

破壞力學의 現況 (I)

宋 智 浩

〈漢陽大 工大 機械工學科·工博〉

1. 머 리 말

現在와 같이 生産, 貯藏, 輸送, 에너지需要等 모든 側面에서 大容量化되고, 여기에 付隨되는 機器 및 構造物이 大形化된 狀態에서의 事故가 어느정도의 深刻性을 지니며, 어떠한 規模로 損失을 招來하는가 하는 것은, 지금까지의 여러 事故例를 收錄하고 있는 外國文獻¹⁾을 參照하지 않더라도, 昨年 國內 新聞紙上에서도 報道된 바 있는 미국의 Three Mile Island의 原子力發電所의 事故(1979.3)와 시카고空港에서 있었던 DC 10젯트旅客機의 추락事故(1979.4)의 內容을 想起하면 거의 推測이 可能하리라 생각이 된다.

279名의 搭乘者全員이 死亡하는 美史上 最惡의 航空慘事를 빚어낸 DC10機 추락사고의 直接的原因은 最初, 엔진을 날개에 連結하는 pylon을 固定하는 보울트(bolt)의 疲勞折損으로 發表된 바 있었으나, 그 後 調査가 進行됨에 따라 航空會社의 無理한 整備方法에 의해 pylon自體에 이미 龜裂(crack)이 가고 있었다는 事實이 밝혀져, 미국國家輸送安全委員會(NTSB)는 이것이 엔진脫落의 原因이라 決定했다. (1979.12) 結局 美連邦航空局(FAA)은, 重大한 整備工程違反이라 하여 當事者인 American航空에 50萬弗, 同工程을 擔當했던 Continental航空에 10萬弗의 罰金을 科했으며, 한편 遺族에 대한 補償은 數億弗에 이를 展望이며, DC10機製作社 또한 pylon의 補強, 計器의 設計變更等에 數億弗程度의 消費가 不可避하게 되었다.

以上과 같이 現代에 있어서의 事故는 當事者에 대한 直接的인 人命的, 經濟的 被害는 물론 이려니와 間接的으로는 그 影響이 全世界에 傳播되어 莫大한 經濟的 損失을 가져오게 마련이며, 또한 事故原因의 分析 및 그 防止對策에 많은 時間과 人的 勞力을 必要로 하게된다. 現代에 있어서의 事故의 深刻性은 이러한 經濟的 側面에서의 損失性 外에 어떤 種類의 事故가 環境汚染等 社會的 問題를 誘起할 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 人類全體에 身體的, 精神的 後遺症을 남기므로서 새로운 世代에까지 惡影響을 미칠 可能性(China syndrome)을 지니고 있다는 點에 있다.

現在와 같이 大形化되고 複雜多岐하게 시스템化된 機器 또는 構造物에서의 事故 또는 異常의 原因은

1. 機器 또는 構造物을 構成하고 있는 要素의 異常

2. 構成된 시스템이 所要의 目的을 達成하고 또한 非常時 充分히 安全을 期할 수 있도록 制御作動하는 系統系의 異常

3. 人爲의 過誤에 의한 異常

으로 크게 나눌 수가 있을 것이다. 여기서 要素라고 하는 것은, 一般的으로 制御系統系를 構成하는 diode, transistor, IC, 抵抗等 電子的, 電氣的 要素를 除外한, 機械的 要素 즉 材料力學, 機械設計學 등에서 對象이 되는 荷重 또는 變形의 負荷를 받는 部材(member) 또는 部品을 말하며, 따라서 이러한 要素의 異常이라 하는 것은 具體的으로는 破損 또는 破壞를 意味하게 된다.

以上 3개의 原因中, 制御系統의 異常과 人爲的 過誤에 의한 事故는 若干 增加하는 傾向이 없지 않아 있으나, 극히 드문게 一般的으로, 現在까지의 機器 또는 構造物의 事故의 大部分은 機械的 要素의 破損 또는 破壞가 原因으로 일어나고 있다.

이와 같은 機器 및 構造物 設計에 있어서의 破壞에 대한 考慮의 必要性和 輕量化라는 특이나 經濟的 側面에서의 要求는 結局 設計의 合理化 要請으로서, 이에 對應하여 「解析에 의한 設計(design by analysis)」라는 새로운 設計概念이 導入되고 있다. 「解析에 의한 設計」라 하는 것은, 일어날 可能性이 있는 모든 破壞形式을 具體的으로 생각하여, 各各의 破壞形式에 對應하는 設計基準를 마련하여 解析에 의해서 機器 및 構造物의 健全性을 詳細하게 評價할 수 있도록 하는 設計概念이라 말할 수가 있다.³⁾

이러한 새로운 設計概念의 導入과 機器 또는 構造物에 대한 信賴性 및 事故에 대한 安全性의 強化라는 增加하는 社會的 要求에 따라 發生한 것이 破壞力學(fracture mechanics)으로서, 現在 原子力, 航空機, 造船等을 비롯한 많은 産業分野에서 그 手法(fracture mechanics technology)이 널리 使用되고 있으며, 機器 또는 構造物의 設計, 材料選擇, 製作, 檢査, 保守等에 대해 法定的인 또는 實質的인 指針이 되는 ASME Boiler and Pressure Vessel Code와 같은 各種基準의 內容속에도, 破壞力學의 結果 및 그 思考方式이 積極的으로 採用되고 있다.

