

反復荷重을 받는 構造用材料의 破斷前漏洩 (LBB)條件에 관한 研究

南 起祐 · 安藤 柱*

釜山水產大學校 · *日本 橫濱國立大學

(1990년 11월 20일 접수)

Study on the LBB Conditions of Structure Material under Cyclic Load

Ki Woo NAM and Kotoji ANDO*

National Fisheries University of Pusan, *Yokohama National University

(Received November 20, 1990)

The high stress, low cycle fatigue test were carried out on HT80 plates with artificial part-through notch. The LBB conditions by the net section stress approach was examined in detail. Finite element methods for the state of deformation were also applied and the results were compared with the results from experiments. From the test results, it was noted that the LBB condition in fatigue test was dependent upon the maximum load change before and after the crack penetration. The LBB criterion by the net section stress approach were slightly dependent on initial crack size. It was shown that the state of deformation can be used to predict whether the component is likely to show LBB condition or they will be broken rapidly.

緒 論

오늘날 液化가스 運搬船¹⁾, 原子力發電 Plant²⁾ 및 超高壓化學 Plant³⁾ 등의 安全設計에 있어서 LBB(Leak Before Break)의 確保는 極히 重要한 要素中의 하나가 되고 있다. LBB 設計法이라는 것은, 만일의 경우에 있어서도, 不安定破壞에 앞서서 內容物의 漏洩이 일어날 것을 保證하는 것이고, 一種의 Fail safe 設計라고 말할 수 있다.

이와같은 LBB 設計法에 關連하여, 表面 龜裂이 成長하여 板厚를 貫通하고, 또한 貫通 後 즉시 脆性破壞나 不安定破壞가 일어나지 않는 것이 保證된다면, 漏洩檢出器에 의해서 漏洩을 檢知하고, 內壓을 내리는 등의 處置에 의해서 龜裂 傳播를 抑制한다든지 流路를 遮斷하는 등의 對策이 취하여 지게 될 것이다. 따라서 LBB가 確保

된다면 重大事故로 發展할 危險性은 大幅 輕減 될 것이라고 생각된다.

이상과 같은 觀點에서 先進諸國^{4)~7)}에서는 LBB舉動에 關한 研究가 활발히 行하여지고 있다. 그러나 이들 研究의 대부분은 單調負荷에 의한 것이고, 反復荷重下^{11)~15)}에 있어서 LBB에 대한 研究例는 아직 그 숫자가 적은 것이 現狀이다.

본 研究에서는 LBB舉動의 基礎研究로서 表面 노치를 가공 한 비교적 大型의 平板試驗片을 사용하여 反復引張荷重에 의한 疲勞龜裂의 成長, 貫通에서 破斷에 이르는 過程을 觀察하고 實斷面 應力基準¹⁸⁾에 의한 LBB成立範圍를 調査했다. 또 貫通前後의 뒷면의 變形 모습을 考察하고, 有限 要素解析을 行하여 實驗結果와 比較檢討를 해보았다.

試驗片과 實驗方法

試驗片은 두께31mm의 高張力鋼 HT80平板이고, 그의 化學成分과 機械的 性質을 각각 Table 1과 Table 2에 나타낸다. 試驗片 形狀은 Fig. 1과 같이 길이 800mm, 板幅 2W=200mm, 판두께 t=12mm의 大型試驗片이다. 試驗片에는 기계가공에 의해 表面中央 노치로 하였다. 노치의 幅은 約 2mm, 노치先端의 角度는 60°, 先端半徑은 約 R=0.1mm이다. 試驗片的 노치치수, 試驗條件을 Table 3에 나타낸다. 試驗은 200ton의 橫型電氣油壓式 試驗機를 사용해서 靜的引張試驗과 疲勞試驗을 實溫 大氣中에서 實施하였다. 疲勞試驗 時的 制御는 正弦波를 使用하여 周波數

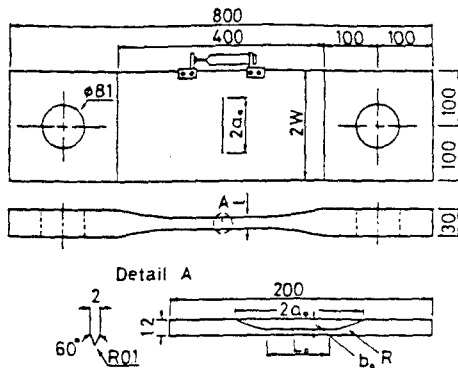


Fig.1. Dimension of specimen.

