

脆性破壞防止를 위한 熔接設計

嚴 東 錫*

1. 緒 言

脆性破壞는 構造物에 接하게 되는 溫度 使用應力 切欠의 存在有無 熔接殘留應力의 층積 등에 支配되며 이들 要因은 設計段階에서 確定 혹은 豫想될 수 있는 것들이라 生覺된다. 切欠에 對해서는 施工 및 檢査時 熔接龜裂 其他各種欠陥 뿐만 아니라 모든 構造上의 不連續性 혹은 局部的인 應力集中 들은 設計上의 配慮에 의하여 緩和될 수 있는 경우가 많다. 板厚가 增加되면 龜裂의 塑性 拘束이 增加됨으로 板厚自體의 切欠 效果로 같은 意味에서 設計上의 配慮 對象으로 生覺하지 않으면 안된다. 熔接殘留應力 其他 內部應力에 對해서도 脆性破壞 防止上 必要하면 設計段階에서 應力의 緩和熱處理등을 考慮하게 된다. 構造物에 使用되는 材料의 選定은 脆性破壞에 對하여 設計上 配慮되어야 할 第一重要課題의 하나이다. 最近 材料選定基準에도 設計條件에 따라 詳細히 規定하고 있는 것이 많다. 脆性破壞事故의 防止가 重要課題로서 取扱된 것은 造船界가 最初이고 石油탱크, 가스탱크(gas tank) 其他 壓力 容器 橋梁 pipe line 등 各分野에서 熔接施工의 普及 構造物의 大形化와 더불어 脆性破壞에 對하여 집중히 生覺하겠끔 되었다.

2. 材料選定の 各種方法

2.1 造船材의 경우

脆性破壞를 일으킨 多數의 戰時標準船으로부터 採取한 船體用鋼板에 대하여 美國의 船體構造委員會가 調査한 結果를 그림 1에 나타내었다.

V-Charpy 15 ft-lb 遷移溫度가 60°F를 上廻하는 鋼板은 脆性破壞의 危險이 大하다는 것을 本調査에서 밝혀졌다. 戰後에 建造된 商船에 대해서는 Lloyd 船級協會가 같은 調査를 行하여 그림 2와 같은 結果를 얻고 있다. 이로부터 船體의 重要部分에 使用되는 鋼板의

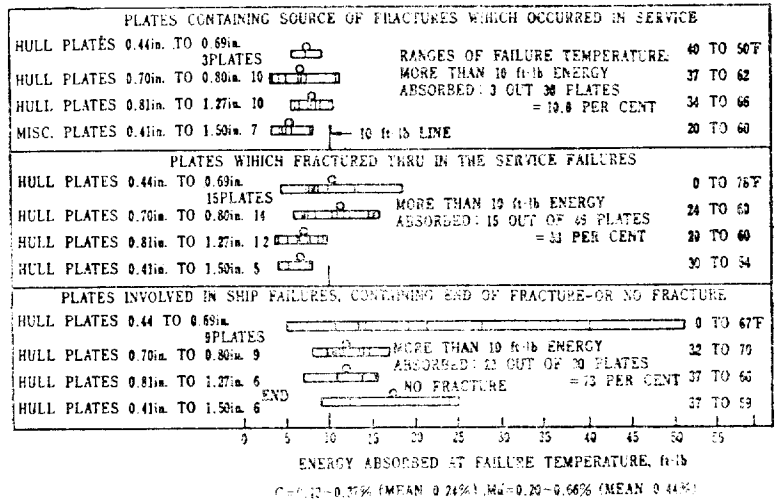


그림 1 脆性破壞를 일으킨 美國戰時標準船의 鋼板에 對하여 行한 損傷時 溫度에 있어 Charpy 試驗의 資料(美國船體構造委員會 1953)

