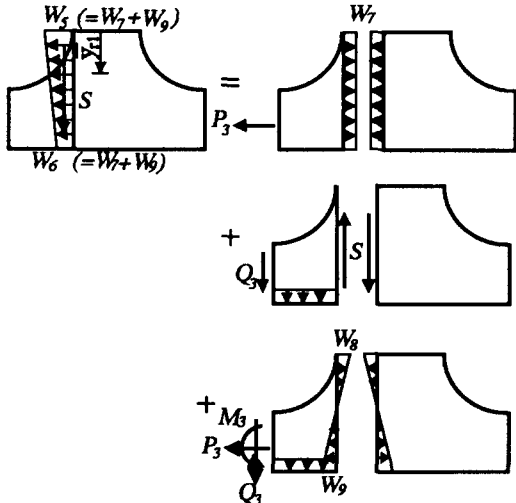


Fig.10 Equivalent load distribution(2)

5. 船體 Corner部の 應力 解析 結果 및 考察

5.1 解析 對象

既存의 等價의 曲線보 理論을 非對稱 荷重 및 非對稱 構造物에도 適用 可能하게 誘導된 新 等價 曲線보 理論의 妥當性을 確認하기 위해 2部材 結合部 및 3部材 結合部에 대해서 對稱 構造物이 對稱 荷重을 받는 경우, 對稱 構造物이 非對稱 荷重을 받는 경우 및 非對稱 構造物이 非對稱 荷重을 받는 경우로 나누어 解析을 遂行하였으며 計算 結果의 精度를 比較하기 위해 membrane 要素를 使用한 有限要素法 및 既存의 等價의 曲線보 理論을 利用하여 各 경우에 대해 構造 解析을 遂行하였다. 또한 實際 船體 構造 解析에 適用하기 위해 2次元 web frame을 對象으로 하여 新 等價 曲線보 理論에 의한 船體 corner部の 應力 解析을 遂行하여 그 有用性을

確認하였다.

5.2 解析 結果 및 考察

Fig.11~16은 解析 結果를 나타낸 것으로 여기서 ECBT는 既存의 等價의 曲線보 理論에 의한 解析 結果이며 NECBT는 本 論文에서 誘導한 新 等價 曲線보 理論에 의한 解析 結果이다. 또한 FEM은 membrane 要素를 利用한 有限要素法에 의한 結果이다.

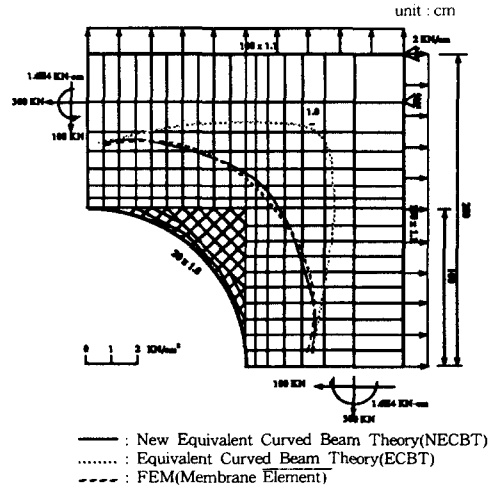


Fig.11 Comparison of stresses at 2-connected corner part(symmetric load and symmetric structure)

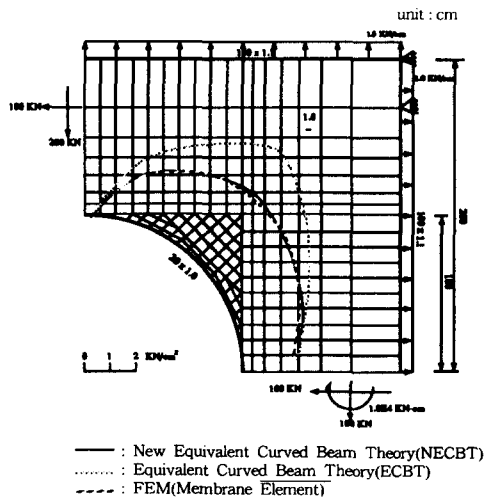


Fig.12 Comparison of stresses at 2-connected corner part(asymmetric load and symmetric structure)

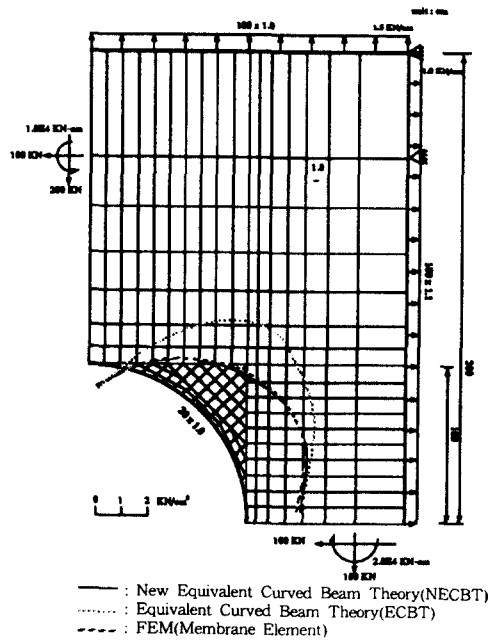


Fig.13 Comparison of stresses at 2-connected corner part (asymmetric load and asymmetric structure)