Table 1. Chemical composition of tested material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	V
	×100		×1000		×100			
12	26	96	8	3	20	64	34	4

Table 2. Mechanical properties of tested material

Yield stress σ_y (MPa)	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation δ (%)
814	863	33

0.04~0.07Hz, 應力比 R=0.1의 荷重制御로 하였다. 試驗片的 初期龜裂이 뒷면에 接近할 때, 뒷면 龜裂周邊 變形은 Laser光線을 사용한 非接觸 表面變形量 計測裝置에 의해, 뒷면에 있어서 初期龜裂의 長이를 中心으로 引張方向으로 40mm 板幅方向으로 最大 180mm의 範圍를 測定하였다. 試驗片에는 電位差型 變位計를 설치하여 試驗片的 균열을 중심으로 120mm 사이의 變位를 計測하였다. 또 貫通前後의 舉動은 目視 및 寫眞攝影으로서 行하였다.

實驗結果 및 考察

1. LBB狀態의 定義

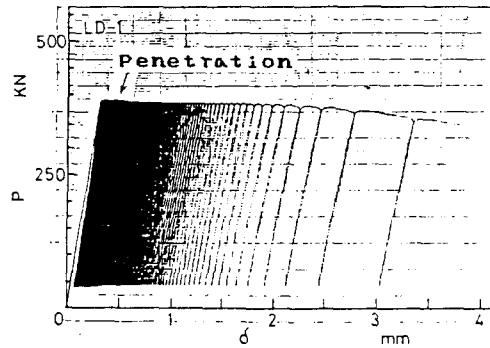
反復荷重下에서 LBB狀態를 나타내는 경우의

Table 3. Geometries and test results

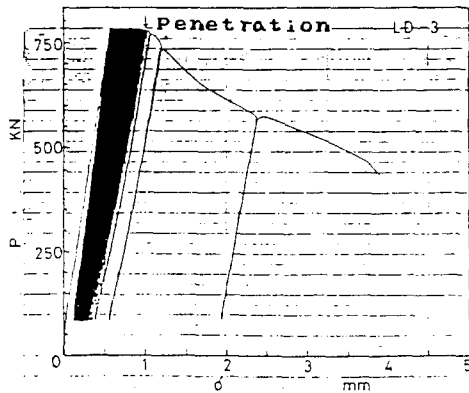
Specimen No.	Crack Geometry				t (mm)	Load		N _F (cycle)	N _F (cycle)	LBB	Load Type
	2a _o (mm)	b _o (mm)	L _o (mm)	R (mm)		P _{max} (kN)	P _{min} (kN)				
LA-1	60	6	20	34.5	12	1804	-	-	-	x	S
LA-2	"	"	"	"	"	1275	127	1700	2557	o	F
LA-3	"	"	"	"	"	1569	157	913	913	x	F
LB-1	100	8	53	37.5	"	1520	-	-	-	x	S
LB-2	"	"	"	"	"	1177	118	-	350	x	F
LB-3	"	"	"	"	"	981	98	1390	1416	o	F
LC-1	120	"	73	"	"	1373	-	-	-	x	S
LC-2	"	"	"	"	"	981	98	-	200	x	F
LD-1	160	"	100	62.5	"	392	39	2558	3784	o	F
LD-2	"	"	"	"	"	588	59	1170	1332	o	F
LD-3	"	"	"	"	"	785	78	584	584	x	F