V-Charpy 35 ft-lb 遷移溫度는 0°C 以下이어야 한다는 靱性에 대한 要求의 基本이 생기게 되었다. 이와같이

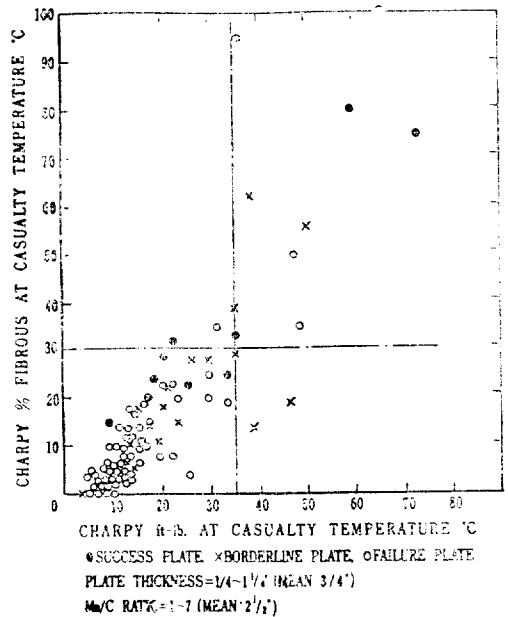


그림 2 脆性破壞를 일으킨 戰後 商船의 鋼板에 對하여 行한 損傷時 溫度에 있어 V-Charpy 試驗資料

* 正會員: 釜山大學校工科大學

事故經驗에 立脚한 材料選定基準는 現實的이긴하나 構造法의 進歩 혹은 新材料의 開發에 대하여 適應性이 결핍되고 있다. 그림 3은 이의 概要를 나타낸 것으로 요컨대 脆性破壞가 船舶의 어느 位置에서 發生하더라도 設計應力에 있어 龜裂阻止溫度(Robertson 試驗에서 구할 수 있는 材料의 特性)가 最低使用溫度 以下이면 大規模인 破壞傳播는 不可能하다는 生覺이다. 이 生覺은 各方面에 널리 普及되고 있다.

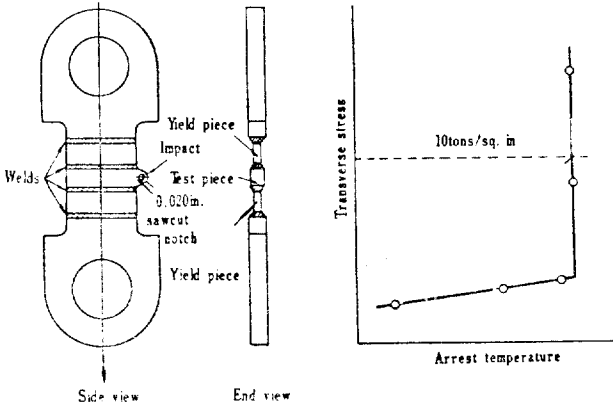


그림 3 Robertson 試驗(1953)

2.2 美國海軍技術研究所(N.R.L.)

前記한 船體構造委員會와는 別途로 美國에 있어 脆性破壞事故에 대하여는 N.R.L.이 중추가 되어 研究가 활발이 행하여져 왔다. 이 研究는 Irwin과 Pellini란 두 有名 研究家에 의하여 推進되어 왔으며 이에 의하면 先在缺陷의 形狀치수와 外力에 의하여 決定되는 stress intensity factor K 가 材料에 따른 限界值 卽

fracture toughness K_c 에 到達하면 破壞가 이어난다는 것이다. 先在缺陷으로서는 板厚의 크기가 생각되며 이와 設計應力이 합쳐져 使用狀態에 있어 K 值를 數理的으로 算出하여 놓고(均一한 引張應力 σ 에 이와 直

