

原子力分野에서의 破壞力學 現況

—法的 要求事項을 中心으로 (Ⅱ)—

宋 達 鎬 · 孫 甲 憲

<韓國原子力研究所 機械第二研究室>

3.3 稼動中檢査結果의 解析

稼動中檢査(ISI)에 適用되는 ASME-XI¹⁾의 1974年 Edition에 ISI時 檢出된 欠陷을 評價하는 節次가 提示되었다는 것은 이미 언급한 바 있다. 稼動中檢査의 概念은 ASME-III²⁾에 따라 建設된 部品이라 하더라도 原子力發電所의 온 壽命期間동안 또는 定해진 壽命期間동안 材料 내부에 欠陷이 전혀 생기지 않는다거나 또는 成長하지 않는다고 볼수 없다는데에 근거를 둔 것이다.³⁾ 즉, 部品을 建設할 때 ASME-III의 規定에 따라 수행한 非破壞試驗(nondestructive examination)에 의하여 合格된 部品이라 할지라도 試驗方法의 有効性 및 合格基準등에 의하여 發見되지 않았거나, 發見되었더라도 合格된 欠陷등이 있을 수 있다. 이러한 欠陷들이 原子爐의 稼動과 더불어 成長하거나, 또는 部品の 使用條件에 따라 欠陷이 새로이 發生할 경우는 RCPB의 構造의 健全性 및 安全性은 위협을 받게 된다. 이에 대처하기 위하여 原子力發電所의 全壽命期間의 통하여 定期的으로 ISI를 수행해 줄 것이 10CFR50⁴⁾의 50.55a, "Codes and Standards"에 法的으로 明文化되어 있다. ISI時發見된 欠陷은 그 크기를 評價하여 合格基準을 초과하는 경우에는, 欠陷의 除去(removal), 修理(repair), 部品の 代替(replacement), 또는 破壞力學的인 解析에 의하여 그러한 欠陷이 構造의 安全性을 損傷시키지 않는다는 것을 立證해 주어야 한다.

ISI時에 檢出된 欠陷을 評價하고 破壞力學的

으로 解析하는 規定으로서 ASME-XI에 명시된 節次는 다음과 같다.

1) 檢出된 欠陷의 理想化(characterization) ISI時에 非破壞試驗—主로 超音波探傷試驗(ultrasonic examination)—에 의해 檢出되는 欠陷은 일반적으로 복잡한 형상을 가진다. 따라서 이들 欠陷을 一貫性있게 評價하기 위해서는 破壞力學的 解析이 가능한 단순한 欠陷으로 理想化할 필요가 있다. 理想化하는 요령은 ASME-XI의 IWA-3300, "Flaw Indication Characterization"에 자세히 주어져있다. 여기서는 欠陷을 位置, 欠陷들사이의 相互關係에 따라 表面平面欠陷(surface planar flaws), 內部平面欠陷(subsurface planar flaws), 複數平面欠陷(multiple planar flaws), 非平面欠陷(nonplanar flaws), 平行平面欠陷(parallel planar flaws), 層狀欠陷(laminar flaws), 一般複數共通平面欠陷(multiple nonaligned coplanar flaws) 및 一列複數共通平面欠陷(multiple aligned coplanar flaws)으로 나누어 각각을 定義하고 이들을 理想化하는 節次를 그림으로써 설명하고 있다.

우선 表面平面欠陷을 理想化하는 요령을 설명하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에 의하면 檢出된 欠陷은 欠陷의 全面積을 포함하는 直四角形으로 理想化된다. 이때 直四角形은 각각 耐壓部의 表面과 平行하고, 垂直인 2개씩의 線으로 이루어져야 한다. 이것은 實際 欠陷面의 方向과 관계없이 欠陷面이 最大應力方向과 直角인 것으로 고려하여 安全側의 解析 結果를 얻기 위하여

□ 解 說

다. 이때 耐壓部 表面과 平行한 直線의 길이 l 과 垂直한 直線의 길이, 즉 欠陷의 길이, a 의 比인 a/l 를 形象比(aspect ratio)라 하고, 이 값은 0.5를 超過할 수 없다. 表面平面欠陷을 理想化함에 있어 特記할 것은 Fig. 11의 flaw #4에서 보는 바와 같이 表面에서 가까운 거리에 있는 內部平面欠陷은 表面平面欠陷으로 간주한다는 사실이다. 이것은 이와 같은 欠陷이 힘을 받으면 쉽게 表面欠陷이 될 수 있다는 觀點에서 매우 妥當하고도 安全側의 假定이라고 할 수 있다.

內部平面欠陷은 欠陷이 材料의 內部에 있다는 점과 欠陷의 길이를 $2a$ 로 한다는 점을 제외하고는 表面平面欠陷과 동일하다. Fig. 11의 flaw #4는 內部平面欠陷을 理想化한 것이나, 이미 설명한 바와 같이 表面에 가까이 있기 때문에 表面平面欠陷으로 간주된 것이다.

위에서 언급한 나머지 欠陷의 種類들은 層狀欠陷을 제외하고는 모두 平面欠陷(表面平面欠陷 및 內部平面欠陷)으로 理想化된다. 紙面관계상 複數平面欠陷을 單一平面欠陷으로 理想化하는 節次만 代表的으로 Fig. 12에 例示한다.

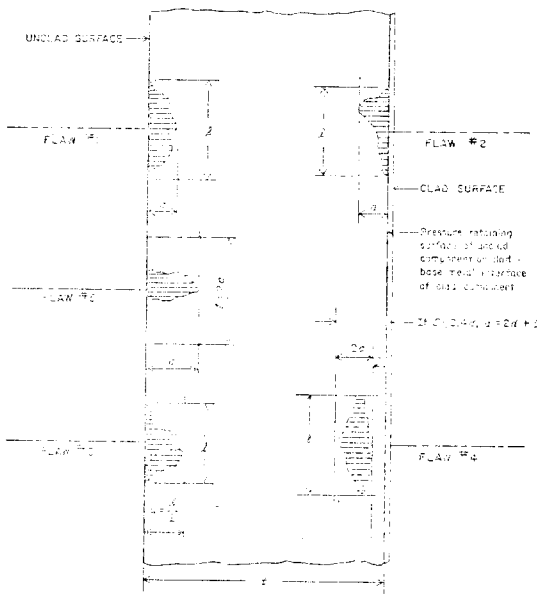


Fig. 11 Surface planar flaws (ASME-XI, Fig. IWA-3310-1)

이렇게 모든 欠陷을 形象比 a/l 인 直四角形으로 理想化하는 것은 破壞力學을 適用하기 쉽게 하기 위함이다. 즉, 直四角形에 內接하는 半橢圓形(內部欠陷의 경우는 橢圓形) 龜裂에 대해서만 短軸端에서의 SIF 를 구할 수 있기 때문이다.