近年 거듭되는 石油價引上에 의해 深刻性이 加重되고 있는 代替에너지資源問題와 其他 諸般 必要性에 의해 原子力發電所 建設 및 航空機 自體生産을 國家的 單位로 推進하고 있는 國內의 現時點에 있어서, 그 設計의 主要方法論의 하나가 되어 있는 破壞力學 知識의 普及과 그 實際活用은 至急히 解決하여야 할 重要課題의 하나라 생각이 된다. 最近의 破壞力學의 發展은 加速度的으로, 數年前만 하더라도 破壞力學하면 線形 破壞力學(linear fracture mechanics)을 일컫는 경우가 많았으나 現在 線形破壞力學은 거의 完成化되어 가는 段階에 있으며, 彈塑性領域의

破壞를 對象으로 하는 非線形破壞力學(non-linear fracture mechanics)도 어느程度 體系化되어 가는 狀態에 있다.

여기서 破壞力學의 特性을 若干이나마 整理해 보고 또한 現在 破壞力學의 狀況을 概觀하여 그 動向을 살펴 볼가 한다. 本論에 들어가기 前에 以後의 理解를 돕기 위해 몇가지 基本的인 事項에 대해 說明해 두기로 하자.

2. 破壞, 破壞形式의 分類, 破損

日常生活에서 흔히 經驗하는 物體가 둘 以上으로 分離하는 破壞(fracture)라는 現象에 관해서 若干 整理해 두자.

破壞라 하는 것은 一般的으로는, 어떠한 (外的)力學的 負荷下에서 物體가 熱的으로는 非可逆的 過程을 통해서, 새로운 表面을 形成하는 現象이라 定義지을 수가 있을 것이다. 다만 破壞는 어느程度 巨視的으로 볼때, 어떠한 하나의 確定된 過程에 의해서 일어나는 物理現象은 아니므로, 人間의 死亡의 경우와 마찬가지로 여러 相違한 過程에 의해서 破壞라는 共通된 現象이 일어난다고 생각하는 것이 妥當한 것이다.⁴⁾ 따라서 實際로 破壞에 대한 材料의 抵抗 또는 強度를 評價하여야 할 경우에는 破壞를 그 過程에 따라 適切히 形式分類하여, 各 形式에 대해 各 各 생각하는 것이 合理的이고 또한 簡便한 것이다.

破壞形式의 分類에 관해서는 Orowan의 分類⁴⁾ 橫掘의 分類⁵⁾ 또는 fractography(破面解析)의 分類⁶⁾等 여러가지가 있으나, 여기서는 가장 通常的인 것을 紹介하여 以後의 便宜를 돕기로 하자.

1. 脆性破壞(brittle fracture)

破壞에 이르기까지 큰 塑性變形을 同伴함이 없이, 크랙이 發生하여 그 크랙이 相當한 速度로 傳播하여 不安定破壞(unstable fracture)를 일으키는 形式. 破壞中에서는 理論的으로 가장 잘 알려진 形式으로서, 유리의 破壞가 그 代表的인 例가 될 것이다. 金屬材料로서는 鋼과 같

□ 解 說

은 體心立方格子(BCC)構造를 갖고 있는 金屬이 低溫에서 이와 같은 形式으로 破壞되는 경우가 있다.

2. 延性破壞(ductile fracture)

脆性破壞와 對比하여, 比較的 均一한 큰 塑性變形을 同伴하여 일어나는 破壞形式을 말하며, 크랙傳播는 比較的 緩慢하고, 材料에 過대한 應力이 負荷된 過荷重破壞(overload fracture)라 할 수가 있다. 延성이 있는 金屬材料를 引張試驗할 때 일어나는 破壞形式이 代表的인 경우가 된다.

3. 疲勞破壞(fatigue fracture)

負荷方向이 變動하는 荷重이 되풀이될 때 일어나는 破壞形式으로서, 특히 負荷되는 應力이 彈性限度 以下일 경우에도 일어나며, 破壞에 이르기까지 巨視的으로 認知할 수 있는 塑性變形을 同伴하지 않는 것이 特徵(high-cycle fatigue의 경우)이기도 하다. 實際의 機器, 構造物의 大部分은 程度의 差異는 있으나 負荷方向이 變動하는 荷重을 받고 있는 것이 一般的이므로 破壞의 大部分은 疲勞와 直接的 또는 間接的으로 關係를 갖고 있는 것이 普通이다.

4. 크리이프破壞(creep fracture)

어떠한 溫度以上の 霧圍氣속에서 材料에 荷重 또는 應力을 負荷할 경우, 變形이 時間과 함께 增加하는 現象을 크리이프(creep)라 하고, 이 크리이프變形이 어느 時點에서 加速度的으로 增加하여 破斷에 이르는 形式을 크리이프破壞라 한다. 크리이프는 變形自體가 工學的으로 問題되는 點에서 그 特異性이 있으며, 大變形後에 破壞가 일어난다는 點에서는 延性破壞의 범주(category)에 包含할 수도 있으나, 破壞機構(fracture mechanism)面에서 相異한 點이 많아 別途로 分類하는 것이 一般的이다. 즉, 延性破壞가 粒內變形을 根本으로한 比較的 均一한 變形을 同伴하는 結晶粒內破壞(transcrystalline fracture)인데 대해, 크리이프破壞는 結晶粒界破壞(inter-crystalline fracture)로서, 粒內變形

역시 變形의 主要機構이기는 하나, 粒界에서의 點欠陷의 擴散等に 의한 塑性流動이 크리이프變形 및 破壞의 主要原因으로, 그 現象은 一般的으로 不均質的이다.