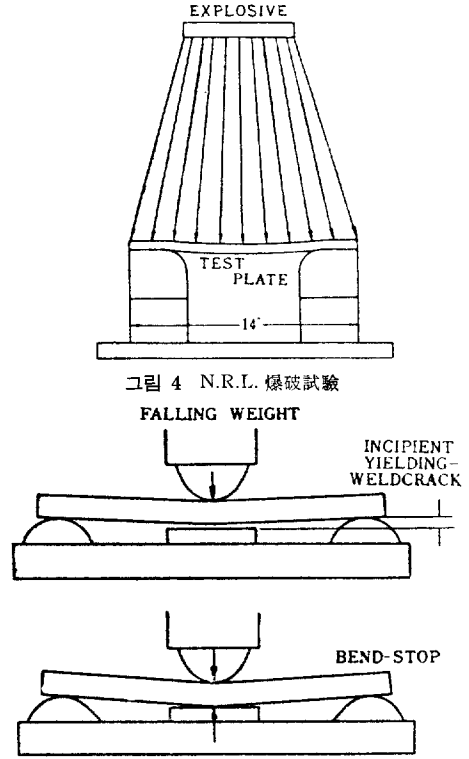
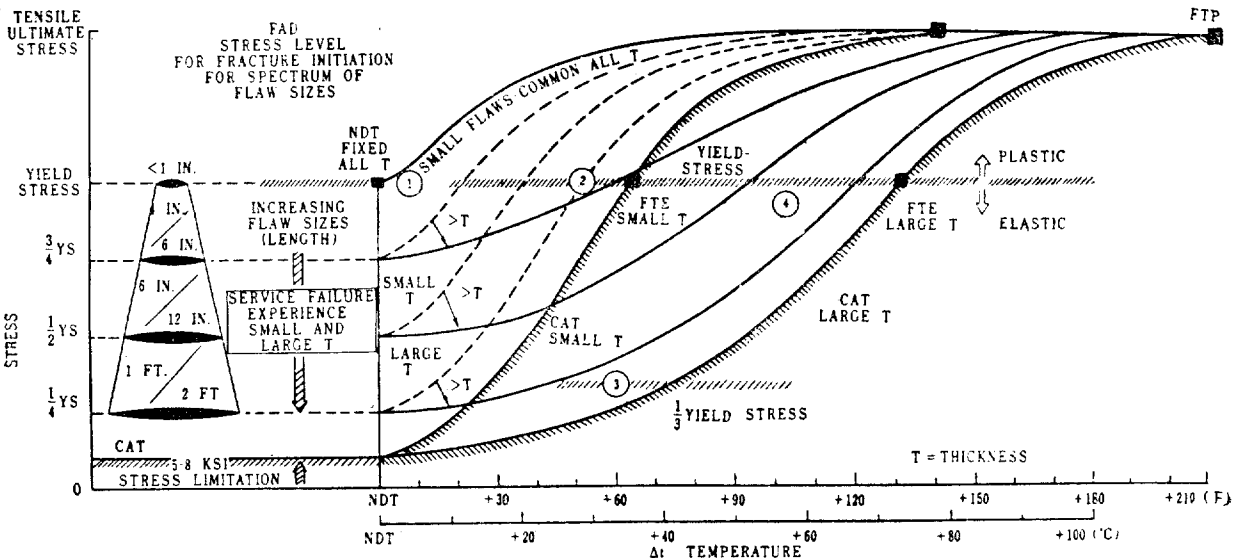


그림 5 N.R.L. 落擊試驗



FAD expansion to include the effects of very large section size. Fracture safe performance with respect to unstable fracture is indicated for temperatures in excess of the limits defined for the engineering design points noted as (1) small flaws subject to yield stress levels, (2) intermediate size flaws subjected to yield stress levels, (3) very large flaws subjected to nominal design stresses, and (4) very large flaws subjected to yield stress levels.

그림 6 Fracture Analysis Diagram

交하는 길이가 2C 인 先在龜裂이 存在하는 경우에는 $K = \sigma\sqrt{2C}$ 使用溫度에 있어 K_{Ic} 를 이 값 以上으로 하는 것이 Irwin의 材料選定 原理이다. K_{Ic} 值를 구하기 위한 材料試驗方法은 美國에서 規格化 되어있다. Pellini는 그림 4의 爆破試驗, 그림 5의 落擊試驗의 組合에 의한 實驗的研究가 出發點으로 되어있고 直觀的인 經驗的 結果를 쌓아 그림 6의 FAD(Fracture Analysis Diagram) 및 그림 7의 RAD(Ratio Analysis Diagram) 등과 같은 破壞力學的 模式圖의 形式로 結果를 整理하기에 이르렀다. Pellini는 一般的 材料選定基準은 그림 5의 落擊試驗에서 決定되는 NDT(Notch Ductility Transition)溫度를 最低使用溫度以下로 하고 있다. 이를 NDT 基準이라 한다. 耐爆特性을 要求하는 潜水艦과 같은 特別히 嚴格한 使用條件에 對하여는 FTP 基準(Fracture Transition Plastic)이 使用된다. 이는 NDT+120°F를 最低使用溫度 以下로 하고있는 材料選定基準이다. NDT 基準과 FTP 基準의 中間的인 使用條件에 對해서는 NDT+60°F의 FTE(Fracture Transition Elastic) 基準이 使用되고 있다. 極厚板인 경우는 그림 6에 나타내마와 같이 CAT(Robertson Crack Arrest 溫度線)는 左下로 쳐져 있으므로 FTP FTE와 NDT의 差는 크게된다. 그림 7에 있어 縱軸

