

船舶의 損傷과 防止對策*

— 破壞管理制御의 實際 —

矢 島 浩**

Damage of Ship and Its Prevention*

by

Hiroshi Yajima**

1. 序 論

船舶이나 海洋構造物에 있어서 일단 損傷이 발생하게 되면 重大한 災害로 發展할 危險性이 대단히 큰 것은 말할 나위도 없다. 이들의 強度設計는 長期間에 걸쳐 蓄積된 實積을 基礎로하여 소위, 經驗工學에 基礎를 둔 各國 船級協會規定 등을 基準으로 하여 행해져 왔다. 즉 近似的인 強度解析(部材力 및 應力의 解析)을 수행하며 損傷實積을 基礎로 한 許容應力을 設定하고, 이에 따른 相對的 評價를 反復하여 改良을 거듭하는 方法에 의했다. 그런데 船體構造와 같은 高次的 不靜定構造物에 있어서는 嚴密히 均열의 發生強度를 檢討 基準으로 하는 것은 불가능에 가깝고, 또한 경험하지 못한 경우도 많다. 均열의 존재 自體가 設計上의 不備를 뜻하고, 損傷의 발생을 許容應力의 輕減에 의해서만 回避하려고 하던 중래의 設計觀念에는 自體의인 한계가 있다고 생각된다.

한편 지금까지 建造해 본 적이 없는 特殊船의 開發 建造 및 LPG船, LNG船과 같이 만일의 損傷時 大規模 災害가 발생한 危險性이 있는 船舶에 대해서는 그 經濟的 要因에 의해서도 破壞의 관리에 의한 fail safe design의 導入이 필요하다고 생각된다.

船舶設計에서 fail safe design 導入, 즉 “船殼의 破壞管理制御設計”는 破壞力學 理論을 活用하고 利用하는 것으로부터 시작된다. 즉 疲勞均열의 發生, 傳播 그리고 脆性破壞發生, 傳播 또는 傳播停止 등 均열을 主體로 한 損傷過程의 把握을 기초로 하여 船殼部材(熔接이음부 포함)의 許容應力 또는 壽命의 計算, 결함許容值의 設定, 材料選定の 判斷基準 등 各種 必要判斷事項에 대하여 하나의 근거를 주는 것이다. 또 均열의 존재는 許容하여도 사용기간 중에 致命的인 破壞을 일으키지 않도록 構造方式의 開發, 設計를 追求하는 것도 된다.

이상과 같은 배경으로부터 본 고에서는 船舶에서 破壞防止對策의 일환으로 船殼의 破壞管理制御 실제에 대하여 약간 소개하고자 한다.

2. 船舶에 있어서의 損傷 例

船舶의 疲勞損傷에 대해서는 많은 損傷 例가 報告되어 있다. 더구나 어느 損傷 例에 있어서도 構造的 應力 集中部, 熔接결함, 微小均열 및 가스 낫치 등의 局部的 應力集中 존재가 원인이 되고 있는 것은 再論의 여지가 없다. 또한 發生 成長한 疲勞均열이 脆性破壞로 移行하게 되면 쉽게 大破壞로 發展하게 된다.

* 1984年 5月 12日 春季 學術發表大會에서 特別講演

** 三菱重工業 株式會社 技術本部 長崎研究所

이미 널리 알려져 있는 바와 같이 第二次大戰 중 美國에서 建造된 戰時 標準船의 破壞例는 典型的인 脆性破壞例이다. 대표적인 例로써 1943年 1月 16日 美國 Oregon 주 Portland 港에서 試運轉을 끝내고 岸壁에 係留中이던 Schenectady 號가 夜間에 큰 소리와 함께 완전히 두 부분으로 折損한 例를 들 수 있다. Fig. 1은 破壞한 個所의 船殼狀況이다.¹⁾ 이 戰時 標準船의 破壞例는 戰時 중에 많은 船舶을 急造하여야 할 必要 때문에 建造期間 短縮을 위해 熔接이 전면적으로 採用되었다는데 最大의 原因이 있다고 말할 수 있다. 즉 熔接결합과 熔接入熱에 의한 殘留應力이 주된 原因이라고 생각된다. 더구나 全熔接構造로써 전체가 일체로 되어있기 때문에 大破壞로 發展한 것이라고 생각된다. 물론 사용된 鋼板의 研壞靱性値와 設計의 配慮도 현재에 비하면 비교가 되지 않는다는 것은 말할 필요도 없다. 약 5,000척 建造한 가운데서 약 1,000척에 대하여 약 1,500件的 損傷이 발생하였던 것이다. 그 가운데 약 250척은 갑판에 균열이 발생하여 船體強度 상 중대한 것이었고, 약 20척은 완전히 둘로 折損하여 폐기되었다.

일본 近海에서도 여러번의 大損傷이 발생하고 있다. 대표적인 例를 2~3개 소개한다. 1953年 1月 8日 原油를 滿載하고 뉴기니아의 주란에서 岩國으로 향하여 북상하던 중 奄美大島의 외항에서 荒天을 만나 순간적으로 船體가 둘로 折損한 탱커 Avanti 號(15,700 D.W. T.)의 例가 잘 알려져 있다.²⁾ Avanti 號는 1946年 스웨덴에서 建造된 노르웨이의 탱커였다. 둘로 折損

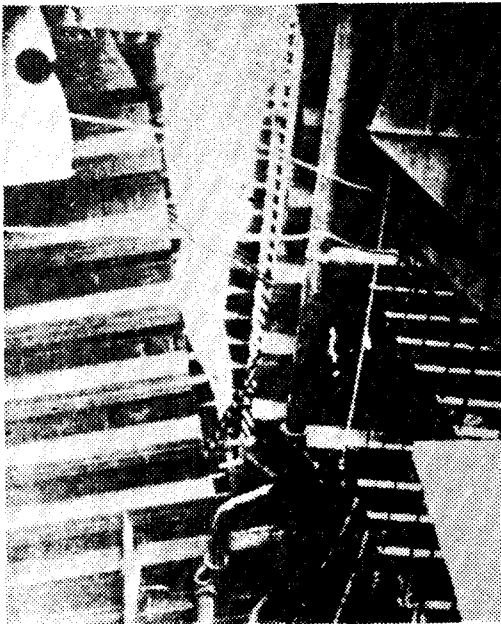


Fig. 1. 戰時標準船 Schenectady 號의 脆性破壞狀況

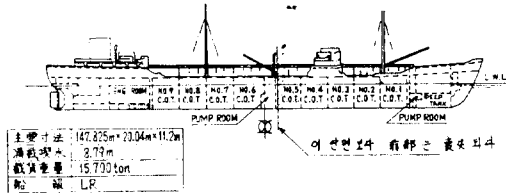


Fig. 2. Avanti 號의 脆性破壞의 概要

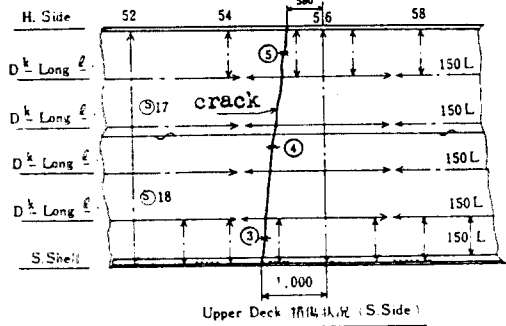
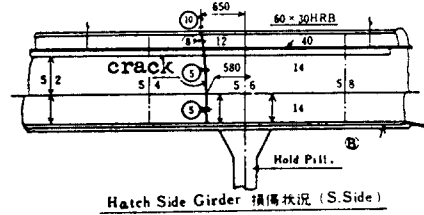
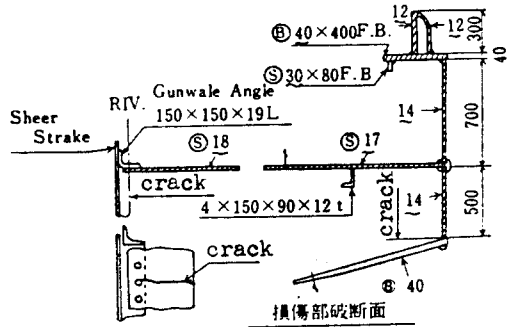


Fig. 3. 木材運搬船 上甲板의 脆性破壞 狀況

후 前半部는 沈沒하였고 後半部는 美海軍에 의해 구조되어 그 후에 三菱重工業 長崎造船所에서 再生工事が 行해졌다. 戰後 混亂時에 建造되었기 때문에 사용된 鋼板의 破壞靱性値도 낮고 熔接도 오늘날 상상도 할 수 없을 정도의 수준이었다.