5. 遲延破壞(delayed fracture)

巨視的으로 보아 部材에 靜的 荷重이 作用하고 있을 때, 그 크기가 降伏點보다 훨씬 낮은 應力이라 할지라도 長時間 負荷될 경우에는, 外見上 塑性變形을 同伴함이 없이 突然히 脆性的으로 破壞하는 경우가 있다. 이러한 破壞形式을 말하며, 表面 또는 內部的 gas分子의 作用이 主要原因으로, 近年 問題가 되고 있는 水素脆性破壞(hydrogen embrittlement cracking), 應力腐蝕破壞(stress corrosion cracking, SCC)가 이 形式에 屬한다.

이 以外에도 cavitation erosion, 放射性照射 損傷에 起因하는 破壞形式이 있기는 하나, 이 경우는 原因的 形式分類의 色彩가 짙으며 또한 機械的 破壞와는 若干 그 樣相을 달리한다.

破壞와 비슷한 破損(failure)이란 用語는, 部品 또는 部材가 所要의 機能(function)을 遂行하지 못하게 되는 狀態를 意味하는 것이 一般的이다.

3. 破壞力學의 定義 및 特徵

破壞力學에 대한 가장 一般的인 定義로서는, “크랙形欠陷(flaw)이 存在하는 連續體에 대한 力學의 解析結果를 利用하여, 크랙形欠陷의 存在 또는 發生이 豫想되는 材料를 強度上 安全하게 使用할 수 있도록 하는 하나의 工學的手法(technology)”이라는 것이 많이 使用된다.

破壞力學은 크랙形欠陷의 存在 또는 그 發生을 基本前提로 하여 크랙의 成長 및 材料의 破壞學動을 論하므로, 크랙의 力學(mechanics of cracks)이라 할 수도 있으며, 이러한 點에서 物體의 均質性을 바탕으로 強度를 論하는 從來의 材料力學의 手法과는 根本的으로 다르다.

그러나 무엇보다도 破壞力學의 本質은 材料內에 存在하는 크랙의 先端에서 일어나는 새로운

表面의 形成이란 破壞現象이, 크랙先端의 力學의 狀態 즉 應力 또는 變形率狀態를 特徵지우는 어떠한 力學的 量과 直接으로 關係가 있다는 點에 있을 것이다. 破壞力學이 現在 實質的인 工學的 有用성을 지니고 있는 것은, 이러한 力學的 量이 解析的 또는 實驗的으로 決定할 수 있는 단 하나의 量이라는 簡便함과 함께 材料의 破壞特性이 實際로 이 單一量에 의해 잘 表現된다는 經驗的 事實때문인 것이다.

破壞力學은, 實際應用을 主目的으로 하는 만큼 手法의 色彩가 길어, 連續體力學이 그 基本에 있기는 하나, 그 應用 및 擴張에 있어서는 數學的 解析 및 物理的 解釋을 때때로 超越하거나 또는 看過留保하는 경우가 적지 않은 特異한 一面 또한 지니고 있다는 것도 指摘해 두어 좋을 것이다.

4. 線形破壞力學의 狀況

線形破壞力學은 크랙先端의 力學的 狀態를 代表하는 單一量으로서 다음과 같이 stress intensity factor K 를 採用하는 破壞力學이다.

Williams의 彈性解結果⁷⁾를 利用하면, 線形彈性體內에 存在하는 二次元크랙先端附近의 應力成分 σ_{ij} 는, 크랙先端에 原點을 둔 (r, θ) 極座標을 使用하여 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{-\frac{1}{2}} f_{1ij}(\theta) + C_2 \left(\frac{r}{a}\right)^0 f_{2ij}(\theta) \\ &+ C_3 \left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{2}} f_{3ij}(\theta) + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} C_n (\sqrt{r/a})^{n-2} f_{nij}(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 a 는 龜裂의 길이 또는 이것을 代表하는 適當한 尺寸이며, $f_{nij}(\theta)$ 는 變形形式 및 應力成分 σ_{ij} 에 의해서 決定되는 固有函數, C_n 은 試驗片形狀, 크랙形狀 및 外力에 依存하는 係數이다.