Ductility Transition)溫度를 最低使用溫度以下로 하고 있다. 이를 NDT 基準이라 한다. 耐爆特性을 要求하는 潜水艦과 같은 特別히 嚴格한 使用條件에 對하여는 FTP 基準(Fracture Transition Plastic)이 使用된다. 이는 NDT+120°F를 最低使用溫度 以下로 하고있는 材料選定基準이다. NDT 基準과 FTP 基準의 中間的인 使用條件에 對해서는 NDT+60°F의 FTE(Fracture Transition Elastic) 基準이 使用되고 있다. 極厚板인 경우는 그림 6에 나타내마와 같이 CAT(Robertson Crack Arrest 溫度線)는 左下로 쳐져 있으므로 FTP FTE와 NDT의 差는 크게된다. 그림 7에 있어 縱軸

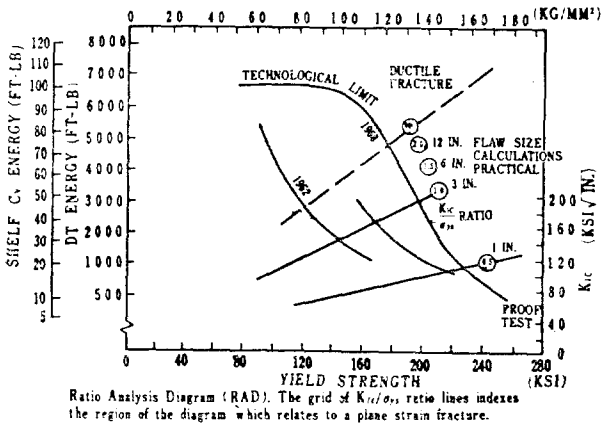


그림 7 Ratio Analysis Diagram

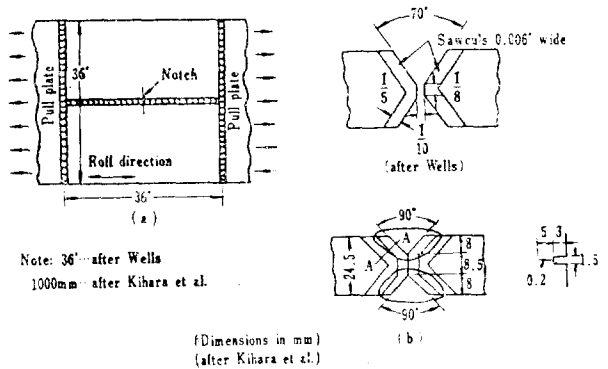


그림 8 Wells 試驗과 Kihara 試驗

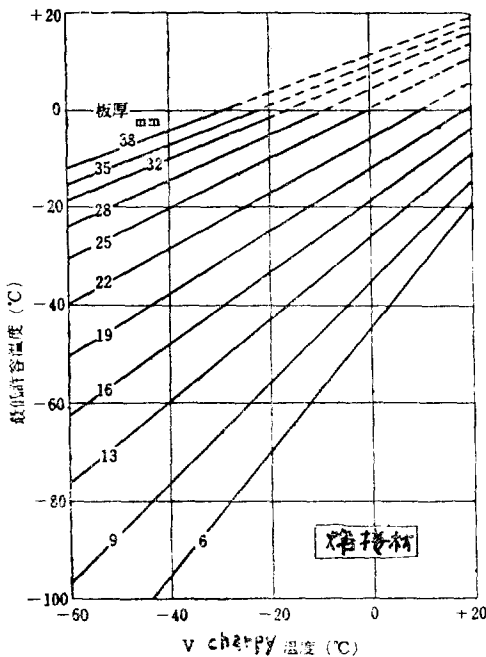
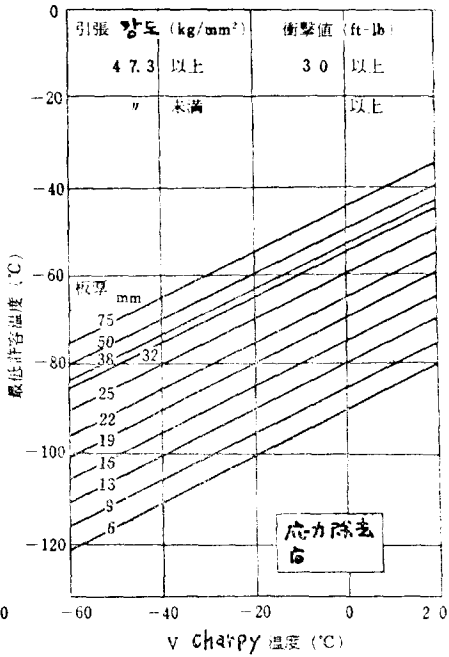


