

〈論 文〉

2기준법에 의한 破壞評價線圖 및 데이터베이스 構築의 試圖

李宗炯* · 沈愚鎭** · 黃恩河** · 姜用求**

(1990年 3月 6日 接受)

Development of a Failure Evaluation Diagram and a Database by Two Criteria Method

Jong Hyung Lee, Woo Jin Sin, Eun Ha Hwang and Yong Goo Kang

Key Words : Failure Evaluation Diagram(破壞評價線圖), Two Criteria Method(2 기준 법), Fatigue Limit(疲勞限度), Threshold Stress Intensity Factor(下限界應力擴大係數)

Abstract

A failure evaluation diagram to evaluate fatigue fracture was developed. The relation between the fatiguw limit and the threshold stress intensit factor for the short-cracked specimens of various materials including a piping carbon steel can be rationally predicted by the proposed method. It is shown that the coupled failure evaluation diagram for fatigue and ductile frature is expecially useful for evaluation of the flaw tolerance as well as the margin of the safety of the pressure vessel and piping. Furture, accumulation of fatigue data will be needed to construct an accurate fatigue failure evaluation diagram.

1. 序 論

缺陷 및 龜裂을 包含하는 機器 및 構造物의 構造健全性 評價에 對해서는, 從來부터 應力擴大係數 K 를 使用해서 破壞의 開始를 判定한다. 즉, 線型 破壞力學(linear elastic fracture mechanics, LEFM)에 의한 缺陷評價法이 넓게 使用되어 왔다.

LEFM에 의한 豫測이 非保守的으로 되는, 微小 疲勞균열은 現在 $\Delta\sigma_w$ (龜裂材의 疲勞限度)와 a (龜裂길이) 關係의 廣範圍 特性의 表示를^(1~5)보다 簡便하게 合理的으로 하는 것이 要望된다.

龜裂材 크기에 비해 충분히 적은 小規模降伏

(small scale yielding)과 塑性崩壞의 兩極限에 있어서 名名 K_{Ic} (平面strain 破壞靱性)와 σ_y (降伏強度 혹은 有效降伏強度)의 2기준(two criteria)法을 使用해서 Fig. 1에 나타내는 K/K_{Ic} 와 σ/σ_y 의 破壞

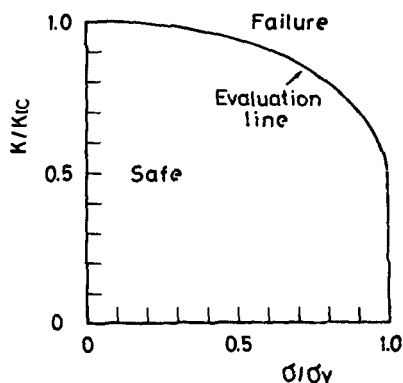


Fig. 1 Failure evaluation diagram

* 정희원, 금오공과대학 생산기계공학과
** 정희원, 금오공과대학 기계설계학과

評價線圖(fatigue evaluation diagram)로서 破壞에 대하여 簡便하게 合理的으로 評價할 수 있다(K : 應力擴大係數, σ : 應力)^(6,7).

疲勞破壞의 경우, K_{lc} 를 K_{th} (下限界應力擴大係數)로 σ_y 를 σ_{wo} (平滑材의 疲勞限界)로 바꾸면 同樣인 破壞評價線圖를 構築할 수 있다고 생각한다.

靜的破壞는 疲勞龜裂 進展의 最終過程에서 생기는 경우가 많다. 따라서, 靜的破壞의 경우의 破壞評價線圖 및 疲勞破壞의 경우의 破壞評價線圖가 얻어지면 實際의 使用에 대해서 대단히 有用하다.

이와같은 觀點에서 疲勞破壞에 對한 破壞評價線圖와 데이터베이스(data base)의 構築을 檢討해 보 고자 한다.

2. 破壞評價線圖의 構築

疲勞破壞의 경우, 下限界應力(σ_{th})과 疲勞限度應力(σ_w)에 對應되는 應力擴大係數를 K_{th} 및 K_w 라 할때, 큰 龜裂材와 下限界應力擴大係數 K_{th} 는 應力比에 依存하지 않고, 材料定數가 된다. 따라서, 疲勞限度 σ_{th} 와 龜裂길이 a 의 關係는, 다음 式으로 주어진다.

$$\sigma_{th} = \frac{K_{th}}{F(a)(\pi a)^{1/2}} \quad (1)$$

여기서, $F(a)$ 는 試驗片, 균열形狀 및 負荷方式에 依存하는 無次元定數이다. 식 (1)의 關係로부터, σ_{th} 는 a 의 減少에 따라 增大한다.