또 1969年 1月 8日 門司를 出港하여 Nakhodka를 향하여 북상 중이던 木材運搬船(7,292 D.W. T.)의 上甲板이 脆性破壞를 일으켰다. 破壞發生時의 溫度는 -1°C 정도였다고 추정되고 있다. 破壞의 起點은 Ha-

tch의 Top coaming 內側 cover plate의 맞대기 熔接部의 熔接결합이었다. 上甲板을 傳播한 균열은 舷側까지 이르러 上甲板 stringer angle 고착용 rivet 구멍에서 정지하였다. (Fig. 3 참조)

이와 같은 通常船의 脆性破壞 이외에도 漁船이나 冷凍運般船의 冷蔵船의 溫度가 以前보다 낮아진 것이 원인이 되어 冷蔵船이나 急速冷凍室의 갑판에 대한 脆性破壞가 두드러지게 나타나고 있다. 이와 같은 破壞에는 冷蔵船 때문에 甲板이 低溫으로 된다든지 주위와의 溫度差에 의하여 생기는 熱應力이 크게 영향을 미치고 있다. 또 破壞의 起點에는 熔接결합이나 가스 낫치 등이 존재하고 있는 것이 대부분이다.³⁾

최근의 損傷 例로 흔히 눈에 띄는 것은 應力集中部에서 發生 成長한 疲勞균열이 使用條件의 惡化(使用應力 또는 熱應力の 增加)와 (破壞發生時的 溫度에 있어서) 材料의 破壞靱性值 부족 때문에 균형을 유지할 수 없게 되어 脆性破壞로 移行하는 損傷 例(Fig. 4참조)이고, 이와 같은 損傷은 계속되고 있다. 더구나 이와 같은 損傷은 大破壞로 發展할 경우가 많다.

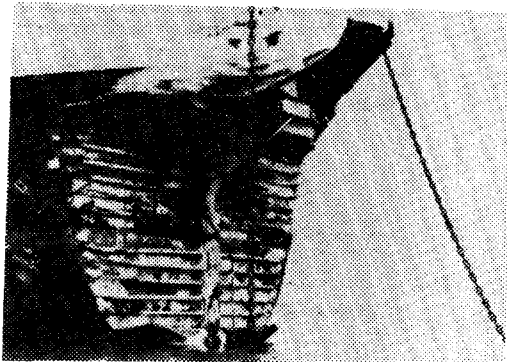


Fig. 4. 航海중에 船首部가 망실된 Tanker(13萬 D.W.T.)의 例

3. 船殼의 破壞管理制御에 대한 생각과 現象

최근 急速히 發展하여 온 破壞力學에서는 熔接결합이 라든지 疲勞균열先端 등에 있어서의 應力集中 또는 變形率集中部의 K值(stress intensity factor, 주로 K_1 值 등), COD(crack opening displacement) 또는 J積分值 등이 극히 가까운 周圍의 材料에 대한 K_c 值(critical value of K의 의미로서 材料의 破壞靱性を 나타내는 값 주로 K_{Ic} 值 등), δ_c 值(critical value of COD의 의미로서 材料의 破壞靱性を 나타내는 값), 또는 J_c 值(critical value of J-integral의 뜻으로서 材料의 破壞靱性を 나타내는 값)을 넘게 되면 平衡이 무너져 破

壞가 發生한다고 생각된다. 즉 K值, COD值 또는 J積分値는 應力(變形率) 集中部의 幾何學的 形狀 치수와 應力(變形率) 條件 등으로 부터 定해지는 物理量 이고 K_c 值, δ_c 值 또는 J_c 值는 일종의 材料定數라 생각되고 있다. 低溫脆性を 나타내는 材料에 있어서는 溫度가 낮게 되면 K_c 值, δ_c 值, J_c 值가 작게 된다.

이러한 생각은 많은 實驗室의 現象, 實構造物에 있어서의 破壞 例에 대한 逆解析 등에 의해 工學적으로 確인 되었다.

그래서 構造物 安全性的의 維持 確證을 實現하기 위한 設計思考의 하나로서 소위 fail safe design이 널리 알려져 있다. 이의 基本的 概念은 材料 및 構造가 그 製造過程에서 불가피하게 극히 微細한 결점이 있게 될지도 모른다는 생각으로부터 出發하고 있으며, 成長하고 있는 균열이 機能을 상실하는 許容限界의 크기에 도달하기 이전에 檢出 探知 및 補修되도록 設計하고 管理할 것이 要求된다. 즉 限界 이하의 균열발생 및 成長은 許容될 수 있으나 항상 構造物의 殘餘強度를 파악하면서 構造物의 安定성을 確保하고 機能을 다할 수 있도록 하는 방향으로 指向해야 한다.

低溫型 LPG船, LNG船, Tank의 安全性 評價에 實용化되어 있는 "leak before failur" 思考, 바꾸어 말하면 균열의 존재는 許容하나 致命的인 機能喪失의 事態에는 결코 이르지 않을 것을 基準으로 하는 設計思考, 즉 破壞管理設計制御가 今後 重要な 課題가 될 것이다.

板骨構造의 集積體인 船殼의 設計에 破壞管理制御의 思考를 적용할 경우 다음과 같은 問題點이 지적된다.⁴ 즉

① 균열 強度解析을 實施함에 있어서 平板의 面內問題인 경우는 疲勞균열의 傳播, 脆性균열의 發生現象에 대하여 풍부한 解析例 및 實驗 例가 便覽化 實驗式化 되어 있다. 그러나 平板과 平板의 立體交叉部(通常은 필렛 熔接部) 및 그 주변에 균열先端이 위치하는 경우에 대해서는 문제가 매우 복잡하며 아직 便覽化나 實驗式化가 되어 있지 않다.

② 荷重條件(海上條件 등)은 확률적으로 밖에 주어지지 않으며 最苛酷狀態를 어떤 設計의 判斷에 의하여 결정할 수 밖에 없다.

③ 板骨構造(防撓板構造)의 集積體로서 高次的 不靜定構造인 사실에서 균열의 擴大에 의한 힘의 再分配는 반드시 일어난다.

④ 熔接工作에 의한 局部形狀(덧붙임形狀, 도우部形狀 등)의 差異는 크고, 이들 局部形狀을 미리 特定하게 한다든지 均一化 하기는 곤란하다.

⑤ 疲勞균열의 傳播나 脆性균열의 발생에 대해서는 工

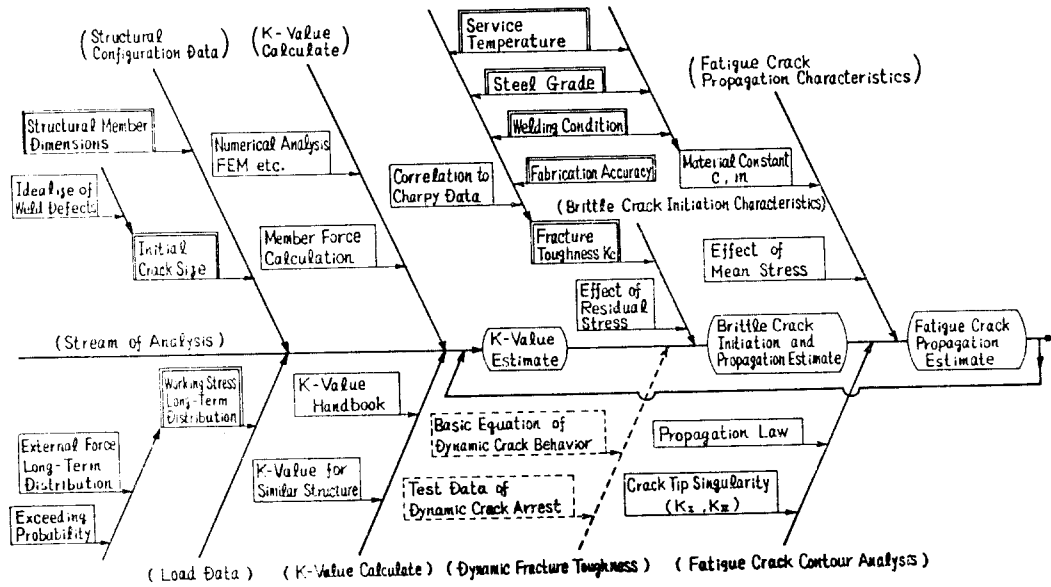


Fig. 5. 破壞力學 解析의 Flow Chart

學的인 基準을 確立하는 등 關連되는 材料定數의 수집이 어느 정도 整備되어 있지만, 脆性균열의 傳播, 停止條件에 대해서는 靜的 解析에 의한 評價나 設備基準은 있어도 動的 現狀을 正攻法으로 취급하기 시작한 것은 극히 最近에 있어서의 일이다. 따라서 脆性균열의 傳播나 停止條件式은 그에 關連하는 材料定數를 결정하는 데 대해서 便覽化, 實驗式化가 앞으로의 課題라고 말하지 않을 수 없다.

그래서 균열을 수반하는 損傷을 fail safe的으로 許容하던가 또는 補修할 때의 判斷도 많은 경우 破壞力學에 의한 균열 強度나 壽命計算 評價에 의존하고 있다. 일반적으로 破壞力學에 의한 균열 強度計算의 경우 計算內容 또는 Flow는 Fig. 5에 例示한 바와 같다. 단 Fig. 5에서는 疲勞균열의 傳播나 脆性균열의 발생 등을 評價할 指標로서 소위 K概念을 생각한다.

船殼部材 均열 強度計算의 대부분은 K概念이 적용 가능하다고 생각하고 있으나 부분적으로는 다른 破壞力學 Parameter를 導入하는 評價도 필요하게 된다.