S: Static test, F: Fatigue test

荷重-變位曲線の 代表例를 Fig. 2(a)에 나타낸다. 이것은 作用荷重이 가장 낮은 LD-1에서 얻어진 것이다. 이로부터 貫通時의 最大變位는 0.4mm 정도이고, 負荷開始부터 貫通까지 試驗片의 引張方向 變形은 比較的적다. 그리고 引張方向 變形이 1mm까지는 LBB狀態가 相當한 cycle수에 걸쳐서 持續되고 있는 것을 알 수 있다. 이것을 지나면 變形은 急速히 일어나고, 數cycle後에는 破斷하지만, 破斷直前까지 荷重의 落下는 極히 적다. 한편 Fig. 2(b)는 龜裂의 貫通과 同時에 破斷이 일어난 代表例(LD-3)이다. 이것은 貫通 時의 最大變位는 1mm로서 前者의 2.5倍이고, 貫通後 3cycle에서 破斷했다. 貫通後의 荷重落下는 極히 크고 不安定的으로 破壞가 進行하고 있는 것으로 생각되어 진다.



(a) LBB

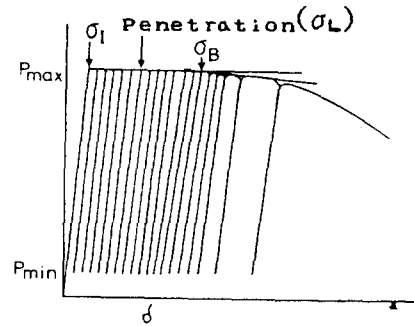


(b) NO LBB

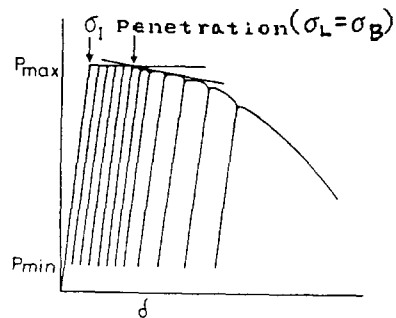
Fig. 2. Examples of load-displacement curves.

위에서와 같이 實驗에서 얻어진 荷重-變位線圖로부터 疲勞試驗에서의 LBB 및 NO LBB 定義를 Fig. 3에 나타내는 模式圖와 같이 定하였다. (a)는 LBB가 成立한 경우로서 疲勞負荷를 開始한後, 龜裂이 進展하여 貫通하여도 荷重의 低下가 생기지 않는 狀態를 LBB라 判定했다. 이것에 대하여 (b)와 같이 貫通까지는 一定한 荷重이 유지되고, 貫通과 同時에 荷重이 急速히 落下해서 破斷에 이르는 경우를 NO LBB라고 判定했다.

한편 單調負荷의 LBB 判定條件은 Heald等에 의해 Fig. 4와 같이 나타내고 있다. 즉 貫通 時의 荷重보다도 破斷 時의 荷重이 높으면 LBB가 成立, 낮으면 成立하지 않는 것이라고 하고 있다. 以上과 같은 LBB 判定條件의 定義에 따라 試驗의 結果를 정리해서 Table 3에 같이 나타내고 있다. 여기서 P_{max} 는 疲勞試驗 時의 荷重最大値

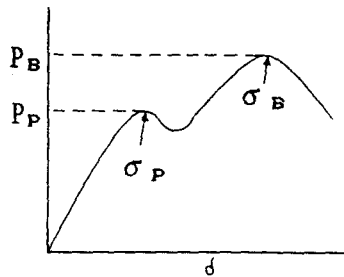


(a) LBB

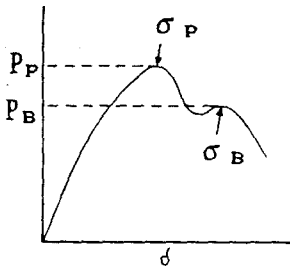


(b) NO LBB

Fig. 3. Schematic illustrations of load-displacement curves for LBB and NO LBB conditions (Fatigue).



(a) LBB



(b) NO LBB

Fig. 4. Schematic illustrations of load-displacement curves for LBB and NO LBB conditions (Static).

또는 靜的引張試驗에서 最大荷重, N_L 는 龜裂이 관두계를 貫通한 時의 荷重反復數, N_F 는 最終破壤때의 荷重反復數이다. 그리고 LBB의 0표는 LBB가 成立한 경우를, ×표는 NO LBB인 경우를 나타낸다.