2) 合格基準과의 比較

理想化한 欠陷의 크기를 合格基準(acceptance standards)과 比較하여 合格 如否를 決定한다. 合格基準은 欠陷이 檢出된 部位의 重要度—試驗範疇(examination category)라 한다—에 따라 平面欠陷과 層狀欠陷의 두 種類의 欠陷에 대하여 주어져 있다. 이것은 欠陷이 構造物의 健全性에 미치는 영향이 欠陷의 位置에 따라 전부 다르기 때문이다.

試驗範疇중 가장 중요한 原子爐容器에서의 圓周方向熔接이음에 대한 것을 例示하면 Fig. 13과 같다. 기타의 試驗範疇에 대한 것은 ASME-XI의 IWB-2500, "Examination and Pressure Test Requirements"에 Fig. 13과 같은 그림들

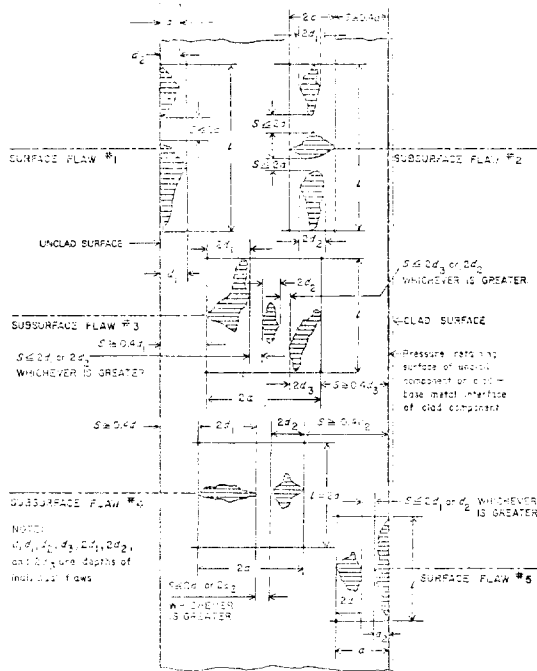


Fig. 12 Multiple planar flaws (ASME-XI, Fig. IWA-3330-1)

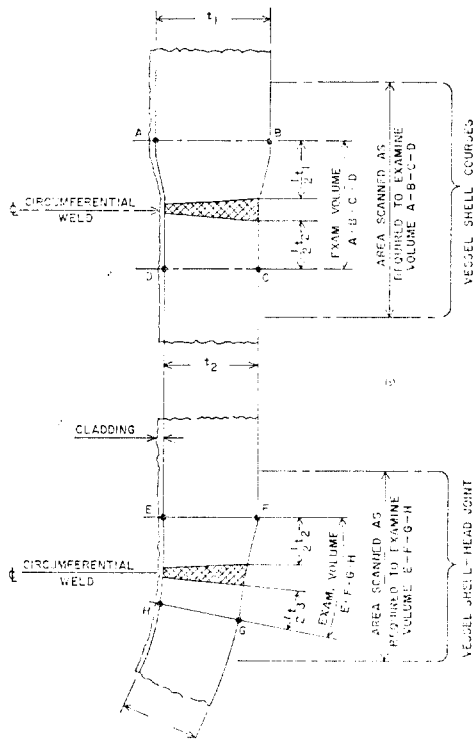


Fig. 13 Examination category B-A, pressure retaining circumferential weld joints in reactor vessel (ASME-XI, Fig. IWB-2500-1)

과 함께 자세히 설명되어 있다.

앞에서 보인 試驗範疇가 속하는 原子爐容器的 壓力維持熔接部에 대한 合格基準을 例示하면 Table 2 및 Table 3 과 같다. Table 2는 平面 欠陷에 대한 것이고, Table 3는 層狀 欠陷에 대한 것이다.

이들 合格基準을 만족하는 欠陷은 다음의 ISI 時에 참고가 되도록 記錄 및 規制當局에 報告하는 것으로 조치가 끝나지만, 不合格인 欠陷에 대해서는 適切한 措置를 취해주어야 한다. 適切한 措置에는 欠陷의 程度에 따른 除去, 修理 및 部品の 代替가 포함된다. 그러나 商業運轉중인 原子力發電所의 部品을 修理, 代替하는데에는 放射能때문에 經濟的, 技術的으로 많은 어려움이 수반된다. 이에 따라 ASME-XI에서는 欠陷을 解析的인 方法으로 評價하는 것을 許容하고

있다. 즉, 다음에 설명하는 바에 따라 破壊力學的으로 解析하여 構造的 安全性이 損傷되지 않음을 立證하는 것이다.

3) 破壊力學的 解析 節次

不合格된 欠陷을 評價하는 節次는 ASME-XI의 Appendix A, "Analysis of Flaw Indications"에 提示되어 있다. 이 附錄은 前記한 바

Table 2 Allowable planar indications for examination categories B-A, pressure retaining welds in reactor vessel. (ASME-XI, Table IWB-3510-1)

Aspect Ratio, ¹ a/l	Surface Indications, ^{2,5} a/t_1 %	Subsurface Indications, ^{2,3,4,5} a/t_1 %
0.00	1.8	2.3Y
0.05	2.0	2.4Y
0.10	2.2	2.6Y
0.15	2.4	2.9Y
0.20	2.7	3.2Y
0.25	3.1	3.7Y
0.30	3.5	4.1Y
0.35	3.5	4.6Y
0.40	3.5	5.2Y
0.45	3.5	5.8Y
0.50	3.5	6.5Y

NOTES:

- (1) For intermediate flaw aspect ratios a/l , linear interpolation is permissible.
- (2) Component thickness t is measured normal to the pressure retaining surface of the component. Where the section of thickness varies, the average thickness over the length of the planar indication is the component thickness.
- (3) The total depth of a subsurface indication is $2a$.
- (4) $Y = (S/t)/(a/t) = S/a$, If $Y > 0.4$, the flaw indication is classified as a surface indication. If $Y > 1.0$, use $Y = 1.0$.
- (5) Material: Ferritic steels that meet the requirements of NB-2331 and the specified minimum yield strength of 50 ksi or less at 100F
Thickness Range: 4 in. and greater.