Fig. 5는 計算의 흐름에 대한 一般的인 예이나 여러 경우에는 檢討對谷部材나 均열形狀에 따라서 그 중 特定計算 Process가 重要度를 증가시키고 다른 부분은 상당히 簡略化, 近似化를 꾀하는 것이 통례이다. 즉 鋼板의 片面에 생긴 表面均열이 板 두께를 貫通하여 內容物의 漏洩을 일으키느냐 아니냐의 狀態를 判斷基準으로 하는 경우, 즉 “機能不全”을 이 狀態로 생각하는 경우, 또는 內殼材로부터 進展한 均열이 外板을 뚫어 海水가

流入하기 시작하는 狀況을 생각했을 경우, 또는 bracket와 같은 補強部材가 破斷하여 補強效果를 喪失한 狀態를 생각하는 경우 등에 따라서 計算 흐름에 있어서의 point를 놓는 방법이 다르게 된다. 그런데 “機能不全”인 때와 같은 狀態를 생각할 때는 部材의 種類나 重要度 또는 船殼 자체의 用途나 社會的 要請 등에도 좌우되며, 正攻法으로 設計의 選擇에 맡겨지는 性質의 것이다. 따라서 fail safe的으로 許容될 수 있는지 없는지의 評價도 아래에 제시되는 몇개의 pattern으로 分類될 수 있다. 단지 斷判基準을 정할 때는 均열 強度計算만 아니라 漏洩 가스 檢知精度, 檢査點檢精度 등과 같은 다른 要素의 技術이 關連하는 경우도 있다.

① 隔壁 등의 一次部材나 bracket 등의 二次部材에서 생긴 均열이 疲勞均열로서 傳播하기 시작한 경우 不安全的 擴大를 일으키기 以前에(또는 內力平衡을 잃어서 뒤이어 大規模 損壞를 유발하기 以前에) 點檢하여 알 수 있는지의 與否, 또는 停留化하는지의 與否, 또는 예정된 船齡에 이르렀는지의 與否.

② 構造的 應力集中部나 平板 중의 疲勞均열이 脆性破壞로 移行한 경우 阻止性能이 우수한 鋼板이 存在하거나 構造的으로 阻止能力이 있는 板交叉部가 존재하거나, 또는 應力 및 溫度에 따른 條件 등에 의해 大規模 破壞를 誘發하지 않는 위치에서 停止하는지의 與否.

③ 表面 결함으로 부터 發生한 均열이 板 두께를 貫通하여 內容物이 漏洩하기 시작할 경우, 均열의 不安靜의 擴大에 의한 內容物의 大量流出을 일으키기 이전에 이

상태가 檢知되는지의 與否.

④ 內構材 등의 결함으로 부터 발생한 균열이 外板部에 달하여 板 두께를 貫通할 경우, 海水 流入에 의한 荷物汚損 또는 荷物流出이 일어나기 이전에 이 상태를 點檢할 수 있는지의 與否 등이다.

이들 중 ③의 斷判基準에 比較的 가깝다고 생각하는 것을 合否基準으로 사용하고 方形 獨立탱크方式 低溫型 LPG 船의 탱크에 leak before failure의 概念 ("Type B"로 하여 評價)이 成立하는지의 여부를 評價

法으로 檢討하였다.

日本造船研究協會 RR3M 委員會의 檢討 flow chart 를 Fig. 6에 나타내었다.⁵⁾

한편 船殼의 破壞管理制御를 수행함에 있어서 日本造船研究協會 第153研究部會 SF小委員會(第169研究部會로 後續)에서, 船殼構造의 破壞力學的 見地로 부터 分類作業이 실시되었다.

즉 船舶의 種類 및 構造方式에 따라 여러가지 部材로 포함하는 船殼를 먼저, 위치(船側構造, 甲板構造

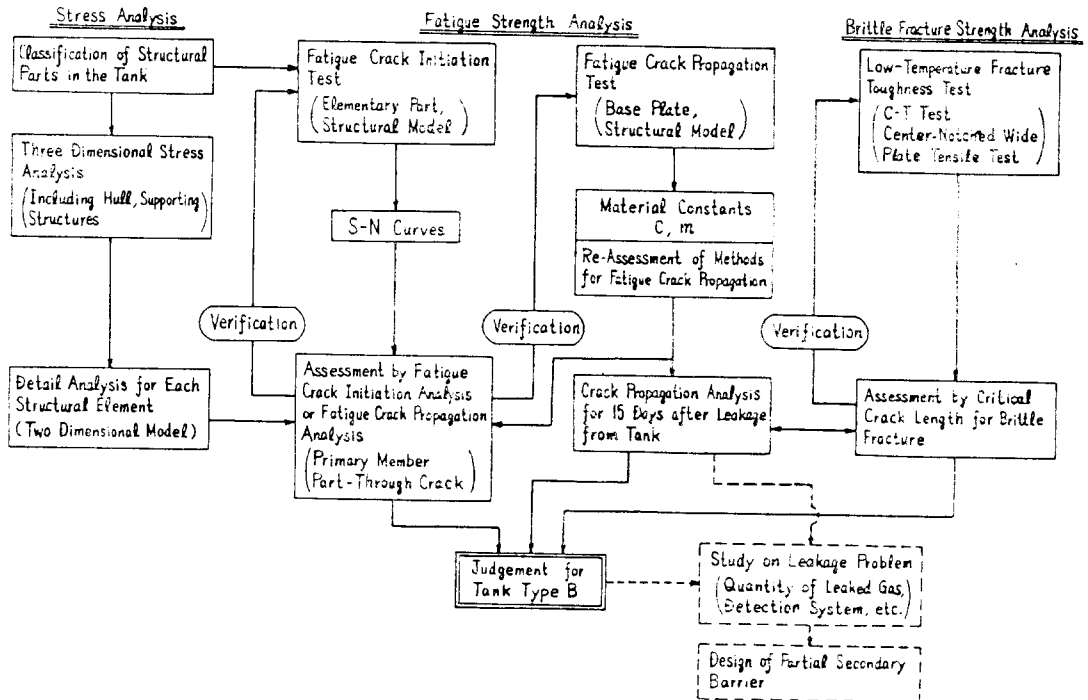


Fig. 6. 方式 獨立 Tank方式 低溫型 LPG船에 관한 Type B의 評價에 대한 Flow Chart

Table 1. Oil Tanker의 Trans and Lonyi Girder의 Member Slot 部에 대한 構造要素 分類

Object Structure	Ship Structure	Structure Component (Indication of External force and Stress)	Member Component (Local Stress Indication -Stress Concentration-)	Elementary Component
Deck Trans., Bolt. Trans., Side Trans., Longi. Trans.	Ring Structure such as Deck Trans., Bolt. Trans., Side Trans. 	(Ex.) Bot. Trans. Slot Part 		

등)에 의하여 分類한다. 또 그리고 防撓材 slot 등 局部構造를 포함하는 構造要素로 단일 또는 數枚의 板材로 立體組合으로 (部材要素라 稱한다) 集積되어 있다고 생각하여 終局的으로는 部材要素의 集合으로 分解되었다. Oil tanker의 수평 및 수직 거더등에 있는 등 縱部材 貫通 slot부에 대한 構造要素 分類 例를 Table 1에 나타내었다. 또 構造要素를 그 形狀과 境界力의 種類에 따라 類型化하고 그들을 實驗室에서의 試驗片과 같은 程度로 對應시킨 것이 Fig. 7에 나타낸 基本要素이다.

이와 같이 構造의 分類 mesh를 設定하므로써 均열 強度計算을 行할 때 model化 해야 할 범위(計算對象範圍)의 Guide line이 주어진다. model化의 範圍設定은 高次 不靜定 構造物에 있어서는 均열 進展때의 内力 再分配를 直接的으로 支配하므로 重要하다. 그리고 境