한편, 平滑材의 疲勞限度 σ_{wo} 도 材料定數이지만, 應力比에 依存한다. 그리고, σ_{wo} 가 식 (1)에 자름을 준다(Fig. 2의 a_0 점 참조). 지름點의 龜裂길이 a_0 는 다음 式으로 주어진다.

$$a_0 = \frac{1}{F(a_0)^2 \pi} \frac{K_{th}^2}{\sigma_{wo}^2} \quad (2)$$

以下에서는 前報의 탄소강 SPPH 42의 結果를 사용한다.

Fig. 2의 實線에 式 (1)의 $\sigma_{th}-a$ 關係($K_{th}=\text{一定}$) 및 各 應力比($R=-1, R=0$)의 $\sigma_{wo}=\text{一定}$ 의 線을 兩對數 Plot로서 나타낸다(實線).

한편, 龜裂材의 疲勞限度 σ_w 의 實驗結果는 a 의 減少에 따라, $a > a_0$ 에서 式 (1)의 實線에서 밀어서 離脫하고, $a < a_0$ 에서 $\sigma_{wo}=\text{一定}$ 의 實線으로 接近해 간다. 이것이 微小龜裂材의 特性이다. Haddad는 이 特性을 表示하기 위해서, 式 (1)의

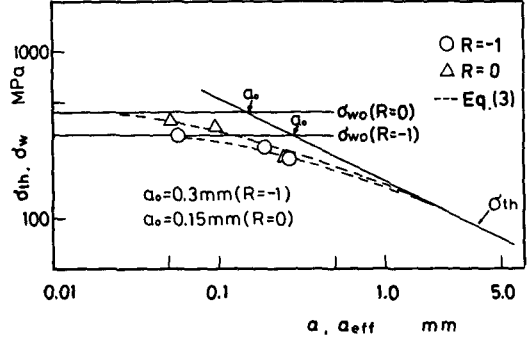


Fig. 2 Relation between σ_{th}, σ_w and a

대신에 다음 式을 提案하고 있다⁽⁴⁾.

$$\sigma = \frac{K_{th}}{F(a)(\pi(a_{eff}))^{1/2}} = \sigma_{th} \left(\frac{a}{a_{eff}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$a_{eff} = a_0 + a$$

식 (3)을 참조해서 $a \gg a_0$ 에서 $\sigma_w = \sigma_{th}$ 로 되고, a 가 0에서 σ_w 는 σ_{wo} 가 된다.

Fig. 2에 있어서, 式 (3)의 結果는 實驗結果와 잘 一致하고 있다. 따라서, 以下에서는 微小龜裂材의 特性으로서 式 (3)을 採擇한다.

다음으로, 微小龜裂材의 疲勞限度 σ_w 에 對應하는 外觀上의 應力擴大係數 K_w 를, 다음 式으로 定義한다.

$$K_w = F(a) \sigma_w (\pi a)^{1/2} \quad (4)$$

한편, σ_w 와 K_{th} 의 關係는 式 (3)과 같이 되는 것으로 그것들의 結果로부터 K_w 와 a 의 關係는 다음 式과 같이 表示된다.

$$K_w = K_{th} \left(\frac{a}{a_{eff}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Fig. 2의 중축을 σ_{wo} 로, 횡축을 a_0 로서 무차원화 하면 σ_w/σ_{wo} 와 a/a_0 선도가 얻어진다. 그러나 식 (3) 및 식 (5)의 形으로부터, σ_w/σ_{wo} 및 K_w/K_{th} 는 a/a_0 에 의해서 一義적으로 정해진다. 즉, σ_w/σ_{wo} 와 a/a_0 선도 및 K_w/K_{th} 와 a/a_0 선도의 사용에 의해, 실험결과를 응력비에 무관계로 표시할 수 있는 것을 알 수 있다.

