

〈講 座〉

構造用 材料의 破壞의 舉動과 強度(Ⅱ)

(疲勞의 機構 및 理論에 대한 概要)

宋 森 弘*

1. 머리말

本講座(Ⅱ)에서는 從來에 提案된 疲勞機構와 理論의 概要를 紹介함으로써, 構造用 材料의 強度 및 破壞의 複雜性을 살펴보기로 하겠다.

機械的인 各種의 原則 및 理論은, 疲勞를 동반한 機械的, 金屬的 또는 物理的인 現象중에 어느 하나의 現象에 대해서만 適應되고 또 理論이 적용되는 領域도, 材料에 加해지는 應力의 高低를 考慮하던 疲勞限度 近方에, 또는 被害가 發生하는 領域 그리고 塑性疲勞를 發生시키는 領域에만 制限된다. 따라서 이와같은 事項들을 全部 考慮한 統一된 疲勞機構 및 理論은 아직 찾아볼 수 없으나, 疲勞를 理解하는데 초보자에게는 도움이 될 것이라고 認識되기에, 우선 從來에 發表된 疲勞에 대한 各種 理論 및 機構들중에 重要하다고 생각되는 몇 가지만을 간추리고 그 概要를¹⁾ 다음과 같이 간단히 소개하기로 했다.

2. 疲勞에 대한 從來의 理論과 問題點

實際의 實驗結果에 대해서는, 彈性論으로 說明하는것은 매우 어렵고, 경우에 따라서는 理論과도 一致하지 않을때가 있다. 이것은 金屬이란것이 理論에서 말하는 假定과 같은 意味의 連續體도 아니고 均質體도 아니기 때문이다. 한 예로서 純鐵과 같은 것이라도 이것을 構成하고 있는 結晶들은 形狀, 方位, 놓여진 狀態등이 一定하지 않으며 또 鋼에 있어서는 적어도 Cementite와 Ferrite의 2相을 생각하지 않으면 안되기 때문이다.

彈性論에 의해서 매우 正確한 靜的인 應力 및 그 때문에 생기는 效果, 延伸, 휨등을 計算할수 있다는 것은 事實이나 一般의으로 變動的인 性質을 가진 動的인 應

力을 材料에 加했을 경우의 結果를 正確히 안다는 것은 不可能하다고 생각된다. 예를들면, 應力이 除去되는 순간 이것에 對應하는 延伸스트레인이 除去된다고는 規定 지을수 없고, 따라서 이러한 히스테리시스 現象의 存在는 靜的인 應力下에서는 精確하다고 生覺되는 Hook's의 法則이 動的 또는 反復應力의 條件下에서는 適用이 힘들다는 것을 말해주고 있다.

또 材料의 強度를 생각할 경우 彈性論에서는 應力이 均一하게 分布되어 있다고 假定하고 있으나, 實際로는 斷面積의 變化, 組織, 노치形狀등 試驗할 材料自體의 形狀에 起因한 應力集中部가 반드시 存在하고 있다. 이러한 應力集中部分은 매우 높은 應力에 達하고 그 값은 實際에 의해서만 얻어진다.

그리고 또한 彈性論에서는 基本的으로 外力이 加해지지 않았을 경우에는 試驗片중의 應力은 零이라고 하고 있으나 實際의 材料중에는 無視할수 없을 정도의 內部應力이 存在하고 있고 이것도 역시 實驗에 의해서만 얻어진다.

이상 몇가지 事項만을 綜合해 보더라도 理論에 맞지 않는 實際의 여러가지 問題點이 많이 있음을 엿볼수 있다.

3. 疲勞에 대한 機械的인 理論

3-1. 內部應力에 대한 理論

Griffith²⁾는 內部應力理論이라고 불리는 소위 金屬의 破壞에 대한 하나의 理論을 提案했다. 즉 이것은 固體가 가지는 實際의 強度와 固體의 分子結合力을 생각했을 경우에 생길수 있는 強度와의 사이에는 大端히 큰 差異가 있다는 點에 注目한 것으로서, 實際의 固體중에는 表面 또는 內部에 存在하는 결함이나 微視的 크랙에 의해서 應力集中이 發生할 것이라는 假定을 設定한 것이다. 이러한 提案에 대한 實證의 하나로는, 加工에 의

* 正會員, 慶熙大學校 工科學科 機械工學科

해서 생기는 表面의 不規則性이라는 것도 같은 形式의 應力集中을 發生시킨다는 것이 Thomas⁶⁾에 의해서 發表되었다.