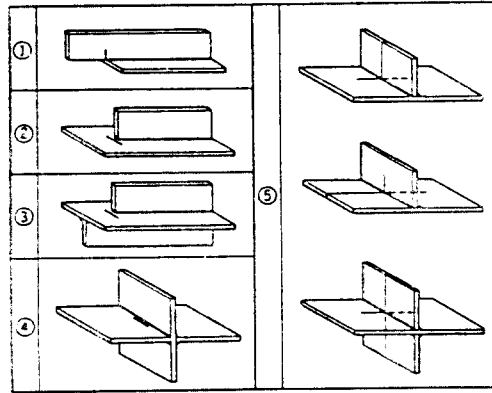


Fig. 7. 基本要素의 例

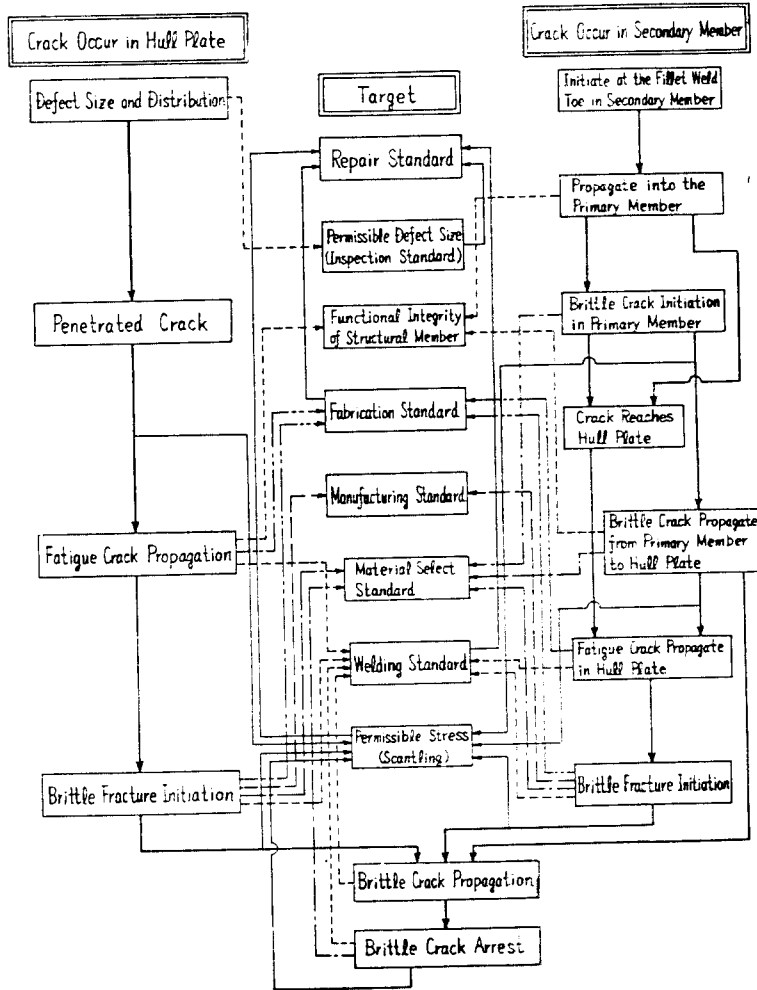


Fig. 8. 船殼破壞強度의 檢討 Flow Chart

界條件을 힘이 아닌 變位로서 주는 등의 것, 構造位置에 따른 便宜의 考慮 方法이 있지만 균열傳播나 停止를 취급할 때는 基本的으로 보다 넓은 범위를 對象으로 할 필요가 있다.

構造 pattern과 破壞樣式的 關連⁶⁾을 Table 2에 나타

냈다.

船殼部材의 一般을 對象으로 均열強度解析을 통해 現行의 諸設計基準의 改良이나 精密化를 企及하려 할 때 均열의 한 狀態로 變化를 檢討하는데 실로 많은 基準이 關係됨을 알 수 있다. 그 중 하나의 模式圖를 Fig. 8에

Table 2. 構造 Pattern과 破壞樣式的 關連

Crack Mode	Classification Mesh	Ship Structure	Structure Component	Member Component	Elementary Component
Fatigue Crack	Initiation	—	—	—	◎
	Propagation	—	○	◎	○
	Stop	—	◎	◎	—
Brittle Crack	Initiation	—	—	◎	—
	Propagation	○	◎	○	—
	Arrest	◎	◎	—	—

◎ : Mainly Correspondence
○ : May be Correspondence

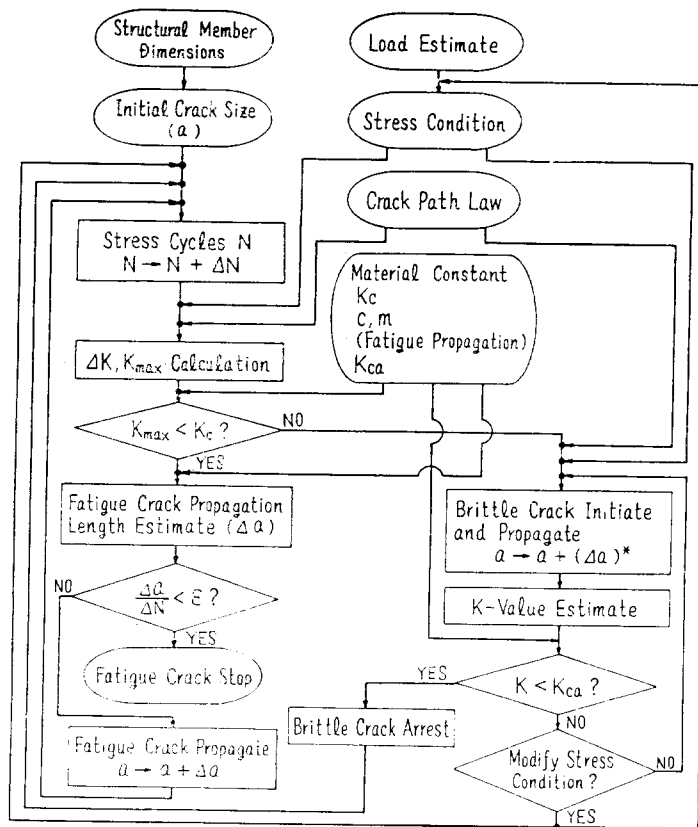


Fig. 9. 計算의 Flow Chart

나타냈다.

各種 基準은 어느 것이든 근본적으로 損傷을 防止한다는 基本概念이 있고 그런 의미에서 均열強度解析의 各々 計算條件이나 結果가 깊이 關與하고 있음이 당연하다 하겠다. 그런데 現時點에서는 均열強度解析과 諸設計基準이 전혀 異質的인 것으로 남아있는 면도 있고 이들을 필요에 따라 어느 정도 統一融合 해나가야 하는 것이 앞으로의 進行 方向이라 생각된다.

4. 船舶에 있어서 破壞管理制御의 實際

4.1 大型 油槽船 deck girder 強度의 檢討

板骨構造의 均열強度解析에 關한 대표적인 例로 大型 油槽船 deck girder 및 그 주변의 甲板, 즉 deck girder 주변을 대상으로 하여 甲板(皮板)으로 傳播해가는 疲勞균열의 傳播壽命과 脆性균열 發生時의 均열치수 등에 대하여 檢討한 例^{4),6-8)}를 소개한다. 또 初期의 微小균열이 어떠한 傳播徑路를 거처서 擴大 進展하는가에 대해서도 고찰한다.^{4),6-8)} 그리고 均열強度解析을 실시하기 위해 채택한 계산의 flow chart는 Fig. 9와 같다.

4.1.1 計算의 前提條件

deck girder 주변의 치수를 Fig. 10과 같이 정하였다. 또 대상 構造를

- ① 溫度 : 0°C ② Kc值 : $600 \text{ kgf} \sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$
- ③ Kca值 ≃ Kc值 ④ $d_a/dN = 1.44 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.5}$

로 가정하였다.

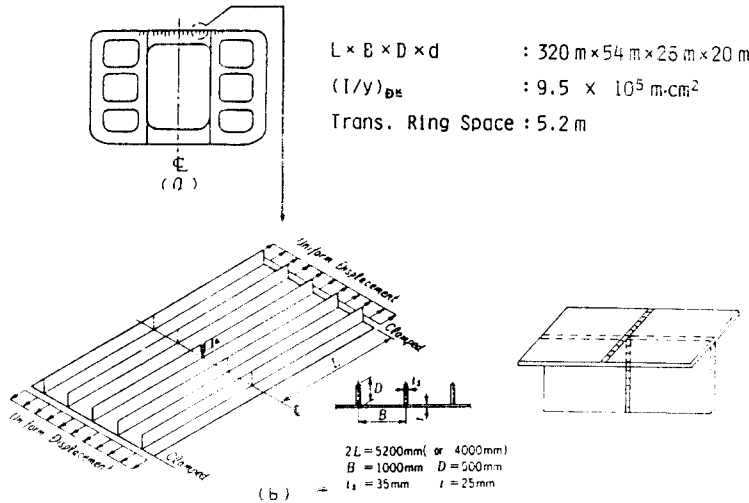


Fig. 10. 檢討對象 構造 및 部材 치수

外荷重條件으로는 波浪變動 및 靜水中의 般體縱方向 굽힘 moment를 받는 것으로 하였다. 또 脆性破壞 發生(傳播, 停止)에 대해서는

$$\sigma_a(\text{變動應力}) + \sigma_m(\text{靜水中 應力}) = 20 \text{ kgf/mm}^2$$

로 하였다. 그리고 疲勞균열의 傳播에 대해서는 等價인 一定 反復應力(σ_a), 즉 $N=10^8$ (回)의 反復應力에 대한 傳播균열 길이를 같게 하는 條件에서 구하여

$$\sigma_a = 3.05 \text{ kgf/mm}^2$$

로 하였다.

한편 疲勞균열의 進展徑路에 대하여는 maximum stress criterion⁹⁾과 strain energy density criterion¹⁰⁾이 破壞力學 分析에 알려져 있다.

이러한 均열傳播를 충실히 追跡하기 위해서는 均열 進展으로 인한 순간의 應力 또는 K值 計算이 필요하다. 그러나 순간마다 應力計算을 할 수 있을 만큼 다른 條件들이 정비되어 있지 않으며, 實船殼의 각종 損傷 例로 부터 어느 정도 類推可能하다는 점을 고려하여 均열 傳播徑路에 대해서는 몇개의 徑路를 포함하는 flow chart(Fig. 11)를 가정하였다.

Fig. 11에서 흐름의 分岐點은 어떤 工學的 判斷條件을 도입할 때 비로서 어느 방향으로 進展하는지를 알 수 있다.