2. 實斷面應力에 의한 LBB條件의 評價

實驗에서 얻어진 靜的引張 및 疲勞試驗에서의 最大荷重(P_{max})와 龜裂길이의 板幅에 대한 比와의 關係를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5중에서 ●표는 靜的引張試驗에 의한 崩壞荷重이고, ○표는 疲勞시험에 의한 龜裂貫通과 同時에 試驗片의 破斷이 생긴 경우, ●표는 LBB 狀態를 表示한 試驗結果이다. Fig. 5로부터, LBB 狀態가 成立하는 荷重은 $a/W=0.5$ 에서 靜的引張 時의 崩壞荷重에 比較해서 約 65% 程度 低下해 왔다. 또 $a/W=0.3\sim 0.6$ 의 範圍에서는 거의 直線의 所以 LBB 成立荷重이 減少하고 있다. 그러나 $a/W=0.8$ 에서는 直線에서 약간 벗어나 높은 荷重을 나타내고 있다. 이것은 初期 龜裂길이 a 의 增大에 비해

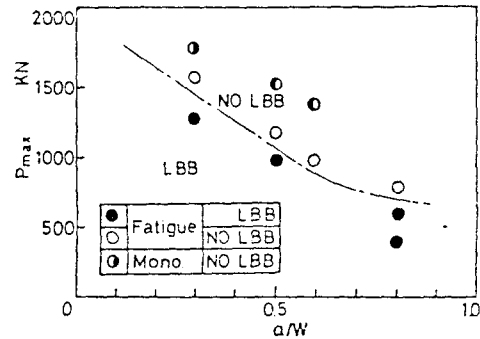


Fig. 5. Dependence of P_{max} on a/W .

實斷面積의 감소비율이 작기때문이라고 생각되어진다.

Fig. 6에는 荷重과 實斷面積의 關係로부터 LBB 狀態의 成立範圍를 나타낸다. 여기서 A_{net} 는 試驗片의 原斷面積으로 부터 初期龜裂面積을 뺀 正味斷面積, A 는 公稱斷面積이다. Fig. 6 中の 實線은 靜的引張試驗에서의 理論的인 崩壞荷重 ($\alpha \times A_{net}$)과 A_{net}/A 의 關係를 나타내고 있다. 여기서 α 는 引張強度이다. 이 경우 理論과 實驗 (●)은 좋은 一致를 보이고 있다. 한편 疲勞荷重에 의해서, LBB 狀態로 되는 限界荷重은 實線의 下側에 圓弧狀으로 되고, 材料의 靱성에 따라서 LBB 領域이 變化하는 것이라고 생각된다. 즉, 靱성이 높으면, LBB-NO LBB의 境界線은 實線에 接近해 간다.

Fig. 7에는 實斷面應力에 의한 σ_{net}/α 와 A_{net}/A 와 LBB 成立範圍를 나타낸다. 이것에 의하면 LBB가 成立하기 위한 實斷面應力 σ_{net} 는 노치

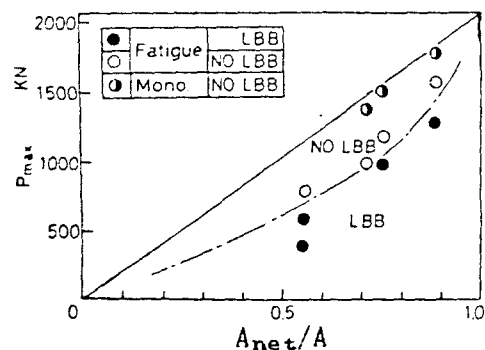


Fig. 6. Dependence of P_{max} on A_{net}/A .