□ 解 說

Table 3 Allowable laminar indications for examination categories B-A, pressure retaining welds in reactor vessel. (ASME-XI, Table IWB-3510-2)

Component Thickness, t , in. ¹	Laminar Area A , sq in. ²
4	18
6	18
8	24
10	30
12 and greater	36

NOTES:

- (1) For intermediate thicknesses, linear interpolation of area is permissible.
- (2) The area of a laminar flaw is defined in IWA-3360.

와 같이 理想化한 不合格 欠陥의 영향을 解析의 으로 評價하는데 사용할 수 있는 것으로서 non-mandatory 이다. 따라서 이 附錄에 提示한 方法 이외의 方法도 妥當하다는 것을 立證할 수 있다면 사용할 수 있음은 물론이다.

또한, 이 附錄 A는 規定最小降伏強度 (specified minimum yield strength)가 345MPa (50ksi) 以下인 ferritic 材料로서, 欠陥이 있는 部位의 두께가 102mm (4in.) 以上이고, 應力分布 및 幾何學的 形狀이 단순한 경우에만 適用할 수 있는 것이다. 그러나, 이 附錄의 基本 概念은 다른 ferritic 材料에도, 또는 조금 복잡한 幾何學的 形狀에는 擴張하여 適用할 수 있다고 規定되어 있다. 따라서 附錄 A의 解析 節次 및 概念을 理解하는 것은, 原子力 部品에 破壞力學을 어떻게 適用하고 있는 가를 理解하는데에는 물론, 이를 擴張 適用하거나 새로운 解析 節次를 開發하기 위해서는 必須的이라고 할 수 있다.

附錄 A의 內容은 破壞力學을 利用하여 欠陥을 評價 解析하는 節次는 물론, 欠陥 先端에서의 SIF를 計算하는 公式와 方法, 그리고 實際 材料의 破壞力學的 性質에 관한 資料가 없는 경우에 사용할, 일반적으로 原子爐容器에 많이 사용되는 材料들의 性質에 관한 資料들을 提示하

고 있다. 다음에서는 이를 要約하여 설명한다.

i) 應力의 決定

檢出된 欠陥 位置에서의 應力들을 구한다. 이 경우에는 별도로 應力解析을 할 필요는 없다. RCPB 部品에 대하여는 이미 建設시에 모든 運轉狀態—一定常狀態 및 過渡狀態—에서의 모든 荷重 및 荷重組合에 대한 상세한 應力解析을 수행하였고 그 結果는 전부 設計報告書에 收錄해 놓았기 때문이다. 따라서 設計報告書에서 각 運轉狀態에서의 應力值를 찾으면 될 것이다.

欠陥 位置에서의 應力을 Fig. 14와 같이 膜應力成分, σ_m 과 굽힘應力成分, σ_b 로 分類한다. 이때 應力이 두께에 沿하여 直線的으로 變換하고 고려한 것은 문제의 간편화를 기한 것으로서 安全側의 解析結果가 예상되므로 妥當한 가정이라 하겠다.

ii) SIF의 算出

直四角形으로 理想化한 欠陥을 다시 이 直四角形에 內接하는 半橢圓形(表面欠陥의 경우) 또는 橢圓形(內部欠陥의 경우) 欠陥으로 再理想化한다. 이 半圓形 또는 橢圓形 欠陥을 가지고 각 運轉狀態에서의 SIF를 구한다. SIF를 구하는 公式은 다음의 Eq. (4)로 주어져 있다.

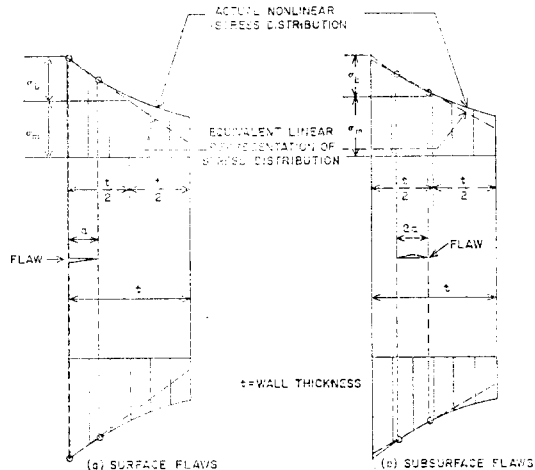


Fig. 14 Linearized representation of stresses at the location of the detected flaw. (ASME-XI, Fig. A-3200-1)

$$K_I = \sigma_m M_m \sqrt{\pi} \sqrt{a/Q} + \sigma_b M_b \sqrt{\pi} \sqrt{a/Q} \quad \text{Eq. (4)}$$

여기서, σ_m, σ_b = 欠陥 位置에서의 膜應力 成分
과 굽힘 應力 成分 (Fig. 14)

a = 欠陥의 크기, 즉 不合格으로 判定
된 欠陥의 短軸 길이 의 半.

$$Q = \Phi^2 - 0.212 \left(\frac{\sigma_m + \sigma_b}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

: 欠陥先端에서의 塑性變形을 고려
해 준 欠陥의 形象係數 (shape factor)
로, Fig. 15와 같이 주어진다.

$$\Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 - \left(\frac{l^2 - a^2}{l^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} d\theta$$

: 第二種 完全情圓積分 (complete
elliptic integral of the second
kind)

σ_{ys} = 規定最小降伏強度

M_m = 膜應力에 의한 SIF 를 求할때의
修正係數로, 表面欠陥에 대해서는
Fig. 16, 内部欠陥에 대해서는 Fig.
17 과 같이 주어진다.

M_b = 굽힘應力에 대한 修正係數로, 表
面欠陥에 대해서는 Fig. 18, 内部
欠陥에 대해서는 Fig. 19 와 같이
주어진다.