破壞力學에 의하면 疲勞균열의 성장속도나 脆性破壞로 移動하는 시기는 K值 計算에 의하여 評價할 수 있다. 그러나 構造物 中の K值 評價에 있어서는 構造의 不定靜으로부터 발생되는 均열進展으로 인한 應力 再分

Table 3. 破壊機構解析結果の代表例

Structural parts	Detailed structure	Stress condition (kg/mm ²)	Fatigue crack initiation analysis			Fatigue crack propagation analysis			Unstable fracture analysis			Final assessment	
			S _g - N _c	Fatigue damage factor (after 20 years)	Code	Judge-ment	Initial crack (mm)	Final crack (mm)	Code	Judge-ment	Critical crack length 2a _c (mm)		Code
1 Face plate		Base plate (Ⓒ) $\sigma = 7.5 \pm 13.7$	$< 10^{-4}$	○									
		Butt joint (Ⓐ) $\sigma = 12.5 \pm 9.8$	$< 10^{-4}$	○	Cw ≤ 0.05								
		Butt joint (Ⓒ) $\sigma = 7.3 \pm 11.6$	3.69×10^{-4}	○									
2 Near slotted part		Web stiffener end $\sigma = 2.8 \pm 6.1$	0.11	○	Cw ≤ 0.5	Edge crack $b_0 = 1.5$	Over 10 years before breaking of web stiffener $b = 36.5$ at 10 years						
		① $\sigma = 6.3 \pm 6.0$ $K_t = 1.4$	0.07	○									
3 Bracket		② $\sigma = 6.1 \pm 6.7$ $K_t = 1.4$	0.13	○	Cw ≤ 0.5	Surface crack $2a_0 = 5.0$ $b_0 = 1.5$	Penetration of face plate at 8 years $2a = 42$ at 10 years	No penetration of tank plate after 10 years					
		③ $\sigma = 3.8 \pm 6.9$ $K_t = 1.4$	0.15	○									
		④ σ_M (tank plate) = 2.1 ± 2.8 σ_M (face plate) = 2.3 ± 2.6				Through crack $2a_0 = 40.0$	$2a = 280.3$ 150μ after penetration	Note (1)	665 (HAZ) (8, C)	> 2.0 m ($\sigma = 5.1$)	2a150 days after penetration $2a_c$	○	
5 Top roller line check		Tank plate (Ⓓ) $\sigma_M = 0.01 \pm 2.76$ $\sigma_B = 0.22 \pm 3.41$	$< 10^{-4}$	○	Cw ≤ 0.5	Surface crack $2a_0 = 5.0$ $b_0 = 1.5$	No propagation	Note (2)	630 (Base plate) (15, C)	> 2.0 m ($\sigma = 4.3$)	2a150 days after penetration $2a_c$	○	
		Rollkey plate (Ⓔ) $\sigma_M = 0.62 \pm 10.1$ $\sigma_B = 0.38 \pm 5.51$	7.03×10^{-2}	○				Penetrated at 10 years $2a = 45.7$				1.47 m ($\sigma = 13.1$)	
6 Dome		① $\sigma_M = 5.3 \pm 6.3$	1.0×10^{-6}	○	Cw ≤ 0.5	Surface crack $2a_0 = 5.0$ $b_0 = 1.5$	$2a = 515$, $b = 164$ at 10 years	Note (1)	665 (HAZ) (8, C)	> 2.0 m ($\sigma = 11.6$)	2a150 days after penetration $2a_c$	○	
		② $\sigma_M = 0.3 \pm 0.9$ $\sigma_B = 2.6 \pm 9.0$	3.3×10^{-2}	○				$2a = 504$, $b = 153$ at 10 years					

Note (1) Analysis of crack shape at penetration. Prediction of crack length 2a (150 days after penetration).
 (2) Period that fatigue cracks reaches tank skin plate or the analyzed part loses its structural function is not too short.

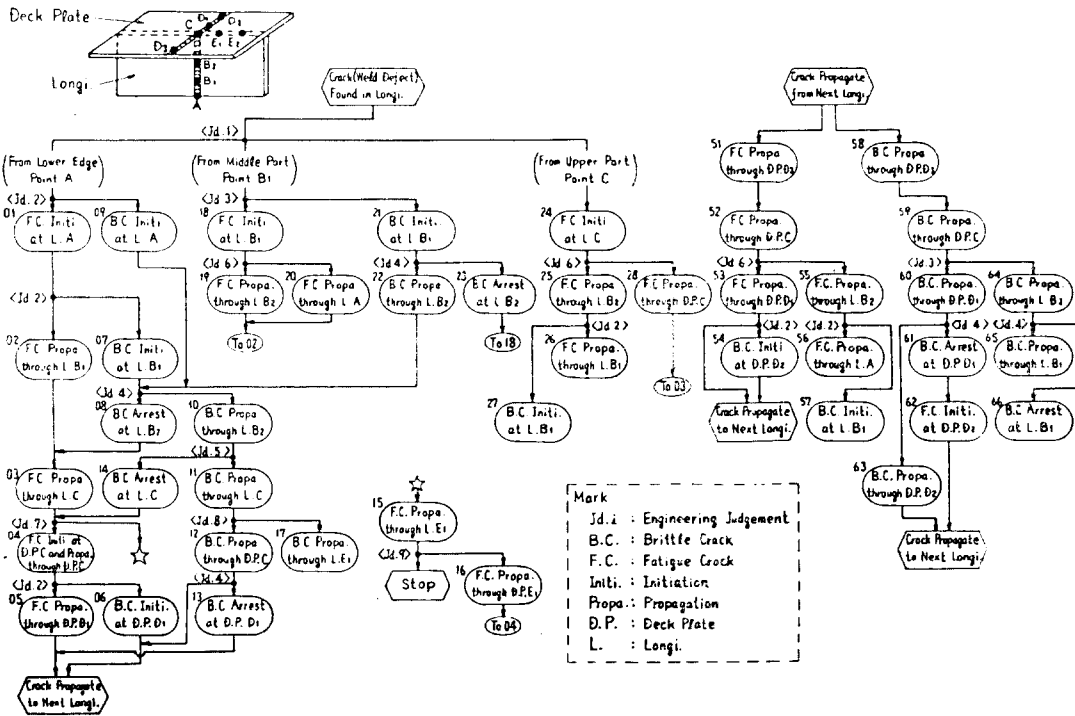


Fig. 11. 균열 進展 可能性이 있는 徑路

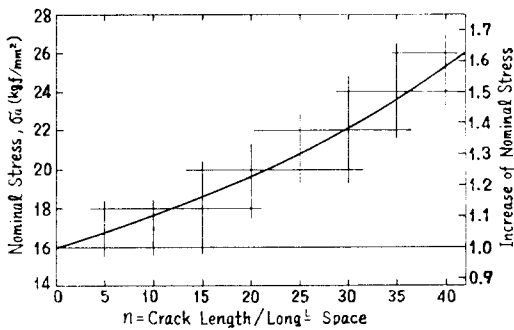


Fig. 12. 균열의 長大化에 따른 公稱應力 變動

配를 고려해야만 한다.

本稿의 計算에 있어서는 균열이 없는 경우의 變形量을 端部條件으로 부터 주는 것에 의해 近似的으로 應力再分配 效果를 導入하였다.

近似計算의 結果 甲板部 均열의 長大化로 인한 公稱應力의 變動은 Fig. 12와 같이 評價할 수 있다는 것을 알았다. Fig 12에서 n=5 deck girder의 간격 만큼 均열이 進展한 경우 公稱應力의 變動은 5% 增加하였지만 이 정도면 船殼全體의 剛性變化가 거의 無視할 수 있다고 判斷하였다. 따라서 이 範圍 内에서는 端部變位를 一定(그 값은 均열이 없을 때의 값에 一致)하게 하

는 近似計算이 許容된다고 생각하여도 좋을 것이다.

4.1.2 均열強度 計算 結果

앞의 Fig. 10에 보인 計算對象構造는 deck girder에 發生한 均열이 傳播하여 deck girder를 切斷하고 deck

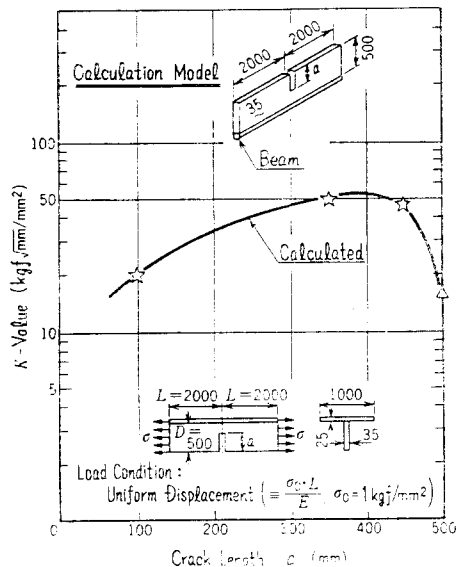
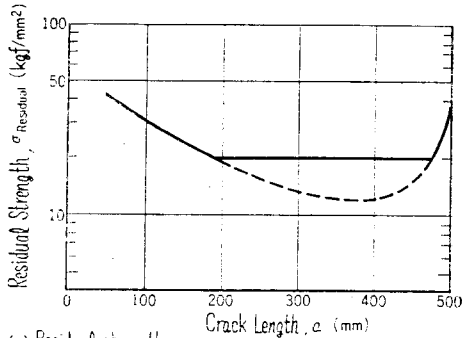