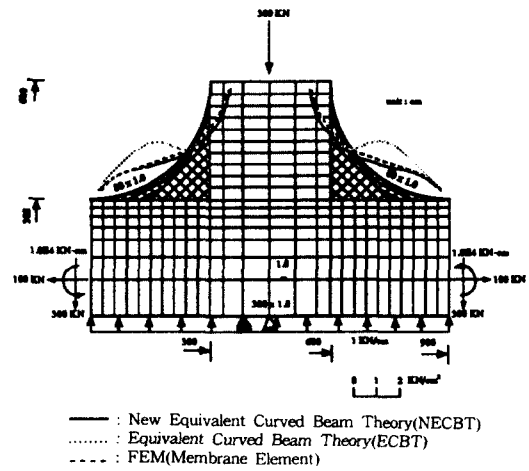


Fig.14 Comparison of stresses at 3-connected corner part (symmetric load and symmetric structure)

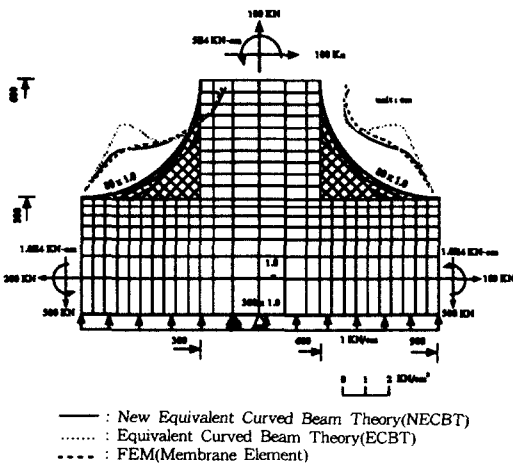


Fig.15 Comparison of stresses at 3-connected corner part (asymmetric load and symmetric structure)

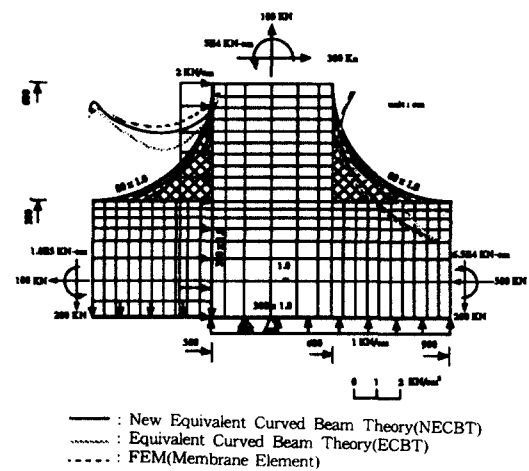


Fig.16 Comparison of stresses at 3-connected corner part (asymmetric load and asymmetric structure)

解析 結果로 부터 어떤 解析 對象이든지 NECBT의 結果는 FEM의 結果와 거의 一致함을 알 수 있고 ECBT의 結果와는 상당한 差異를 보임을 알 수 있으며 2部材 結合部中 對稱 構造物이 對稱 荷重

을 받는 경우 最大 應力을 比較할 때 2배 程度의 差異를 보이고 있다. 이 結果로 부터 外力을 받고 있는 경우 外力을 無視한 既存의 理論은 精度가 상당히 떨어지며 外力 및 非對稱 構造物의 效果를

考慮한 新 等價 曲線보 理論은 FEM의 結果와 거의 一致함으로서 妥當性을 確認할 수 있었다.

또한, 解析 對象의 構造 形態, 荷重 條件 및 結合 形態에 따라 應力의 精度를 比較하면 單純한 形態일 수록 잘 맞는 傾向이 있으며 複雜해질수록 等價의 構造 및 荷重 狀態를 表現하기가 힘들어 잘 맞지 않는 傾向이 있다.

2部材 結合部에서는 解析 對象의 形狀이나 荷重 條件에 관계없이 有限要素法의 結果와 比較的 一致함을 알 수 있으며 3部材 結合部에서는 解析 對象의 形狀이나 荷重 條件에 따라 差異가 나는 경우도 있으므로 等價시키는데 細心한 注意가 必要하다할 것이다.

특히 3部材 結合部에서 충격벽이 있는 非對稱 構造物인 경우 충격벽의 影響을 제대로 表現하기가 어려운 가장 낮은 精度를 주고 있으며 많은 反復 計算 및 實驗을 통하여 等價시키는 方法을 改善하여야 한다고 思料된다.

實際 船體 構造 解析에 適用하기 위해 Fig.17에서 보인 Test model을 對象으로 하여 一般화된 傾斜 처짐법[12]에 의한 均一 斷面部的 應力 解析과 新 等價 曲線보 理論에 의한 corner部の 應力 解析 結果를 Fig.18에서 보이고 있다. 均一 斷面部的 應力은 membrane 要素를 使用한 有限要素法의 結果와 거의 一致함을 알 수 있으며 corner部の 應力도 比較的 近似한 結果를 얻을 수 있다.