또한, 金屬에는 機械的인 處理(例로서 加工硬化), 熱處理 등에 의해서 殘留應力이 存在한다. 이와같은 內部應力은 때로는 破斷應力 以上이 될 수도 있다. 따라서 物理的, 化學的, 또는 組織的인 不均質性 및 殘留應力이 存在하는 結果로서, 金屬은 無視할수 없을 정도의 큰 應力集中點을 發生시키고 이것들에 의해서 2次的인 應力場에 놓여지게 된다.

또는 金屬은 外力에 의해서 생기는 振動을 받게되면 그 自體의 간섭 現象에 의해서 局部的으로 대단히 큰 應力을 發生시킨다. 이와같이 여러가지의 因子들이 金屬에 주는 影響때문에 金屬內部에는 結合應力 以上の 局部的인 應力이 發生할수 있게되고 이것에 의해서 微視的인 크랙이 發生한다. 따라서 이것은 疲勞破壞의 씨앗이 된다. 이러한 微視크랙은 한번 發生하면, 金屬內部에 생기는 諸應力이 크기 및 種類에 따라 보다 신속하게 傳播되어 간다.

3-2. 原子의 Slip 에 대한 理論

疲勞에 있어서의 變形은 靜的인 變形의 경우와 마찬가지로 同一한 slip 系가 작용하지만 그 slip 또는 變形에 同伴한 表面輪廓의 變化는 靜的인 變形의 경우와는 다른 樣相을 나타낸다. slip 과 slip에 동반하는 과정은 疲勞破壞의 發生 및 成長에 큰 比重을 차지한다고 생각되므로, 變形에 의해서 만들어지는 表面形態의 관찰은 變形條件을 바꾸어 가면서 系統的으로 觀察할 必要가 있다. 그러나 그러한 研究는 대단히 적다.

疲勞變形에 있어서 slip 線의 變化를 처음으로 記述한 것은 Ewing 및 Humfrey⁷⁾이다. 그들은 slip 線은 slip bands 를 발생시키고 그幅은 變形의 進行과 더불어 擴大되어, 결국은 넓은 幅을 가지는 slip bands 중에 크랙이 發生하고 있음을 觀察하고, slip 面上的 磨滅過程에 의해서 破壞가 점점 심해진다고 생각했다.

그후 Gough⁸⁾를 비롯한 많은 研究者들에 의해서 多結晶 및 單結晶의 金屬에 대해서 詳細한 觀察을 行한 結果 結晶表面이 나타나는 slip 線 및 雙晶帶는 靜的인 變形의 경우와 마찬가지로 어떤 臨界值 以上の 應力을 받은 slip 系 혹은 雙晶系의 活動에 의한것이고, 크랙은 面心立方 金屬에서는 變形이 顯著한 領域의 slip bands 로 부터 發生하나, 體心立方 金屬에서는 最大剪斷應力의 slip 面에서, 또는 稠密六方 및 三方結晶에서는 原子密度의 稠密한 底面 및 雙晶境界面에 따라서 일어난다.

最近의 많은 觀察結果⁹⁾에 의하면, 疲勞에 의한 slip bands 는 靜的인 變形의 그것과 달라서 起伏이 심하고 波狀的이며, 또한 電子顯微鏡觀察에 따르는 slip bands 는 一般的으로 彎曲되어 있고 따라서 電子顯微鏡에 의해서 分析할 수 없을 程度의 가느다란 것도 形成되어 있다고 한다.

3-3. 加工硬化에 대한 理論

純金屬에 의한 實驗을 基礎로 Gough, Hanson¹⁰⁾은 加工硬化理論을 提唱했다. 延性인 金屬은 反復的인 荷重이 加해지면 塑性變形이 일어난을 볼수 있으나 이 塑性變形은 漸次的으로 增加하는 加工硬化 때문에 規則적으로 減少하고 있음을 確認했다. 加해지는 荷重에 의한 應力이 疲勞限度以下일때는 變形은 途徑에서 정지하고 破壞는 發生하지 않는다. 이와 반대로 疲勞限度以上の 應力에서의 加工硬化는 이 材料의 最大硬化能力에 對응한 일정한 값에 달하고 드디어 크랙이 形成된다고 한다.