龜裂材의 靜的破壞의 경우, 破壞評價線圖에서는 무차원 항으로서 σ/σ_y 와 $K/F(a)\sigma_y\sqrt{\pi a}$ 혹은 K/K_{lc} 와 σ/σ_y 등의 항이 使用된다. 이값들에 對應해서, 疲勞破壞의 경우, 破壞評價線圖로 해서 σ_w/σ_{wo} 와 $K_{th}/F(a)\sigma_{wo}\sqrt{\pi a}$ 혹은 K_w/K_{th} 와 σ_w/σ_{wo} 등

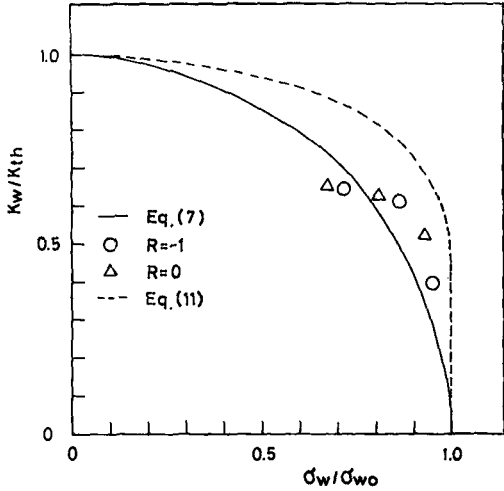


Fig. 3 $K_w/K_{th} - \sigma_w/\sigma_{wo}$ failure evaluation diagram

의 무차원 항을 사용하면, 破壞評價曲線 (failure evaluation line)은 式 (2)와 (3)으로부터 다음 式으로 주어진다.

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{wo}} = \frac{K_{th}/F(a)\sigma_{wo}\sqrt{\pi a}}{1 + (K_{th}/F(a)\sigma_{wo}\sqrt{\pi a})^2} \quad (6)$$

Fig. 3에 K_w/K_{th} 와 σ_w/σ_{wo} 사이의 관계를 表示한 結果를 나타내었다. 破壞評價曲線은 式 (3) 및 (5)에서 다음 式으로 주어진다 (實線).

$$\frac{K_w}{K_{th}} = \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_{wo}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

靜的破壞의 경우, 破壞評價曲線은 Dugdale 모델에 根據해서, 다음 式으로 주어진다.

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{2}{\pi} \cos \left[\exp \left\{ -\frac{\pi^2}{8} \left(\frac{k}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \quad (8)$$

$$\frac{K}{K_{Ic}} = \frac{2}{\sigma_y} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left\{ \sec \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_y} \right) \right\} \right]^{1/2} \quad (9)$$

式 (8)에서 σ/σ_y 를 σ_w/σ_{wo} 로, K/σ_y 를 K_{th}/σ_{wo} 로, 式 (9)에서 K/K_{Ic} 를 K_w/K_{th} 로, σ/σ_y 를 σ_w/σ_{wo} 로 바꾸면, 疲勞破壞의 경우에 다음 式(10)과 (11)이 얻어진다.

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{wo}} = \frac{2}{\pi} \cos \left[\exp \left\{ -\frac{\pi^2}{8} \left(\frac{K_{th}}{\sigma_{wo}} \right) \right\} \right] \quad (10)$$

$$\frac{K_w}{K_{th}} = \frac{\sigma_w}{\sigma_{wo}} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left\{ \sec \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_w}{\sigma_{wo}} \right) \right\} \right]^{-1/2} \quad (11)$$

式 (11)의 結果를 Fig. 3에 나타낸다(破線). 破線의 傾向은 實驗結果 및 實線과 다르다. 卽, 靜的

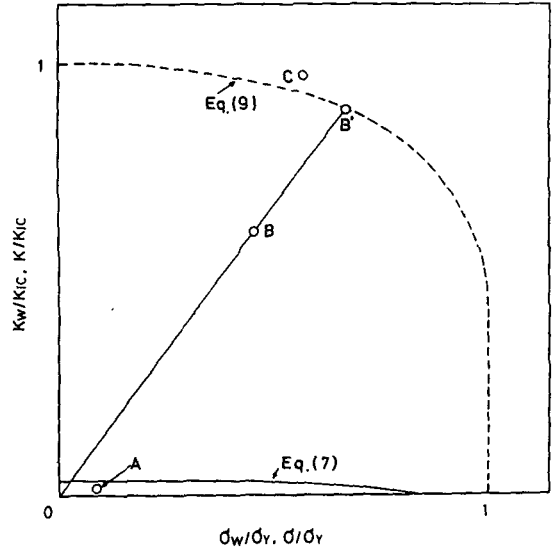


Fig. 4 $K_w/K_{Ic}, K/K_{Ic} - \sigma_w/\sigma_y, \sigma/\sigma_y$ failure evaluation diagram