크랙의 代表的 尺寸 a 에 비해, r 이 充分히 작은 크랙先端附近에서는 (1)式의 第2項以下는 第1項에 비해 無視할 수 있을 程度로 작게 되므로 크랙先端附近의 應力分布는 第1項에 의해 近似

的으로 表示할 수가 있을 것이다. 線形破壞力學은 이와 같이 크랙先端의 應力分布를 (1)式에서 $r \rightarrow 0$ 일때 無限대가 되는 特異應力成分

$$\sigma_{ij} = C_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{-\frac{1}{2}} f_{1ij}(\theta) \equiv \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2)$$

으로 表示하고, 크랙先端의 力學的 狀態를 代表하는 單一力學的 量으로서 크랙先端의 應力特異性的의 세기(強度)를 나타내는 量 K (stress intensity factor 또는 stress field parameter around the tip of crack)를 使用한다. (2)式에서 알 수 있는 바와 같이 K 는

$$[\text{應力}] \times [\text{길이}]^{\frac{1}{2}} = [\text{힘}] \times [\text{길이}]^{-\frac{1}{2}}$$

의 次元(dimension)을 갖고 있는 量이며, 또한 座標 r, θ 에는 依存하지 않는 量으로서, 따라서 應力の 크기를 擴大하거나, (應力分布에 影響을 미치기는 하나) 應力分布自體를 決定하는 量은 결코 아니며, 다만 應力場의 세기(強度)(intensity)만을 特徵지우는 量이다. 따라서 以後 Stress intensity factor에 대해서는, 日本에서 하나의 情性의 產物로서 使用되는 適切하지 못한 應力擴大係數라는 用語는 避하여, 應力強度係數라 번역하여 使用하기로 하겠다.

(2)式에 의하면 $r=0$ 즉 크랙先端에서는 應力은 無限대가 되나, 實際材料에 있어서는 應力이 無限대가 되기 以前에 降伏하여 塑性變形域을 形成하는 것이 一般的이다. 應力強度係數 K 는, 이 塑性域尺寸(plastic zone size)가 크랙길이 및 試驗片 各部分의 尺寸에 비해 充分히 작은 小規模降伏(small scale yielding)이 成立하는 경우에 限해서, 形成된 塑性域을 包含한 크랙先端의 應力場을 決定하는 力學的 parameter가 되며, 나아가서 破壞를 支配하는 力學的 因子가 되므로, 線形破壞力學의 有用성은 小規模降伏이 充足되는 경우에만 存在하게 된다.

小規模降伏이 充足되는 경우, 예컨대 非延性 材料의 不安定破壞, 高週波이數疲勞(high-cycle fatigue)에서의 크랙進展, 應力腐蝕破壞 및 腐蝕疲勞(corrosion fatigue)크랙進展 등에 대한 線形破壞力學의 適用은 거의 定着化된 狀態에 있다. 基本的이며 工學的으로도 重要的 多種多樣

□ 解 說

의 試驗片形狀 및 크랙形狀에 대한 應力強度係數 K_{Ic} 값은 거의 얻어져, 이를 收錄한 handbook 類^{8,9)}가 發刊되고 있으며, 不安定破壞의 條件을 決定하는 材料特性值인 平面變形率破壞靱性(plane strain fracture toughness) K_{Ic} (또는 G_{Ic}) 을 구하는 試驗法¹⁰⁾ 및 部分的이나 疲勞크랙 進展速度試驗法¹¹⁾로 規格化되어 있는 段階에 있다. 應力腐蝕破壞 및 腐蝕疲勞에 있어서의 크랙 進展舉動에 대해서도 K_{Ic} 값이 다른 그 基本的 特性이 거의 알려져 있는 狀態다.

그러나 線形破壞力學의 테두리 안에서 解決하여야 할 工學的으로 重要的인 問題는 許多하며, 世界的으로 進行中인 基礎的인 또는 實用的인 興味있는 研究課題 또한 많다. 最近은 특히나 더욱 實用的인 問題에 關心이 集中되어 있는 것이 事實이며, 예를 들면 變動荷重 나아가서 이른바 實稼働荷重(service loading 또는 actual loading) 下의 疲勞크랙進展, 複雜한 形狀을 가진 實際部材에 發生한 表面크랙(surface flaw)에 대한 應力強度係數評價 및 그 크랙의 進展舉動, 多軸(multi-axial) 荷重 下의 破壞靱性 및 크랙進展 舉動의 評價, 高溫高壓 下의 破壞舉動等等이 主要話題가 아닌가 한다.

여기서는 몇가지 問題에 대해서만 그 概況을 살펴보기로 하겠다.

1. 變動荷重 下의 疲勞크랙進展

變動荷重 下에서의 疲勞크랙問題의 重要性은 實際部材에 作用하는 荷重이 本質的으로 不規則荷重이라는 事實에 있는 것은 물론이나, 現在 특히나 興味の 對象으로 注目되는 또 하나의 側面은, 工學的으로 利用價値가 期待되는, 變動荷重 下에서 일어나는 크랙進展遲延(crack growth retardation) 現象의 存在일 것이다.

高 level 荷重에서 低 level 荷重으로 變動한 後 어느 期間동안 크랙進展이 거의 停止하거나 進展速度가 顯著하게 減少하는 이른바 遲延(retardation) 現象은 일찍부터 觀察되어 現在까지 相當한 量의 研究結果가 報告되고 있다.¹²⁻²⁵⁾ 그러나 大部分의 研究는, 試驗方法 및 結果解析이 簡便하다는 利點에서, 變動荷重中에서도 簡單한

形式인 單一 過荷重(single overload), 二段荷重(two-step) 또는 二段되풀이荷重(repeated two-step loading) 下에서 進行되어, 遲延期間의 評價法과 現象에 支配的인 力學的 因子에 關係서 有益한 情報를 提供하고는 있으나, 더욱 不規則한 荷重波形에 대한 그 結果의 擴張方法에 關係서는, 過荷重에 의한 一方向塑性域(monotonic plastic zone) 등을 基準으로 하는 方法이 提案되고는 있으나,^{17,26-28)} 疑問點이 많다.