또는 Gough¹¹⁾는, 塑性變形은 slip 에 의해서 發生하고 크랙은 slip 密度가 높은 領域을 通過해서 전파한다. 硬度的 測定으로 부터 最大의 加工硬化能力에 달하는 結晶領域은 全體중에 限定된 部分이고 크랙의 形成은 이들 特定한 局部的인 場所에서의 slip 과 過度한 加工硬化 때문에 생기는 것이라고 제안하고 있다.

Orowan¹²⁾은, 金屬은 彈性的인 matrix 중에 彈性塑性의 學動을 나타낼 수 있는 不均一한 部分의 組織을 포함한다고 하는 假定을 세웠다. 이 理論에 의해서 그림 1에 表示한것처럼 應力-스트레인 線圖을 그리는 條件을 주었을 경우, 1 cycle 마다 發生하는 塑性變形에 따른 加工硬化의 發達は 定量的으로 說明할수 있다. 지금 加해진 應力이 破壞應力에 달하지 않는 狀態에서 最大로 可能한 加工硬化도에 달할 수 있다면 材料는 反復되는

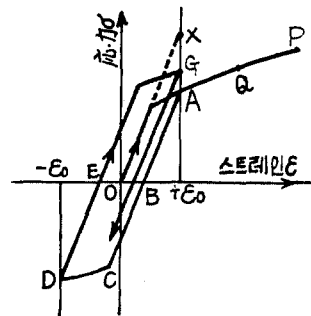


그림 1. 1 cycle 마다 생기는 塑性變形에 의한 加工硬化의 發達을 應力-스트레인 線圖으로 부터 模型的으로 표시한 그림

應力狀態에서 견딜수가 있으나,破壞應力以上の應力이加해지면 거기에는 크랙이 形成된다고 볼수 있다.

3-4, Crack의 傳播에 대한 理論

크랙의 傳播에 대한 最近의 定量的인 研究는 Griffith²⁾에 의하여 提案되었다고 보는것이 좋겠다. 이 理論은 크랙의 擴大에 必要한 에너지는, 크랙의 表面積에 比例한다고 하는 假定에서 얻어졌다. 한편 크랙의 擴大는 크랙 주변의 材料의 變形에 要하는 에너지를 減少시킨다. 따라서 變形에 要하는 에너지의 減少가 表面에너지의 增加보다도 크게 된다면 크랙은 傳播하게 된다. 이 兩者의 平衡條件으로부터 應력과 크랙의 表面積 사이의 關係를 計算에 의해서 求할수가 있다.

그러나 이 理論은 材料에 塑性變形이 일어날 경우에는 成立되지 않는다. 即 塑性變形이 크랙先端에 發生할 경우에는 에너지를 吸收하고 따라서 補充의인 에너지를 導入하지 않으면 안되기 때문이다. 따라서 이 理論은 延性材料에는 適用할 수 없다.

이러한 Griffith 理論에 비해서 Head^{10, 11)}의 理論은 高應力狀態의 크랙先端에 생기는 塑性變形을 考慮하고 있음을 엿볼수 있다. 完全彈性的인 格子와 完全塑性인 格子로부터 提唱된 Head의 모델은 數學的인 解析에 의해서 다음과 같이 크랙의 傳播速度를 求하고 있다.

$$\frac{dl}{dN} = \frac{l^{3/2}}{d^{1/2}} f(\sigma_a)$$

여기서 l 는 N cycle 後의 크랙길이의 1/2의 길이, d 는 크랙의 先端에 있는 塑性領域의 두께(길이), σ_a 는 試料의 全斷面積을 고려해서 計算한 結果로부터 얻어진 反復應力, N 는 應力の 反復數이다.