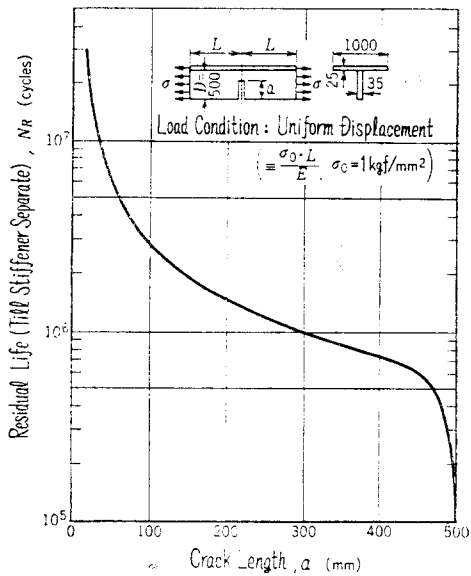
Fig. 13. Longi가 破斷되는 過程과 K值

plate에 侵入하는 過程까지를 數值 計算으로 追跡하여 본 것이다. 이때 熔接 殘留應力이나 초기의 形狀의 不均一은 無視할 수 있다고 가정하여 一直線으로 deck girder를 切斷하고 그대로 deck plate에 進入하는 것으로 하였다. 또 이 構造部分이 받는 力學的 境界條件은 縱方向으로 引張荷重을 받는 것으로 하였다.

計算 結果 중 girder가 破斷할 때 까지의 過程에 대해서는 K值가 變하는 모양을 Fig. 13에서 나타내었고, girder의 完全 破斷까지의 殘餘壽命(residual life)과 殘



(a) Residual strength



(b) Residual life

Fig. 14. Longi가 完全히 破斷될 때 까지의 殘餘壽命과 殘餘強度

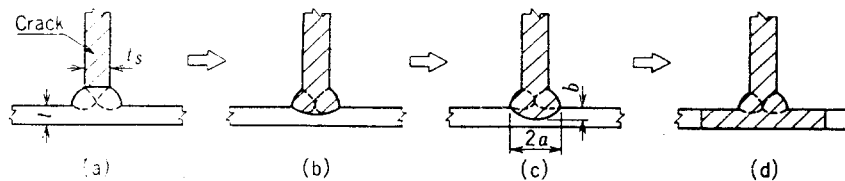


Fig. 15. 균열先端의 輪廓變化 (模式圖) (未熔着部가 없을 경우)

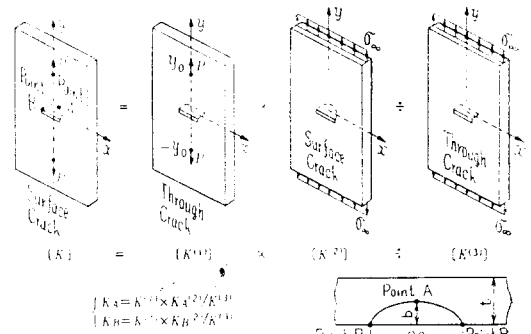


Fig. 16. 表面균열에 대한 K值의 簡易評價

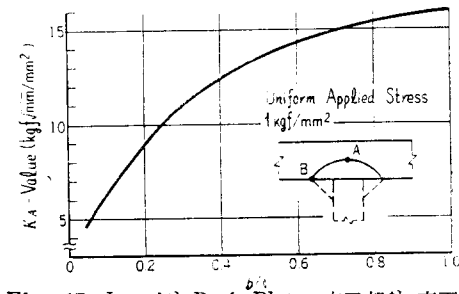
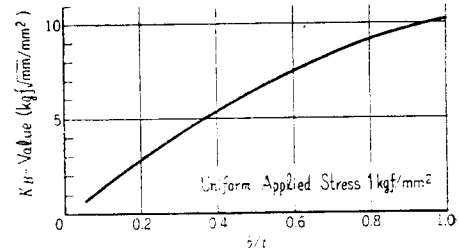
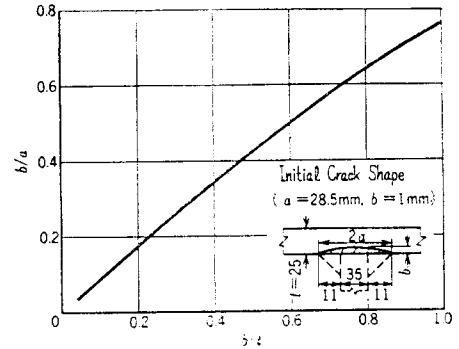
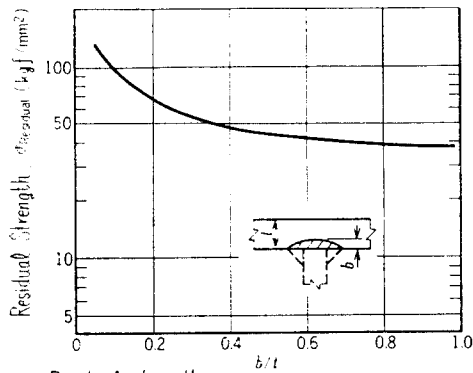


Fig. 17. Longi와 Deck Plate 交叉部의 表面균열의 成長狀況과 K值

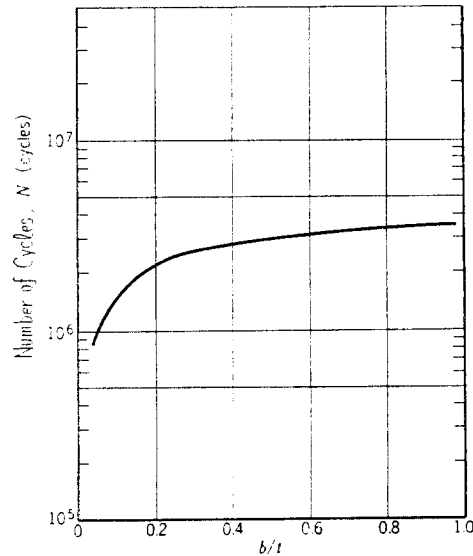
餘強度(residual strength)는 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 14(a)의 殘餘張度라 하는 것은 균열 길이가 a 인 상태에서 단 한번의 脆性균열을 發生시키는데 필요한 應力(荷重)이다. Fig. 13의 K 値는 作用應力 1 kgf/mm^2 일 때의 變形에 대한 것으로서 壽命評價에는 이것을 3倍로 하여 소정의 反復應力下의 값으로 換算하였다. K 値의 計算法은 理論解와 有限要素法解와의 重疊法¹¹⁾을 基本으로 하여 面內 K 値 計算 Program¹²⁾을 이용하여 구하였다.

또한 girder가 完全히 切斷된 상태, 다시 말하면 deck plate 板두께 內의 表面균열로 變換 상태에 대해서는 Fig. 5와 같이 균열 先端形狀의 變化를 가정하였다. 즉 板骨構造에 대한 汎用 有限要素法 program에



(a) Residual strength



(b) Crack depth v.s. number of cycles

Fig. 18. Longi와 Deck Plate 交叉部의 表面균열 成長狀況과 殘餘強度

의하여, girder와 deck plate의 接合線에 따라 剪斷應力을 算定해 두고, Fig. 15(c)에서와 같은 表面균열의 균열先端 K 値를 Fig. 16과 같이 近似法에 의하여 구하였다.

表面균열의 表面길이를 girder의 두께와 필렛다리 길이의 2倍의 습으로 취하고, 깊이 1mm 인 상태에서 부터 表面균열의 形狀 및 壽命을 計算한 結果가 Fig. 17과 Fig. 18이다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 불용착部가 없는 model인 이 예에서는 表面의 K 値(K_B 值)와 最深部의 K 値(K_A 值)와를 比較해 보면 表面의 點(Fig. 17에서 B點)이 傳播로 시작하기 전에 最深部の 點(Fig. 17에서 A點)이 板두께를 貫통하게 될 것으로 추정된다.

Fig. 13의 右端部, 즉 균열 길이 500mm 에서의 값은 이와 같은 貫통이 發生하기 직전의 값을 나타내고 있다.