그림 9 壓力容器用 C-Mn 鋼板(非調質)의 脆性破壞發生을 許할수 있는 最低許容溫度(Burdakin 1968)



의 DT(Dynamic Tear) energy란 大形의 振子式 衝擊試驗에서 구해지는 energy이나 試驗材의 加工 및 試驗裝置 등으로 하여 아직 많이 普及되지 않고 있는 實情이다.

2.3 英國熔接研究所의 V-Charpy 要求

造船材를 除外한 各種構造用에 대한 英國에 있어 靱性에 대한 要求근거는 Welding Institute(舊稱 British Welding Reserch Association)에서의 脆性破壞에 대한 研究이다. 靜의 荷重下에 있어 脆性破壞事故를 再現키 위한 實驗의 考案으로 그림 8과 같은 Wells 試驗結果와 普及率이 높은 V-Charpy 試驗結果와의 相關關係로서 Welding Institute에서는 그림 9와 같은 靱性에 대한 要求提案이 되어 各分野에서 活用되고 있다.

그런데 英國에 있어 最近의 傾向은 Welding Institute를 中心으로 하여 COD(Crack Opening Displacement) 研究에 근거를 둔 基準을 要求하고 있다. Irwin의 K 概念이 適用되는 것은 先在龜裂先端에 形成되는 塑性變形領域이 龜裂치수에 比하여 크지 않을 때에 限定됨으로 超高張力鋼을 除外한 普通構造用鋼의 使用溫度에 있어 K_{Ic} 値를 材料試驗에 의해서 決定하기에는 곤란하다. 이 곤란을 극복하기 위하여 Cottrell와 Wells에 의하여 案出된 것이 COD 概念 卽 先在龜裂先端의 開口量 δ 가 材料固有值 δ_c 에 達할 때 脆性破壞가 發生한다는 생각이다. δ_c 를 材料試驗에 의하여 決定키 위하여 Wells가 最初로 考案한 方法이 그림 10이다.

最近에는 電氣抵抗線形 strain gage가 많이 利用되고 있다. 英國에서는 이미 COD 試驗方法의 標準化가 試圖되고 있다.

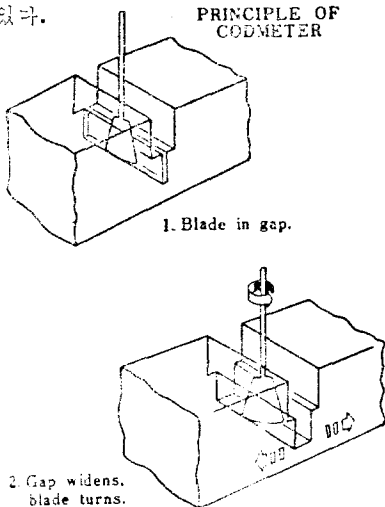


그림 10 COD 測定法의 一例(Wells 1914)