이 式은 크랙發達過程이 3段階로 나누어지는것을 나타내고 있다. 즉 제 1단계에서는, 加해진 應力에 대응할수 있는 硬化狀態로 될때까지 試料全體에는 變形이 생긴다. 제 2단계에서는, 局部的인 領域에 있어서 서서히 變形이 增加하고 이 領域중에 크랙의 發生이 觀察된다. 이 크랙의 發達段階가 제 3단계에 해당한다. 이와 같은 크랙의 發達は 局部的으로 彈性限度以上の 應力에 달했을 경우에만 發生한다.

그런데 Frost, Dugdale¹²⁾에 의하면, 두께 d 는 크랙의 길이 l 에 比例하고 따라서 다음과 같은 實驗式을 誘導하고 있다.

$$\frac{dl}{dN} = K\sigma_a^3 \cdot l$$

여기에서 K 는 平均應力에 依存한 材料의 定數이다¹³⁾. 이 關係式은 크랙幅이 試料幅의 1/10이하의 경우까지만

適用된다고 한다.

한편, Yokobori, Tanaka¹⁴⁾는, 塑性變形領域의 길이測定에 대한 研究를, 延綱의 疲勞크랙先端部에서 行하고 塑性領域의 길이는 크랙길이 l 에 比例한다고 提案하고 있다. 이 이외에도 많은 研究者들이 크랙傳播速度에 대한 提案들이 있다.

그후, 最近에 들어와서 크랙의 傳播速度와 Irwin¹⁵⁾이 定義한 應力擴大係數와의 關連性을 檢討하기 시작했다. Lange¹⁶⁾는 노치가 大端히 에리한 狀態에 있을 경우에는 Neuber¹⁷⁾가 提案한 從來의 計算方式은 適用할수 없다고 하고, 따라서 크랙의 先端部分의 應力値가 求해질수 있는 새로운 解析方法을 제안했다. 즉

$$\sigma_{ij} = Kf_{ij}(\rho \cdot \theta)$$

여기에서 ρ 와 θ 는 크랙의 先端部를 原點으로한 1점의 極座標値를 표시하고 K 는 應力擴大係數를 表示한다. 이 K 의 값은 試料에 가해지는 荷重에 依存해 있고 疲勞의 1 cycle 중에 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 만큼 變化한다.

따라서 많은 研究者들에 의해서 다음과 같은 關係式이 提案되었다.

$$\frac{dl}{dN} = \frac{(\Delta K)^m}{M}$$

여기에서 M 는 材料에 依存하는 定數(片振 또는 兩振의 荷重이 걸렸을 때는 $\Delta K = K_{max}$ 이다)이고, m 의 값에 대해서는 아직 統一된 見解는 없으며, 그값은 4 전후이다.

以上の 理論은 여하한 경우라 하더라도, 疲勞에 의한 크랙의 形成機構, 또는 크랙의 傳播를 支配할수 있는 因子에 대한 究明은 할수없다.

4. 疲勞에 대한 物性的인 理論

現在까지 많은 金屬材料의 組織觀察에서 보여지는 Intrusion¹⁸⁾과 Extrusion¹⁹⁾이라는 現象은, 一般的으로 크랙形成에 原因이 된다고 말할수 있다. 이와같은 現象을 동시에 說明할수 있는 機構에 대한 하나의 方法으로서는 轉位論의 考察方法이 提案되어 있다.

Cottrell, Hull²⁰⁾은, 應力이 걸리는 方向이 결정되었을 경우, slip은 方位가 다른 2개의 slip面을 따라 發生한다고 했다. 각 slip面은 각각 轉位源을 포함하고 이들은 最初應力の 1 cycle에 있어서는 부호가 일정한 한개 또는 여러개의 轉位를 發生시키고, 그다음 2回째의 應力 cycle에서는 부호가 반대인 轉位를 發生시킨다(그림 2). 따라서 이와같은 思考方式에 따르면 實際로 同一 slip bands 중에 관찰되는것 처럼 보이는 Intrusion