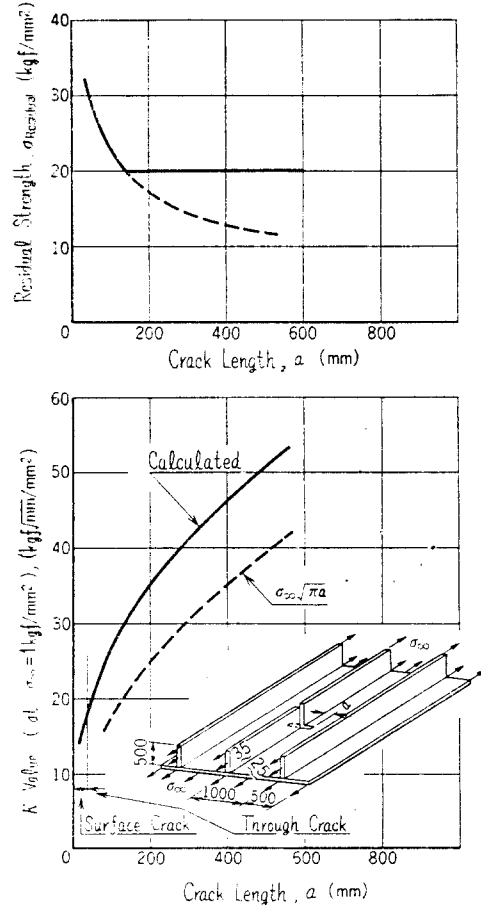


Fig. 19. Deck Plate에 侵入한 균열의 K 値와 殘餘強度

다음에 deck plate를 관통한 후의 균열 傳播過程을 girder를 beam으로 생각해서 面內問題로 model化 하여 計算한 결과를 Fig. 19에 나타내었다. 같은 그림에서 deck plate 중의 균열 길이 반(a)이 약 130mm인 지점에서 殘餘張度는 20kg/mm^2 이고, 異常狀態荷重에 의하여 脆性균열化 構造로 되는 것을 알 수 있다. deck plate 중의 균열이 더욱 進展하여 隣接한 girder에 接近하면, 板材 交又點에서 特有的 K值 減少가 생긴다. 따라서 가령 균열 길이 130mm 이하에서 脆性균열이 發生했다 해도 隣接 girder와의 거리 약 100~150mm의 위치에서 停止할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

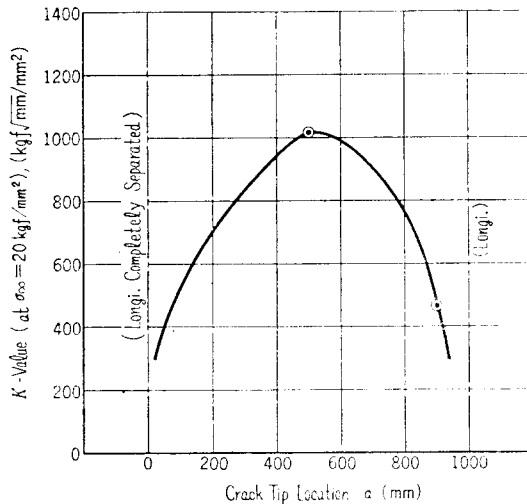


Fig. 20. 隣接 Longi의 存在로 인한 K值의 減少效果

4.2 方形 獨立 Tank方式 低溫型 LPG船 Tank 強度의 Type B 로서의 評價檢討

從來 方形 獨立 Tank方式 低溫型 LPG Tank 船에 대해서는 만일의 Tank 破壞時를 고려하여, 二次防壁으로된 船體內殼에는 Tank와 同等한 低溫用鋼을 義務的으로 사용하도록 되어 있었다. 그러나 아주 최근에는 Tank에 small leak protection system (leak before failure)이 成立하고 있는 것이 確認될 경우에는 二次防壁을 생각해도 좋다는 (Type B³⁹) 것이 實用化되어가고 있다.⁵⁾(Fig. 6참조)

Type B로 評價가 成立하는 경우에는 二次防壁을 생각해도 좋다는 생각이 球形 tank方式 低溫型 LNG 船에서 이미 實用化 되어있고 實績도 많다.

球形 tank에서는 small leak protection system이 成立하는 것을 確認하기 위한 均열強度解析(破壞機構解析)이 비교적 쉽기 때문이다. 그러나 方式 tank에서

는 소위 骨組構造로 되어 있어 均열強度解析의 대상이 주로 fillet 熔接 이음부이기 때문에 解析이 복잡하게 되는 難點이 있으므로 實用化가 늦어진 것이다.

4.2.1 Type B의 立證 檢討方針

Fig. 6에 보인 바와 같이 Type B의 評價가 成立하는지의 檢討는 다음과 같은 方式에 따르게 된다.

즉 就航 중에 만일 tank의 皮材에서 疲勞균열이 發生 成長하는 경우, 均열이 tank 皮材를 貫通하여 LPG가 漏洩하는 것이 檢知되고, tank 皮材의 損傷이 確認되고나서 최소한 15日間 繼續航行 可能하도록 義務化 되어있다. 그 사이에 疲勞균열이 脆性破壞로 옮겨가는 일이 절대로 있어서는 안되며 또 그 사이에 漏洩하기 시작한 LPG를 적당한 方式로 처리하지 않으면 안되는 것은 물론이다. 그러므로 tank 各부의 應力條件이 가능한 한 精確히 把握되고, 어떠한 부분에서든 疲勞균열이 發生 成長하여도 그 疲勞균열이 tank 皮材를 貫通할 때 形狀치수가 推定可能한 경우에는 Type B의 評價가 可能한 것이다.

4.2.2 77,000m³型 LPG 船 tank의 破壞機構解析

77,000m³型 LPG 船(Fig. 21)을 對象으로 tank(Fig. 22)의 破壞機構解析 實施 例를 소개한다.

먼저 tank의 3次元 骨組構造解析을 船體를 포함한 Fig. 23과 같은 model에서 실시하였다. 立體骨組 應力解析에서의 span 中央의 應力크기는 把握 되어도 主 girder corner 근방의 應力評價는 곤란하기 때문에 상세한 主 girder 2次元 F.E.M. 應力解析을 실시하였다. 構造 model의 一例를 Fig. 24에 표시하였다.

또 tank 꼭대기 부의 Roll key, tank 바닥 부 Bearing 부 등 局部構造에 대해서 上記 應力解析 結果를 境界條件으로한 局部構造 3次元 F.E.M. 應力解析을 실시하였다.

一例로서 tank 꼭대기 부 Roll key의 F.E.M. 應力解析 model을 Fig. 25에 나타냈다. 그리고 이들 應力解析方法에 대한 妥當性을 檢證하기 위하여 앞에서 말한 3次元 骨組應力解析 model 및 主 girder의 2次元 F.E.M. 應力解析 model을 이용하여 tank watertest 時의 荷重條件으로 應力解析을 실시하고, 實測 應力值와 解析值가 잘 일치하는 것을 확인하였다.(Fig. 26)

이들의 應力值를 이용하여 tank의 主要 構造要素(主 girder 構造, tank 板 補強材, 支持材 및 tank 板)에 대해서 疲勞균열 發生強度, 疲勞균열 傳播強度 및 脆性破壞(不安定破壞)強度 등에 破壞機構解析을 실시하였다.