2.4 日本熔接協會의 靱性判定基準

日本에서는 Robertson 試驗을 二重引張試驗의 形態로 改良하여 이것이 各種鋼材의 脆性破壞 傳播阻止特性을

調査하는데 基本的인 方法으로 되어있다. 또 이 二重引張試驗結果를 Irwin의 K 概念으로 整理되고 K_c 値의 溫度依存이란 形態로 表現되고 있다. 이것과 V-Charpy 試驗資料의 相關關係를 넣어 日本熔接協會의 靱性判定基準 WES-136이 判定되었다. 使用應力 σ (kg/mm²) 最低使用溫度 T (°C) 및 板厚 t (mm)가 주워지면 이 材料에 對한 靱性要求가 다음 式에서 算定되는 vT_E (°C)로 된다. 여기서 G種이란 脆性破壞事故防止를 基準으로 生覺한 경우이고 A種이란 原子力構造物의 重要部分 혹은 軍事上의 目的으로 經濟性을 고려치 않을 때의 脆性破壞對策에 대하여 例外的으로 慎重을 기할 경우이다. 또 vT_E 는 材料의 V-Charpy 50% energy fraction로서 定義되는 遷移溫度의 許容上限을 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} & 3.16 \sigma (G \text{種인 경우}) \\ & 10.0 \sigma (A \text{種인 경우}) \end{aligned} \right\} =$$

$$\left\{ \begin{aligned} & 260 f_{(t)} \exp \left\{ 3, 100 \left(\frac{1}{vT_E + 291} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \\ & \quad (-18^\circ\text{C} \leq vT_E \text{인 경우}) \\ & (310 + 2.75 vT_E) f_{(t)} \exp(3050 + 22.5 vT_E) \\ & \quad \left(\frac{1}{vT_E + 291} - \frac{1}{T + 273} \right) \\ & \quad (-58^\circ\text{C} \leq vT_E \leq -18^\circ\text{C인 경우}) \\ & 150 f_{(t)} \exp \left\{ (2986 + 13.6 vT_E) \right. \\ & \quad \left. \left(\frac{1}{1.13 vT_E - 299} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \\ & \quad (-196^\circ\text{C} \leq vT_E \leq -58^\circ\text{C인 경우}) \end{aligned} \right.$$

$$f_{(t)} = \begin{cases} 1 - 0.05(t - 30) & (t \leq 35 \text{ mm인 경우}) \\ 0.75 & (t \leq 35 \text{ mm인 경우}) \end{cases}$$

이 WES-136은 日本國內의 各種壓力容器, 低溫貯槽, 長大橋 등의 材料選定時 널리 利用되고 있다.

3. 設計上의 配慮

3.1 脆性破壞對策에 對한 判斷

構造工學에 있어 經濟性을 考慮한다는 것은 重要課題의 하나이다. 構造物의 性質로보야 靱性이 크게 必要하지 않는 것에 靱性을 要求한다는 것은 不合理하다. 船舶 및 壓力容器 其他 熔接에 의하여 連續性을 갖인 殼構造에서는 一部이 脆性破壞가 發生하게 되면 왕왕 大規模인 破壞傳播로 直結되어 構造物 全體의 機能을 순간적으로 잃게 된다. 脆性破壞가 極히 낮은 빈도로 發生한다손 치더라도 이와 같은 構造物에 대해서는 材料選定을 本格的으로 行할 必要가 있다. 殼構造 일지라도 部材의 接合이 rivet나 bolt로 行할 경우라던가 熔接構造일지라도 全體가 殼을 形成치 않고 骨組 내지는 格子狀인 경우에는 使用材料에 靱性을 要求한다는 것은 原價만 높게하는 無意味한 일이니 注意할 必要가

있다. 部材 一個의 脆性破斷이 構造物全體에 影響을 주지 않는 限 必要最少限의 構造要素에 限하여 必要最少限의 靱性만 준다는 것이 正當한 設計態度라 하겠다.

3.2 細部構造에 있어 設計上의 配慮

美國의 代表的인 戰時標準船인 Liberty 船의 船口 모퉁이는 그림 11-a 와 같아 이는 構造上의 切缺이 甚多로 이와같은 形에 脆性破斷事故가 頻발하는 큰 原因이 되었다. 그러나 그림 11-b 와 같이 設計變更을 한 Victory 船에서는 이와같은 事故가 根絶되었다. 甲板은 船體에 있어서 強度上 重要部分이므로 이와같은 重要部分에서는 될 수 있는 限 stress의 集中이 없어야 함은 設計上의 常識으로 되어 있다. 한편 그림 12의 例에서는 破壞發生場所가 鑲裝品에 屬하는 部材이고 船體強度上 普通重要部分이라 생각되지 않는 곳이다. 그럼에도 不拘하고 일단 發生한 脆性龜裂은 熔接構造로 되어 連續性