크랙進展遲延現象 및 荷重在 低 level에서 高 level로 變動할 때에 觀察되는 加速(acceleration) 現象^{12,14,15)}을 包含하여 變動荷重 下의 進展速度評價에 있어서 注目되는 것이, Elber에 의해 提案된 크랙닫힘現象(crack closure phenomenon)을 考慮한 有效應力強度係數幅(effective stress intensity range) 概念²⁹⁾이 있다. 이 概念은, 疲勞크랙은 荷重在 零이 되기 以前인 引張荷重 下에서도 그 先端이 닫히는 경우가 있으므로, 크랙先端이 完全히 열려 應力特異性이 存在하는 期間의 荷重部分만이 크랙進展에 寄與한다고 생각하는 것이 合理的이라 하는 것이다. 有效應力強度係數概念을 使用하면, 變動荷重 下의 加速, 遲延現象에 대해 力學的 解釋 및 評價도 可能할 뿐 아니라,^{14,17,29-31)} 크랙進展速度에 미치는 力學的 因子의 影響에 關係서도 그 定量的 評價가 容易하다는 등^{29,32-35)} 많은 利點이 있어, 現在 이에 關한 研究가 活潑하나, 크랙닫힘現象의 檢出 및 測定이 그다지 容易하지 않아 測定方法에 따라 相違한 結果가 얻어질 可能性이 있다는 點^{33,37)}과 함께 變動荷重 下의 크랙進展에 대한 有效應力強度係數概念 適用의 否定的인 結果等도 報告되고 있어,³³⁻⁴⁰⁾ 더욱 系統的인 研究가 期待된다.

變動荷重 下의 疲勞크랙進展에 있어서 또 하나의 興味있는 問題는, 크랙進展이 거의 停止하거나 또는 進展速度가 急激히 減少하는 應力強度係數幅의 下限值 ΔK_{Ith} (threshold stress intensity range)의 舉動⁴¹⁻⁴⁴⁾이다. 龜裂進展에 있어서의 ΔK_{Ith} 의 存在는 平滑材(smooth specimen or unnotched specimen)에서의 크랙限度の 存在와 同等한 工學的 意義를 지니고 있어 利用價

值가 期待되나, fractography 또는 有効應力強度係數概念을 使用한 研究結果^{42,43,45}에 의하면, 變動荷重下의 ΔK_{Ia} 도 平滑材의 變動荷重下의 疲勞限度의 舉動^{46,47}과 마찬가지로 消失하는 傾向이 있어 注目된다.

따라서 變動荷重下의 crack進展速度評價에 있어서는 一定振幅荷重下에서 얻어진 進展速度曲線을 그대로 利用하는 이른바 Miner式의 推定方法은 避延效果의 存在를 認定하더라도 危險側의 評價가 될 可能性이 있어, 적어도 修正 Miner式의 推定方法이 必要하다.⁴⁵ 다만 變動荷重下의 ΔK_{Ia} 는 材料에 따라 微視組織의 影響을 크게 받아 力學的 解釋이 困難한 경우도 있어,^{43,49} 그 舉動은 一般의으로 複雜하다.

극히 最近의 變動荷重下의 ΔK_{Ia} 의 舉動에 관한 研究結果^{49,50}는 現在 使用되는 ΔK_{Ia} 試驗法에 대해 疑問을 提議하고 있어 興味가 있다. 現在 使用되는 ΔK_{Ia} 試驗法은 段階의이든 連續的이든 간에 모두 漸減法(decreasing method)^{51,52}으로서, 이 漸減法에 의해 얻어지는 應力強度係數幅 ΔK 와 進展速度 da/dN 와의 關係는 履歷影響이 存在하지 않는 眞正한 定常狀態의 關係를 나타내고는 있지 않다는 것이다. 履歷影響의 消失이 빠른 漸増法(increasing method)에 의해서 ΔK_{Ia} 를 決定해야 한다는 結論으로, 熱處理法⁴⁹ 또는 壓縮荷重振幅을 더욱 많이 付加하는 方法⁵⁰ 등이 提案되고 있으나, 熱處理方法은 材料에 따라 適用 不可能한 경우가 있으며, 壓縮荷重振幅 付加方法은 경우에 따라 試驗片形狀 및 試驗方法에 대한 自由도를 制限하는 缺點이 있어, 더욱 簡便하고 合理的인 새로운 ΔK_{Ia} 試驗法 確立을 위한 研究가 要望된다.

實際部材에 作用하는 이른바 實際變動荷重(service loading)下에서의 龜裂進展에 관한 研究는 大體的으로 다음의 두가지 類型으로 나눌 수가 있을 것이다. 하나는 定常랜덤(stationary random) 또는 擬似랜덤(pseudorandom)波형을 使用하는 方法이며, 또 하나는 實際荷重波형을 適當히 多段프로그램(multi-step program)波형等으로 시뮬레이션(simulation)하여 使用하는 方法이다.