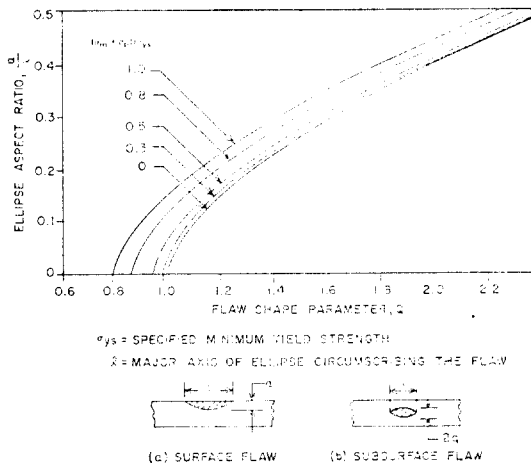


Fig. 15 Shape factors for modeled elliptic flaw (ASME-XI, Fig. A-3300-1)

iii) 材料의 性質

여기서 必要한 材料의 性質은 破壞靱性, 疲勞
龜裂成長率 및 照射의 영향에 관한 것이다.

이중 破壞靱性에 대해서는 K_{Ic} 와 K_{Ia} 가 필요
하다. K_{Ic} 는 우리가 잘 아는 平面變形度破壞靱性

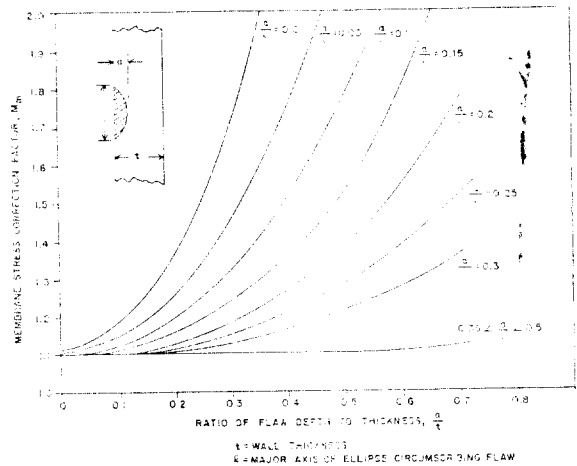


Fig. 16 Membrane stress correction factor for surface flaws (ASME-XI, Fig. A-3300-3)

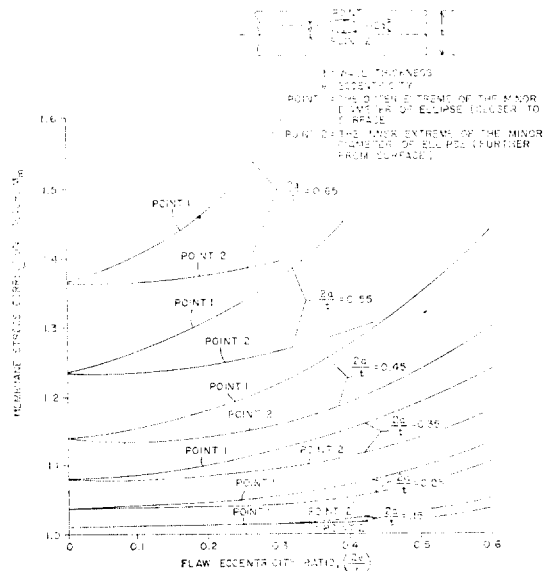


Fig. 17 Membrane stress correction factor for subsurface flaws (ASME-XI, Fig. A-3300-2)

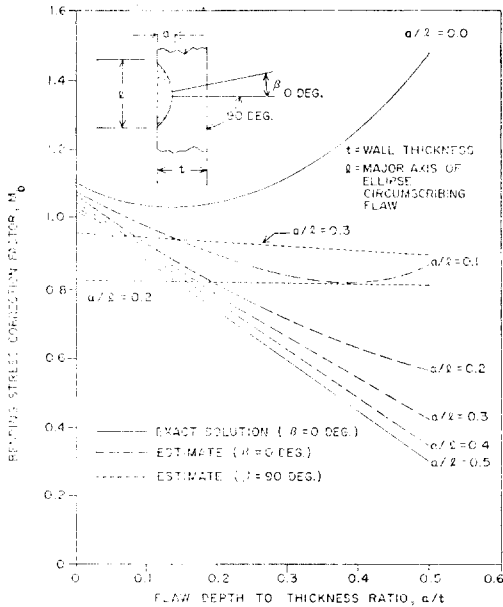


Fig. 18 Bending stress correction factor for subsurface flaws (ASME-XI, Fig. A-3300-5)

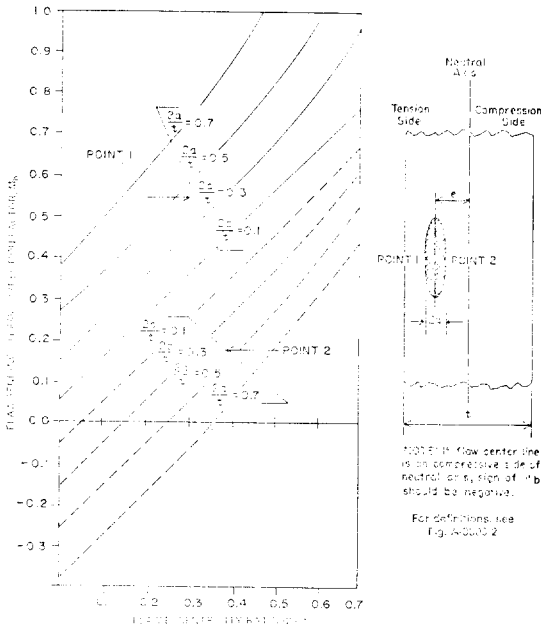


Fig. 19 Bending stress correction factor for subsurface flaws (ASME-XI, Fig. A-3300-4)