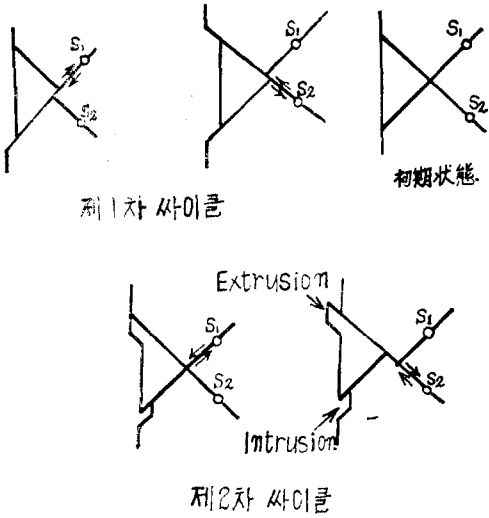


그림 2. Cottrell, Hull의 機構. 應力의 1 cycle마다 轉位源 S_1, S_2 로부터 발생한 轉位의 부호는 逆轉하고, 이것에 의해서 Extrusion 과 Intrusion 이 형성된다.

과 Extrusion도 理論的으로는 서로 인접된 2개의 slip bands 中에 Intrusion 과 Extrusion 이 한개씩 組合된 狀態로서 發生한다고 說明할수 있다.

이 이외에도 Mott²⁰⁾, Thompson²¹⁾, Kenned²²⁾, Wood²³⁾ 등이 의해서도 많은 모델이 제안되어 있다.

5. 疲勞에 대한 統計的인 理論

實際條件을 可能한한 同一하게 할려는 努力, 또는 試驗片은 可能한한 同一한 狀態의 것으로 할려는 實驗者들의 努力이 있었음에도 불구하고 疲勞試驗結果가 一定하지 않는것 즉, 散發的이라는 것은 經驗的으로 얻어진 結果이다.

$S-N$ 曲線상에서 應力值 S 가 一定했을 때의 壽命은 한

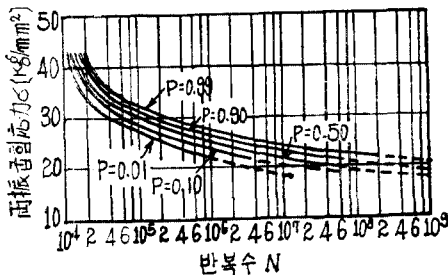


그림 3. 여러가지의 破壞確率 P 에 대한 SN 곡선(알루미늄 合金)

점으로 表示할수 없고 任意의 反復數範圍에 分布되어 있다.

따라서 이 曲線은 한개의 그룹의 等確率曲線에 의해서 表示될수 있다(그림 3).

座標軸上의 點 N_p, S_p 는 反復應力 S_p 를 받는 試驗片이 N_p cycle에 到達했을 때 破壞되는 確率が P 라고 하는것을 表示하고 있다. 따라서 平均的인 $S-N$ 曲線은 그 條件下에서 使用한 試驗片의 50%가 破壞되는 것을 意味한다(그림 4).

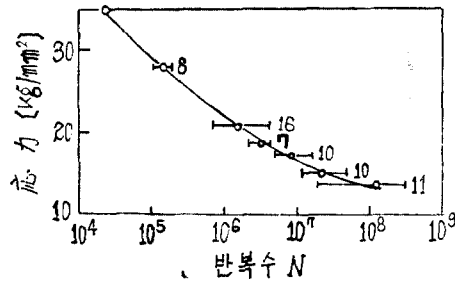


그림 4. 回轉굽힘에 의한 疲勞強度: 숫자는 各應力레벨에서 의 試驗回數임. (드랄류민 合金)

橫軸上의 N_p 點에서 $S-N$ 曲線그룹에 수직으로 그은 直線과 이것들의 曲線과의 교차範圍를 보통 $N=N_p$ 에 있어서 S 의 分布라고 말한다. 따라서 이 수직선과 $S-N$ 曲線그룹과의 交點은 壽命이 N_p 에 定해진 疲勞試驗에 있어서 發生하는 應力의 함수로서의 破壞效率을 規定하는 것이라고 하겠다. 變數 S 의 變化에 대한 破壞의 確率 P 를 表示하는 曲線을 一般的으로 應答曲線이라고 불리워지고 있다.

$S-N$ 曲線그룹과 수평축과의 交點에 포함되는 범위도, 破壞의 確率 P 와 應力反復數 N 와의 사이에 關係를 規定지을수 있다. 이때에 임의의 變數로서 破壞순간의 cycle 數 N 의 分布關係數를 생각할 必要가 있다.