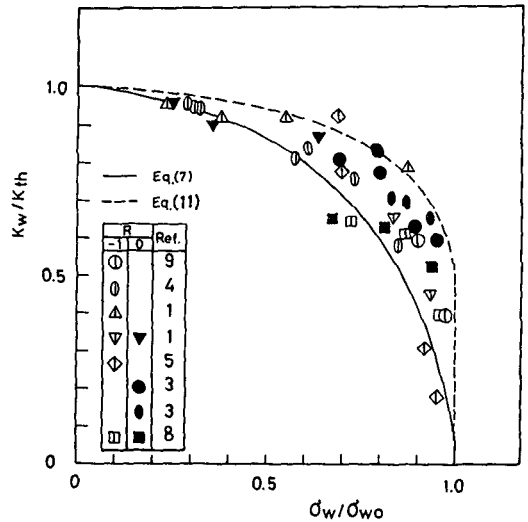


Fig. 5 $K_w/K_{th} - \sigma_w/\sigma_{wo}$ failure evaluation diagram (database)

破壞의 경우에 破壞評價曲線의 特性을 支配하는 因子는 降伏規模 이지만, 疲勞破壞의 경우에 支配因子는 降伏規模는 아니다.

靜的破壞의 경우에 對해서 式 (9)의 破壞評價曲線과, 疲勞破壞의 경우에 對해서 式 (7)의 破壞評價曲線을 합쳐서 Fig. 4의 破壞評價線圖에 나타낸다.

Table 1 Material, test condition of database

Ref.	Steel	Specimen type	Loading condition	Crack type	R	σ_y MPa	σ_B MPa	σ_{wo} MPa	K_{th} MPa \sqrt{m}
(9)	Mild	Plate	Axial	Through	-1	296	437	200	6
(4)	G40.11	Plate	Axial	Through	-1	376		275	16
(1)	SM41	Plate	Axial	Through	-1	251	483	177	7
(1)	SM41	Plate	Axial	Through	-1	251	483	160	7
(1)	SM41	Plate	Axial	Through	0	251	483	300	7
(5)	S20C	Plate	Axial	Through	-1	366	528	235	5
(3)	HT80	Plate	Axial	Surface	0	726	784	549	5
(3)	SM50	Plate	Axial	Surface	0	373	500	378	5
(8)	SPPH42	Bar	Bending	Surface	-0	362	592	307	8
(8)	SPPH42	Bar	Axial	Surface	0	362	592	426	8

R : Stress ratio, σ_y : Yield strength, σ_B : Tensile strength, σ_{wo} : Fatigue limit for plain specimen, K_{th} : Threshold stress intensity factor for large crack.

縱軸은 K/K_{Ic} , K_w/K_{Ic} 橫軸은 σ/σ_y , σ_w/σ_y 로 했다. 따라서, 縱軸은 應力擴大係數 K , K_w 橫軸은 應力 σ , σ_w 의 絕對值로 보는 것이 된다. 또, K_{Ic} , σ_y 로 해서는, 炭素鋼 SPPH 42의 實測值를 使用했으며, K_{Ic} 는 다음 式으로 주어진다.

$$K_{Ic} = \frac{EJ_{Ic}}{1-\nu^2} \tag{12}$$

여기서, E : 縱彈性係數, ν : 프와송 비 (poisson's ratio), J : 炭塑性破壞靱性이다.

Fig. 4의 2種類의 破壞評價線圖가 얻어지면, 以下에 나타내는 順序로서 欠陷評價, 破壞評價를 행할 수가 있다.

(1) 基礎에 對象으로 하고 있는 機器에 대해서 稼動應力 σ 와 欠陷길이 a 에 對한 應力擴大係數 K 를 決定한다.

(2) 破壞評價線圖上에 있어서 A點과 같이 K , σ 가 疲勞破壞의 경우의 破壞評價曲線의 內側에 位置하면, 欠陷으로부터 疲勞龜裂은 進展하지 않는다.