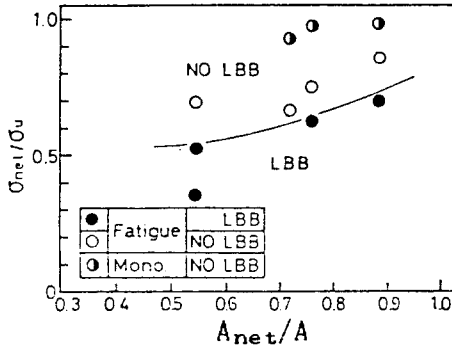
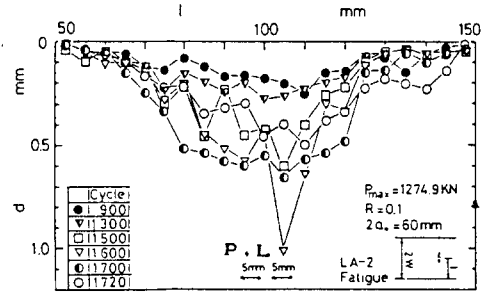


Fig. 7. σ_{net}/σ versus A_{net}/A based on net section stress criterion.

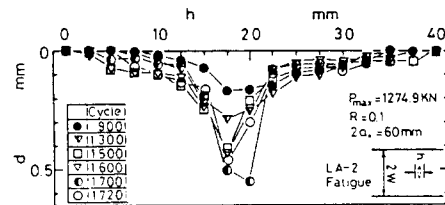
形狀에 약간 依存하고, 노치形狀이 크게 될수록 應力이 낮게되는 것을 알 수 있다. 즉 노치가 크게 될수록 LBB 成立을 위한 負荷範圍의 減少比率은 크게되지만, $A_{net}/A=0.55\sim 0.9$ 의 範圍에서 σ_{net}/σ 의 範圍은 0.54~0.7 程度이고 노치치수의 影響은 그렇게 큰 것은 아니라고 생각되어진다.

3. 貫通前後의 龜裂周邊 變形狀態

Fig. 8(a)는 가장짧은 노치($2a=60mm$)가 가공된 試驗片에서 LBB狀態를 나타낸 경우, 뒷면에서의 變形量分布 狀態를 나타내고 있다. 가장 깊은 變形은 貫通直前(1700cycle)에서 測定되고, 板幅의 中央部($l=80\sim 120mm$)에서 40mm의 길이에 걸쳐서 0.6mm 程度の 깊이를 나타냈다. 그러나 變形은 貫通(1720cycle)과 同時に 急速히 낮아지고, 貫通直前の 2/3~1/2 程度の 깊이로 감소한다. 이것은 貫通에 의해 龜裂先端의 應力이 급속히 緩和된 것을 나타내고 있다. 이때 板幅中央의 두곳(圖中 Penetration Length=P.L.)에 길이 5mm인 두개의 貫通龜裂이 나타나 있다. Fig. 8(b)는 같은 試驗片의 뒷면 中央部($l=100mm$)에 있어서, 引張方向40mm의 範圍에서 測定한 變形結果이다. 最深部는 cycle 數의 增加와 함께 깊게되고, 貫通直前に 가장 깊다. 그리고 貫通한 순간 깊이가 감소하고 있다. 한편, 周邊部에서는 詳細히 보면, 貫通(1720 cycle)하기 상당한 이전에 가장깊고 貫通直前에는 약간 깊이가 낮아져 있다. 이와같은 경향은 노치길이 가장 긴 LD試驗片에서도 거의 같은 舉動을



(a) Parallel to the crack line



(b) Vertical to the crack line

Fig. 8. Deformations at a back surface.

나타내었다.

LA試驗片의 板幅中央部에 있어서 變形量과 反復數와의 關係를 Fig. 9에 나타낸다. 또 比較하기 위하여 單調負荷에서의 變形도 함께 나타낸다. 이것에 의하면 反復數가 크게 됨에 따라 變形도 깊게 되는 것을 알 수 있다. 그림에서 ■표는 作用荷重이 낮은 LA-2($P_{max}=1275kN$)試驗片으로서, 反復數가 約 750cycle까지는 거의 같은 程度의 變形을 나타내고, 그 後는 서서히 變形이 깊게 되어 貫通直前に 急激히 變形이 크게 되어 0.5mm 程度の 깊이를 나타낸다. 그리고 貫通後 깊이가 낮게 되고 있는 것을 알 수 있다. 이 試驗片은 LBB 狀態가 成立하였다. 한편 作用荷重이 높은 LA-3의 경우는 疲勞負荷 初期段階부터 變形이 0.5mm程度로서 깊고, 그 後 變形은 더욱 깊게 되어 約 0.95mm 程度를 나타낸 後, 약간 낮게 되어 貫通直後 破斷하였다. 이 試驗片은 NO LBB狀態였다.