랜덤波형을 使用하는 경우에는, 波形中的 어떤 因子를 crack進展에 대한 主要因子로 選定하며,^{53~55} 이와 함께 어떠한 計數法(counting method)을 採用하느냐 하는 問題가 있다. 現在까지는 應力強度係數幅의 自乘平均値(root mean square) ΔK_{rms} 에 의해 crack進展速度評價가 可能하다는 報告^{56~58}가 優勢하나, 物理的 意味가 明確하지 않으며, 進展速度를 全體의으로 評價하는 點에서는 變動荷重下에서 일어나는 加速 및 遲延效果에 대해 相殺效果의 考慮하는 것이 없다는 缺點이 있다. 最近은 應力強度係數의 히스테리시스(hysteresis)를 考慮하는 range-pair-mean에 의한 評價^{59,60} 또는 range-pair-mean 二元分布로 부터 crack닫힘現象을 考慮한 有効應力強度係數의 range-pair $\Delta K_{r,p}$ 에 의한 評價⁶¹가 提案되고 있으나, 履歷效果에 대한 考慮等 未備한 點이 많다.

한편, 시뮬레이션에 의한 研究에 있어서는 荷重波형이 比較的 簡單하여, 이에 따라 試驗 및 測定도 어느程度 容易하며 加速, 遲延效果도 加味할 수 있다는 點等에서 航空機의 飛行(flight) 시뮬레이션試驗이 많으나^{62~66}, 實際의 進展速度 評價는 1飛行間의 K_{max} 또는 K_{min} 를 代表值로 使用하는 경우가 많으며,⁶² 더욱 實用的인 見地에서 應力強度係數와 crack進展速度와의 關係보다는 crack길이와 crack進展速度와의 關係를^{62,63,65} 또는 飛行數에 따르는 crack길이의 變化를⁶⁶ 決定하고 있는 것이 實情이 아닌가 한다.

實際變動荷重下에서의 crack進展試驗은 入力荷重波형의 發生, 出力荷重波형의 計數, crack길이 및 其他 現象의 測定 등이 複雜하여, 적어도 D-A, A-D Interface를 具備한 Mini-computer 程度의 시스템(system)은 必要로 하므로 小研究室規模로서는, 특히나 經濟的 側面에서, 若干 施行하기 어려운 面이 있다.

實際變動荷重下에서 系統的인 試驗을 實施하여 直接 情報를 收集, 結果를 集約하는 것도 有益하고 必要한 일이나, 可及의 簡單한 變動荷重下에서의 研究로부터 crack進展에 관한 基本特性을 整理하여, 이를 擴張, 檢證하는 意味에서 實際變動荷重下의 試驗을 施行하는 것이 研究方法의

□ 解 說

로서는 經濟的이고 또한 合理的일 것이다. 이러한 觀點에서 볼때, 現在의 變動荷重下의 크랙進展研究는 基本特性에 관한 情報의 收集, 整理의 段階로 부터 應用的 段階로 移行하고 있는 中이라 할 수도 있으나, 지금까지의 叙述內容으로 부터 알 수 있는 바와 같이, 解決하여야 할 重要한 基本的 問題 역시 대단히 많이 남아 있는 것이 事實이다.

다음호에서는 表面크랙等 몇가지 問題에 관한 研究狀況을 다루고, 이어서 近年 急速히 體系化되어 가고있는 非線形破壞力學에 대해서 言及해 본다 한다.

參 考 文 獻

- 1) S.T. Rolfe and J.M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics, pp. 1~4, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1977.
- 2) 小倉, 壓力容器・タンク類의 事故例とその對策, 日本機械學會誌, Vol. 83, pp. 720~722, 1980.
- 3) 安藤, 岡林, 原子力プラント의 構造設計, p. 6, 原子力工學シリーズ 3, 東京大學出版會, 1977.
- 4) E. Orwan, Reports on Progress in Physics, Vol. 12, p.185, 1949의 內容은 橫堀, 材料強度學 pp. 75~76, 技報堂, 1955를 参照.
- 5) 日本金屬學會強度委員會編, 金屬材料의 強度と破壞 pp. 163~166. 丸善, 1968.
- 6) 北川, 小寺澤, フラクトグラフィ, pp. 3~22, 破壞力學と材料強度講座 15, 培風館, 1977.
- 7) M.L. William, On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack, J. of Appl. Mech., Trans. of ASME, E, Vol.24, pp.109~114, 1957.
- 8) H. Tada, P.C. Paris and G.R. Irwin, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corp., Hellertown, Pennsylvania, 1973.
- 9) G.C.Sih, Handbook of Stress Intensity Factors, Inst. of Fract. and Solid Mech., Lehigh University, Pennsylvania, 1973.
- 10) ASTM Designation: E399-74, Standard Test Method for Planetrain Fracture Toughness of Metallic Materials.
- 11) ASTM Designation: E647-78T, Tentative Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/Cycle.
- 12) E.F.J. von Euw, R.W. Hertzberg and R. Roberts, Delay Effects in Fatigue Crack Propagation, ASTM STP513, pp. 230~259, 1972.
- 13) R.C. Rice and R.I. Stephens, Overload Effects on Subcritical Crack Growth in Austenitic Manganese Steel, ASTM STP 536, pp. 95~114, 1973.
- 14) V.W. Trebules, Jr., R. Roberts and R.W. Hertzberg, Effect of Multiple Overloads on Fatigue Crack Propagation in 2024-T3 Aluminum Alloy, ASTM STP 536, pp. 115~146. 1973.
- 15) F.H. Gardner and R.I. Stephens, Subcritical Crack Growth Under Single and Multiple periodic Overloads in Cold-Rolled Steel, ASTM STP 559, pp. 225~244, 1974.
- 16) R.I. Stephens, Fatigue Crack Growth Specimen Configuration with Compressive Loads Present, Int. J. of Fracture, Vol. 12, pp. 323~326, 1976.
- 17) S. Matsuoka, K. Tanaka and M. Kawahara, The Retardation Phenomenon of Fatigue Crack Growth in HT80 Steel, Engng. Fract. Mech., Vol. 8, pp. 507~523, 1976.
- 18) M.K. Himmelein and B.M. Hillberry, Effect of Stress Ratio and Overload Ratio on Fatigue Crack Delay and Arrest Behavior Due to Single Peak Overloads, ASTM STP 590, pp. 321~330, 1976.
- 19) D.J. Bernard, T.C. Lindley and C.E. Richards, Mechanisms of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 595, pp. 78~97, 1976.
- 20) K.N. Morman, Jr. and R.G. Dubensky, Predicting Fatigue Crack Retardation Under Single and Intermittent Overloading, ASTM STP 601, pp. 245~261, 1976.
- 21) R. Roberts and K. Wnek, Delay Effects in a Pressure Vessel Material —5083-0 Aluminum,