몇개의 N 의 값에 대하여 S 의 分布形式을 實驗에서 결정할수 가 있겠다. 가령 그 分布狀態가 이미 알려져 있는 形式과 포함될경우는 중간값, 또는 偏差와 같은, 統計學에서 使用되는 度數分布의 平均值的인 性質과 分散의 傾向을 表示하는 變數에 의해서 이 分布狀態를 表示할 수 있다. 이것으로부터 等確率曲線을 作成하고 이것에 의해서 N 의 分散을 찾아낼수 가 있다. 따라서 S 와 N 의 等確率曲線 및 分布狀態를 數學的으로 나타낼 수 있을 경우에는 S 와 N 는 각각 獨立된 狀態로는 選擇할수 없게 된다. 이러한 數學的인 相關關係에 대해

서의 適合條件에 대해서는 여러사람들의 研究가 있다.

分散의 原因으로서는 試驗片을 實驗機에 고정시킬 때의 偏心과 같은 實驗的인 誤差에 의한것과 材料의 不均質性 特히 介在物의 存在에 의한것 등을 들수 있다.

以上과 같은 簡單한 統計理論은 應力の 反復數를 基礎로 하기 때문에 이것은 거의 確率論的인 취급方法으로서, 材料에 대해서는 어떠한 假定도 設定하지 않았으며, 特히 材料의 不均質性에 대해서는 全然 考慮하지 않았다.

6. 疲勞에 대한 被害理論

被害라고 하는 表現은 두가지 側面을 가지고 있다. 그 하나는 物理的인 概念으로서 直觀的인 表現이고 다른 하나는 記述的인 概念을 나타내는 것으로서 構造物에 材料를 使用하는 觀點에서는 매우 重要한 意味를 가진다.

被害의 物理的인 概念이라고 하는것은 疲勞中에 생기는 材料의 物理的인 諸性質의 變化에 대응하는 것으로서 여기에는 變化라고 하는것은 加해지는 各種 應力의 作用때문에 材料의 性質에 나는 變化를 가르킨다.

한편 記述的인 概念이라고 하는것은, 變動하는 應力의 事前 履歷때문에, 또는 疲勞限度에 해당하는 應力을 받은 材料의 耐久性에 관한 定量的인 表示라고 생각된다.

Miner²⁴⁾는 線形이라는 假定下에서 被害의 單純한 法則을 提案했다. 즉, S_i 라고 하는 應力레벨에서 N_i cycle을 加했을 경우, 破壞할때의 平均反復數가 N_i 라고 하면, n_i/N_i 에 比例해서 被害는 增大하고

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

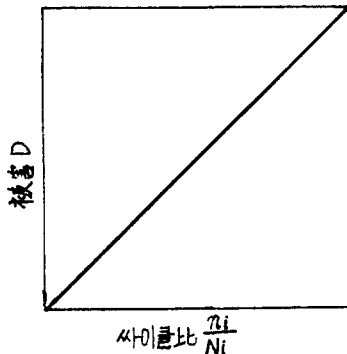


그림 5. 被害 D의 cycle比 n_i/N_i 에 의한 變化의 模型의 圖式化

이 되었을 때 破壞한다고 했다.

被害의 狀態는 그림 5에 表示한것과 같다. 이 그림에서 가령 應力의 應力振幅레벨 S_1 에 있어서 壽命의 比率이 $n_1/N_1=Z$ 에 달했다고 하면 其他의 應力振幅레벨 S_2 에 있어서의 殘存耐久比率은

$$n_2/N_2 = (1-Z)$$

로 表示할 수가 있다.

이 被害에 대한 思考方式은 S_2 가 S_1 보다 높은 레벨에 있는지 혹은 낮은 레벨에 있는지의 여부는 區別할수가 없다. 그러나 지금 생각하고 있는 應力레벨이 전부가 疲勞限度以上일 경우, 이 應力이 漸次的으로 減少할 때에는 $\sum(n/N)$ 는 1以下이고 反對로 同一條件上에서 應力이 漸次的으로 增加할 때에는 1以上이 된다.