한편 單調負荷에서의 變形은 作用荷重이 $P_{max}=1667kN$ 의 경우에 있어서도 約 0.16mm程度로서 疲勞負荷에 比較해서 대단히 작은 變形을 나타내고 있다. 이와같이 일반적으로 疲勞負荷에 의한 경우가 單調負荷의 경우보다도 龜裂뒷면의 變形은 크게 나타나고, 目視에 의해서도 龜裂의

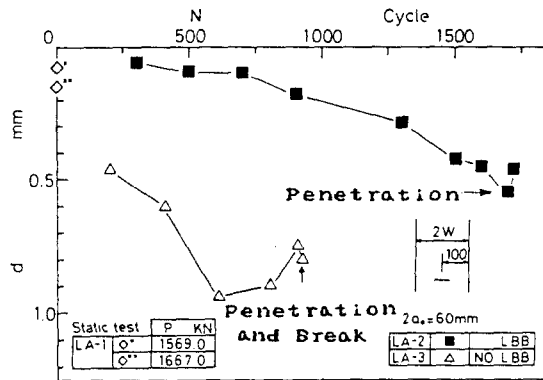


Fig.9. Change of deformations on load cycles.

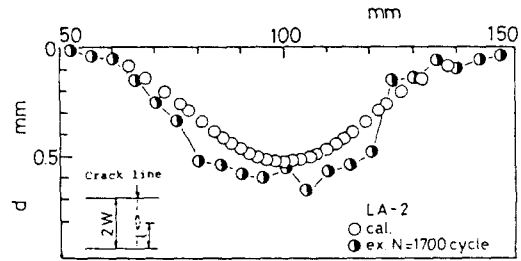
存在가 쉽게 確認 될 수 있다. 이것은 疲勞의 경우가 單調負荷보다, 破壞하기까지 龜裂이 깊이방 向으로 周邊의 變形을 수반하여 進展하는 것이 原因이라고 생각되어진다.

4. 有限要素解析과의 比較

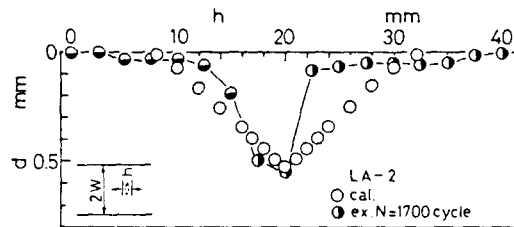
龜裂의 進展에 의한 貫通 直前의 뒷면에서의 變形모습을 알아보기 위하여 有限要素解析을 시도해 보았다. 計算의 範圍는 引張方向12mm, 板幅方向으로 最大 80mm이다. 計算은 龜裂이 進展해서, Ligament두께가 1mm 남아 있는 것으로서 最大反復荷重 P_{max} 까지 荷重을 負荷하는 彈塑性解析을 行하였다. 要素數는 最大 864, 節點數는 最大 1176이다.

變形解析의 結果를 Laser 光線에 의한 變形計測結果와 比較해서 Fig. 10에 나타낸다. (a)는 板幅方向의 變形이다. 解析値는 實驗과 같은 정도로 板幅中央部에서 0.5mm 정도의 變形을 나타내고, 周邊部에서는 매끈한 變形을 보이고 있다. (b)는 引張方向의 變形이다. 最深部에서의 變形은 實驗과 좋은 일치를 보이지만, 周邊部에서는 直線的인 變化을 나타내고, 實驗値가 銳角의인 變形을 보이는 것과는 약간 다르다. 이것은 解析에서는 P_{max} 까지 單調引張荷重을 받기 때문에, 反復荷重의 效果가 考慮되어 있지 아니하기 때문이라 생각된다.