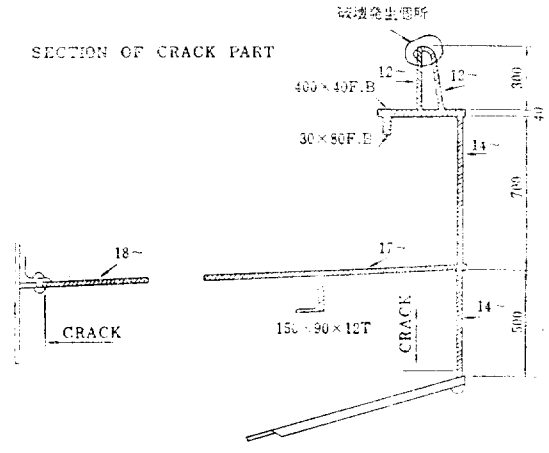
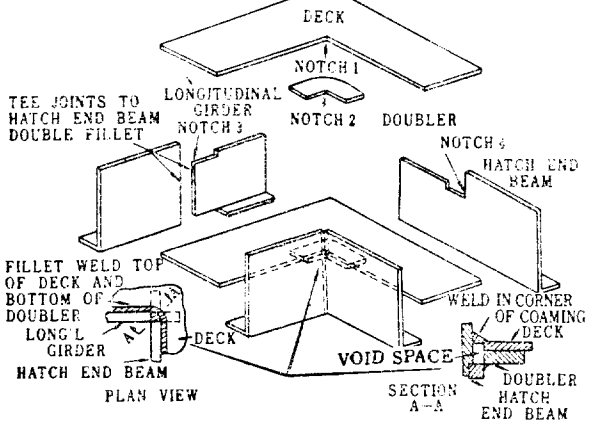
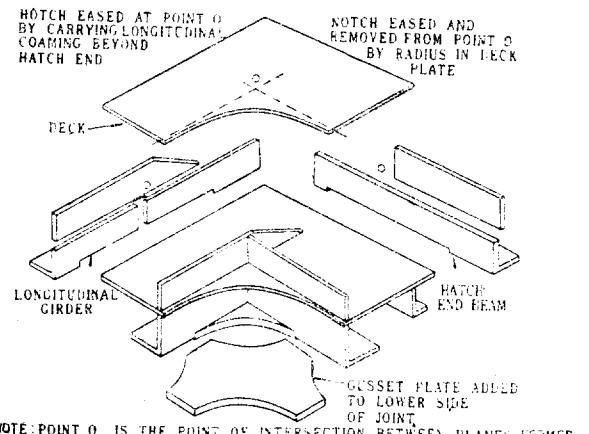


그림 12 貨物船에 생긴 脆性破斷의 最近例(NK)



Liberty ship hatch corner



NOTE: POINT O IS THE POINT OF INTERSECTION BETWEEN PLANES FORMED BY DECK, LONGITUDINAL GIRDER, AND HATCH END BEAM.

Victory ship hatch corner

그림 11-a, b 船口의 設計改善(Shauk 1957)

이 있어 重要部分인 甲板으로 탄술에 傳播하여 rivet 된 船體部에서 停止한 事實이 있다. 이러한 事實로 미루어 보면 重要部材가 아닌 것에 대해서도 重要部材와의 關係를 考慮하여 設計하지 않으면 안된다.

3.3 使用中 靱性の 劣化

材料의 使用環境에 따라 當初의 靱性이 점차 없어지는 경우가 있다. 普通 船體用鋼板(厚 38mm)에 대하여 切缺引張試驗을 행하여 이의 破壞發生時 眞斷面에 있어 平均應力의 溫度依存性을 調査한 例를 그림 13이 鎖線으로 나타내었다. 같은 材料의 대해서 먼저 切缺이 없는 狀態로서 low cycle 疲勞荷重을 걸어 11%의 塑性 strain을 準後 上記와 같은 切缺引張試驗片을 製作하여 試驗한 結果를 實驗點 및 實驗線으로 表示하였다. 이와같이 疲勞에 의하여 주어진 塑性 strain(單一荷重에 의한 塑性 strain도 같은)은 명확히 靱性을 變化시킨다. 한편 大形試驗片을 室溫에서 疲勞龜裂을 넣고 이를 低溫에서 試驗하면 이의 脆性破斷強度는 疲勞前歷에 의하여 強化된 것과 같은 값을 가질 경우가 있다. 이는 所謂 豫荷重效果가 기억하는데 불과하고 安全性을 評價하는데도 疲勞에 대한 脆化와 豫荷重效果를 分離하기 위해서 使用條件에 따라 定量的으로 論議할 必要가 있다. 充分히 큰 塑性 strain의 出現이 設計段階에서 豫想되지 않는 限 一般적으로 疲勞에 의한 脆化는 고려할 必要가 없다고 생각된다.