以上과 같이 Miner가 提案한 法則은 正確하지는 않으나 大端히 간편하다는 것이 長點이다. Miner의 法則에 依한 結果를 보면 $\sum(n/N)$ 의 平均値는 0.98, 最大値는 1.45, 最少値는 0.61이 얻어진다.

그후 많은 研究者들에 의해서 Miner 法則을 檢討하고 있는 實情이며, 實驗的인 解析에 의하면, 이 法則은 반듯이 正確하지는 않고 應力이 매우 높은 레벨의 경우에는 樂觀的인 結論을 내릴 위험이 있는 反面에 낮은 應力레벨의 경우에는 너무 慎重한 結論을 내릴 위험이 있다고 한다.

New-mark²⁵⁾는 다음과 같은 等價의 概念을 導入해서 S-N 曲線上에 同一한 被害線을 定義하려고 시도했다. 지금 두개의 應力레벨 S_1, S_2 를 생각하고, 예를 들면, S_1 에서 n_1 cycle 후에, 또는 S_2 에서 n_2 cycle 후에 試驗片에 걸리는 應力레벨을 S로 정했을 경우, 이 試驗片이 破壞할때까지 견딜수 있는 殘存反復數가 같은 경우에는, S_1 과 S_2 에서의 처리는 同一한 被害率을 發生시킨다고 생각했다.

이와같은 等被害線은, 被害의 概念의 有効性を 檢討하기 위해서, 被害處理條件(S_1, n_1)을 考慮한후의 殘存壽命과 同一한 殘存壽命을, 應力레벨 S_2 에서 얻기 위해서 的 被害處理條件(S_2, n_2)을 결정하는것은 그렇게 어려운 일은 아니다.

우선 (S_1, n_1)을 消費한후에 S_2 에 있어서의 殘存壽命을 결정하고 그값을 S_2 에 있어서의 被害를 동반하지 않는 壽命 N_2 의 값으로부터 빼면 된다. 이렇게해서 S_2 에서의 殘存壽命의 값이 同一하게 되는 (S_1, n_1), (S_2, n_2)의 두가지 處理條件을 결정할수가 있으나 S_1 의 觀點에서 양쪽의 殘存壽命이 同一한지 어떤지는 확실하지 않다.

7. 低 cycle 疲勞

S-N 曲線에 있어서의 上部分은 짧은 壽命($N < 10^4$ cycle)과 高應力이 對應해있는 部分이다. 이와같은 負荷條件에서는 대단히 큰 塑性變形이 일어나고 疲勞의 特殊한 경우를 構成한다. 이것을 低 cycle 疲勞 또는 塑性疲勞라고 말한다.

이 領域에서는 壽命을, 各 cycle에서 얻어지는 스트레인 ϵ 의 함수로서의 반복수 N 로서 表示하는 경우가 많다. Orowan²⁶⁾은 全스트레인량이 어떤 限界値를 넘었을때 破壞가 發生한다고 가정하고, N 와 ϵ 과의 關係를 다음式으로 表示했다.

$$\epsilon \cdot N = \text{一定}$$

그후 Manson²⁷⁾이 행한 實驗結果로부터 上式은 다음과 같이 修正되었다. 즉

$$\epsilon \cdot N^m = \text{一定}$$

Coffin²⁸⁾은 因子로서 最大스트레인 [$\epsilon = \epsilon$ (elastic) + ϵ (plastic)]이 아니고, 塑性스트레인 成分인 ϵ_p 를 취함으로서 이 現象은 매우 正確하게 表示할수 있음을 提案했다. Coffin²⁹⁾은 實驗을 基礎로 해서 다음과 같은 매우 簡單한 關係式을 發表했다. 즉,

$$\epsilon_p \cdot N^{1/4} = \text{一定}$$

이 關係式은 疲勞에 관해서 經驗的으로 얻어진 것임에도 불구하고 많은 金屬에 對해서의 實驗結果와 一致한다는 사실은 놀라운 일이라고 말할수 있겠다. 또 Coffin은, 座標軸에 $\log N$ 와 $\log \epsilon_p$ 를 선택할 경우 이式으로부터 얻어지는 直線(그림 6)은 靜的인 引張試驗의 點을 通過한다는 것도 확인했다. 이 點이라고 하는것은 $N=1/4$, $S=$ 破斷強度에 해당하는 것이라고 말할수 있다. 따라서 靜的인 試驗結果를 가지고서 定數를 구할수 있다. 즉 破斷할때의 眞塑性스트레인 값을 취하