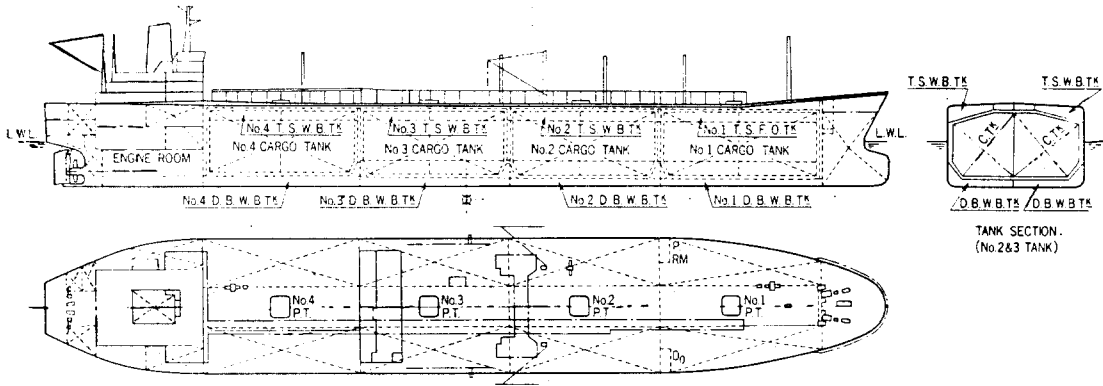


Fig. 21. 對象 LPG船의 概要圖

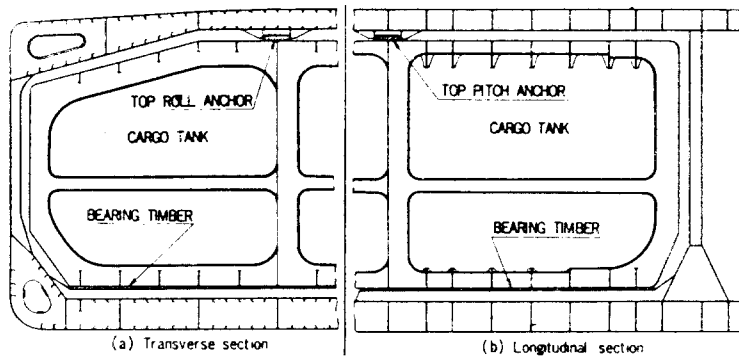


Fig. 22. LPG Tank의 主要 斷圖面

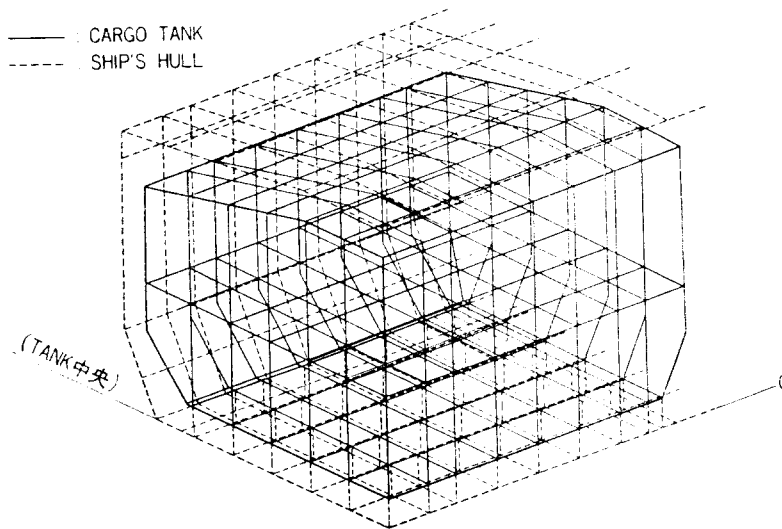


Fig. 23. Cargo Tank 및 그 주위의 船體構造의 應力解析 Model

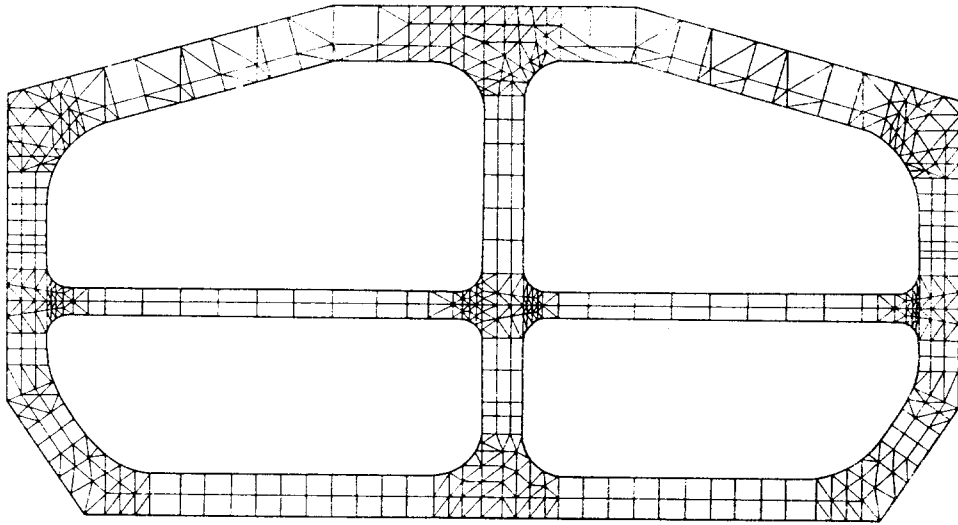


Fig. 24. Trans. Ring의 應力解析 Model



Fig. 25. Top Roll Key의 應力解析 Model

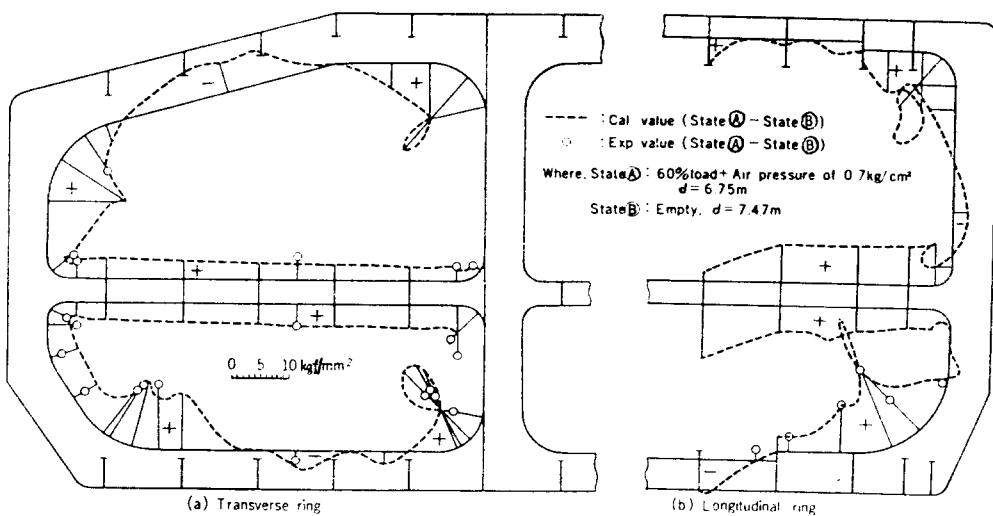


Fig. 26. Water Test에 의한 應力解析 方法의 妥當性의 確認

解析結果의 대표적인 例를 Table 3에 나타냈다.

結論의 概要는 다음과 같다.

① 모든 解析對象에 대해서 豫定 使用 期間 20年間의 疲勞被害度는 극히 적고, 疲勞균열 發生強度는 充分하다.

② 疲勞균열이 發生하였다고 생각하는 경우, 그 傳播速度는 아주 느려서 疲勞損傷에 의한 큰 균열의 發生은 일어나지 않는다.

③ 疲勞균열이 成長하여 tank 板을 貫通하는 등 重要 構造要素에 疲勞損傷으로 인한 큰 균열이 發生하였다고 생각한 경우에도 그 疲勞균열이 脆性破壞(不安定破壞)로 發展하는 現象은 생기지 않는다.

이상의 破壞構造 解析結果로 부터 檢討對象인 LPG 船 tank는 Type B의 評價가 성립하는 것이 분명해졌다.

5. 結 論

船舶에서의 破壞防止對策 方案중의 하나로서 船殼의 破壞管理制御 現象 및 그 實例 등에 대해 지금까지 説明했다. 船殼의 破壞管理制御는 소위 Total Engineering 이고 破壞力學의 發展을 비롯하여 여러가지 要素의 技術進歩에 도움을 받아 實用化가 가능해졌다고 말할 수 있다. 더구나 船殼의 破壞管理制御는 LNG 船, LPG 船과 같은 危險物 運搬船 또는 水産商船과 같은 高付加價値特殊船에만 限定되지 않고 一般船殼에 있어서도 그 質的 合理性을 追求할 수 있으므로 앞으로도 實用化가 推進되어야만 한다고 생각된다.

破壞力學을 비롯해서 諸技術의 日進日歩로 急速히 發展하고 있는 상황으로 봐서 破壞管理制御에 대한 概念은 일상 設計業務 중에 폭넓게 浸透되어 갈 것이다.

參 考 文 獻

- 1) *Symposium on Effect of Temperature on the Brittle Behavior of Metals with Particular Reference to Low Temperature* ASTM, STP, No. 158, (1954)
- 2) 矢島浩, 松尾一義, AVANTI. I 號 脆性破壞事故例의 調査, 三菱重工社內報告(1961) (未發表)

- 3) 最近의 損傷船의 事故調査報告, 日本海事協會
- 4) 渡邊昌建, 矢島浩, 川野始, 船殼構造의 破壞管理制御設計, 三菱重工技報, Vol. 16, No. 5, (1979. 9)
- 5) 危險物의 特性および 運搬船의 特殊設備에 關する 調査 研究報告書, 研究資料, 日本造船研究協會 第三基準 研究部會, No. 44R(1976. 3), No. 45R(1976. 3), No. 59R(1977. 3.), No. 68R(1978. 3), および No. 78R(1979. 3)
- 6) 厚鋼板大入熱熔接繼手의 脆性破壞強度および 疲勞強度에 關する 研究, 研究資料, 日本造船研究協會 第 153 研究部會, No. 267-2, (1978. 3)
- 7) 船體構造의 破壞管理制御設計에 關する 研究, 研究資料, 日本造船研究協會 第 169 研究部會, No. 297, (1978. 3), No. 315, (1979. 3), No. 323, (1980. 3) および, 船體構造의 破壞管理制御指針, (1983. 6)
- 8) 渡邊昌建, 矢島浩, 川野始, 船殼構造要素의 龜裂強度 解析 例, 日本造船學會 論文集, 第 146 號(1979. 12)
- 9) G. C. Sih, H. Liebowitz, *Mathematical Theories of Brittle Fracture*, Fracture, Vol. 2, (1968)
- 10) G. C. Sih, *A special Theory of Crack Propagations Method of Analysis and Solution of Crack Problems*, Mechanics of Fracture 1, Noordhoff Int. Publ., Leiden (1973)
- 11) 山本善之, 德田直明, 板構造物中ワテツワの應力擴大係數の有限要素法による解析法, 日本造船學會 論文集, 第 130 號, (1971. 12)
- 12) 安藤清, 船體構造部材의 龜裂強度解析 一面內彈性問題一, 三菱重工技報, Vol. 10, No. 3(1973. 5)
- 13) *Code for the Construction and Equipment of Ship Carrying Liquefied in Bulk, Adopted*, IMCO Resolution A328(K), 12 NOV. (1975)
- 14) 渡邊昌建, 矢島浩, 的場正明, 安藤清, 伏見彬, 飯塚晴彦, 木下正一-山下壽夫, 低溫式 LPG 船 獨立型 方型タンクの IMCO タイプ B 立證のための 破壞構造解析, 三菱重工技報, Vol. 17, No. 3, (1980. 5)
- 15) *Fracture Mechanics Analysis of Independent Prismatic Tank of Low-Temperature LPG Carrier for Verification of IMCO Type B*, Mitsubishi Technical Bulletin, No. 147, (1981. 12)