위에서 說明한 것과 같이 表面變形量 計測裝置에 의해, 龜裂 뒷면 周邊部에 대하여 變形量을 X-Y Recorder에 기록하고, 그 結果를 圖形으로



(a)Parallel to the crack line



(b)Vertical to the crack line

Fig.10. Comparison of experiment and analysis.

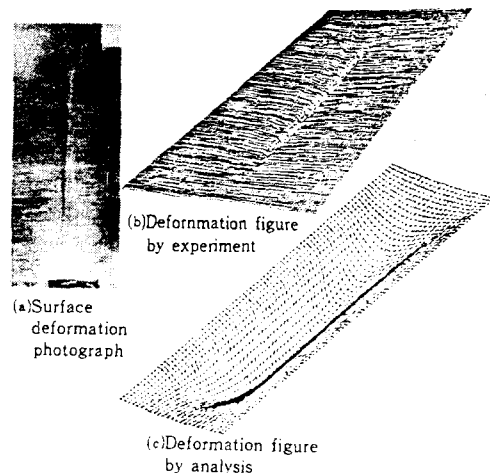


Fig.11. Surface deformation figures by experiment and analysis.

出力시켰다. 그 一例를 Fig. 11에 나타낸다. (a)는 LD-3試驗片이 400cycle의 負荷를 받았을 때의 變形寫眞이다. (b)는 이 때의 變形圖이다. 出力圖形의 範圍는 引張方向 40mm, 板幅方向 180

mm이다. 깊이 方向의 變形量은 10倍로 擴大시켰다. 이 그림에 의하면 初期龜裂이 길게 됨에 따라서 變形도 길고, 깊게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 (c)는 計算에서 얻어진 變形圖(引張方向 24mm, 板幅方向 160mm)를 나타내고 있다. 이 경우도 最深部 變形은 거의 일치하지만, 變形의 幅에는 差가 나타나 있다.

結 論

高張力鋼 HT80을 사용하여 反復引張荷重을 받는 表面龜裂材의 LBB條件을 檢討한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 疲勞에서의 LBB 成立條件이 貫通前後의 荷重-變位曲線의 變化에 의해 定義되었다.
2. 實斷面應力 σ_{net} 와 正味斷面積 A_{net} 를 사용하여 얻은 LBB狀態의 成立範圍는 노치치수에 어느 程度 依存하는 것을 알았다.
3. 뒷면의 變形은 疲勞龜裂에 의한 경우가 靜的引張보다 크게 나타나는 것을 알았다. 그리고 變形量은 貫通直前이 가장 크고, 貫通과 同時에 減少하였다.
4. 有限要素法으로서 解析한 表面變形狀態는 全體的으로 實驗結果와 좋은 一致를 보였다.

參考文獻

1) IMCO(現 IMO) (1975): Reseolution A328(IX).

2) 矢川 外2名U1981): 原子力工業, 30-11, 36.
 3) 高橋 外2名(1981): 壓力技術, 19-1, 22.
 4) Bartholome, G., et al,(1986): 第3回日獨原子力工學 Seminar, 69.
 5) Wilkowski, G.M., et al, (1985 - 1986): NUREG/CR-4082, BMI-2120, Vol. 1-4.
 6) Garcia, J.L., et al, (1985): 8th Inter. Confer. on SMIRT, Aug.
 7) Milella, P.P., (1985): ENEA-DISP, 1.
 8) Miline, I., et al. (1986): CEGB Report, R/H/R6-Rev. 3.
 9) Hasegawa, K., et al, (1984): PVP. Vol. 95, 65.
 10) Shibata, K., et al (1986): Nucl. Engin. and Design. 94, 221.
 11) 矢川 外3名(1984): 日機論, 50-541A, 482.
 12) 安藤 外4名(1986): 日機論, 52-483A, 2463.
 13) 南 外4名(1987): 日機論, 53-487A, 444.
 14) Ando, K., et al.(1987): JSME Inter, J., Vol. 30-270, 1988.
 15) Nam, K.W., et al. (1988): JSME Inter. J., Vol. 31-2, 272.
 16) 金子 外4名(1985): JAERI-M, 85-064.
 17) 安田 外6名(1986): JAERI-M, 86-098.
 18) Kanninen, M.F., et al. (1976): EPRI NP-192.