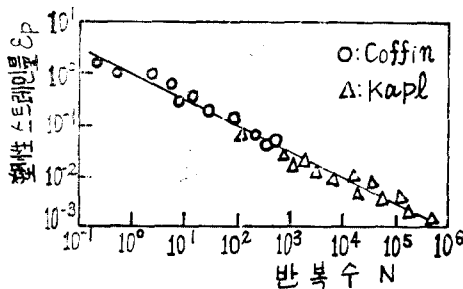


그림 6. 반복수에 따르는 塑性 스트레인 ϵ_p 와 반복수 N 와의 변화

면 된다.

이 法則은 塑性疲勞의 領域에서는, 疲勞限度應力은 靜的인 破壞應力 보다는 오히려 材料의 延性に 依存함을 말해주고 있다.

참 고 문 헌

1. 西島敏, 金屬의 疲勞, 丸善 Co, (1973)
横畑武夫, 金屬材料의 強度と 破壞, 丸善 Co. (1964)
石橋正, 金屬疲勞と 破壞, 養賢堂, (1954).
2. A. A. Griffith, Plip. Trans, Royal Soc, Vol. 221A (1920), 163.
3. W. N. Thomas, Engineering, (1923), 12~19.
4. J. A. Ewing, J. C. W. Humfrey, Phil. Trans. Royal Society, Vol. 200, (1903), 241.
5. H. J. Gough, Proc. ASTM, 33 (1933), 3.
H. J. Gough, S. J. Wright, D. Hanson, J. Inst. Met., 36 (1926), 173.
H. J. Gough, D. Hanson, Phil Trans., A226 (1927), 1.
6. M. R. Hempel, Symposium on Basic Mechanism of Fatigue, ASTM, Tech. Pub., No. 237 (1959), 52,
7. H. J. Gough, D. Hanson, Proc. Roy. Soc., A., Vol. 104, (1923), 539.
8. H. J. Gough, Proc. A. S. T. M., (1933).
9. E. Orowan, Proc. Royal Society, Vol. 171, (1939), 79.
10. A. K. Head, The Philosophical Magazine, (1953), 925.
11. A. K. Head, J. Appl. Mech. 23, (1956), 407.
12. N. E. Frost, S. Dugdale, J. Mechanics and physics of Solids, Vol. 6 (1958), 92.
13. N. E. Frost, J. Mechanical Science, Vol. 4, (1962), 4.
14. T. Yokobori, M. Tanaka, International Jour. of Fracture Mechanics, (1966), 564.
15. G. R. Irwin, Trans ASME, 79, (1957), 361.
16. E. A. Lange, Low cycle Fatigue Crack Propagation in Rotating, Materials Research and Standard, (1965), 352.
17. 石橋正, 金屬의 疲勞と 破壞防止, 養賢堂 (1954), 40.
18. P. J. E. Forsyth, J. Inst. Met., 83 (1954~55), 173, 395.

19. A.H. Cottrell, D. Hull, Proc. Roy. Society, A242 (1957), 211.
 20. N.E. Mott, Acta. Metallurgia, Vol.6, (1958), 195.
 21. N. Thompson, Fracture, 18, (1959), 354.
 22. A.J. Kenned, Phil. Mag.6, (1961), 49.
 23. W.A. Wood, Academic Press, New York, (1956), 1.
 24. M.A. Miner, J. Appl. Mech, 12, (1945), A159.
 25. N.M. Newmark, Fatigue and Fracture of Metals, 10, (1952), 197.
 26. E. Orowan, The Welding Journal, 31,6, (1952), 273.
 27. S.S. Manson, N.A.C.A. (1953) 2933.
 28. L.F. Coffin, Trans, ASM, 51, (1959), 438.
 29. L.F. Coffin, Internal Stresses and Fatigue in Metals Elsevier Publishing Co., New-York, (1959), 363.
-