{ (plane strain fracture toughness)으로서 靜的 荷重에 의해 龜裂이 傳播하기 시작하는 破壞靱性の 最低值이며, K_{Ia} 는 傳播하던 龜裂이 停止(crack-arrest)하는 破壞靱性の 最低值이다. 이러한 K_{Ic} 와 K_{Ia} 는 溫度의 函數로 주어져야 하며, 規定된 材料나 製品(product form)으로부터 얻을 수 있는 값중에서 安全側의 값이어야 한다. 따라서 現在の 技術現況하에서, 사용되는 K_{Ic} 및 K_{Ia} 의 값들이 正當하다는 것을 立證할 수 있어야 하며, 또한 材料의 不均一性, 實驗技術 기타 이들 破壞靱性值들을 낮출 수 있는 變數들도 고려한 것이어야 한다. 만일 實際的인 資料를 얻을 수 없는 경우, RCPB 部品에 많이 사용되는 SA-533 Grade B Class 1, SA508 Class 2 및 SA-508 Class 3에 대하여서는 Fig. 20에 주어진 K_{Ic} 와 K_{Ia} 를 사용할 수 있다. 이 Fig. 20의 破壞靱性值들은 實際의 材料에 대한 값들을 모를 경우에 사용되는 값들이기 때문에 매우 安全側으로 주어졌음을 알아야 한다. Fig. 20에 주어진 K_{Ic} 와 K_{Ia} 를 式으로 표시하면 式 (5)와 같다.

$$K_{Ic} = 33.2 + 2.806 \exp[0.02(T - RT_{NDT} + 100)]$$

$$K_{Ia} = 26.8 + 1.233 \exp[0.0145(T - RT_{NDT} + 160)]$$

Eq. (5)

여기서 K_{Ic} 및 K_{Ia} 의 單位는 $\text{ksi} \sqrt{\text{in}}$ 이고, 溫度는 $^{\circ}\text{F}$ 로 주어져야 한다.

윗식과 Fig. 20에서 強調하고 싶은 것은 K_{Ic} 와 K_{Ia} 가 3.1에서 설명한 基準無延性 遷移溫

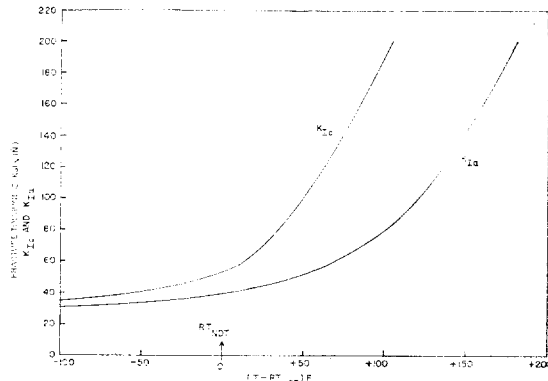


Fig. 20 Lower bound K_{Ic} and K_{Ia} data for SA-533 grade B class 1, SA-508 class 2, and SA-508 class 3 steels (ASME-XI, Fig. A-4200-1)

度, RT_{NDT} 에 대한 相對溫度의 函數로 주어져 있다는 사실이다.

疲勞龜裂成長 (fatigue crack growth)에 대한 概念은 다음 Eq.(6)로 表示되는 Paris¹⁵⁾의 power law 를 사용한다. 즉,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m \quad \text{Eq. (6)}$$

여기서, $\frac{da}{dN}$ = 疲勞龜裂成長率 (fatigue crack growth rate)

$$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}$$

: SIF의 變化 範圍

C, m = 材料常數

따라서 材料 및 試驗條件에 따른 常數인 C 와 m , 또는 각 SIF의 變動 範圍에 따른 疲勞龜裂成長率을 알아야 한다. 이들 常數나 資料들은 破壞靱性值의 경우에서와 같이 實際의 材料로부터, 材料의 變化, 環境條件, 試驗條件, 기타 試驗結果에 영향을 주는 因子들을 고려하여 安全側으로 얻은 값이어야 한다. 만일 實際의 材料에 대한 資料를 사용할 수 없는 경우에는 破壞靱性值와 마찬가지로 RCPB 部品에 많이 사용되는 材料들에 대해서는 Fig. 21로 주어진 疲勞龜裂成長率에 대한 資料를 사용할 수 있다. Fig. 21의 資料는 實際 材料에 대한 資料가 없는 경우에 사용되는 값이기 때문에 上限值로서 매우 安全側으로 주어진 것이다.

한편, Fig. 21에서 알 수 있듯이 表面欠陥에 대한 資料는 原子爐 冷却材의 영향, 즉 冷却材와 같은 環境條件을 고려한 것이며, 荷重比, $R(=K_{\min}/K_{\max})$ 이 0~0.25 사이에 있는 경우에 한하여 사용할 수 있는 것이다. Fig. 21에 주어진 資料들을 式으로 表示하면 다음 式(7)과 같다.

$$\frac{da}{dN} = (0.3795 \times 10^{-3}) (\Delta K_I)^{3.726}$$

for surface flaws

$$\frac{da}{dN} = (0.0267 \times 10^{-3}) (\Delta K_I)^{3.726}$$

for subsurface flaws

Eq. (7)

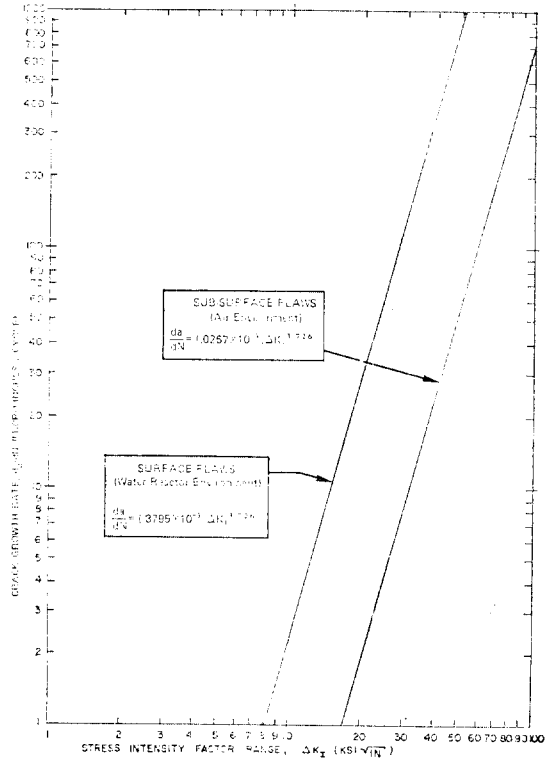


Fig. 21 Upper bound fatigue crack growth data for SA-533 grade B class 1, SA-508 class 2, and SA-508 class 3 steels (ASME-XI, Fig. A-4300-1)

여기서 疲勞龜裂成長率의 單位는 10^{-6} in/cycle 이고, SIF의 값은 $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ 로 주어져야 한다.