3.4 破壞力學의 考察의 必要

靱性力學 및 塑性力學이 電子計算機의 普及과 더불어 具體的인 設計에까지 깊이 影響하게 되었다. 構造工學의 近代化는 設計 施工 檢査 分野를 要求하듯끔 되었고 所謂 安全率에 대한 檢討는 이미 始作되었다. 脆性破斷의 問題도 體系化가 最近에 와서 특히 進歩한

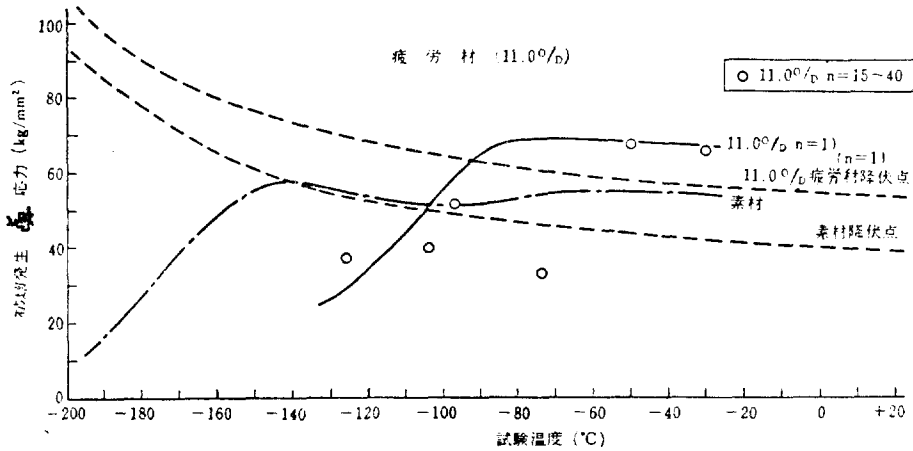


그림 13 Low Cycle 疲勞에 의한 脆化의 例

破壞力學과 關聯하여 점차 設計者에 接近되고 있다. 個 個의 設計에 대하여 破壞力學的인 考察이 보편화되는 時期도 멀지 않다고 생각된다.

4. 結 言

現實에 있어 設計는 發注者側으로부터 要請하는 條件들을 만족하고 同時에 原價가 最少로 되게하는 作業

이 대부분을 詰한다. 發注者는 設計의 具體的인 詳細한 條件을 주지 않고 使用性能面만을 要求하는 경우도 많다. 例컨데 材料의 選定 施工法 檢査 등은 充分히 自由로 하는 反面 完成한 構造物이 脆性破壞를 이르 키지 않는 適切한 設計를 要求하는 경우의 注文이다. 이와 反對인 경우도 있어서 要컨데 設計者는 脆性破壞 에 關한 어느 程度의 知識을 가짐이 切實하다.

圖 書 案 內

1. 圖書名: KOREA-JAPAN SEMINAR ON SHIP HYDRODYNAMICS
 版 型: 4×6 倍版 面 數: 200 面 發 行 日: 1970 年 5 月
 定 價: 1,000 圓(國內) \$ 3.00(國外)
 發 行: 大韓造船學會
2. 圖書名: COLLECTED PAPERS OF HARRY BENFORD ON SHIP ECONOMICS
 版 型: 4×6 倍版, 面 數: 未定, 發 行 日: 1974 年 8 月 豫定
 定 價: 未定
 發 行: 大韓造船學會
3. 圖書名: 造船工學一般
 版 型: 4×6 倍版, 面 數: 未定, 發 行 日: 1974 年 7 月 豫定
 定 價: 未定
 編 者: 大韓造船學會
 販 賣: 東明社

購入方法: 3 을 除外하고, 學會事務室로 連絡하십시오.