따라서, 有限要素法을 利用하지 않더라도 빠른 時間內에 近似한 應力을 解析할 수 있도록 誘導된 新 等價 曲線보 理論은 橫強度 解析에 의한 橫強度 部材의 最適 設計時 매우 有用하게 使用될 것으로 期待된다.

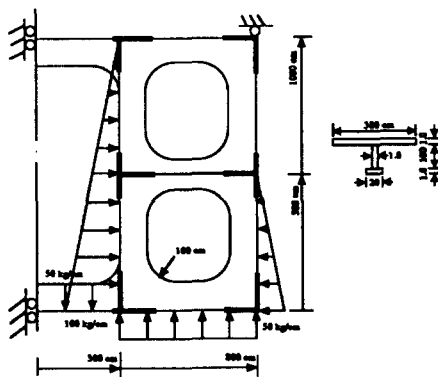


Fig.17 Test model

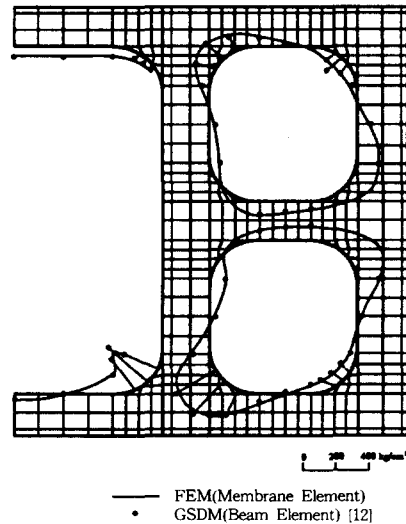


Fig.18 Comparison of stress distribution (Test model)

6. 結 言

一般的으로 最大 應力이 發生하는 船體 corner部の 應力을 解析하기 위해서는 有限要素法을 利用하여야 하나 計算 時間이 莫大하게 所要되므로 計算 時間을 줄이기 위해 既存의 等價의 曲線보 理論에 外力을 考慮하여 等價의 荷重이 되도록하고 假想의 對稱 構造物의 重疊에 의해 等價의 剛性이 되도록 置換하여 新 等價 曲線보 理論을 誘導하였다.

誘導된 理論을 適用하여 2部材 結合部 및 3部材 結合部の 應力 解析을 遂行한 結果 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

- 1) 新 等價 曲線보 理論은 構造物의 形態나 荷重 條件에 관계없이 適用이 可能하며 有限要素法에 의한 應力과 比較하여 거의 類似한 結果를 준다.
- 2) 外力을 받고 있는 경우 既存의 等價의 曲線보 理論은 船體 corner部の 應力을 제대로 表現하지 못하며 有限要素法에 의한 應力과 比較하여 상당한 差異를 준다.
- 3) 3部材 結合部인 경우 1部材와 2部材 結合部の 連結된 곳에서 平衡 條件을 考慮하여 2部材 結合部로 置換하는 것이 바람직하다.
- 4) 新 等價 曲線보 理論은 船體 corner部の 應力 解析時 計算 時間이 매우 적게 걸리므로 直接 解析에 의한 船體 構造의 最適 設計時 매우 有用하게 使用될 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] Terada, Y., "Approximate Method of Analysis on the Stress Distribution at Joints of Structural Members in Oil Tankers", SNAJ., Vol. 109, 1961.
- [2] Osgood, W.R., "A Theory of Flexure for Beams with non-parallel Extreme Fibers", J. of Applied Mechanics, 1959.
- [3] Nishimaki, K., "On the Measurement of Stress Distributions of the Transverse Strength Members of Tankers", SNAJ., Vol.105, 1959.
- [4] Nishimaki, K., "Some Examples of the Calculations on the Transverse Strength of Oil Tankers", SNAJ., Vol.108, 1961.
- [5] Inokuty, T. and Yamaguchi, I., "On the Distribution of Bending Moment of Bracketed Structures", SNAJ., Vol.103, 1959.
- [6] Yamaguchi, I., "On the Tests of Fixed Beam with Brackets", SNAJ., Vol.102, 1958.
- [7] Yamaguchi, I., "Approximate Method on Calculation of Transverse Strength of Ship (2nd report)", SNAJ., Vol.109, 1961.
- [8] 寺澤一雄, 船體構造力學, 海文堂, 1974.
- [9] Hughes, O.F., Ship Structural Design, A Wiley Interscience Publication, 1983.
- [10] 中原一郎, 材料力學(上卷), 養賢堂, 1975.
- [11] Timoshenko & Young(任尙鏞譯), 材料力學, 文運堂, 1977.
- [12] 羅昇洙, "一般화된傾斜처짐법에 의한船體의橫強度解析 및最小重量設計에 관한研究", 서울大學校 博士學位論文, 1988.