- J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J. Vol. 99, pp. 427~431, 1977.
- 22) G.R. Chanani, Effect of Thickness on Retardation Behavior of 7075 and 2024 Aluminum Alloys, ASTM STP 631, pp. 365~387, 1977.
 - 23) R.I. Stephens, E.C. Sheets and G.O. Njus, Fatigue Crack Growth and Life Predictions in Man-Ten Steel Subjected to Single and Intermittent Tensile Overloads, ASTM STP 637, pp. 176~191, 1977.
 - 24) C. Bathias and M. Vancon, Mechanisms of Overload Effect on Fatigue Crack Propagation in Aluminium Alloys, Engng. Fract. Mech., Vol. 10, pp. 409~424, 1978.
 - 25) S.G. Druce, C.J. Beevers and E.F. Walker, Fatigue Crack Growth Retardation Following Load Reductions in a Plain C-Mn Steel, Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 385~395, 1979.
 - 26) G.J. Petrak and J.P. Gallaghe, Predictions of the Effect of Yield Strength on Fatigue Crack Growth Retardation in HP-9Ni-4Co-30C steel, J. of Engng. Mat., and Tech., Trans. of ASME, H. Vol. 97, pp. 296~213, 1975.
 - 27) T.D. Gray and J.P. Gallagher, Predicting Fatigue Crack Retardation Following a Single Overload Using a Modified Wheeler Model, ASTM STP 599, pp.331~344, 1976.
 - 28) G. H. Jacoby, H. Nowack and H.T.M. van Lipzig, Experimental Results and a Hypothesis for Fatigue Propagation Under Variable-Amplitude Loading, ASTM STP 595, pp. 172~183, 1976.
 - 29) W.Elber, The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STF 486. pp. 239~242, 1971.
 - 30) W.N. Sharpe, Jr. and A.F. Grandt, Jr., A Preliminary Study of Fatigue Crack Retardation Using Laser Interferometry to measure Crack Surface Displacements, ASTM STP 590, pp. 302~320, 1976.
 - 31) K. Ogura and K. Ohji, FEM Analysis of Crack Closure and Delay Effect in Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, Engng. Fract. Mech., vol. 9, pp. 471~480, 1977.
 - 32) M.Katcher and M. Kaplan, Effects of R-Factor and Crack Closure on Fatigue Crack Growth for Aluminum and Titanium Alloys, ASTM STP 559, p p. 264~282, 1974.
 - 33) 菊川, 城野, 田中, 高谷, 除荷彈性コンプライアンス法による低進展速度領域における疲労き裂進展速度とき裂開閉口挙動の測定, 材料, Vol. 25, pp. 899~903, 1976.
 - 34) A. Ohta, M. Kosuge and E. Sasaki, Fatigue Crack Closure over the Range of Stress Ratios from -1 to 0.8 down to Stress Intensity Threshold Level in HT80 Steel and SUS 304 Stainless Steel, Int. J. of Fracture, Vol. 14, pp. 251~264, 1978.
 - 35) H.U. Staal and J.D. Elen, Crack Closure and Influence of Cycle Ratio R on Fatigue Crack Growth in Type 304 Stainless Steel at Room Temperature, Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 275~283, 1979.
 - 36) 宋智浩, 金一鉉, 辛龍承, 2017-T3알루미늄合金의 疲労龜裂進展과 龜裂닫힘現象, 大韓機械學會論文集, 第4卷. pp. 47~53, 1980.
 - 37) V. Bachmann and D. Munz, Fatigue Crack Closure Evaluation with the Potential Method, Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 61~71, 1979.
 - 38) T.T. Shih and R.P. Wei, A Study of Crack Closure in Fatigue, Engng. Fract. Mech., Vol. 6. pp. 19~32, 1974.
 - 39) K.D. Unangst, T.T. Shih and R.P. Wei, Crack Closure in 2219-T851 Aluminum Alloy, Engng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 725~734, 1977.
 - 40) R.D. Brown and J.Weertman, Effects of Tensile Overloads on Crack Closure and Crack Propagation Rates in 7050 Aluminum, Engng. Fract. Mech., Vol. 10, pp. 867~878, 1978.
 - 41) S.W. Hopkins, C.A. Rau, G.R. Leverant and A. Yuen, Effect of Various Programmed Overloads on the Threshold for High-Frequency Fatigue Crack Growth, ASTM STP 595, pp. 125~141, 1976.
 - 42) 小寺澤, 志茂, 近藤, 過大過小應力下の疲労き裂傳