照射 (Irradiation)의 破壞力學的 性質에 대한 영향에 관한 것은 나중에 監視試驗에 대하여 설명할 때 자세히 논의하기로 한다. 다만, 照射의 영향에 관한 實質的인 資料가 없을 경우에는 Fig. 22를 이용하도록 規定하고 있다. Fig. 22에는 RT_{NDT} 의 變化 (ΔRT_{NDT})가 高速中子 (fast neutron)의 照射量 (fluence)의 函數로 주어져 있다. 이때 高速中子라 하면 $E > 1\text{MeV}$ 이상인 中子를 말한다. Fig. 22에 의하면 照射脆化 (irradiation embrittlement)는 鋼속에 포함되어 있는 구리 (copper)의 成分비에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

照射量이 크면 ΔRT_{NDT} 가 커지게 되므로 그

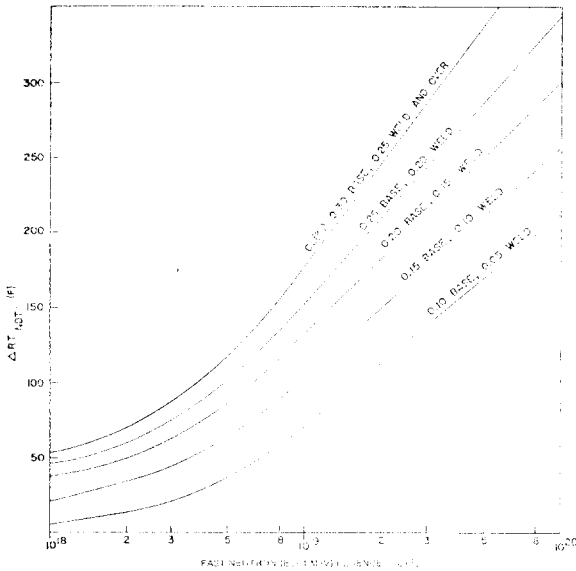


Fig. 22 Effect of fast neutron fluence and copper content on shift of RT_{NDT} for reactor vessel material irradiation at 550°F (ASME-XI, Fig. A-4400-1)

만큼 照射후의 RT_{NDT} 는 上昇하게 된다. 그런데 破壞靱性은 Fig. 20 에서 RT_{NDT} 에 대한 相對溫度에 대하여 單調的으로 증가하는 것으로 주어져 있으므로, RT_{NDT} 가 높으면 같은 使用溫度에 대해서도 材料의 破壞靱性値가 낮아질 것이라는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 22 가 照射의 영향을 고려할 때 사용되는 것이다.

iv) 臨界龜裂 크기의 算出

이제까지 準備한 資料를 가지고 다음 세개의 龜裂의 크기를 求한다.

a_f = 檢出된 欠陥이 成長하여 어떤 規定된 期間末에서의 豫想되는 龜裂의 깊이. 여기서 規定된 期間이라 함은 欠陥이 檢出된 部位를 다시 檢査할 때까지 또는 部品의, 設計壽命까지를 말한다.

a_c = 正常狀態(Normal conditions)에서의 最小臨界龜裂의 크기(critical crack depth)

a_i = 緊急狀態(Emergency Conditions) 및 損傷狀態(Faulted Conditions)에서 停止하지 않고 계속 傳播할 수 있는 最小 臨界龜裂의

크기.

이들을 구하는 요령은 다음과 같다.

a) a_f 의 決定

a_f 를 決定하는 節次는 Fig. 23 과 같다. Fig. 23에서의 原子爐 過渡條件(reactor transients)이라 함은 原子爐의 正常運轉, 試驗狀態 및 Upset 狀態(Upset Conditions)에서 일어날 것으로 豫想되는 過渡條件이다. 따라서 設計에서는 충분히 이들 過渡條件을 반영할 수 있고 반영하여야 한다. 이러한 設計過渡條件은 系統의 設計者에 의해 定해져서 部品의 設計示方書(Design Specification)에 주어진다. 대부분의 PWR 에 대한 設計 過渡條件은 Table 4 와 같다. 이해를 돕기 위하여 過渡條件중의 하나인 plant heat-up 및 cooldown transients 시의 壓力과 溫度에 대한 time history를 Fig. 24에 代表적으로 보였다.

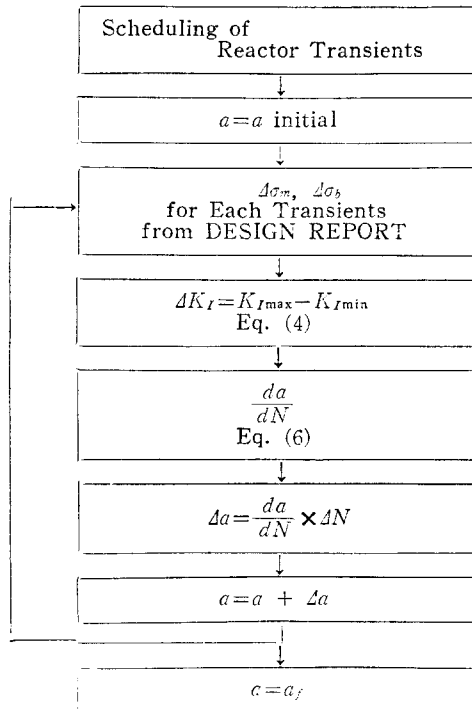
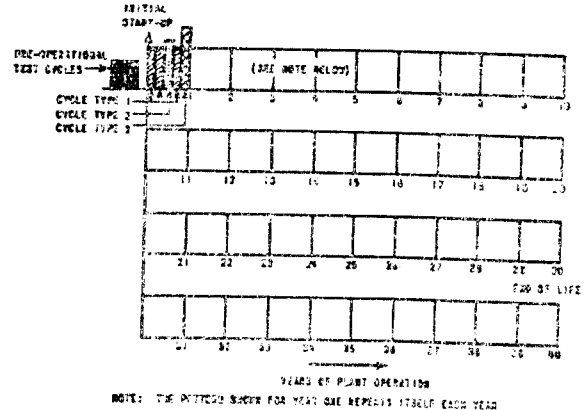


Fig. 23 Procedure for determination of a_f

이와 같은 設計 過渡條件중 規定된 期間동안에 일어날 過渡條件의 回數를 順序的으로 Fig. 25과 같이 나열한다. Fig. 25는 設計過渡條件을 發電

Table. 4 Typical reactor design transients.