(3) 點 B와 같이 疲勞破壞의 破壞評價曲線의 外側에 位置하면, 疲勞龜裂이 進展한다. 또, 靜的破壞의 破壞評價曲線의 內側에 位置하고 있고 靜的破壞에 對해서 應力으로서 OB'/OB 의 安全여유가 있다.

(4) 點 C와 같이 K , σ 가 靜的破壞의 경우의 破壞評價曲線의 外側에 位置하면 欠陷으로부터 靜的破壞가 생긴다.

以上에서, 2種類의 破壞評價線圖가 얻어지면, 實際의 使用시 대단히 有用하다는 것을 알 수 있다.

3. 데이터베이스의 檢討

疲勞에 對한 데이터베이스를 構築함으로서, 式 (6)의 破壞評價曲線의 타당성이 검정되고 物理的意味의 明確한 破壞評價曲線을 模索할 수 있다. 이것을 만족할 수 있는 데이터로서는 K_w , σ_w , K_{th} , σ_{wo} 가 측정되어 있지 않으면 안된다.

K_w , σ_w 의 實驗結果를 σ_w/K_{th} 와 σ_w/σ_{wo} 의 破壞評價線圖로서 現在까지 얻어지고 있는 데이터베이스^(1,3-5,8,9)를 Fig. 5에 나타낸다. 얻어지고 있는 데이터는 炭素鋼, 저합금강에 한정되어 있다. Table 1에 材料, 實驗조건을 나타낸다. 實驗結果는 Haddad式 (6)이 下限을 Dugdale 모델의 式 (10)이 上限을 나타내고, 많은 데이터는 그 中間에 位置하고 있다. 이것은, 前述한 炭素鋼 SPPH 42의 結果(Fig. 3)와 다르다. 現在로서는 下限에 가깝다고 하는 意味에서 式 (6)이 타당하다고 판단된다. 그러나, 금후는 龜裂의 크기, 材料를 계통적으로 바꾸어서, 시험과 평가를 행할 필요가 있다.

4. 결 론

疲勞에 對한 破壞評價線圖와 데이터 베이스의 構築을 檢討한 結果를 요약하면 다음과 같다.

(1) 微小龜裂材의 疲勞限度와 下限係應力擴大係數의 關係는 2기준법에 의한 破壞評價線圖로서 間便하게 合理的으로 表示된다.

(2) 靜的破壞 및 疲勞의 破壞評價線圖가 얻어지면 欠陷評價와 破壞評價를 행할 수 있다.

(3) 疲勞破壞의 破壞評價曲線으로 해서 Haddad의 式이 타당하고, 이것은 靜的破壞의 破壞評價曲線과 다르다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 1988년도 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었으며, 동 재단 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Usami, S. and Shida, S., 1979, "Elastic-Plastic Analysis of the Fatigue Limit for a Material with Small Flaws", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 1, pp. 471~481.
- (2) Smith, R.A., 1977, "On the Short Crack Limitations of Fracture Mechanics", *International Journal of Fracture*, Vol. 13, No. 5, pp. 717~720.
- (3) Kitagawa, H. and Takahsi, S., 1979, "Fracture Mechanical Approach to Very Small Fatigue Crack Growth and to the Threshold", *Fransactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 45, No. 399, pp. 1289~1303.
- (4) El Haddad, M. H., Topper, T.H. and Smith, K.N., 1979, "Prediction of Non-Propagating Cracks", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, No. 3, pp. 537~584.
- (5) Tanaka, K., nakai, Y., and Yamashita, M., 1981, "Fatigue Growth Threshold of Small Cracks", *International Journal of Frature*, Vol. 17, No. 5, pp. 519~533.
- (6) Chell. G.G., 1979, "A Procedure for Incorporating Thermal and Residual Stressess Into the Concept of a Failure Assessment Diagram", *CEGB Report, RD/L/R 2007*.
- (7) Harrison, R.P., Loosamore, K., Milne, I., and Dowling, A.R., 1980, "Assesemnt of the Integrity of Structure Containing Defects", *CEGB Report, R/H/R6-Rev 2*.
- (8)李宗炯, 1988, "微小疲勞균열의 檢出과 停留균열", *大韓機械學會 春季學術大會 초록집*, pp. 503~505.
- (9) Forst, N.E., 1963, "Alternating Stress Required to Propagate Edge Cracks in Copper and Nickel-Chromium Alloy Steel Plates", *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 15~22.