□ 解 説

- ばとフRACTグラフィ, 材料, Vol. 27, pp. 54~58, 1978.
- 43) 小寺澤, 渡邊, 高良, 過大過小應力下の疲労き裂薄ばと開閉挙動および轉位組織, 材料, Vol. 28, pp. 868~872, 1979.
- 44) 菊川, 城野, 近藤, 低K領域における2段ならびに3段多重變動荷重下の疲労き裂進展と開閉口挙動, 材料, Vol. 28, pp. 946~952, 1979.
- 45) 同, 低K領域における變動荷重下の疲労き裂進展挙動と進展速度の評価法, 日本機械學會講演論文集, No. 800-1, pp. 185~192, 1980.
- 46) 菊川, 城野, 宋, 繰返し塑性ひずみと累積疲労損傷, 材料, Vol. 21, pp. 753~758, 1972.
- 47) 同, 實働荷重下の繰返し塑性ひずみと累積損傷, 材料, Vol. 23, pp. 743~750, 1974.
- 48) 菊川, 城野, 近藤, 平面ひずみ条件下の疲労き裂進展とき裂開閉口挙動, 材料, Vol. 29, pp. 155~161, 1980.
- 49) 同, 焼鈍したき裂からの疲労き裂の進展, 停留と開閉口挙動, 日本機械學會關西支部第55期定時總會講演論文集, pp. 34~36, 1980.
- 50) 同, き裂開閉口挙動の測定による疲労き裂進展下限界条件試験法に對する検討, 日本材料學會第2期通常總會學術講演會前刷, pp. 164~166, 1980.
- 51) R.J. Cooke and C.J. Beevers, The Effect of Load Ratio on the Threshold Stresses for Fatigue Crack Growth in Medium Carbon Steels Engng. Fract. Mech., Vol. 5, pp. 1061~1071, 1973.
- 52) A. Ohta and E. Sasaki, A Method for Determining the Stress Intensity Threshold Level for Fatigue Crack Propagation, Engng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 655~662, 1977.
- 53) S.H. Smith, Random-Loading Fatigue Crack Growth Behavior of Some Aluminum and Titanium Alloy, ASTM STP 404, pp. 74~100, 1966.
- 54) S.R. Swanson, F. Cicci and W. Hoppe, Crack Propagation in Clad 7079-T6 Aluminum Alloy Sheet Under Constant and Random Amplitude Load, ASTM STP 415, pp. 312~362, 1967.
- 55) J.C. McMillan and R.M.N. Pelloux, Fatigue Crack Propagation under Program and Random Loads, ASTM STP 415, pp.505~535, 1969.
- 56) J.M. Barsom, Fatigue- Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in ASTMA514-B Steel, ASTM STP 536, pp. 147~167, 1973.
- 57) J.M. Barsom, Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in Various Bridge Steels, ASTM STP, pp. 217~235, 1976.
- 58) W.D. Dover and R.D. Hibberd, The Influence of Mean Stress and Amplitude Distribution on Random Load Fatigue Crack Growth, Engng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 251~264, 1977.
- 59) 薄, 岡村, 定常ランダム荷重下の疲労き裂進展(第1報), 日本機械學會論文集, Vol. 44, pp. 3322~3323, 1978.
- 60) 同, (第2報), 日本機械學會論文集, Vol. 45, A, pp. 92~101, 1979.
- 61) 菊川, 城野, 近藤, 三上, ランダム荷重の疲労き裂開閉口挙動と進展速度の評価法, 1980(發表豫定).
- 62) J. Schijve, F.A. Jacobs and P.J. Tromp, Crack Propagation in Aluminum Alloy Sheet Materials Under Flight Simulation Loading, NLR-TR68117U, National Aerospace Laboratory NLR, Netherlands, 1968.
- 63) 同, Fatigue Crack Growth in Aluminium Alloy Sheet Material under Flight-Simulation Loading. Effects of Design Stress Level and Loading Frequency, NLR-TR72018 U, NLR, Netherlands, 1972.
- 64) L.A. Imig, Crack Growth in Ti-8Al-1Mo-1V with Real Time and Accelerated Flight-by-Flight Loading, ASTM STP 595, pp. 251~264, 1976.
- 65) R.J.H. Wanhill, Flight Simulation Fatigue Crack Propagation Evaluation of Candidate Lower Wing Skin Materials with Particular Consideration of Spectrum Truncation, NLR-TR 77092U, National Aerospace Laboratory NLR, Netherlands, 1977.
- 66) D. Broek and S.H. Smith, The Prediction of Fatigue Crack Growth under Flight-by-Flight Loading, Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 123~141, 1979.