Normal Conditions	Occurrences
Heatup and cooldown at 100F/h	200(each)
Unit loading and unloading at 5% of full power/min	18400(each)
Stepload increase and decrease of 10% of full power	2000(each)
Large step load decrease, with steam dump	200
Steady state fluctuations	10 ⁶
Upset Conditions	
Loss of load, without immediate turbine or reactor trip	80
Loss of flow (partial loss of flow, one pump only)	80
Reactor trip from full power	400
Test Conditions	
Turbine roll test	10
Hydrostatic test conditions	
Pre-operational (cold) Hydro Test	5
Post-operational (hot) Hydro Test	40



TRANSIENT	OCCURRENCE TABLE			
	PRE-OPERATIONAL TEST CYCLES	CYCLE TYPE 1	CYCLE TYPE 2	CYCLE TYPE 3
HEATUP - COOLDOWN		1	1	1
PLANT LOADING & UNLOADING	22	87	10	
STEP CHANGE IN POWER	10	10	10	
STEAM DUMP	1	1	1	
STEADY STATE FLUCTUATIONS	3000	3000	3000	
LOSS OF LOAD		1	1	1
LOSS OF FLOW		1	1	1
REACTOR TRIP		2	2	2
TURBINE ROLL TEST	10			
COLD HYDRO TEST	5			
HOT HYDRO TEST				1

Fig. 25 Assumed schedule of total reactor design transients in design service lifetime.

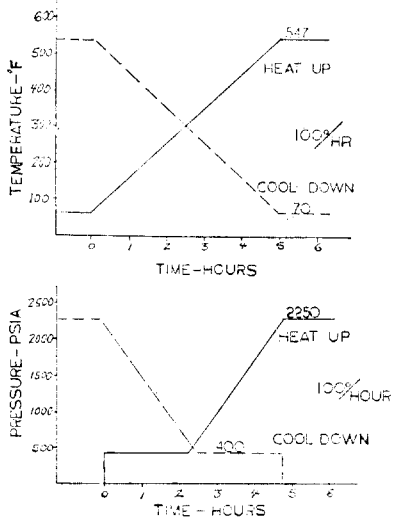


Fig. 24 Plant heatup and cooldown transients.

所의 온 壽命期間에 걸쳐 均等하게 分布, 나열 시킨 것이다. 그러나 ISI 시에는 이미 지나간 過渡條件, 規定된 期間 및 기타安全率등을 고려하여 過渡條件을 다시 順序의으로 나열하여야 한

다.
다음 Eq. (4)를 이용하여 SIF의 範圍를 구하고, Eq. (6)으로부터 고려하는 크기에서의 疲勞 龜裂成長率을 계산하여 이에 고려하고 있는 過渡條件의 回數를 곱하므로써 龜裂의 増分을 얻고 처음의 龜裂에 増分을 더함으로써, 고려하고 있는 過渡條件으로 인한 成長된 龜裂의 크기를 알게 된다. 이때 龜裂의 形象은 변하지 않고 처음의 龜裂과 항상 相似形을 이룬다고 가정한다. 이 成長된 龜裂을 처음의 龜裂로 보고 다시 다른 過渡條件을 고려 해준다. 이 過程을 나열된 모든 過渡條件에 適用하면 맨 나중에는 規定期間 末期에서의 龜裂의 크기, a_f 를 구할 수 있다.

b) a_c 의 決定
材料의 破壞靱性은 壽命 末期에 제일 적을 것이기 때문에 最小臨界龜裂 a_c 를 구하기 위하여서는 우선 壽命 末期의 破壞靱性을 알아야 한다.

□ 解 說

따라서 壽命 末期의 欠陷 位置에서의 照射量을 推定한 후 Fig. 22 에 의하여 ΔRT_{NDT} 를 구하고 Fig. 20 에 의하여 각 過渡條件시의 使用溫度에서의 龜裂停止破壞靱性, K_{Ia} 를 구한다. 不合格으로 判定된 欠陷과 相似形의 크기가 다른 여러 欠陷들에 대하여 Eq.(4)을 이용, SIF 를 구한다. 이 計算된 SIF 와 적절한 溫度에서의 K_{Ia} 값과 비교한다. 따라서 위의 過程을 모든 過渡條件에 대하여 반복함으로써 最小許容龜裂의 크기, a_i 를 구한다.

c) a_i 의 決定

a_i 를 결정할 때에는 Fig. 23 과 같은 疲勞龜裂 成長을 고려할 필요가 없다. 이것은 a_i 가 緊急狀態나 損傷狀態와 관련된 量으로 이러한 狀態들은 일어날 確率이 매우 낮으며, 일단 일어날 경우에는 계속적인 發電所의 運轉은 기대되지 않으며, 단지 安全하게 運轉停止(shutdown)에 이르게하는 것이 목적이기 때문이다. a_i 를 決定하는 요령 및 順序는 다음과 같다.

① 欠陷位置에서의 壽命 末期의 照射量을 두께에 沿하여 推定한다.

② 假想事故후의 時間에 대한 函數로서 欠陷位置에서의 두께에 沿하는 溫度와 應力의 分布(profile)를 구한다.

③ 壽命 末期의 照射量을 알고 있으므로 Fig. 22 및 Fig. 20 에 의하여, 假想事故후의 時間에 대한 函數로서 두께에 沿하는 K_{Ia} 와 K_{Ic} 의 分布를 구한다.

④ 不合格으로 判定된 欠陷과 相似形으로서 크기가 다른 여러 欠陷에 대하여 Eq. (4)를 이용, SIF 를 구한다.

⑤ Fig. 26 (a)에서 보는 바와 같이 계산된 SIF 와 구해진 K_{Ia} 가 맞나는 점에서의 龜裂의 크기가 a_c 즉, 龜裂停止를 위한 臨界龜裂이며, K_{Ic} 와 맞나는 점이 a_i 즉, 龜裂이 傳播하기 위한 臨界龜裂이다. Fig. 26(b)는 龜裂의 停止(arrest)가 일어나지 않는 경우를 나타낸 것이다.

⑥ 각 假想事故후의 여러 時間點에 대하여 Fig. 26 과 같은 그래프를 그린다.

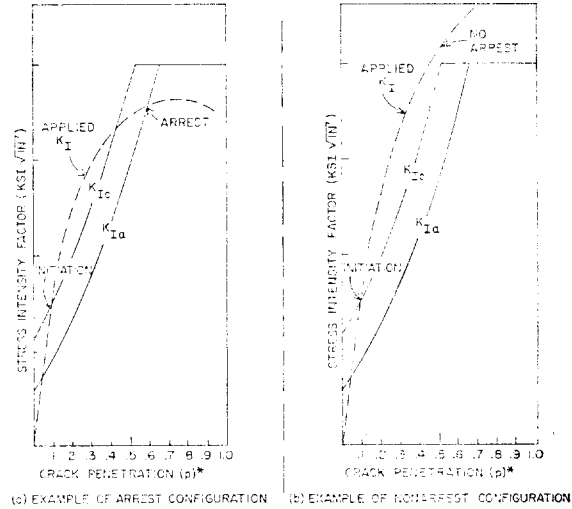


Fig. 26 Determination of a_i for postulated accident conditions (ASME-XI, Fig. A-5300-1)

⑦ 모든 假想事故에 대하여 위의 過程을 반복하여 龜裂이 停止할 때의 龜裂의 길이 0.75T 보다 작은 경우에서의 가장 큰 龜裂의 크기를 찾는다. 이것이 最小臨界龜裂의 크기, a_i 이다.

4) 解析 結果의 評價

破壞力學의 手法을 이용하여 解析한 a_i , a_c 및 a_i 의 세 龜裂의 크기를 評價하는 基準은 ASME-XI의 IWB-3600, "Analytical Evaluation of Indication"에 주어져 있다.

이에 의하면 다음의 基準을 만족하는 欠陷은 規定된 期間동안 修理를 하지 않고도 받아들일 수 있는 것으로 간주하며, 만족시키지 못하는 경우에는 반드시 修理등의 修正措置(corrective measures)를 취하여야 한다.

i) 欠陷의 크기를 基準으로 할 경우

$$a_f < 0.1 a_c \text{ 및 } a_f < 0.5 a_i$$

ii) SIF 를 基準으로 할 경우

$$K_I < K_{Ia} / \sqrt{10} \text{ 및 } K_I < K_{Ic} / \sqrt{2}$$

여기서 앞의 K_I 은 規定 期間末에서의 龜裂의 크기, a_f 를 사용하여 구한 定常狀態에서의 最大 SIF이며, 뒤의 K_I 은 緊急狀態 및 損傷狀態에 대한 最大 SIF 이다.

SIF가 欠陷 크기의 自乘根에 비례한다는 것을 고려하면 위의 두 基準은 根本的으로는 같은 것이라고 할 수 있다.

이렇게 ISI 시에 檢出된 欠陷을 破壞力學的으로 解析하여 安全性을 立證한 경우에는 規制當局에 解析 結果를 提出하여 承認을 받아야 하며, 承認을 받기전에는 發電所의 再稼動에 들어 갈 수 없다. 修正措置를 취하는 경우에는 修正措置에 대한 節次書를 提出하여 承認을 받아야

만 措置를 수행할 수 있으며, 修正措置후에는 반드시 再試驗하여 合格되지 않으면 안된다.

3.4 監視試驗(다음호에 계속)

參 考 文 獻

- 14) 金 炳九, 宋 達鎭, 李 昌熙, "非破壞檢査 技術開發", KAERI/107/RR-32/78, 韓國原子力研究所, 12月, 1978
- 15) Paris, P.C., and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Journal of Basic Engineering, Trans. of ASME, Vol. 85, No. 4, 1963, pp. 528-534

大韓機械學會誌 投稿 案内

- ① 論說은 機械工學 및 工業, 學會活動에 관한 提言 및 意見을 記述한 것으로 한다.
- ② 展望은 機械工學 및 工業에 관한 最近의 進歩를 土臺로 한 將來의 豫想必要 等을 資料에 의거 公正한 立場에서 記述한 것으로 한다.
- ③ 解說은 機械工學 및 工業에 관한 最近의 發展을 詳細하게 記述한 것으로서 著者의 調査結果를 包含한 것으로 한다.
- ④ 講座는 이미 學問體系가 確立된 機械工學의 基礎原理 또는 技術 및 方法에 대하여 平易하게 說明한 것으로 한다.
- ⑤ 資料는 機械工學 및 工業에 有用한 보편적인 技術資料를 收錄한 것으로 한다.
- ⑥ 紹介는 機械工學 및 工業에 관한 現況을 記述한 것으로 한다.
- ⑦ 座談會記錄은 本會 主催 또는 協贊의 公開座談會의 記錄으로 한다.
- ⑧ 紀行文, 見學 및 參觀記는 會員에게 有益한 著者의 施行見學 및 參觀의 所感을 記述한 것으로 한다.
- ⑨ 體驗談은 著者가 機械工學 및 工業分野에서 體驗한 것으로서 會員에게 有益한 內容을 記述한 것으로 한다.
- ⑩ 隨筆은 工學 및 技術에 관한 內容이 있는 隨筆로 한다.
- ⑪ 國內外 뉴우스는 國內外的 機械工學 및 工業에 關聯이 있는 時事性 있는 것으로 한다.
- ⑫ 論文集抄錄은 本會의 論文集에 掲載된 論文의 抄錄으로 한다.
- ⑬ 委員會報告는 本會의 各 部門委員會 및 其他委員會의 經過報告로 한다.
- ⑭ 會員의 소리는 會員으로 부터의 本會의 業務 및 活動에 대한 意見 및 提言을 書信으로 本會에 보내진 것으로서 公開할 意義가 있는 것으로 한다.